

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОУ ВПО «СИБИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ»

ГЕО-СИБИРЬ-2007

Т. 3

**ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ И
ФОТОГРАММЕТРИЯ, МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ
СРЕДЫ, ГЕОЭКОЛОГИЯ**

Сборник материалов
III Международного научного конгресса

Новосибирск
СГГА
2007

УДК 502:528.7
С 26

Ответственные за выпуск:

координаторы направления «Дистанционные методы зондирования Земли и
фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология»

Доктор технических наук, профессор, проректор по НР СГГА
А.П. Гук

Доктор технических наук, профессор, проректор по УМР МИИГАиК
И.Г. Журкин

Доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, директор
ИВМиМГ СО РАН
Б.Г. Михайленко

С 26 ГЕО-Сибирь-2007. Т. 3. Дистанционные методы зондирования Земли и
фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология: сб. матер. III
Междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2007», 25–27 апреля 2007 г.,
Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2007. – 368 с.

ISBN 978-5-87693-229-7

ISBN 978-5-87693-233-4 (т. 3)

В сборнике опубликованы материалы III Международного научного
конгресса «ГЕО-Сибирь-2007» направления «Дистанционные методы
зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды,
геоэкология».

Печатается по решению Редакционно-издательского совета СГГА

Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 502:528.7

ISBN 978-5-87693-229-7
ISBN 978-5-87693-233-4 (т. 3)

© ГОУ ВПО «Сибирская государственная
геодезическая академия», 2007

LATEST ACHIEVEMENTS IN AIRBORNE SURVEYING TECHNOLOGY AND NEW APPLICATIONS BY LEICA GEOSYSTEMS AG

Leica Geosystems – when it has to be right

With close to 200 years of pioneering solutions to measure the world, Leica Geosystems products and services are trusted by professionals worldwide to help them capture, analyze, and present spatial information. Leica Geosystems is best known for its broad array of products that capture accurately, model quickly, analyze easily, and visualize and present spatial information.

Those who use Leica Geosystems products every day trust them for their dependability, the value they deliver, and the superior customer support. Based in Heerbrugg, Switzerland, Leica Geosystems is a global company with tens of thousands of customers supported by more than 2,400 employees in 22 countries and hundreds of partners located in more than 120 countries around the world. Leica Geosystems is part of the Hexagon Group, Sweden.

Leica Geosystems Introduces the Leica ADS40 2nd Generation Airborne Digital Sensor.

(Heerbrugg, 5 October 2006) Leica Geosystems announces the introduction of its Leica ADS40 2nd Generation Airborne Digital Sensor. In 2001, the company was first to introduce large-format digital cameras with its Leica ADS40. With more than 50 Airborne Digital Sensors already delivered worldwide, Leica Geosystems has now developed two new sensor heads - SH51 and SH52 - for this successful system.

Equipped with new, patented beamsplitter technology, the SH51 Sensor Head provides perfectly co-registered color and panchromatic images for stereo viewing. The SH52 adds a stereo color-infrared capability. Professionals can now produce and use the 5-band co-registered imagery for all aerial surveying and airborne remote sensing applications. Time and costs are saved through simultaneous, wide-area acquisition of true high-resolution panchromatic, color and color-infrared digital images.

Ultimate Goal of Uncompromising Data Capture

The guiding single-lens design principle for the Leica ADS40 2nd Generation avoids multiple-lens image patching. Pan-colorizing (pan-sharpening) with low resolution spectral band images, that causes color distortion, is not required for the Leica ADS40 2nd Generation. Plus, optimal stereo viewing is achieved color fringe-free, due to the constant stereo and viewing angle. Thus, the Leica ADS40 2nd Generation has reached the ultimate goal of uncompromising geometric and radiometric representation of the earth's surface.

LEADING-EDGE IMAGERY WITH LEICA GEOSYSTEMS CAMERAS AND SENSORS

Dr. Juergen Dold, Senior Vice President of Leica Geosystems' Imaging and Scanning Business Area states: "Since 1925, our cameras and sensors have set the in-

dustry standard for airborne imaging technology. The Leica ADS40 2nd Generation sensor heads continue this tradition by producing leading-edge imagery with equal resolution in all five bands. The SH52 Sensor Head has just completed pilot projects for forestry and urban applications. Its co-registered bands gave remarkable results for remote sensing needs such as forestry, while the 4-times increased sensitivity allows extended coverage and capability for large scale urban mapping. Ultimately, the lead of the 3-line sensor principle over all other large-format digital camera concepts is further increased.”

The Leica ADS40 2nd Generation is designed for versatility by providing performance, cost and exportability options. Additionally, Leica Geosystems continues to enhance its first-class global customer support network. “Those factors help make ADS40 2nd Generation Airborne Digital Sensors the first choice worldwide for airborne imagery collection”, says Dr. Dold.



Picture 1 – The Leica ADS40 2nd Generation is designed for versatility by providing performance, cost and exportability options.

LEICA GEOSYSTEMS ANNOUNCES SIGNIFICANT ADVANCEMENT IN RANGE MEASUREMENT TECHNOLOGY

(Heerbrugg, 5 October 2006) Leica Geosystems announces the successful development of an advanced laser distance measurement technology. It allows measurements to be made at significantly higher rates than conventional time-of-flight distance measurement systems. Unlike current time-of-flight systems, Leica Geosystems' new "Multiple Pulses in Air" (MPiA) Technology does not depend on receiving the target reflection before starting the next distance measurement cycle. The result is the ability to double or even triple the rate at which distance data can be obtained today, without sacrificing data accuracy.

According to Dr. Juergen Dold, Senior Vice President of Leica Geosystems' Imaging and Scanning Business Area, "This technology has the potential of radically in-

creasing the productivity of airborne and ground-based data acquisition systems. In a first step, we expect to offer our airborne LIDAR customers an upgrade path from our current industry-leading 150 kHz data acquisition rate to even higher rates. This will enable our customers to fly a significantly wider swath at the same point densities as today, or acquire significantly increased point densities with the same swaths as today. Either option ultimately leads to significant cost savings through dramatically reduced flight costs.”

Worldwide patent applications covering Leica Geosystems’ MPiA technology are pending. The technology has been successfully tested in real-world applications, and is now ready for incorporation into product lines. “These are the kinds of changes that the market expects from a technology leader such as Leica Geosystems, and we look forward to applying this new development”, says Dr. Dold.



Picture 2 – 150 kHz LIDAR image of water treatment plant at 1250 meters demonstrates MPiA technology

Examples for new applications with Leica Geosystems’ Airborne Sensors

Development of forestry application based on ADS40 multispectral images
Leica recently made the first successful steps in emulating different false color (infrared) film emulsions widely used in forestry for taxation and other tasks. These images allow working on monitors using images as in the familiar technology but plot in digital form and use the full stereoscopic support. Based on future practical experiences a partly automatic or computer supported work will be made possible.

Special configuration of ALS50-II LIDAR scanner for corridor mapping – ALS50-CM. The ALS50-CM version is based on ALS50-II adapted to special requirements of corridor mapping like low flying height above ground level, high precision of captured data, small laser divergence, large field of view etc. As a result of limited, corridor oriented applicability; the Corridor Mapping (CM) version of ALS50 has a lower price level.

© Peter Schreiber, 2007

УДК 528.7

В.Н. Адров, Ю.И. Карионов, П.С. Титаров, А.Д. Чекурин
ООО «Ракурс», Москва

ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИХ ДАННЫХ CARTOSAT-1 В СИСТЕМЕ PHOTOMOD В РАМКАХ ПРОГРАММЫ ISPRS/ISRO C- SAP

В докладе представлены результаты исследования возможностей фотограмметрической обработки стереопар (продукта Stereo Orthokit), получаемых индийским спутником Cartosat-1.

Исследование было выполнено в рамках участия в научной программе изучения данных Cartosat-1 (Cartosat-1 Scientific Assessment Programme, C-SAP), проводимой ISPRS и индийским космическим агентством ISRO.

На данных, предоставленных в рамках программы C-SAP, при использовании RPC модели, уточненной по четырем опорным точкам, удалось достичь субпиксельной точности по контрольным точкам (32 точки, равномерно распределенные по полю перекрытия снимков). Среднеквадратическая ошибка цифровой модели рельефа (ЦМР), построенной по стереопаре, составила 3 м. Проверка производилась путем сравнения с эталонной ЦМР, также предоставленной в рамках C-SAP.

Построенное ортоизображение удовлетворяет требованиям к геометрической точности, предъявляемым к картам масштаба 1: 10 000.

Приведенные выводы согласуются с результатами, полученными при выполнении компанией «Ракурс» тестового проекта по собственному набору тестовых данных.

Все фотограмметрические работы по обработке стереопар Cartosat-1 выполнялись в цифровой фотограмметрической системе PHOTOMOD.

© В.Н. Адров, Ю.И. Карионов, П.С. Титаров, А.Д. Чекурин, 2007

УДК 528.852

А.А. Бучнев, В.П. Пяткин
СГГА, Новосибирск

КОНТРОЛИРУЕМАЯ И НЕКОНТРОЛИРУЕМАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Эффективность дистанционных исследований Земли из космоса во многом определяется используемыми методами тематической обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ). При этом центральным при тематической обработке, безусловно, является модуль распознавания [1].

В данной работе представлены алгоритмы контролируемой и неконтролируемой классификации многоспектральных ДДЗЗ, включенные в модуль распознавания программного комплекса обработки ДДЗЗ, разработанного в ИВМиМГ СО РАН совместно с НИЦ “Планета” Роскомгидромета РФ [2].

1. КОНТРОЛИРУЕМАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ ДДЗЗ

Система *контролируемой классификации (классификации с обучением)* ДДЗЗ в программном комплексе состоит из семи классификаторов (один поэлементный классификатор и шесть объектных), основанных на использовании байесовской стратегии максимального правдоподобия, и двух объектных классификаторов, основанных на минимуме расстояния [3].

1.1. Поэлементная классификация.

Под элементом здесь понимается N -мерный вектор измерений (признаков) $x = (x_1, \dots, x_N)^T$, где N – число спектральных диапазонов. Предполагается, что векторы x имеют в классе ω_i нормальное распределение $N(m_i, B_i)$ со средним m_i и ковариационной матрицей B_i . В этом случае байесовская стратегия максимального правдоподобия для поэлементного классификатора формулируется следующим образом.

Пусть $\Omega = (\omega_1, \dots, \omega_m)$ – конечное множество классов; $p(\omega_i)$ – априорная вероятность класса ω_i . Тогда дискриминантная функция класса ω_i имеет вид:

$$g_i(x) = \ln(p(\omega_i)) - 0.5 \ln(|B_i|) - 0.5(x - m_i)^T B_i^{-1}(x - m_i). \quad (1)$$

Классическое решающее правило для классификатора принимает следующий вид: вектор x заносится в класс ω_i , если $g_i(x) > g_j(x)$ для всех $j \neq i$.

Для проверки гипотезы о нормальности обозначим через T_i основанное на распределении χ^2 пороговое значение для векторов класса ω_i :

$$T_i = \ln p(\omega_i) - 0.5A(N, \Omega) - 0.5 \ln |B_i|, \quad (2)$$

где $A(N, Q)$ – критическое значение уровня Q распределения χ^2 . Пусть t_i – переменная, значение которой зависит от параметра классификатора thr :

$$t_i = \begin{cases} -\infty, & \text{если } thr = 1, \\ T_i, & \text{если } thr = 2, \\ \min_{i=1}^m T_i, & \text{если } thr = 3, \\ \max_{i=1}^m T_i, & \text{если } thr = 4, \\ (\sum_{i=1}^m T_i) / m, & \text{если } thr = 5. \end{cases} \quad (3)$$

Тогда решающее правило для классификатора с учетом (3) принимает следующий вид [1]: вектор x заносится в класс ω_i , если $g_i(x) > g_j(x)$ для всех $j \neq i$ и $g_i(x) > t_i$. В противном случае вектор заносится в класс отклоненных векторов (класс с номером $m + 1$).

Значения $A(p, Q)$ для размерности вектора $p \leq 30$ находятся из статистических таблиц. Например, для $p=4$ и уровня $Q=0.05$ (т.е. 5% векторов может быть отклонено) $A=9.488$. При $p > 30$ для нахождения значений $A(p, Q)$ используется аппроксимация:

$$\chi^2_{1-Q}(p) \approx p \left(1 - \frac{2}{9p} + u_{1-Q} \sqrt{\frac{2}{9p}} \right)^3, \quad (4)$$

где u_{1-Q} – значение стандартизованной нормальной величины для вероятности $1-Q$ (в частности, для уровня $Q=0.05$ значение $u_{0.95} \approx 1.645$).

1.2. Объектная классификация.

Под объектом мы понимаем блок смежных векторов квадратной или крестообразной формы с длиной образующей F . Поскольку физические размеры реально сканируемых пространственных объектов, как правило, больше разрешения съемочных систем, между векторами данных существуют взаимосвязи. Использование информации подобного рода дает возможность повысить точность классификации, если пытаться распознавать одновременно группу смежных векторов – объект в приведенном выше смысле. Решение об отнесении центрального элемента объекта к тому или иному классу принимается на основе результата классификации всего объекта.

Покажем размещение векторов в объектах для $F=3$:

$$X = \begin{pmatrix} & x_5 & \\ x_4 & x_1 & x_2 \\ & x_3 & \end{pmatrix} \text{ - для перекрестия, } X = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ x_4 & x_5 & x_6 \\ x_7 & x_8 & x_9 \end{pmatrix} \text{ - для квадрата.} \quad (5)$$

Классификаторы OINDC, OMEANIC, OMEANC, OMARKC работают с блоком в форме перекрестия, а классификаторы OINDS, OMEANIS, OMEANS, OMARKS работают с квадратным блоком. Приведем алгоритмы работы этих классификаторов.

Пусть снова $\Omega = (\omega_1, \dots, \omega_m)$ – конечное множество классов, $p(\omega_i)$ – априорная вероятность класса ω_i , $X = (x^1, \dots, x^k)$ – объект, состоящий из k N -мерных векторов $x^l = (x_1^l, \dots, x_N^l)$.

OINDC и OINDS основаны на предположении, что векторы внутри блока независимы. Будем рассматривать векторы, составляющие объект X , как один вектор размерности kN . Тогда дискриминантная функция класса ω_i имеет вид:

$$g_i(X) = \ln(p(\omega_i)) - 0.5k \ln(|B_i|) - 0.5 \sum_{l=1}^k (x^l - m_i)^T B_i^{-1} (x^l - m_i). \quad (5a)$$

Решающее правило для данных классификаторов принимает следующий вид: центральный элемент объекта X заносится в класс ω_i , если $g_i(X) > g_j(X)$ для всех $j \neq i$ и $g_i(X) > t_i$. В противном случае центральный элемент объекта заносится в класс отклоненных векторов. Здесь t_i определяется по (2) и (3) с $A = A(kN, Q)$.

OMEANIC и OMEANIS классифицируют среднее блока в предположении, что векторы внутри блока независимы. Классифицируется вектор x , равный среднему по всем векторам объекта X :

$$x = \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k x^l. \quad (6)$$

Дискриминантная функция класса ω_i имеет вид:

$$g_i(X) = \ln(p(\omega_i)) - 0.5 \ln(|B_i|) - 0.5k(x - m_i)^T B_i^{-1}(x - m_i). \quad (6a)$$

Решающее правило для данных классификаторов имеет следующий вид: центральный элемент объекта X заносится в класс ω_i , если $g_i(X) > g_j(X)$ для всех $j \neq i$ и $g_i(X) > t_i$. В противном случае центральный элемент объекта заносится в класс отклоненных векторов. Здесь t_i определяется по (2) и (3).

OMEANC и OMEANS классифицируют средний вектор (6) блока в предположении, что векторы внутри блока независимы и ковариационные матрицы равны единичной. Фактически это объектные классификаторы, решающие правила которых основаны на минимуме расстояния до центра класса. Дискриминантная функция класса ω_i имеет вид:

$$g_i(X) = \ln(p(\omega_i)) - 0.5(x - m_i)^T(x - m_i). \quad (6б)$$

Решающее правило для данных классификаторов имеет следующий вид: центральный элемент объекта X заносится в класс ω_i , если $g_i(X) > g_j(X)$ для всех $j \neq i$ и $g_i(X) > t_i$. В противном случае центральный элемент объекта заносится в класс отклоненных векторов. Здесь $t_i = -A$, где $A > 0$ – число, задаваемое пользователем.

OMARKC и OMARKS объединяют пространственные характеристики объекта на основе модели каузального марковского случайного поля первого и третьего порядка соответственно. Предполагается, что автокорреляционная функция элементов объекта разделима по вертикали и горизонтали:

$$\text{corr}(x_{ij}, x_{kl}) = \rho_h^{|i-k|} \cdot \rho_v^{|j-l|}, \quad (6в)$$

где x_{ij} – вектор признаков на пересечении i -ой строки и j -ого столбца;

ρ_h – коэффициент пространственной корреляции между двумя соседними векторами в горизонтальном направлении;

ρ_v – коэффициент пространственной корреляции между двумя соседними векторами в вертикальном направлении.

Пусть i – номер класса, I, J – размеры образа. Тогда:

$$\rho_{hi} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \rho_{hi}^k, \quad (7)$$

где

$$\rho_{hi}^k = \frac{1}{I(J-1)} \sum_{t=1}^I \sum_{j=1}^{J-1} (x_{ij}^k - m_{li}^k)(x_{t,j+1}^k - m_{ri}^k) / \sqrt{\text{Var}_{li}^k \text{Var}_{ri}^k}, \text{ а } 1 \leq k \leq N. \quad (7a)$$

Соответственно

$$\begin{aligned}
m_{li}^k &= \frac{1}{I(J-1)} \sum_{t=1}^I \sum_{j=1}^{J-1} x_{tj}^k, \\
m_{ri}^k &= \frac{1}{I(J-1)} \sum_{t=1}^I \sum_{j=2}^J x_{tj}^k, \\
Var_{li}^k &= \frac{1}{I(J-1)-1} \sum_{t=1}^I \sum_{j=1}^{J-1} (x_{tj}^k - m_{li}^k)^2, \\
Var_{ri}^k &= \frac{1}{I(J-1)-1} \sum_{t=1}^I \sum_{j=2}^J (x_{tj}^k - m_{ri}^k)^2.
\end{aligned} \tag{76}$$

Аналогичные формулы получаются для ρ_{vi} .

Для классификатора OMARKC (форма объекта – перекрестие) имеем решающие функции вида (см. (5))

$$G_i(X) = g_i(x_1) - 0.5 \sum_{j=2}^5 g_i^1(x_j | x_1). \tag{7B}$$

Здесь $g_i(x_1)$ – дискриминантная функция (1) поэлементного классификатора, а в качестве примера для функций $g_i^1(x_j | x_1)$ распишем функцию $g_i^1(x_2 | x_1)$ (остальные получаются аналогично):

$$g_i^1(x_2 | x_1) = N \ln(1 - \rho_{hi}^2) + \ln |B_i| + \frac{1}{1 - \rho_{hi}^2} (D_{22}^i - 2\rho_{hi} D_{21}^i + \rho_{hi}^2 D_{11}^i), \tag{8}$$

где

$$D_{kl}^i = (x_k - m_i)^T B_i^{-1} (x_l - m_i). \tag{9}$$

Центральный элемент x_1 объекта X относится в класс ω_i , если $G_i(X) > G_j(X)$ для всех $j \neq i$ и $G_i(X) > T_i^c$, где T_i^c – пороговое значение для отклоненных векторов класса ω_i :

$$T_i^c = \ln p(\omega_i) - 0.5(A(NL, Q) + (2[L/2] + 1) \ln |B_i| + N[L/2] \ln((1 - \rho_{hi}^2)(1 - \rho_{vi}^2))). \tag{10}$$

Здесь $A(NL, Q)$ – критическое значение уровня Q распределения χ^2 , а L – количество векторов в объекте.

Для классификатора OMARKS (форма объекта – квадрат) имеем следующие решающие функции (см. (5)):

$$\begin{aligned}
G_i(X) &= g_i^2(x_1 | x_2, x_4, x_5) + g_i^2(x_2 | x_3, x_5, x_6) + g_i^2(x_4 | x_5, x_7, x_8) + g_i^2(x_5 | x_6, x_8, x_9) + \\
&+ g_i^1(x_3 | x_6) + g_i^1(x_6 | x_9) + g_i^1(x_7 | x_8) + g_i^1(x_8 | x_9) + g_i(x_9),
\end{aligned} \tag{10a}$$

где $g_i(x_9)$ – дискриминантная функция (1) поэлементного классификатора, $g_i^1(x_j | x_l)$ – функции вида (8), а в качестве примера для функций g_i^2 распишем функцию $g_i^2(x_1 | x_2, x_4, x_5)$ (остальные получаются аналогично):

$$\begin{aligned}
g_i^2(x_1 | x_2, x_4, x_5) &= -0.5(\ln |B_i| + N \ln((1 - \rho_{hi}^2)(1 - \rho_{vi}^2))) + \frac{1}{(1 - \rho_{hi}^2)(1 - \rho_{vi}^2)} (D_{11}^i - 2\rho_{hi} D_{12}^i - \\
&- 2\rho_{vi} D_{14}^i + 2\rho_{hi} \rho_{vi} D_{15}^i + \rho_{hi}^2 D_{22}^i + 2\rho_{hi} \rho_{vi} D_{24}^i - 2\rho_{hi}^2 \rho_{vi} D_{25}^i + \rho_{vi}^2 D_{44}^i - 2\rho_{hi} \rho_{vi}^2 D_{45}^i + \rho_{hi}^2 \rho_{vi}^2 D_{55}^i).
\end{aligned} \tag{11}$$

Центральный элемент x_5 объекта X относится в класс ω_i , если $G_i(X) > G_j(X)$ для всех $j \neq i$ и $G_i(X) > T_i^s$, где T_i^s – пороговое значение для отклоненных векторов класса ω_i :

$$T_i^s = T_i^c - 0.5(L^{0.5} - 1)^2 (N \ln((1 - \rho_{hi}^2)(1 - \rho_{vi}^2)) + \ln|B_i|), \quad (11a)$$

(T_i^c берется из (10)).

Когда размер объекта равен 1, все объектные классификаторы становятся поэлементными классификаторами (1), основанными на стратегии максимального правдоподобия, за исключением OMEANC и OMEANS, которые становятся поэлементными классификаторами, основанными на минимуме расстояния.

1.3. Обучение и работа классификаторов.

Необходимые для построения дискриминантных функций классов оценки статистических характеристик векторов, средних ковариационных матриц, коэффициентов пространственной корреляции между значениями координат соседних векторов в горизонтальном и вертикальном направлениях – определяются на основе векторов из обучающих выборок (полей). Кроме обучающих для каждого класса может быть задан набор контрольных полей.

Оценки коэффициентов пространственной корреляции ρ_{hi} и ρ_{vi} в i -ом классе вычисляются как средние по количеству обучающих полей:

$$\rho_{hi} = (\sum_{l=1}^S \rho_{hi}^l) / S, \quad (11b)$$

где S – количество обучающих полей в классе, ρ_{hi}^l – коэффициент пространственной корреляции в горизонтальном направлении для обучающего поля с номером l , вычисленный согласно (7).

Все классификаторы могут использоваться в двух режимах – тестовом и рабочем. По результатам работы классификаторов в тестовом режиме над векторами обучающих и контрольных полей рассчитываются матрица ошибок и оценки вероятностей правильной классификации. Известно, что эти оценки для векторов из обучающих полей являются, в среднем, оптимистическими, а для векторов из контрольных полей также в среднем являются пессимистическими. Анализируя эти данные, можно оценить (проконтролировать) качество обучения.

Как отмечалось выше, возможны ситуации, при которых нарушается условие о случайности поля измерений, следствием чего являются нулевые дисперсии в некоторых каналах. Тогда формулы типа (1) становятся неприменимыми, т.к. ковариационные матрицы B вырожденные. Для исправления подобных ситуаций в системе классификации предусмотрена функция добавления к спектральным каналам с нулевой дисперсией гауссовского шума с нулевой средней и единичной дисперсией.

Результатом работы классификаторов в рабочем режиме является одноканальное (байтовое) изображение, значениями пикселей которого

являются номера классов. Это изображение окрашивается в predeterminedенные цвета, которые в интерактивном режиме могут быть заменены на цвета, определяемые пользователем. Кроме того, к этому изображению можно применить функцию постклассификации для удаления изолированных пикселей.

Система контролируемой классификации имеет следующие характеристики: число обучающих образов – до 9, число классов – до 15, число обучающих и контрольных полей в классе – до 10, размер каждого поля – до 50×50 векторов, размер объекта – от 1×1 до 11×11, размерность векторов данных не ограничивается.

На рис. 1 представлена тематическая карта ледовой обстановки в восточном секторе Арктики, полученная с использованием контролируемой классификации. В качестве распознаваемых изображений использовались мозаики радиолокационных и радиометрических снимков с ИСЗ «Океан-О1». Для выбора тестовых участков использовалось цветосинтезированное изображение.

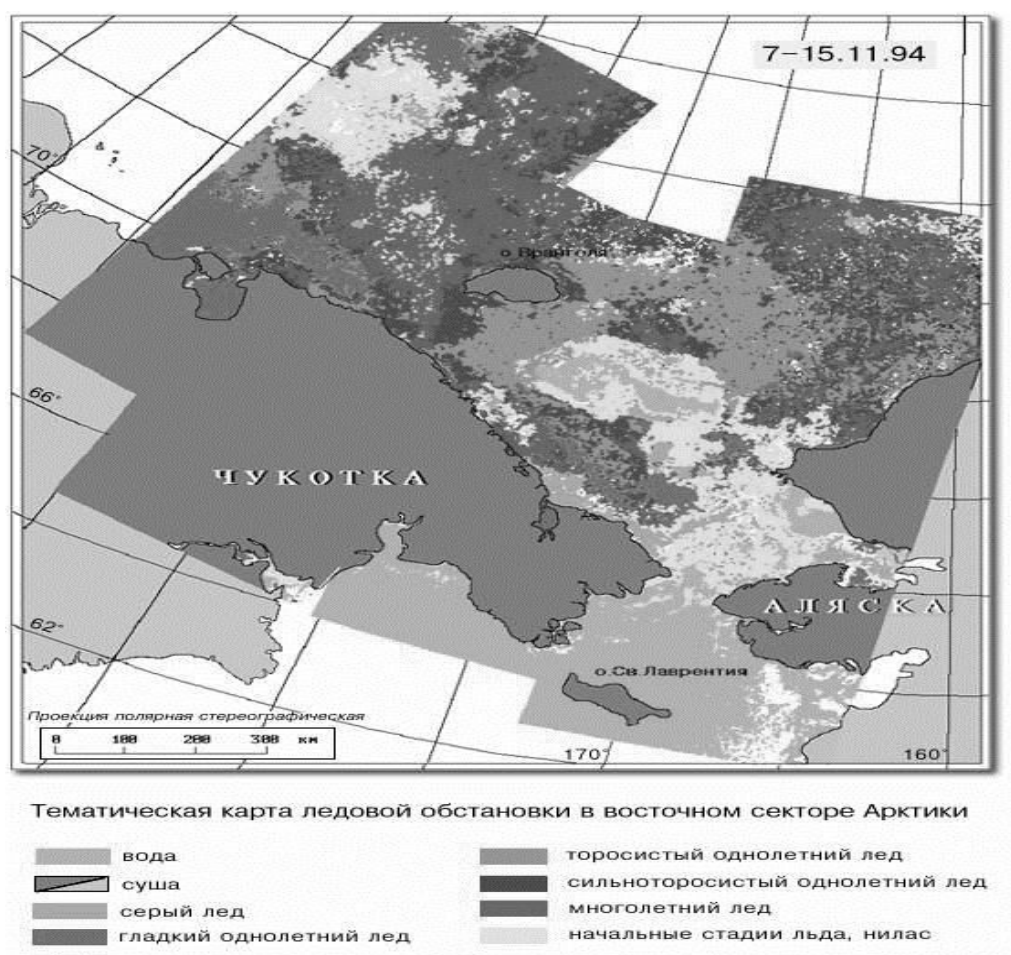


Рис. 1

2. НЕКОНТРОЛИРУЕМАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ДДЗЗ

Неконтролируемая классификация (кластерный анализ) в программном комплексе представлен двумя алгоритмами – методом K -средних и методом анализа мод многомерной гистограммы [3].

2.1. Метод K - средних.

Первый подход основан на итеративной процедуре отнесения векторов признаков классам по критерию минимума расстояния от вектора до центра класса. Оптимальным считается такое разбиение входных векторов на кластеры, при котором внутриклассовый разброс не может быть уменьшен при переносе какого-либо вектора из одного кластера в другой.

Алгоритм состоит в выполнении следующих шагов:

1. На основе заданного соотношения α чистых и смешанных векторов производится разделение векторов на чистые и смешанные. Под смешанными мы понимаем векторы, компоненты которых либо формируются за счет попадания в поле зрения съемочной аппаратуры нескольких объектов, либо искажены влиянием фона. С этой целью вначале для исходного набора векторов измерений с помощью многомерного оператора Робертса рассчитывается градиентное изображение и одновременно строится гистограмма градиентов. Исходя из заданного α , по гистограмме определяется порог, разделяющий векторы на смешанные и чистые.

2. Объединение чистых векторов в связные компоненты. На этом этапе все чистые векторы объединяются в связные компоненты, которые последовательно нумеруются. Соответствующий алгоритм, идейно близкий к алгоритму заполнения областей с произвольной границей по критерию связности [3], может выделять и нумеровать одновременно любое количество многосвязных областей без ограничений на их форму и ширину контуров. Для каждой связной компоненты вычисляется вектор средних значений.

3. Итеративная кластеризация векторов средних значений. Начальные центры кластеров определяются по следующей схеме. В качестве первых двух центров берется пара векторов, наиболее далеких друг от друга. Затем вся выборка делится на кластеры по критерию близости к выбранным центрам. В каждом кластере отыскивается вектор, наиболее далекий от центра. Для всех таких векторов рассчитывается суммарное расстояние до центров. В качестве нового центра берется вектор, для которого суммарное расстояние максимально, и процедура распределения векторов по кластерам повторяется.

4. Распределение связных компонент по кластерам. На этом этапе связные компоненты получают новые номера. Новый номер присваивается компоненте в соответствии с номером кластера, в который попал вектор средних значений этой компоненты.

5. Кластеризация смешанных векторов. На завершающем этапе производится неитеративная кластеризация смешанных векторов по принципу минимума расстояния до центров кластеров $C_1, \dots, C_k$. Смешанный вектор z будет отнесен к ближайшему кластеру ω_i , если $\|C_i - z\| < 0.5 \max \|C_i - C_l\|$, $i, l = 1, \dots, k, i \neq l$.

Рис. 3 иллюстрирует результат работы кластеризации методом K -средних значений изображения, представленного на рис. 2. Рис. 3 демонстрирует результат работы алгоритма для следующих входных данных: количество выделяемых кластеров 16, соотношение количества смешанных и чистых векторов $\alpha = 0.35$.

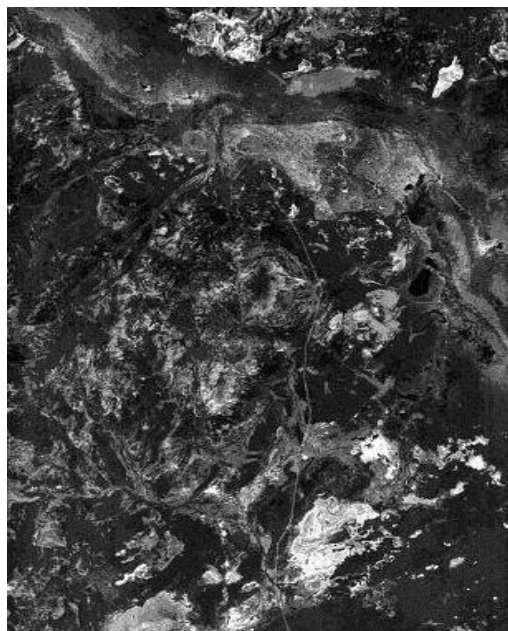


Рис. 2

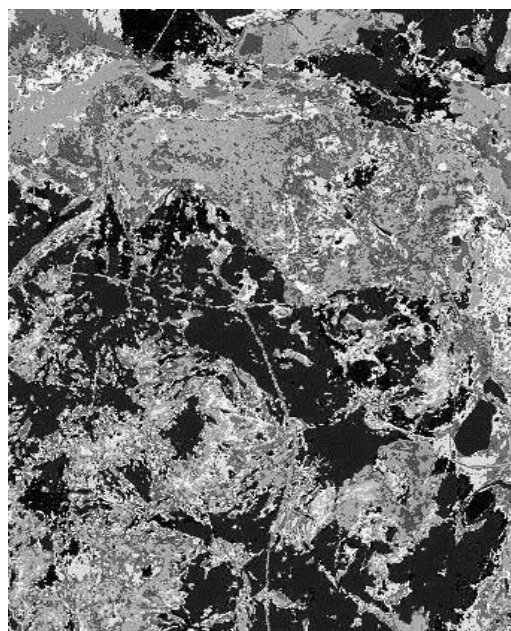


Рис. 3

2.2. Метод анализа мод многомерной гистограммы.

В основе второго подхода лежит предположение, что исходные данные являются выборкой из многомодового закона распределения, причем векторы, отвечающие отдельной моде, образуют кластер. Таким образом, задача сводится к анализу мод многомерных гистограмм. В программный комплекс включена реализация метода, описание основных шагов которого приведено в [3].

Гистограмма генерируется последовательным просмотром векторов данных и сравнением каждого вектора с текущим списком векторов. При этом либо изменяется соответствующее значение частоты, либо вектор добавляется в список. Для вычисления адресов векторов в списке используется хэш-кодирование. Первым шагом модального анализа является поиск ближайших соседей данного вектора списка среди других векторов списка. По определению вектор x есть ближайший сосед вектора y , если $|x_i - y_i| \leq 1$ для $i = 1, \dots, N$. Каждый из возможных ближайших соседей данного вектора x может быть получен из него прибавлением вектора сдвига, компоненты которого принимают значения из множества $\{-1, 0, 1\}$. Алгоритмически i -ый вектор сдвига $i = 1, 2, \dots, 3^N - 1$ можно получить, уменьшив на 1 каждый из коэффициентов представления числа i в троичной системе исчисления. Поскольку в реальной гистограмме присутствуют

далеко не все ближайшие соседи, то для эффективного их поиска векторы предварительно упорядочиваются в многомерные бинарные деревья. В этом случае время поиска всех ближайших соседей данного вектора становится пропорциональным числу реально существующих соседей. При построении дерева векторы x рассматриваются как N -мерные ключи. Вначале рассчитываются дисперсии по всем координатам векторов, и определяется координата j , имеющая максимальную дисперсию. Медианное значение выборки по этой координате используется в качестве ключа для разделения множества векторов на два подмножества: в одно подмножество помещаются векторы, значение которых по координате j меньше порогового значения, а в другое векторы, у которых значение координаты превосходит порог. Каждое из полученных подмножеств делится далее аналогичным образом.

Далее проводится локализация мод гистограммы. Вначале каждому вектору на основе анализа его ближайших соседей ставится в соответствие градиент. Вектору приписывается номер вектора с максимальным значением градиента. Если градиент меньше нуля, то это означает, что координаты вектора являются координатами локального максимума и вектору приписывается его собственный номер. В итоге каждой моде гистограммы сопоставляется ориентированный граф, корень которого соответствует точке моды. Если количество получаемых кластеров (количество локальных максимумов гистограммы) больше заданного порога, то проводится сглаживание гистограммы. Сглаживание осуществляется либо путем замены частоты $h(x)$ вектора x на среднее значение частот его ближайших соседей, либо путем уменьшения “разрешения” векторов данных, т.е. делением компонент векторов на 2.

На завершающем этапе выполняется раскраска ориентированного графа одним цветом, т.е. всем вершинам графа присваивается значение, которое присвоено его корню. На рис. 4 приведен результат кластеризации исходного изображения (см. рис. 2) описанным выше методом. Выделено 13 кластеров при заданном максимальном количестве 16. Существенные различия в рисунках 3 и 4 говорят о том, что надежность результатов кластеризации часто можно оценить лишь сравнением нескольких вариантов обработки.

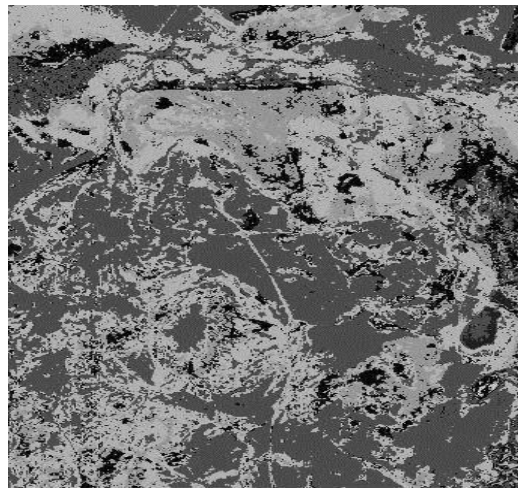


Рис. 4

Работа выполнена частично при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 07-07-00085).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Природа Земли из космоса // А.П.Тищенко, В.В. Асмус, В.П. Пяткин и др. Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 151 с.

2. Асмус В.В., Бучнев А.А., Пяткин В.П. Программный комплекс для обработки данных дистанционного зондирования Земли // Труды XXXII Международной конференции “Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе IT+SE’2005”, 20–30 мая 2005 г., Украина, Крым, Ялта-Гурзуф. – с. 229–232.

3. Асмус В.В. Программно-аппаратный комплекс обработки спутниковых данных и его применение для задач гидрометеорологии и мониторинга природной среды // Диссертация (научный доклад) на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. На правах рукописи. Москва – 2002. – 75с.

© А.А. Бучнев, В.П. Пяткин, 2007

УДК 528.8 (94)

John C. TRINDER

School of Surveying and SIS, the University of NSW, Sydney

STATE OF THE ART AND FUTURE DEVELOPMENTS IN PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING

SUMMARY

New developments in digital imaging have enabled high resolution imaging from aerial sensors. This is claimed to have resulted in a paradigm shift in procedures for aerial imaging which will result in a significant change in methods, applications and economy of aerial imaging. As well, close range photogrammetry now incorporates digital cameras with capabilities that will result in moderate to very high accuracies of measurement of objects. These developments will be covered in the paper. New satellite systems, particularly those based on small satellite technologies are being developed by many countries to satisfy their priorities to enter the space industry. In parallel with these developments are those of GEO and GEOSS which aim to co-ordinate developments in satellite technologies to reduce overlaps and provide more comprehensive Earth observation datasets to all regions of the world. The paper will consider these developments and how they will satisfy the future needs of society.

INTRODUCTION

The development of new computer technologies, laser scanning, radar imaging and satellite technologies is leading to a range of new equipment available for automatic processes for mapping, GIS database acquisition, terrain and city modelling, land cover analysis and environmental modelling. This paper will review the current state of art of the technologies for digital aerial imaging, digital imaging for close range photogrammetric applications, terrain laser scanning, interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), new satellite developments, especially small satellites, and some trends in processing for automation information extraction from digital imaging, especially multi-sensor data fusion.

DIGITAL AERIAL CAMERAS

It is only in the last 6-7 years that digital aerial cameras have been developed that can replace film cameras. Film cameras have been developed to a very advanced level over a period approaching 100 years and have proved to be very efficient in acquiring high resolution and high quality aerial images. To compete with these highly

advanced film aerial cameras, the new digital cameras should be able to acquire high resolution images with Ground Sampling Distance (GSD) of 10cm or less, have similar or better geometric accuracies, have comparable angles of field, include efficient management and storage of large volumes (TBytes) of data, take advantage of the particular characteristics of digital image acquisition, and be suitable for mapping and orthophoto production. The majority of these aims have been largely achieved with the current digital aerial cameras. Their efficiency is likely to improve as the technologies are advanced. Sales of digital aerial cameras have increased rapidly over recent years.

There are two approaches to the design of digital aerial cameras:

- Systems based on linear array scanners (pushbroom), in which the terrain is scanned by one or more linear arrays as the aircraft moves over the terrain. They normally incorporate at least three sensors, one looking forward, one looking vertically and one backwards to acquire three separate overlapping images of the terrain that can be used for determining elevations. An integrated GPS/IMU system is essential for this configuration for the determination of camera position and tilts, because the image acquisition is a continuous process and not frame based. Typical systems available or soon to be available are Leica Geosystems ADS40, Wehrli 3-DAS-1, DLR HRSC, Jenoptik (JAS-150).

- Systems based on multiple area arrays, in which the images are stitched together to form a larger frame image. The formats of the images are usually not square, but their dimensions approach those of frame aerial film cameras. The images can be processed using standard digital photogrammetric software. GPS/IMU system will not be essential for its operation, but some components of such a system may be included as an option. Typical systems are Z/I DMC, Vexcel UltraCam_D and UltraCam_X.

The general characteristics of most of these digital cameras are:

- 12 bit dynamic range of panchromatic images with ground pixel sizes as small as 5cm;
- Most acquire multi-spectral images, some with larger pixel sizes than for the panchromatic images, covering wavelengths from blue to NIR;
- Proven high geometric accuracies;
- Data storage capabilities of several TerraBytes both for the original data and backup;
- Area coverages are smaller than those of wide-angle film cameras of 90°; the cross-track and along-track coverages are typically less than 50°;
- The Base/Height (B/H) is about 0.7 for push-broom cameras, but as low as 0.3 for area array cameras; this has led to the use of high percentage overlaps (ie highly redundant imaging) for area array cameras of 80% to 90% to achieve high geometric accuracy;
- If highly redundant imaging is acquired, then ‘true’ or ‘near-true’ orthophotos are achievable.

The development of digital cameras, according to some manufacturers has led to a ‘paradigm shift’ in the way photogrammetry is undertaken. The elements of this paradigm shift are: digital imaging; high levels of redundancy in the imaging and hence multiple images used for processing; digital image processing is possible for information extraction; highly accurate and reliable information extraction; much higher throughput; improved quality of orthophotos; and more imaging for a range of applications. Highly redundant imaging is possible, since manual handling of the data is eliminated and all data is processed automatically.

CLOSE RANGE DIGITAL PHOTOGRAMMETRY

The multitude of digital cameras on the consumer market provides a wide selection for photogrammetric applications. Many processes can be undertaken automatically on digital images for close range application, such as point identification and coordinate measurement, full automation of the measuring process (real-time or off-line), and enhanced modelling and visualization. Coded targets can also be used for defining positions of known points, while the measurement of individual points can be done manually if required, using a so-called EO (exterior orientation) device that speeds up the process.

The range of digital cameras that can be used for close range photogrammetry can be broadly grouped into 3 types:

Amateur: cost <\$US500 giving an accuracy of <1:20,000.

Professional: cost up to \$US2,000 giving accuracies <100,000.

Photogrammetric: cost of the order of \$US50,000, giving accuracies 1:200,000.

New low cost close range photogrammetry software packages are also becoming available, that can be used for processing of the digital images, leading to a broader range of close range photogrammetric applications.

LIDAR OR TERRAIN LASER SCANNING

In LiDAR (Light Detection And Ranging) or airborne laser scanning (ALS) a laser scans the terrain surface at right angles to the flight direction of an aircraft. The measured distance from the aircraft to visible points on the terrain surface will enable the position and elevation of points to be determined. The following equipment is included:

- The laser scanning normal to the flight direction.
- GPS to determine the location of the aircraft based on kinematic measurements.
- IMU (Inertial Measuring Unit) or INS (Inertial Navigation System) to continuously determine the tilts of the aircraft.

A dense set of elevation posts (XYZ coordinates), or ‘point cloud’, is determined at a separation typically of about 1m, that represent a digital surface model (DSM) of the visible terrain. This means that the elevations are determined of visible objects from the air, such as buildings and trees, as well as the terrain surface if the laser beam penetrates the vegetation. The accuracy of the elevation posts is of the order of

10-20cm, although tests have shown that accuracies of interpolated hard surfaces can better than 5cm are achievable. The separation of the posts will depend on the configuration of the LiDAR equipment and the scanning frequency, which is increasing as the systems are developed further.

Most LiDAR systems register multiple returns or echoes of the laser beam, but as a minimum the *first* and the *last pulses* will be recorded. Therefore, if the laser beam hits a tree, a part of the beam will be reflected by the canopy, resulting in the returned signal being registered by the sensor as the *first pulse*. The rest of the signal may penetrate the canopy and, thus be reflected further below the top of the tree, maybe even by the terrain surface. The *last pulse* registered by the sensor corresponds to the lowest point from where the signal was reflected. In certain cases, the difference in elevation between the first and last pulses can be assumed to measure the heights of trees.

Along with the time of transmission of the signal from the sensor to the terrain and back to the sensor, the *intensity* of the returned laser beam may also be registered by LiDAR systems. LiDAR systems typically operate in the infrared part of the electromagnetic spectrum and therefore the intensity can be interpreted as an IR image. As well as the laser data, images of the terrain surface may also be recorded with a low or high resolution digital camera. These images may be used to identify the location and description of points on the terrain surface. The combination of colour and the IR as multi-spectral images can provide valuable information for information extraction.

A summary of characteristics of LIDAR data for information extraction is as follows:

- Since a DSM is recorded on the visible surface, it is necessary to process the data for the extraction of the bare earth DEM.
- Multiple returns of the same signal, especially the first and last returns, enable the determination of tree and building heights. As well, penetration of the vegetation by the laser signal enables the measurement of elevations of the bare earth, even though the terrain does not appear to be visible from the air.
- The intensity of the return laser signal, combined with colour images, enables the use of image processing techniques, such as classification.
- The economics of LIDAR equipment require it to be used over large areas, and therefore GBytes of data are likely to be acquired in a single mission (250,000 points may be recorded in a few seconds). Automatic processes are required for the extraction of information from the data.

Typical applications of LIDAR data may include:

- DEMs of the bare earth surface.
- Beach erosion studies.
- Infrastructure analysis.
- Flood risk analysis, flood simulation, and drainage design.
- Ground subsidence.
- Visibility analysis.
- Telecommunications planning.

- Noise propagation studies.
- Volume change monitoring.
- Buildings extraction for 3D city models.
- Forest analysis.

Recent developments in LiDAR include:

- Full wave sensing in which the full wave characteristics of the return signal from the terrain are recorded: this enables better identification of the terrain characteristics and hence feature identification, but little or no software is currently available to interpret the data.
- Higher frequency laser pulsing brought about by high quality systems and also multiple pulsing during data acquisition. This will enable closer spacing of the elevation posts on the terrain surface and more accurate determination of elevations on the terrain, as well as on features such as buildings and vegetation.

INTERFEROMETRIC SAR (InSAR)

In InSAR, signals from an antenna illuminate the terrain and echoes scattered from the surface are recorded by two separated antennas on board the aircraft. For most satellite InSAR systems, the two images are recorded on two separate satellite passes over the same area of the terrain. The time separation between the two passes for satellite systems will be a minimum of 1 day, but sometimes it will a longer interval. The significant measurement in InSAR is the difference in phases between the signals received at the two antennas. These differences can be used to determine terrain elevations with high accuracy. After registering the two images, the phases are calculated and differenced on a pixel by pixel basis, resulting in a phase difference image or interferogram. The process of computing the phase differences is referred to as phase ‘unwrapping’, and it is designed to eliminate redundancies in the phase information derived from the two antennas. Accuracies of 0.5m are possible for short wavelength airborne radars, while accuracies of the order of 5m to 10m are achievable with spaceborne systems. The recent development of longer wavelength P-band interferometric airborne systems enable elevation determination over heavily forested areas, that is not possible with shorter wavelength systems, since P-band radar is able to penetrate the vegetation. InSAR systems are very economical for medium accuracy elevation determination over large areas. Differential interferometric SAR systems that determine changes in elevations over several epochs can result in very high accuracies of mm and are important for measuring ground subsidence.

InSAR is a complex process and special software is required to process the data. Typical problems that must be overcome include: temporal decorrelation, particularly for repeat pass satellite InSAR, caused by the time differences between the two satellite passes; spatial decorrelation, also called geometric decorrelation caused by the magnitude of the baseline; volume decorrelation, due to variations in the penetration of the radar signal into ground features within a resolution pixel; and atmospheric artefacts. These issues will reduce the accuracy of elevation determination, but means are available to significantly correct for these errors.

DEVELOPMENTS IN SATELLITE EARTH OBSERVATION

There are more than 50 Earth observation (EO) satellites already in orbit or planned by 2010, largely with the same spectral coverage. A brief summary of the characteristics of these satellites is as follows:

- Civil land imaging satellites with resolutions $\leq 36\text{m}$ in orbit or planned by 2010.
- Optical, 26 in orbit, 25 planned.
- Radar, 3 in orbit, 9 planned.
- These can be divided into two major resolution groups.
- 18 high resolution systems (0.5m to 1.8m).
- 44 mid resolution systems ($>2.0\text{m}$ to 36m).
- The two groups have greatly different coverage capabilities.
- Hi-resolution swaths are between 8km to 28km range.
- Mid-resolution swaths are generally between 70km to 185km except for the Disaster Monitoring Constellations (DMC) which have swaths of 600km.

More than 20 countries, including many small countries are prepared to fund development of satellite systems. Many of these countries are developing small satellites, which are lower cost and can be developed much more quickly to satisfy their ambitions to become space faring nations.

Small satellites are characterised by:

- Rapid development scales for experimental missions ranging from just 6 to 36 months.
- They are based on leading-edge commercial off-the-shelf (COTS) technology.
- Include innovative solutions and cheaper alternatives to the established systems.
- They are lighter weight and designed with smaller volumes.

A typical classification of satellites is as follows (Table 1):

Table 1

Satellite Group Name	Mass	Possible Cost (\$US1999)	Examples
Large	$>1000\text{kg}$		
Medium	500-1000kg		
Mini	100-500kg	5-20 million	DMC, TopSat
Micro	10-100kg	2-5 million	SSTL MicroSat-70
Nano	1-10kg	>1 million	
Pico	0.1-1kg		
Femto	$>100\text{g}$		

The question can be asked as to why so many countries wish to develop a space capability including EO. Some of the reasons are:

- Improve communications in remote areas.
- National security and national pride.
- Scientific endeavours, such as planetary exploration, studies of aspects of global change.
- Development of high technology capability for future, where the spin-off benefits will enable the countries to develop leading edge high technology industries.
- Operational aspects of EO, such as EU farming policies.
- Providing for a space capability that may not be available from elsewhere in the future, RiceSAT, fire monitoring.

Given the current level of development in satellite systems, there are a number of questions that can be asked. Due to CCD sensor technology being used in most of these satellites, there is a concentration on limited spectral range of most sensors, to less than about 1200nm. Therefore, it remains to be seen whether the medium range of sensors are adequately catered for. Similar questions apply to microwave sensors and hyperspectral sensors. Coordination in the development of EO would ensure that gaps are filled in the range of data acquired by EO systems. It appears that many developments of EO sensors are being driven only by national priorities and not global needs.

The establishment of GEO (Group on Earth Observation) and GEOSS (Global Earth Observation System of Systems) is intended to coordinate the developments of future satellite systems. However, there is no compulsion for member countries of GEO to limit their plans for space developments, or to cooperate with other members. Indeed, the technical commitments of GEO members or participating organizations will only apply to those contributions that they themselves have identified. Hence, in the short-term it seems that there will be very little reduction in the high level of redundancy in the development of satellite systems, since many countries are already developing their own for national reasons.

GEOSS is an ambitious plan which should involve inputs from all members and participating organizations. The best knowledge available should be input into the development of GEOSS, which should result in the acquisition of an adequate range of data for such aspects as sustainable development, climate change and global warming studies, as well as food security, disaster management, provision of safe drinking water and other issues described under societal benefits above. It is hoped that all participating countries will recognize the anticipated benefits of international cooperation in developing GEOSS and commit their space programs to its fulfillment.

PROCESSING OF MULTI-SOURCE DATA

Data fusion is a formal framework for combining data originating from different sources. It aims at obtaining information of greater quality than can be obtained from the data when processed separately; the exact definition of 'greater quality' will depend upon the application.

Examples of data fusion are: optical satellite data with radar data; aerial photography with LiDAR data; high resolution panchromatic and multi-spectral data; and interferometric SAR with other types of data. The advantages of data fusion to the remote sensing industry have been argued for more than two decades, yet efficient methods of data fusion still need to be developed. The concept of data fusion is often referred to as *one plus one is greater than 2*. That is, the fusion of two sets of data will result in the extraction of significantly more information than may be assumed by a linear combination of the two sets of data. It is important that methods are developed in remote sensing in which data fusion is applied based on strong theoretical principles so that the full potential of fusion of multiple sources of data can be achieved. The advantages of data fusion are that it uses the complementarities of the individual data sets, but it also provides redundancies in the processes, so that when data is not operational in one medium, it may be operational in the other form.

An example of the fusion of several sources of data is given in the determination of DEMs from aerial photography and optical remotely sensed data based on a statistical approach of the Dempster-Shafer algorithm (Lu et al 2006). The research is designed for 3D reconstruction from stereo images over trees or built-up areas, based on an attempt to understand and interpret the image content. In order to provide an accurate DTM of the terrain surface, the characteristics of the terrain cover, such as buildings and trees is determined. Figure 1 illustrates the architecture of the automatic building extraction system.

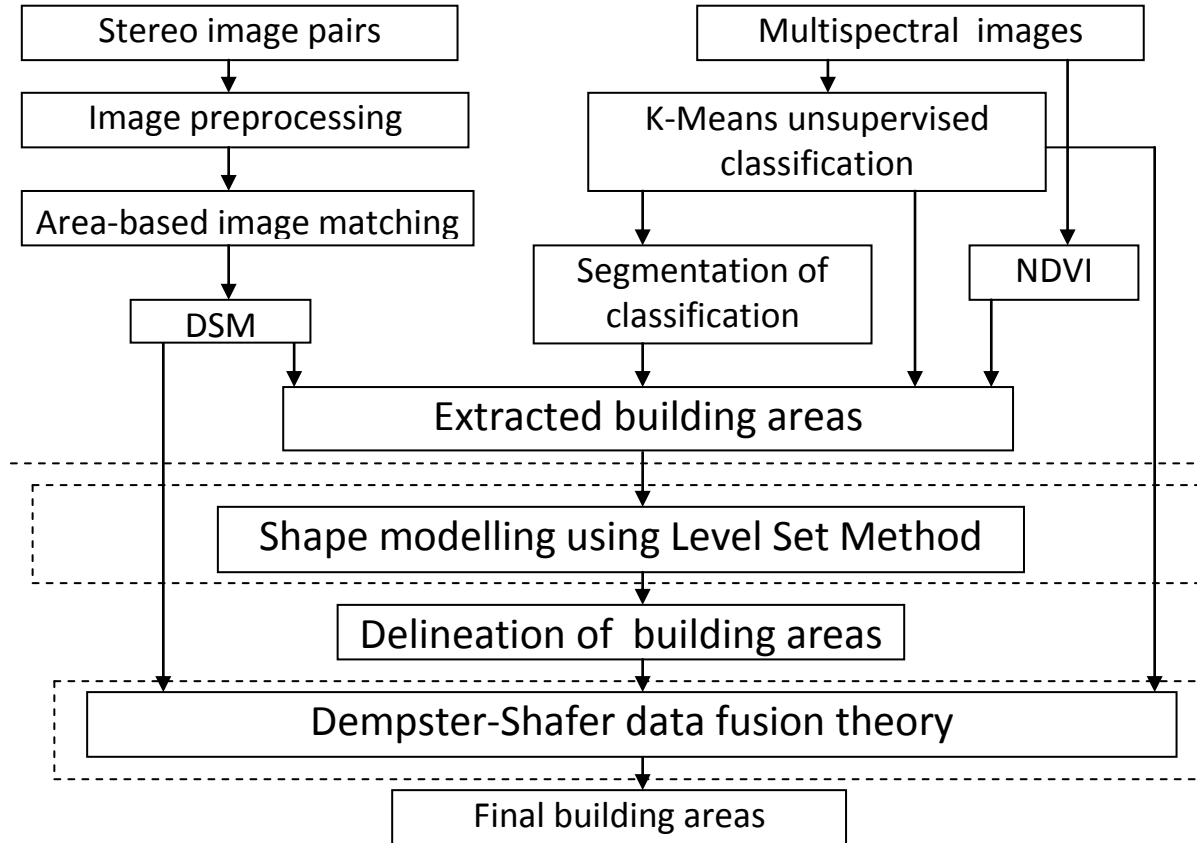


Figure 1: Architecture of building extraction system

Data fusion is used to resolve multiple propositions for the identification of the buildings, ie the DSM, the building classification, the building outlines derived from the Level Set method. The Dempster-Shafer algorithm is based on probability masses of a proposition A, through ‘*support*’ (Sup(A)) and ‘*plausibility*’ (Pls(A)). Sup(A) are the probabilities derived directly from the data sources, while the Pls(A) are the probabilities not assigned to the negation of a proposition, ie range of uncertainties free to support the proposition A. The possible sets of classes available include single classes, unions of classes and negations of classes.

By combining the probabilities of the sources of data derived from the DSM, the NDVI and the extracted building outlines, the most probable description of the buildings or trees could be determined. This is one demonstration of the application of a number of sources of information for the derivation of image content. A similar application of the Dempster-Shafer algorithm has been used to combine aerial multi-spectral images and LiDAR data, also for the extraction of buildings (Rottensteiner et al 2005).

CONCLUSIONS

- Digital sensing is a major new development in photogrammetry, which is being rapidly adopted worldwide. Improvements to the earlier models of digital cameras are continuing and therefore better quality and more efficient digital images will be acquired in future.

- LiDAR has developed as a major source of elevation data, and with improvements in the technology, more detailed data at much higher sampling interval will be possible in the future. Merging of LiDAR with digital imaging is also a future development.

- The large number of Earth observation satellites, including very high resolution satellite sensors with resolutions as small as 0.4m, demonstrates the level of interest in developing satellite technology in many countries around the world. However, this leads to a high level of redundancy in the provision of satellites for Earth observation. It is hoped that GEO and GEOSs will coordinate satellite developments for EO for the next 10 years so that efficient comprehensive monitoring of the environment will be possible.

- Data fusion is a powerful tool for combining data from a number of different sources. With the increase in automation, such techniques will become important in the future for extracting features from the digital images.

BIOGRAPHICAL NOTES

John Trinder graduated with a BSurv at University of New South Wales in Sydney Australia (UNSW) in 1963, MSc (ITC) 1965 and PhD (UNSW) 1971. He worked at the UNSW from 1965 to 1999, progressing to the position of Professor in 1991. He was Head of School, now named School of Surveying and SIS at UNSW from 1990-1999, and currently holds the position of Visiting Emeritus Professor. John has published extensively on his research at UNSW on photogrammetry and remote sensing. He has held executive positions in the Council of ISPRS, including Treasurer (1992-

1996), Secretary General (1996-2000), President (2000-2004) and is currently First Vice President.

REFERENCES:

1. Lu Y. H., Trinder J. C. and Kubik K., 2006 Automatic Building Detection Using The Dempster-Shafer Algorithm, Photogramm. Eng. & Rem Sens, Vol. 72(4) pp. 395-404
2. Rottensteiner F., J. Trinder, S. Clode, and K. Kubik: 2005 'Using the Dempster-Shafer Method for the Fusion of LIDAR data and Multi-spectral Images for Building Detection'. Information Fusion (an International Journal on Multi-Sensor, Multi-Source Information Fusion by Elsevier), special issue on Fusion of Urban Remote Sensed Features. Guest Editors: O. Hellwich (Berlin), P. Gamba (Pavia), Vol 6/4 pp 283-300.

© *John C. Trunder*, 2007

УРАВНИВАНИЕ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИОННОЙ СЕТИ

На международном научном конгрессе «ГЕО-Сибирь-2006» автор докладывал о сравнительном анализе двух систем внешнего ориентирования снимков [2]. Эти системы различаются последовательностью поворотов связки проектирующих лучей вокруг осей координат при различных преобразованиях (например, при переходе от наклонного снимка к горизонтальному или наоборот). В обеих системах один из углов лежит в экваториальной плоскости, проходящей через две оси правой внешней пространственной прямоугольной системы координат, совмещенной с центром проектирования так, чтобы оси ее были параллельны осям координат местности.

Одна из систем в прежние годы традиционно реализовывалась в аналоговых фотограмметрических приборах, а затем благодаря работам представителей научной школы профессора Лобанова А.Н. легла в основу аналитических и цифровых методов, наиболее часто используемых в отечественной практике. В этой системе за экваториальную принимается плоскость $X'Z'$ и в ней находится продольный угол наклона снимка α . Поперечный угол наклона ω лежит в меридианной плоскости, проходящей через ось Y' и главный луч связки, т.е. перпендикулярной к экваториальной плоскости.

Графическое представление о названных плоскостях и углах дает рис. 1.

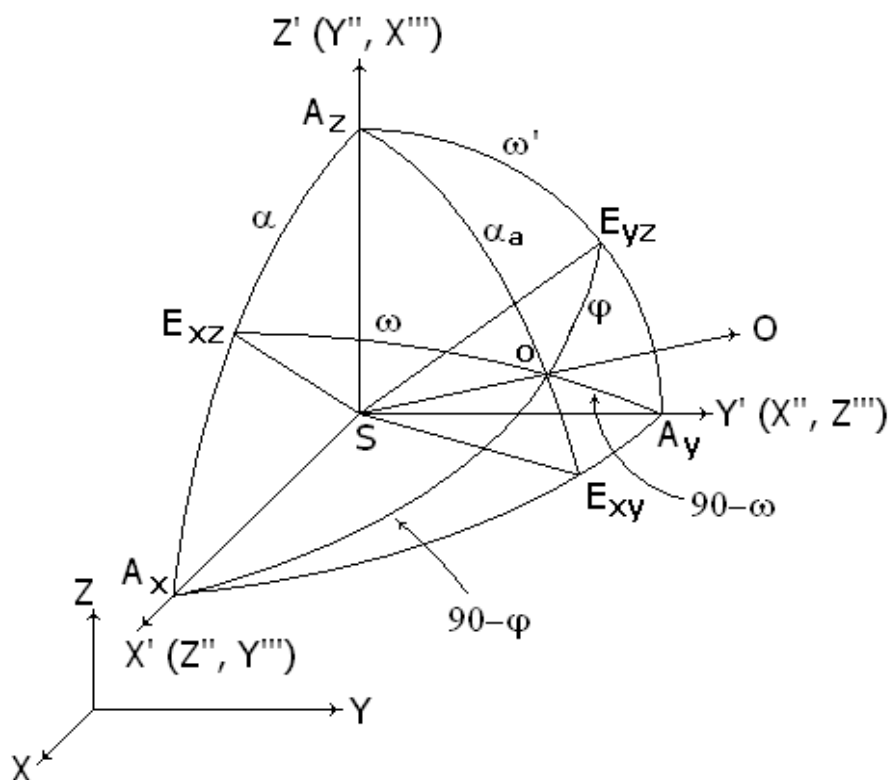


Рис. 1. Системы координат и углов наклона снимка

Во многих зарубежных аналитических и цифровых системах за экваториальную принимается плоскость $Y'Z'$, и в ней размещается поперечный угол наклона ω' . Меридианная плоскость, содержащая продольный угол φ , проходит через ось X' . Эта система углового ориентирования применена и в широко распространенной цифровой фотограмметрической станции (ЦФС), созданной в нашей стране на фирме Ракурс. (Заметим, кстати, что программа фототриангуляции для ЦФС ЦНИИГАиК может работать с каждой из названных угловых систем).

В обоих случаях третий угловой элемент внешнего ориентирования снимка (κ или κ') лежит в его плоскости и измеряется между следом меридианной плоскости и одной из осей координат самого снимка.

Как показано в работе [2], при решении фотограмметрических задач по плановым снимкам обе системы равноценны. Но в экстремальных случаях возможны осложнения, связанные с двумя факторами, влияющими на коэффициенты уравнений поправок для условий коллинеарности. Так, в системе с углами α, ω, κ , когда $\omega = 90^\circ$, коэффициенты уравнений поправок для этого угла могут оказаться бесконечно большими, что исключает возможность решения. Обе системы углового ориентирования в принципе допускают возможность возникновения пропорциональности между коэффициентами уравнений поправок для второго и третьего углов. В свою очередь, пропорциональность приводит к вырождению матрицы коэффициентов нормальных уравнений и точность решения фотограмметрических задач резко падает. Такое случается, если $\omega \approx 90^\circ$ и $\alpha \approx 0^\circ$, т. е. главный луч связки проектирующих лучей близок к оси Y' , или $\varphi \approx 90^\circ$ и $\omega' \approx 0^\circ$, т. е. главный луч связки почти совпадает с осью X' .

В работе [2] высказано предположение, что при съемке объекта со всех сторон или создании единой фотограмметрической сети в виде кольца или сферы целесообразно сочетать обе системы, выражая углы наклона одних снимков через α, ω, κ , а других – через $\omega', \varphi, \kappa'$. Предлагалось также сочетать несколько систем внешних прямоугольных координат для снимков разных частей объекта, выбирая их так, чтобы углы наклона снимков лежали в нужных пределах. Названные предположения экспериментально проверены автором на примере построения сети фототриангуляции, имеющей форму сферы. Второй вариант оказался фактически универсальным, исключая необходимость манипулировать системами углового ориентирования снимков и одинаково пригодным как для углов α, ω, κ , так и для углов $\omega', \varphi, \kappa'$.

Одновременное использование нескольких систем координат сильно облегчается тем обстоятельством, что в уравнения поправок для условий коллинеарности входят данные только одного снимка и только одной точки. В общем случае, когда неизвестными являются и элементы внешнего ориентирования снимков, и координаты точек местности, уравнения поправок для первой системы углов записываются, как

$$\begin{aligned}
 a\delta\alpha + b\delta\omega + c\delta\kappa + d\delta X_S + e\delta Y_S + f\delta Z_S + g\delta X + h\delta Y + i\delta Z + l_x &= V_x; \\
 a'\delta\alpha + b'\delta\omega + c'\delta\kappa + d'\delta X_S + e'\delta Y_S + f'\delta Z_S + g'\delta X + h'\delta Y + i'\delta Z + l_y &= V_y.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Формулы (1) общеизвестны, обозначения в них общеприняты и не нуждаются в пояснениях.

В фототриангуляции обособленность снимков приводит к тому, что в структуре системы нормальных уравнений выделяются две большие диагональные клетки. Одна из них, в свою очередь, состоит из диагональных клеток, имеющих размерность 6×6 и относящихся к снимкам, а другая – из диагональных клеток 3×3 для определяемых точек местности. Поскольку клетки снимков не имеют непосредственной связи между собой, то ясно, что элементы внешнего ориентирования любого снимка могут быть выражены без учета других снимков.

Таким образом, при уравнивании блока главная система координат должна служить для представления координат точек местности. Элементы внешнего ориентирования снимков могут выражаться в других, вспомогательных системах координат, выбираемых для отдельных групп снимков.

В принципе для каждого снимка возможен индивидуальный выбор системы координат, например, такой, в которой этот снимок имеет нулевые значения углов наклона. Тогда многие формулы заметно упростились бы, хотя во всей процедуре уравнивания упрощение в одном месте неминуемо приведет к усложнению в другом.

Нет, однако, необходимости доводить дело до крайности. Вполне достаточно иметь на блок любой формы всего три системы координат. На рис. 1 эти системы обозначены как $X'Y'Z'$, $X''Y''Z''$ и $X'''Y'''Z'''$. Они полностью гарантируют, что углы наклона всех снимков будут далеки от опасных значений в 90 градусов.

Для системы $X'Y'Z'$ дуга A_ZO представляет абсолютный угол наклона снимка α_a . В двух других системах абсолютный угол наклона равен соответственно дугам $A_XO = 90^\circ - \varphi$ и $A_YO = 90^\circ - \omega$. Для снимка следует выбирать ту систему, в которой абсолютный угол наклона оказывается наименьшим. В случае равенства двух или всех трех дуг, что теоретически не исключено, соответствующие этим дугам системы будут равноценны. Практически выбор следует осуществлять по наибольшему абсолютному значению косинуса трех названных дуг. Если из предварительных вычислений определены элементы внешнего ориентирования снимков в общей системе координат блока и подсчитаны направляющие косинусы, то

$$\begin{aligned}
 \cos \alpha_a &= \cos \alpha \cos \omega = c_3, \\
 \cos (90 - \varphi) &= \sin \varphi = -a_3, \\
 \cos (90 - \omega) &= \sin \omega = -b_3,
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где c_3, a_3, b_3 – направляющие косинусы.

Очевидно, что не требуется выполнять никаких преобразований координат и углов, когда выбрана система $X'Y'Z'$. Для второй системы ($X''Y''Z''$) необходимые преобразования координат и направляющих косинусов описываются выражениями

$$\begin{vmatrix} X'' \\ Y'' \\ Z'' \end{vmatrix} = M'' \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} a_1'' & a_2'' & a_3'' \\ b_1'' & b_2'' & b_3'' \\ c_1'' & c_2'' & c_3'' \end{vmatrix} = M'' \begin{vmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{vmatrix}, \quad M'' = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix}. \quad (3)$$

Для перехода к третьей системе служат аналогичные формулы, причем

$$M''' = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Порядок обратных преобразований очевиден.

При практической реализации варианта уравнивания с одновременным использованием нескольких систем координат для снимков необходимо иметь в программе соответствующее число процедур, подсчитывающих коэффициенты уравнений поправок для условий коллинеарности с учетом конкретных систем координат, в которых представлены снимки и точки местности. Более прост иной путь. Он основан на том, что в уравнениях (1) для коэффициентов при поправках к координатам центра проектирования ($\delta X_s, \dots$) и точкам местности ($\delta X, \dots$) существуют зависимости

$$g = -d, \quad h = -e, \quad i = -f; \quad g' = -d', \quad h' = -e', \quad i' = -f'. \quad (5)$$

Это позволяет увязывать названные процедуры только с углами α, ω, κ или $\omega', \varphi, \kappa'$, но не с системами координат, и подсчитывать с помощью этих процедур лишь первые шесть пар коэффициентов. Перед обращением к процедурам координаты точек местности переводятся в систему снимка по формулам (3), а по возвращению из этих процедур последние три пары коэффициентов находятся, как

$$\begin{vmatrix} g \\ h \\ i \end{vmatrix} = -M^T \begin{vmatrix} d \\ e \\ f \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} g' \\ h' \\ i' \end{vmatrix} = -M^T \begin{vmatrix} d' \\ e' \\ f' \end{vmatrix}, \quad (6)$$

где M^T – матрица, транспонированная по отношению к M'' или M''' .

Практическая проверка возможности построения фототриангуляционного блока сферической формы с одновременным использованием разных систем координат для снимков сделана по макетным данным. Для преемственности за объект съемки принято то же шаровидное тело, сопоставимое по размерам с Землей, которое послужило основой для экспериментов, выполненных в работе [2] и предусматривавших построение трех отдельных колец, каждое из которых содержало пару маршрутов, проложенных вдоль экватора и меридианов с долготами 0 и 90 градусов. Для начала три названных кольца были объединены

в один блок, а затем этот блок наращивался за счет последовательного включения в него новых, дополнительных колец, проложенных либо вдоль других меридианов, либо лежащих в наклонных плоскостях. Полная обработка выполнена для 5 блоков (3, 5, 7, 9 и 11 колец). Параметры съемки взяты такими же, как и в работе [2], а именно: масштаб фотографирования 1:3000000, фокусное расстояние камеры – 150мм, формат кадра 24х24 см. Количество снимков в маршруте – 151. Точки на снимках смоделированы по схеме 7х7. Опорные точки расположены парами примерно через 10-15 базисов. Общее число опознаков в каждом кольце – 24. В качестве твердых использованы также координаты центров проектирования. Вся опора задана непосредственно в геоцентрической системе координат. Исходным данным приданы случайные погрешности, соответствующие точности измерений снимков 0.01 мм. Схема одного из блоков, включающего 7 колец, представлена на рис. 2.

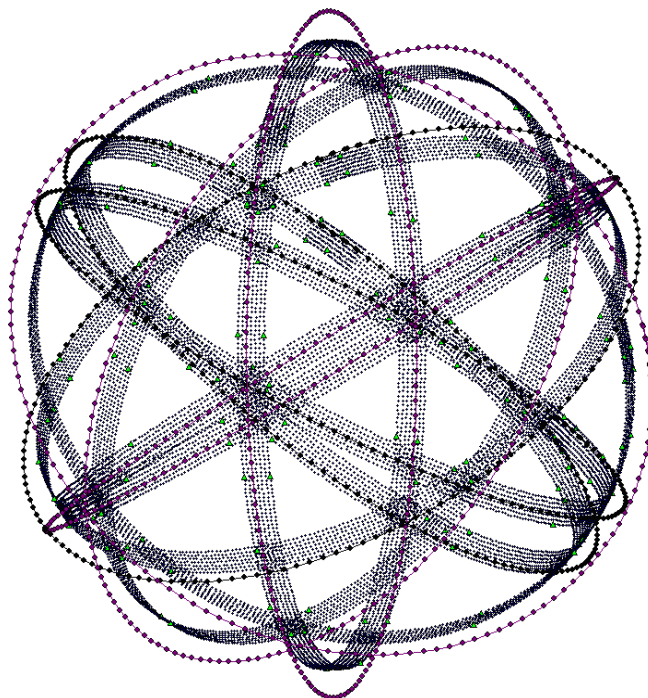


Рис. 2. Схема блока из 7 колец

Оценка точности фототриангуляции выполнена путем сравнения истинных координат точек объекта съемки с уравненными координатами, а также по вероятнейшим ошибкам их, подсчитанным через весовые коэффициенты. Некоторые результаты экспериментов показаны в табл. 1, 2 и 3. Эти таблицы составлены по протоколам вычислительной обработки сети с использованием углов α, ω, κ . Для второй системы углов результаты оказались такими же с точностью до ошибок округления. Это обстоятельство подтверждает сделанное выше утверждение, что уравнивание блока с использованием нескольких систем координат для снимков освобождает от необходимости одновременно применять разные системы углового ориентирования, поскольку при этом продольные и

поперечные углы наклона снимков в принципе не могут превосходить $\pm 45^\circ$ или $(180 \pm 45)^\circ$.

В табл. 1 истинные ошибки даны как в метрах на поверхности объекта съемки, так и в масштабе снимков. Учитывая приведенные выше параметры съемки, полученную точность следует признать хорошей. Примечательно, что для всех блоков и по всем осям координат достигнуты практически одинаковые показатели точности. Есть основания полагать, что при дальнейшем наращивании размеров блока точность сгущения сохранится на этом же уровне.

Табл. 2 характеризует распределение по интервалам ошибок координат точек всех пяти блоков. Можно смело утверждать, что эта таблица, по крайней мере, не противоречит закону нормального распределения ошибок.

Наконец, табл. 3 подтверждает объективность вероятностной оценки точности уравнивания. Хорошее совпадение данных для всех блоков и всех осей свидетельствует, что все системы нормальных уравнений не содержали вырождающихся клеток. Следовательно, полученные решения этих систем вполне корректны, а сама табл. 3 правильно отражает усредненные показатели достигнутой при уравнивании точности.

Таблица 1. Точность уравненных координат точек блоков

Число колец в блоке	Оси к-т	Истинные ошибки координат точек блоков					
		На сфере в метрах			В масштабе снимка в мм		
		сред.	ср. кв.	max	сред.	ср. кв.	max
3	X	26.4	33.7	143.9	0.009	0.011	0.048
	Y	25.0	31.6	144.8	0.008	0.011	0.048
	Z	25.9	32.8	192.8	0.009	0.011	0.064
5	X	26.7	33.9	162.4	0.009	0.011	0.054
	Y	26.2	33.2	191.0	0.009	0.011	0.064
	Z	25.9	32.8	145.1	0.009	0.011	0.049
7	X	26.5	33.6	153.7	0.009	0.011	0.051
	Y	27.5	34.9	158.0	0.009	0.012	0.052
	Z	26.9	34.1	162.0	0.009	0.011	0.054
9	X	26.9	34.1	155.3	0.009	0.011	0.052
	Y	25.8	32.8	166.3	0.009	0.011	0.056
	Z	27.2	34.4	162.3	0.009	0.012	0.054
11	X	25.5	32.3	148.3	0.009	0.011	0.050
	Y	26.3	33.4	155.2	0.009	0.011	0.052
	Z	26.5	33.5	159.2	0.009	0.011	0.053

Таблица 2. Распределение ошибок уравненных координат точек блоков

Интервалы ошибок, м	Количество ошибок в %%		
	по оси X	по оси Y	по оси Z
0.0 < D < 33.3	69.4	69.5	68.8

$33.3 < D < 66.7$	25.7	25.6	26.4
$66.7 < D < 100.0$	4.5	4.5	4.4
$100.0 < D < 133.3$	0.4	0.4	0.4
$133.3 < D < 200.0$	менее 0.1	менее 0.1	менее 0.1

Таблица 3. Вероятная точность уравненных фототриангуляционных блоков

Число колец в блоке	В масштабе снимка в мм								
	По оси X			По оси Y			По оси Z		
	min	средн.	max	min	средн.	max	min	средн.	max
3	0.005	0.012	0.023	0.005	0.012	0.023	0.005	0.013	0.027
5	0.005	0.012	0.023	0.005	0.012	0.023	0.005	0.013	0.027
7	0.005	0.012	0.028	0.005	0.012	0.025	0.005	0.013	0.028
9	0.005	0.012	0.023	0.005	0.012	0.025	0.005	0.013	0.027
11	0.005	0.012	0.028	0.005	0.012	0.025	0.005	0.013	0.031

Сказанное позволяет утверждать, что идея уравнивания фотограмметрических построений с одновременным использованием нескольких систем координат открывает перспективы на те грядущие времена, когда, например, задача съемки небесных тел станет реальной. В настоящее время эта идея может найти применение в наземной съемке, где она позволит всегда, вне зависимости от положения камеры и объекта съемки, задавать опорные данные только в общепринятой геодезической системе координат, не вводя частных, собственных систем координат для отдельных объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антипов, И.Т. Математические основы пространственной аналитической фототриангуляции / И.Т. Антипов. – М.: Картгеоцентр-Геодезиздат, 2003. – 296.
2. Антипов, И.Т. Об использовании систем угловой ориентировки снимков / И.Т. Антипов // ГЕО-Сибирь-2006, Т. 3, ч. 1. Мониторинг окружающей среды, геоэкология, дистанционные методы зондирования Земли фотограмметрия: сб. материалов науч. конгр. «Геосибирь-2006».- Новосибирск: СГГА, 2006. – С. 52 – 58.

© И.Т. Антипов, 2007

УДК 528.7

А.П. Гук

СГГА, Новосибирск

К.А. Худогизов

Администрация президента и правительства Республики Саха, Якутск

Л.Г. Евстратова

СГГА, Новосибирск

ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГРАНИЦ МУНИЦИПАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ МАЛООБЖИТЫХ РАЙОНОВ

Особенность фотограмметрической обработки космических снимков в малообжитых районах Крайнего Севера заключается в выборе опорных точек для привязки снимков, то есть точек, необходимых для сбора информации по снимкам и их трансформирования. Имеющиеся топографические карты устарели. Естественные контуры (контуры леса, рек, угодий) существенно изменились. Соответственно, возникает проблема привязки информации, получаемой по космическим снимкам.

Развитие космических съемочных систем позволит принципиально по-новому решить проблему привязки снимков. Новый подход к привязке космических снимков малообжитых районов заключается в следующем.

Предлагается схема привязки информации, полученной по космическим снимкам.

Для проектирования границ муниципальных образований малообжитых районов используются карты масштаба 1:100 000 и крупнее. Соответственно снимки среднего разрешения, полученные съемочными системами Landsat, SPOT, IRS могут быть также использованы для решения этой задачи. Более того, ввиду генерализации естественные границы природных образований являются более достоверными, чем границы, нанесенные на топографических картах.

Известно, что существует два подхода к определению координат точек местности по снимкам:

- На основе использования элементов внешнего ориентирования снимков, определенных в полете;
- По опорным точкам.

В первом подходе вычисление координат точек местности осуществляется путем прямых вычислений на основе выбранной модели связи координат точек местности и снимка по элементам внешнего ориентирования снимка, полученных в результате физических измерений (GPS, INS и т.д.).

Во втором случае сначала решается обратная задача: по опорным точкам определяются элементы внешнего ориентирования снимков, а затем по измеренным координатам точек на снимке вычисляются координат точек местности с использованием выбранной математической модели.

Естественно, что точность определения координат как в первом, так и во втором способах зависит от точности определения элементов внешнего ориентирования и математической модели, используемой для вычислений [1].

При обработке космических снимков используются элементы внешнего ориентирования, определенные по орбитальным данным. Это дает возможность выполнить привязку снимков, трансформирование снимков и вычислить по измерениям на снимках координаты точек местности с определенной точностью. Часто для повышения точности обработки космических снимков координаты точек местности уточняются на основе полиномиального подхода [3].

Коэффициенты полиномов вычисляют по опорным точкам, координаты которых определяют по картам.

В настоящее время практически для любого участка поверхности Земли можно получить снимки определенного уровня разрешения и геометрической точности. На рис. 1 показана схема покрытия территории различными съемочными средствами. Соответственно можно построить схему привязки снимков: опорные точки для снимков более низкого разрешения (имеющих больший захват на местности) определять по снимкам более высокого разрешения. Причем координаты точек, выбранных в качестве опорных, определяются для снимков высокого разрешения – по орбитальным станциям, а для аэрофотоснимков из результатов фототриангуляции [2]. Также в качестве дополнительных данных можно использовать топографические карты и пункты ГГС. На рис. 1 показаны участки, на которые получают снимки высокого разрешения или аэрофотоснимки выбираются в соответствии с известной схемой расположения точек для трансформирования полиномиальным способом [3].

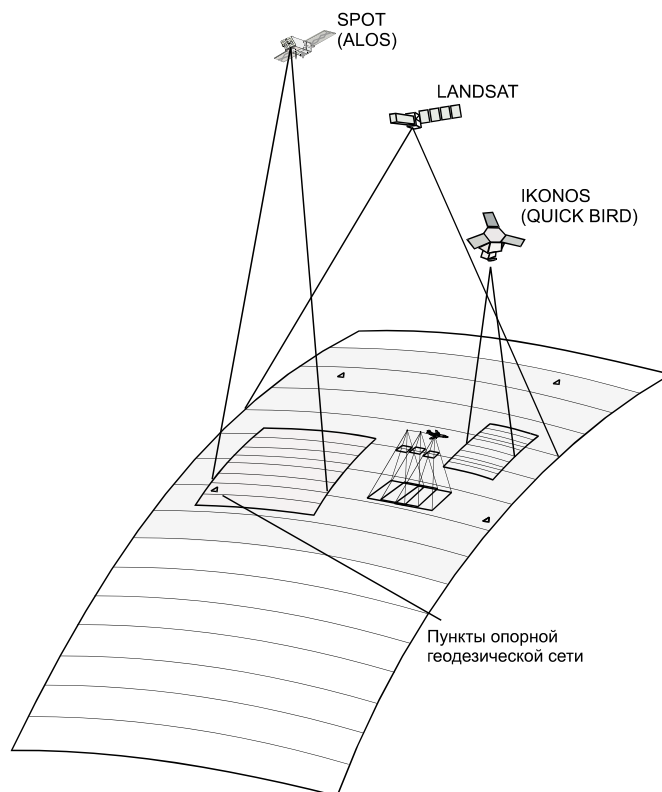


Рис. 1. Схема покрытия территории аэрокосмическими съемочными средствами

Для реализации предложенной схемы можно использовать разработанный на кафедре фотограмметрии и дистанционного зондирования СГГА программный комплекс MonoSDS, который является эффективным средством для одновременной работы со снимками и картами различных масштабов, оперативного выполнения фототриангуляции, трансформирования снимков на основе различных математических моделей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Евстратова Л.Г. Разработка технологий создания цифровых карт по аэрокосмическим снимкам на основе метода свободно ориентированных моделей: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук / Евстратова, Л.Г. – Новосибирск: СГГА, 2005.
2. Евстратова Л.Г. Разработка технологии создания цифровых карт различных масштабов по свободно ориентированной маршрутной сети / Л.Г. Евстратова // Геодезия и картография. – 2004. – № 9. – С. 42–44.
3. Гук А.П. Современное состояние и перспективное развитие фотограмметрических технологий, дистанционных методов и мониторинга по аэрокосмической информации / А.П. Гук, И.Т. Антипов // Материалы междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2005», Мониторинг окружающей среды, геоэкология, дистанц. методы зондирования земли, 25–29 апр. 2005 г., Т. 5. – Новосибирск: СГГА, 2005. – С. 3–9.

© А.П. Гук, К.А. Худогизов, Л.Г. Евстратова, 2007

УДК 528.711.089.6

В.Л. Быков, Л.В. Быков

Западно-Сибирский филиал ФГУП «Госземкадастрсъемка», Омск

А.А. Макаров

СиБАДИ, Омск

РЕЗУЛЬТАТЫ КАЛИБРОВКИ СНИМКОВ НА ИСПЫТАТЕЛЬНОМ ПОЛИГОНЕ

Прогресс в области цифровых технологий привел к появлению на рынке высококачественной цифровой фотосъемочной аппаратуры. Малоформатные и среднеформатные цифровые камеры с успехом используются при наземной стереотопографической съемке, а также при аэрофотосъемке с беспилотных, легких летательных аппаратов и средств малой авиации. Разрабатываются широкоформатные цифровые аэрофотосъемочные комплексы, способные конкурировать с лучшими образцами пленочных камер.

С появлением цифровой техники для аэрофотосъемки изменились подходы к определению элементов внутреннего ориентирования камер [1]. Визуальные лабораторные способы калибровки, успешно применявшиеся на протяжении многих лет, становятся непригодными для исследования цифровой аппаратуры. В большинстве аппаратов объективы и светочувствительные твердотельные элементы (ПЗС или КМОП) не отделяются от камер, что не позволяет непосредственно исследовать оптическую систему аппарата. Более эффективными являются лабораторные фотографические способы калибровки, основанные на использовании фотографий тест-объектов.

Широкое распространение получили спутниковые навигационные системы. Благодаря их внедрению в топографо-геодезическое производство в

корне изменилась технология геодезических, топографических, аэрофотосъемочных и фотограмметрических работ. Использование спутниковых навигационных систем при калибровке снимков позволяет успешно реализовать и усовершенствовать известные принципы полевой калибровки, использование которых ограничивалось отсутствием эффективных средств позиционирования в пространстве. Исследования способов калибровки, основанных на сочетании методов фотограмметрии и спутникового позиционирования, представляются актуальными.

Для калибровки широкоформатных разработан способ полевой калибровки на испытательном полигоне. Идея способа основана на использовании пары разномасштабных снимков с измеренной разностью высот фотографирования. Разность масштабов определяется по отрезкам, симметричным относительно начала координат.

$$f = \frac{\Delta H}{\Delta m} \quad (1)$$

где ΔH – разность высот фотографирования;

Δm – разность масштабов.

Современные средства спутникового позиционирования позволяют с высокой точностью определить как разности высот фотографирования, так и координаты центров фотографирования. Более подробное изложение способа представлено в работе [2].

В теоретической части исследований получены формулы предвычисления требуемой точности определения разности высот фотографирования:

$$m_{\Delta H}^2 = f^2 \cdot \frac{b^2 \cdot m_B^2 + B^2 \cdot m_b^2}{b^4} \sqrt{2} \quad (2)$$

Результаты расчетов по формуле (2) приведены в табл. 1.

Таблица 1. Требуемая точность определения разности высот фотографирования

f (мм)	88	100	150	300
$m_{\Delta H}$ (м)	0.09	0.10	0.15	0.30

Современные средства спутниковой навигации позволяют получить разности высот фотографирования с требуемой точностью.

Экспериментальные исследования алгоритмов были выполнены с помощью имитационной модели аэрофотосъемки, которая может быть выполнена с помощью аэрофотоаппарата РС-30. Формат кадра 230 на 230 мм. Исследования проводились для объективов с фокусными расстояниями 88, 153 и 303 мм, входящих в комплекс РС-30. Моделировалась съемка с двух высот.

Для достоверного моделирования тест-объект был создан в виде набора точек равнинной местности. Координаты точек были определены по карте масштаба 1:10000 с высотой сечения рельефа 2.5 м. Для эксперимента были выбраны 16 опорных точек на территории примерно в 5 км². При моделировании создавались снимки масштаба 1:12000.

Модель предусматривала расчет положения опорных точек на двух снимках. При моделировании было предусмотрено изменение отношения высот фотографирования крупномасштабного и мелкомасштабного снимков. Коэффициент увеличения высоты фотографирования составлял 1.5 и 2.0.

Для сохранения масштаба модели высота фотографирования мелкомасштабного снимка изменялась в соответствии с фокусным расстоянием. При фокусном расстоянии 88 мм высота составила 1056 м, для 153 мм – 1836 м, а для $f = 303$ мм $H = 3636$ м. Такая высота фотографирования превышает гиперфокальное расстояния для заданных фокусных расстояний при допустимом кружке нерезкости 0.01 мм.

Условия эксперимента

Эксперимент устанавливал зависимость точности определения фокусного расстояния при изменении отношения случайных и систематических ошибок, вводимых в имитационные модели. Значения случайных ошибок вводились по нормальному закону распределения с математическим ожиданием равным 0 и со среднеквадратическим отклонением, равным 0.01 мм. Систематические ошибки имеют радиальный характер $\delta = k r^3$. Коэффициент k изменялся от 0.00000001 до 0.0000001. Такие величины приводят к изменению ошибки на краю снимка от 0.01 мм до 0.1 мм, что соответствует изменению отношения систематической ошибки к случайной от 1 до 10.

Фокусное расстояние определяется по моделям с введенными случайными и систематическими ошибками. Разность высот считается известной, так как в условиях калибровки она определяется по координатам центров фотографирования, полученных по GPS технологии. Погрешность определения высот фотографирования изменялась от 0.2 м до 0.5 м. Вычисление разности масштабов производилось по базисам, выбранным на крупномасштабном и мелкомасштабном снимках.

Оценка устойчивости полученного решения производится по отклонениям полученного значения фокусного расстояния от макетного значения. Для повышения достоверности оценка производится по отклонениям в 100 реализациях. Среднеквадратическая ошибка определения фокусного расстояния вычислялась по формуле (9):

$$m_f = \sqrt{\frac{\sum \Delta_f^2}{n}} \quad (9)$$

Оценка достоверности полученного решения производится по отклонению среднего значения фокусного расстояния, полученного в 100 итерациях, от истинного значения.

$$\delta_{f_{ch}} = f_{cp} - f_0 \quad (10)$$

Таблица 2.

Фокусное расстояние 88 мм

δ/M		10		1	
ΔH	mh	Устойчивость	Достоверность	Устойчивость	Достоверность
1,5	0.2	0,026	-0,019	0,017	-0,002
	0.5	0,029	-0,018	0,018	-0,001
2,0	0.2	0,021	-0,013	0,015	0,002
	0.5	0,019	-0,011	0,016	0,001

Фокусное расстояние 153 мм

δ/M		10		1	
ΔH	mh	Устойчивость	Достоверность	Устойчивость	Достоверность
1,5	0.2	0,047	-0,031	0,033	-0,007
	0.5	0,043	-0,028	0,037	0,005
2,0	0.2	0,036	-0,022	0,028	-0,001
	0.5	0,033	-0,019	0,029	-0,002

Фокусное расстояние 300 мм

δ/M		10		1	
ΔH	mh	Устойчивость	Достоверность	Устойчивость	Достоверность
1,5	0.2	0,095	-0,070	0,067	-0,007
	0.5	0,094	-0,063	0,064	-0,007
2,0	0.2	0,074	-0,049	0,063	0,008
	0.5	0,073	-0,041	0,065	-0,017

Анализ полученных результатов показал:

- Результат решения наиболее достоверен при меньших абсолютных значениях фокусного расстояния;
- Результат решения не зависит от ошибки определения высоты фотографирования в пределах от 0.2 м до 0.5 м.
- При прочих равных условиях уменьшение влияния систематической ошибки в 10 раз приводит к улучшению достоверности решения в 8-10 раз. При этом устойчивость решения увеличивается в среднем в 1.5 раза.
- Увеличение отношения высоты фотографирования крупномасштабного снимка к мелкомасштабному от 1.5 до 2.0 раз значительно улучшает результат решения только при больших абсолютных значениях фокусного расстояния.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований положены в основу построения испытательного полигона на территории Омской области.

Программа калибровочных испытаний принята к внедрению в ФГУП «Госземкадастрсъемка» – ВИСХАГИ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Предвычисление точности определения координат точек объекта в ближней фотограмметрии. Ю.С. Тюфлин и др. // Геодезия и картография. – 2004. – № 11. – С. 29–32.
2. Калибровка снимков по плоскому испытательному полигону. Б.К. Малявский и др. // Сб. материалов междунар. конгр. «ГЕО-Сибирь-2006», Новосибирск, 24-28 апр. 2006 г.: - Новосибирск: СГГА, 2006. – С. 68–73.

© В.Л. Быков, Л.В. Быков, А.А. Макаров, 2007

УДК 528.852

П.Д. Гук

СГГА, Новосибирск

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ ЦИФРОВОЕ ОРТОТРАНСФОРМИРОВАНИЕ

Фотограмметрия занимается изучением формы, размеров, положения в пространстве различных объектов и их количественных и качественных характеристик по изображениям этих объектов. Одним из продуктов фотограмметрических технологий, который позволяет решить часть указанных проблем, является фотоплан.

Принципиально создание фотоплана заключается в преобразовании снимков путём исправления их за влияние «углов наклона» и «рельефа». Преобразования могут выполняться разными способами: аналитическим, фотомеханическим и цифровым. В настоящее время ведущее положение занял цифровой метод. Исправление снимков за углы наклона не представляет сложности, т. к. связь между координатами наклонного и горизонтального снимков выражается строгими математическими зависимостями. Исправление изображения за влияние рельефа – более сложный процесс, т. к. рельеф нельзя выразить единой функциональной зависимостью, т. е. практически надо использовать зависимость между высотой каждой точки на местности и её положением на снимке.

Получить полную информацию о рельефе очень сложно. Для решения этой задачи в настоящее время создают цифровые модели рельефа, с которых в последующем получают данные о рельефе для каждой точки снимка.

Как отмечалось ранее, записать единую функциональную зависимость для рельефа для всей площади нельзя. Поэтому любая функция, используемая для характеристики рельефа, позволяет определить данные для конкретной точки с той или иной степенью точности. Чтобы эти данные получить точнее, нами предлагается использовать идею, используемую в дифференциальном способе трансформирования. Известно, что в этом способе высота для каждой трансформируемой точки определяется по модели, построенной на универсальном приборе. Т.к. определить высоту для каждой точки практически невозможно, то это определение производится для элементарных участков, в пределах которых остаточная ошибка за рельеф не превышает допуска. Размер элементарного участка подсчитывается по формуле (1):

$$\delta r_h = \frac{rl}{2f} \operatorname{tgi}, \quad (1)$$

где r – расстояние на снимке от точки надира n до определяемой точки;

l – размер элементарного участка;

i – угол уклона местности.

Из формулы (1) выразим формулу (2) для вычисления размера элементарного участка:

$$l = \frac{2f * \delta r_h}{r * \operatorname{tgi}}. \quad (2)$$

Сканируя модель полосами вдоль оси y , получим полосу, исправленную за рельеф. Точность ортотрансформирования будет зависеть только от отступления реального рельефа от величины, определяющей δr_h для элементарного участка.

Аналогичную технологию можно применить при цифровом трансформировании. Суть этой технологии будет заключаться в следующем:

1. Выполняют расчёт ширины полосы сканирования в геодезической системе координат;

2. Выполняют сканирование модели, построенной цифровым методом, автоматическим способом, задавая координаты элементарных участков координатами, соответствующими вычисленным размерам элементарного участка;

3. После определения Z для каждого элементарного участка вычисляют координаты точки снимка, соответствующей центру элементарного участка, по формулам (3) и (4):

$$x = -f \frac{a_1(X - X_S) + b_1(Y - Y_S) + c_1(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)}, \quad (3)$$

$$y = -f \frac{a_2(X - X_S) + b_2(Y - Y_S) + c_2(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)}; \quad (4)$$

4. После этого вычисляют координаты этой же точки для трансформированного снимка по формулам, аналогичным приведённым выше, только углы α , ω , κ принимают равными 0;

5. Составляют матрицу координат точек наклонного снимка и матрицу координат точек горизонтального снимка, вычисленных по формулам, приведённым выше;

6. Яркости матрицы точек наклонного снимка присваивают соответственным координатам точек горизонтально снимка.

Преимуществом данного метода является то, что экстремальное отклонение рельефа от плавных форм будет сказываться меньше, чем в существующем в настоящее время методе.

© П.Д. Гук, 2007

АЛГОРИТМ ОБРАТНОГО ТРАССИРОВАНИЯ ЛУЧЕЙ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ МАКЕТНЫХ СНИМКОВ

Цифровые макетные снимки, как и ряд других тест-объектов, используются для исследования цифровых фотограмметрических станций [1]. Для их создания задается трехмерная сцена, которая включает в себя несколько моделей, в том числе модель съёмочной системы и объекта съёмки в единой системе координат. В качестве модели объекта съёмки в данном алгоритме используется цифровая модель рельефа (ЦМР).

Построение ЦМР осуществляется с помощью полинома

$$P(X, Y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} T_i(X) T_j(Y), \quad (1)$$

где a_{ij} – коэффициенты полинома; $\hat{T}_i(X), \hat{T}_j(Y)$ – ортонормированные полиномы Чебышева, i и j указывают на степень полинома.

Участок моделирования разбивается на фрагменты, которые делятся на элементарные участки. Поверхность в каждом элементарном участке аппроксимируется полиномом (1) при условии непрерывности на границах смежных участков [2].

Модель съёмочной камеры задается несколькими параметрами, минимальный набор которых составляют фокусное расстояние, координаты главной точки, размер снимка, число элементов матрицы (рецепторов), разрешение и элементы внешнего ориентирования снимка.

При формировании цифрового макетного снимка (битового или реалистичного) необходимо, чтобы заданной точке на снимке с координатами x, y соответствовала бы точка на поверхности ЦМР с известными координатами X, Y, Z .

В компьютерной графике [3] при проецировании трехмерных объектов на экран используется так называемый метод трассирования лучей, который основывается на воспроизведении в математической форме хода лучей в съёмочных системах. При этом различают два способа трассирования лучей – прямое и обратное.

В случае прямого трассирования берут точку на поверхности объекта с координатами X, Y, Z и, используя формулы связи координат точки местности и снимка, вычисляются координаты точки x, y на изображении.

При обратном трассировании берут центр рецептора (пикселя) на приемнике изображения и моделируют путь луча из него на объект, т.е. находят точку пересечения луча с поверхностью объекта. В обоих случаях необходимо учитывать невидимые стороны объектов.

В данном случае, при формировании цифровых макетных аэроснимков с использованием только рельефа по предлагаемому алгоритму, процесс учета

невидимых точек отсутствует. Это обусловлено тем, что найденная точка пересечения проецирующего луча с поверхностью ЦМР является ближайшей к съемочной системе, и потому является видимой.

Сущность алгоритма заключается в следующем. В данной системе координат задается модель кадровой съемочной системы с элементами внутреннего (f, x_o, y_o, l_x, l_y) и внешнего ориентирования ($X_s, Y_s, Z_s, \alpha, \omega, \chi$), и ЦМР (рис. 1)

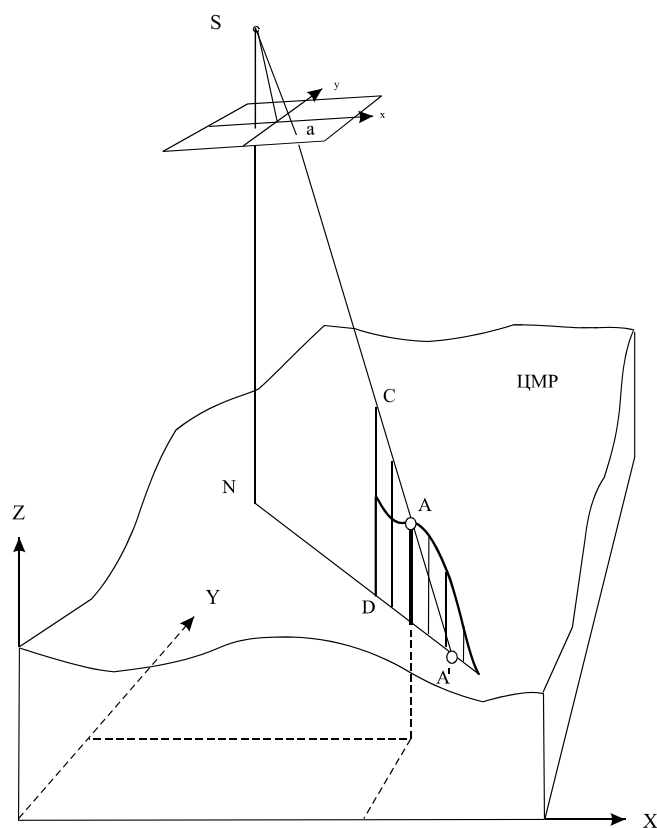


Рис. 1. Обратное трассирование луча

Выберем некую точку a на снимке с координатами x, y и определим её координаты X, Y, Z на поверхности ЦМР, т.е. найдем точку пересечения проецирующего луча Sa с поверхностью модели рельефа. Для этого сначала находим координаты X', Y' точки пересечения A' проецирующего луча Sa со средней плоскостью рельефа по формулам

$$\left. \begin{aligned} X' - X_s &= (Z_{cp} - Z_s) \frac{a_1(x-x_o) + a_2(y-y_o) - a_3f}{c_1(x-x_o) + c_2(y-y_o) - c_3f} \\ Y' - Y_s &= (Z_{cp} - Z_s) \frac{b_1(x-x_o) + b_2(y-y_o) - b_3f}{c_1(x-x_o) + c_2(y-y_o) - c_3f} \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

Затем в надирной плоскости SNA' восстанавливаем рельеф вдоль линии NA' с заданным шагом, обеспечивающим точность определения координат точки пересечения A с поверхностью рельефа. Зона восстановления профиля

рельефа вдоль линии NA' ограничивается с целью сокращения времени вычисления. При этом используется известная формула смещения точки за рельеф

$$\delta r_h = \frac{h}{H} r, \quad (3)$$

где $r = NA'$;

h – максимальное превышение точек ЦМР над средней плоскостью;

H – высота фотографирования над средней плоскостью.

При восстановлении рельефа определяется номер фрагмента и элементарный участок, куда попал узел сетки.

Далее, рассматривая треугольник $A'CD$, определяем два ближайших узла сетки, между которыми находится точка A . Данная задача решается путем перебора разностей между вертикальными катетами образованных треугольников и отметок рельефа в узлах сетки. Перебор начинается от точки надира N . Если полученная разность меняет знак при переходе от одного узла к другому, значит, между этими смежными узлами и находится точка пересечения A с поверхностью ЦМР. Составляются уравнения двух прямых, первая из которых проходит через две найденные точки, расположенные на поверхности рельефа, а вторая – через центр проекции S и A' . Решая совместно полученные уравнения двух прямых, находим координаты точки пересечения проецирующего луча с поверхностью рельефа и, следовательно, отметку Z_A точки A . Затем по формулам

$$\left. \begin{aligned} X_A - X_S &= (Z_A - Z_S) \frac{a_1(x-x_0)+a_2(y-y_0)-a_3f}{c_1(x-x_0)+c_2(y-y_0)-c_3f} \\ Y_A - Y_S &= (Z_A - Z_S) \frac{b_1(x-x_0)+b_2(y-y_0)-b_3f}{c_1(x-x_0)+c_2(y-y_0)-c_3f} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

вычисляются плоские координаты X_A, Y_A точки A .

Точность определения отметки рельефа в точке пересечения проецирующего луча с рельефом зависит от типа рельефа (горы, равнина), шага сетки и составляет $1 \cdot 10^{-2} - 3 \cdot 10^{-3}$ м. Скорость определения координат точек местности по заданным координатам точек макетного снимка зависит от заданной точности и мощности компьютера.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коркин, В.С. Разработка макетных снимков для тестирования цифровых фотограмметрических систем В.С. Коркин// Соврем. проблемы геодезии и оптики: материалы междунар. научно-техн. конф., посвящ. 65-летию СГГА – НИИГАиК, 23-24 нояб. 1998 г. – Новосибирск: СГГА, 1998. – С. 62–69.
2. Коркин, В.С. Моделирование рельефа с использованием ортонормированных полиномов Чебышева / Коркин В.С. // Сб. материалов X Междунар. научно - практ. конф. “Методы дистанционного зондирования и Гис-технологии для оценки состояния окружающей среды, инвентаризации земель и объектов недвижимости”. GEOINFOCAD-ASIA, (МГУГиК), 20-29 мая 2006. – Китай. – С. 56–62.
3. Иванов, В.П. Трехмерная компьютерная графика / В.П. Иванов, А.С. Батраков; под ред. Г.М. Полищука. – М.: Радио и связь, 1995. – 224 с.

**ТЕХНОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ АНАЛИТИЧЕСКОЙ СЕТИ
ФОТОТРИАНГУЛЯЦИИ ДЛЯ МАЛОКОНТУРНЫХ ЛЕСНЫХ ТЕРРИТОРИЙ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ MONOSDS И PHOTOCOM**

В настоящее время основной объём обновления лесоустроительных карт выполняется аэрофототопографическими методами. Аэрофототопографические методы предусматривают обеспечение района работ точками планово-высотного обоснования, определяемыми или геодезическими методами, или с помощью топографических карт.

Как правило, на снимках лесных территорий отсутствует достаточное количество чётких контуров, которые можно использовать в качестве опорных точек, а на некоторых снимках они отсутствуют совсем. В связи с этим привязка снимков к местности затруднена.

Построение пространственной сети аналитической фототриангуляции по аэроснимкам лесных территорий позволит сократить количество опорных точек, необходимых для привязки снимков, и повысить геометрическую точность создаваемых цифровых карт и планов.

Для решения данной задачи предлагается использовать комплексы программ MonoSDS и PHOTOCOM, разрабатываемые на кафедре фотограмметрии и дистанционного зондирования СГГА.

Программный комплекс MonoSDS предназначен для расширения возможности цифровой фотограмметрической станции SDS по обработке цифровых материалов космической, воздушной и наземной съёмки в монорежиме. К его основным функциональным возможностям относятся:

- Привязка снимков различного типа к растровым и векторным картам по опорным точкам и по контурам в интерактивном режиме;
- Перенос информации со снимка на карту (рисовка контуров по одиночному снимку);
- Трансформирование контуров с использованием различного типа преобразований (в зависимости от исходной информации);
- Трансформирование снимков;
- Обновление цифровых карт, топографической информации в геоинформационных системах.

Отличительной особенностью MonoSDS является наличие двух графических панелей, каждая из которых может одновременно отображать растровое изображение и цифровую картографическую информацию. Две графические панели могут использоваться для решения традиционных задач стереофотограмметрии путём идентификации соответствующих точек, изображенных на разных снимках съёмочного маршрута. С их помощью также удобно выполнять пространственную привязку данных по опорным точкам в интерактивном режиме, а двунаправленный обмен векторными данными между панелями позволяет выполнять обновление фрагментов цифровой карты.

Координатная связь между графическими панелями и различные режимы отображения позволяют визуально контролировать корректность собранной семантической информации, не перегружая цифровой снимок. При необходимости на экране можно оставить только одну из графических панелей.

Программа MonoSDS обладает широкими возможностями по динамическому трансформированию данных. В настоящий момент реализованы модули для выполнения аффинного преобразования, проективного преобразования, трансформирования по зонам, радиального трансформирования второго порядка (для компенсации дисторсии), эпполярного трансформирования, преобразования данных по законам центральной проекции.

Программный компонент PHOTOCOM предназначен для аналитического фотограмметрического сгущения опорных данных с использованием фотограмметрических измерений, выполненных на цифровой фотограмметрической станции или на аналитическом универсальном приборе. Результаты сгущения в виде каталога координат точек уравненной фототриангуляционной сети и элементов внешнего ориентирования одиночных снимков и стереопар используются в качестве исходных данных для последующих технологических процессов.

Технологическая схема выполнения аналитической фототриангуляции с использованием комплекса программ MonoSDS и PHOTOCOM приведена на рис. 1.

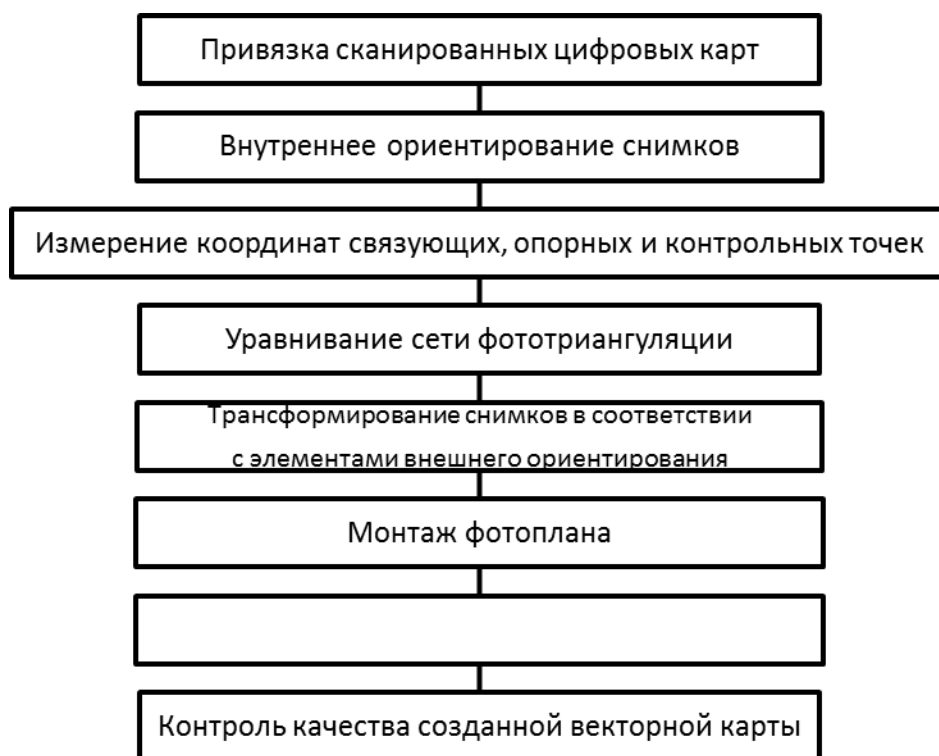


Рис. 1. Технологическая схема выполнения аналитической фототриангуляции

MonoSDS выполняет общее управление комплексом программ MonoSDS и PHOTOCOM, осуществляет сбор необходимой для пространственной фототриангуляции информации и использует результаты сгущения опорных

данных для привязки и трансформирования аэрофотоснимков, первичного сбора картографической информации.

Первым этапом данной технологической схемы является подготовка топографической основы, которая заключается в ориентировании цифрового изображения топографических карт. Привязка может осуществляться как в программе MonoSDS, так и в других ГИС-продуктах, например, в MapInfo. Процесс ориентирования карт заключается в измерении координат узлов километровой сетки топографической карты с указанием положения точек в системе координат Гаусса-Крюгера и установлении связи между координатами карты и геодезической системой координат. Привязка осуществляется по избыточному числу опорных точек с использованием полинома первой степени, что позволяет оценить точность выполнения процесса ориентирования топографических карт и, соответственно, точность опорных данных для фототриангуляции.

Внутреннее ориентирование снимков осуществляется по координатным меткам сканированных снимков и по паспорту АФА с использованием полинома первой степени. Точность внутреннего ориентирования определяется по невязкам на координатных метках.

После окончания подготовительных работ проводятся измерения координат связующих, опорных и контрольных точек на снимках. Для измерения координат связующих точек поочерёдно загружают стереопары аэрофотосъёмочного маршрута, и в каждой из шести стандартных зон измеряют по три точки. Идентификация точек на соседнем снимке осуществляется в полуавтоматическом режиме с использованием корреляционных алгоритмов идентификации. Для измерения координат опорных точек в одну из панелей MonoSDS загружают снимок маршрута, в другую – привязанную топографическую карту. Поиск соответственных точек осуществляется визуально, а их идентификация – в ручном режиме. Точка автоматически помечается как опорная, с указанием её плановых координат. Высотная отметка определяется оператором по горизонталям топографической карты. Часть измеренных опорных точек помечают как контрольные.

Уравнивание сети аналитической фототриангуляции осуществляется посредством программного модуля PHOTOCOM, вызов которого производится непосредственно из программы MonoSDS. При этом указывается фокусное расстояние фотоаппарата, точность используемых опорных данных и высота фотографирования. Результаты фототриангуляции представлены в виде элементов внешнего ориентирования снимков и в виде каталога опорных точек сети сгущения.

Затем производится трансформирование снимков на основании вычисленных элементов внешнего ориентирования, фокусного расстояния АФА и средней высоты изображённой на снимках местности. Если смещение точек на снимках, вызванное влиянием рельефа, превышает допуск, то выполняется ортотрансформирование с использованием регулярной цифровой модели рельефа.

Трансформированные снимки монтируются в единый фотоплан.

Векторизация контуров объектов на снимках производится по единому фотоплану, без разрывов контуров и их последующей сводки.

Контроль точности созданной цифровой карты осуществляется путём её наложения на слой растровой топографической основы и измерения расхождений между вновь оцифрованными контурами и контурами на топографической карте.

Предложенная на кафедре фотограмметрии и дистанционного зондирования СГГА технология была апробирована совместно с ФГУП Запсиблеспроект; были получены первые производственные результаты.

За 10 рабочих дней производственная группа, состоящая из 5 человек, обработала по данной технологии 170 снимков.

Снимки формата 18*18 см и масштаба 1: 5000 получены АФА с фокусным расстоянием 140 мм. Продольное перекрытие снимков в маршруте составляет около 80 %. Были получены цифровые снимки с разрешением 800 dpi. Особенностью маршрута является его непрямолинейность, переходы самолёта-аэрофотосъёмщика с одного курсового угла на другой сопровождаются большими углами взаимного разворота снимков.

Поскольку сфотографированная территория представляла собой в большей части лесные массивы, возникала проблема выбора связующих точек в стандартных зонах.

Особую сложность при объединении моделей представляли места, где осуществлялся разворот самолета.

Обработка маршрута осуществлялась отдельными блоками, количество снимков изменялось от 5 до 25. Маршруты были разделены на секции для организации параллельной обработки снимков. Каждая секция ориентировалась по 4 опорным точкам, расположенным по краям. Координаты опорных точек были определены по карте масштаба 1:25000. В качестве опорных точек использовались пересечения грунтовых дорог и просек, элементы гидрографии. Расхождения на опорных точках при уравнивании в программе PHOTOCOM составили от 5 до 15 метров.

По полученным элементам внешнего ориентирования в программе MonoSDS осуществлено трансформирование снимков и монтаж фотоплана. Полученные фотопланы экспортировались в MapInfo и совмещались с топографическими картами.

Контроль точности построения фотоплана осуществлялся по линиям разреза соседних снимков и по контрольным точкам. Контроль показал высокую точность монтажа, максимальные ошибки составляли 1-3 м на местности. Расхождения координат на контрольных точках лежат в пределах от 0 до 20 м.

После наложения смонтированного фотоплана на карту появилась возможность опознавания дополнительных опорных точек, которые не всегда удавалось опознать до фототриангуляции. Дополнительные точки можно использовать для повышения точности привязки фотоплана.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ЦИФРОВОЙ АЭРОФОТОСЪЕМКИ, ПОЛУЧЕННОЙ С БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

В настоящее время активно развивается направление использования цифровых малоформатных фотокамер для решения фотограмметрических задач. По материалам аэросъемок такими камерами оперативно обновляются и создаются планы на небольшие участки местности.

В Западно-Сибирском филиале ФГУП «Госземкадастрсъемка» - ВИСХАГИ разработан беспилотный аэрофотосъемочный комплекс. Составными частями комплекса являются:

- Радиоуправляемая авиамодель «Эльф» ПП-40. Авиамодель развивает скорость горизонтального полета 50-80 км/ч. Рабочая высота полета колеблется в пределах от 100 до 400 метров;
- Цифровая фотокамера Sony DSC-P200. ПЗС-матрица фотокамеры содержит около 7,2 млн. пикселей. Диапазон фокусных расстояний: 7,9-23,7 мм;
- Комплект телевизионно-телеметрического оборудования.

Беспилотный аэрофотосъемочный комплекс позволяет оперативно выполнять цифровую аэрофотосъемку локальных участков местности.

Материалы аэрофотосъемки, выполняемой с беспилотной авиамодели, имеют следующие особенности:

- Аэрофотосъемочные маршруты не прямолинейны;
- Аэрофотоснимки могут иметь существенные взаимные углы наклона, разворота и значительную разномасштабность;
- Три последовательно полученных снимка могут не иметь зоны тройного перекрытия или эта зона имеет «неправильную» форму.

Обработка материалов такой съемки с использованием цифровых фотограмметрических станций, ориентированных на обработку материалов классической аэрофотосъемки, малоэффективна.

В Западно-Сибирском филиале ФГУП «Госземкадастрсъемка» - ВИСХАГИ разработаны алгоритмы и программное обеспечение для обработки материалов аэрофотосъемки, выполняемой с беспилотной авиамодели. Ключевым звеном в технологии фотограмметрической обработки является метод блочного трансформирования, который реализует задачу плановой фототриангуляции. Учет влияния рельефа осуществляется с использованием цифровой модели плановых радиальных смещений точек [1, 3, 4]. По данной технологии созданы ортофотопланы масштаба 1:2000 на общую площадь более 50 кв.км.

С использованием указанной технологии обработки можно определять только плановые координаты точек местности, ее применение в горных районах неэффективно. Поэтому важным этапом совершенствования технологии фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки, выполняемой с беспилотной авиамодели, является переход к пространственному

фототриангулированию. Построение фототриангуляционной сети должно осуществляться с учетом особенностей съемки с беспилотной авиамодели.

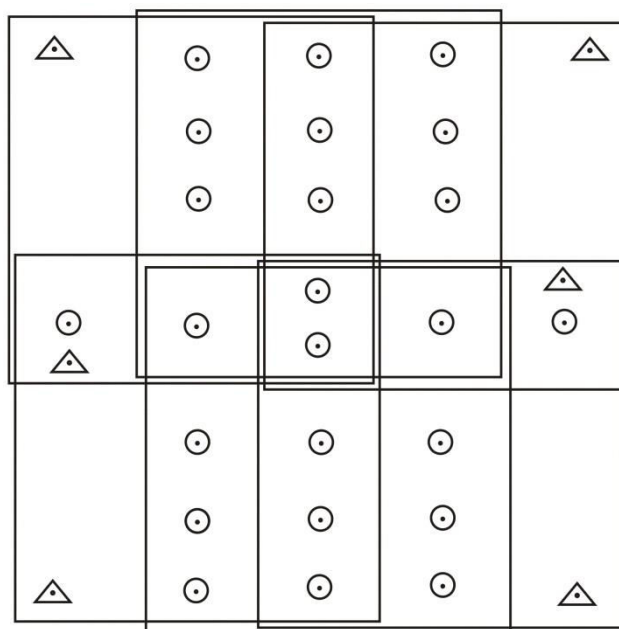
Проведено исследование, цель которого заключалась в установлении возможности построения пространственной фототриангуляционной сети из снимков, имеющих только двойные продольные перекрытия.

Для достижения поставленной цели созданы два макетных блока.

Первый макетный блок соответствует классической аэрофотосъемке. Блок включает в себя два параллельных маршрута по три снимка в каждом (рис. 1).

Макетные снимки соответствуют следующим параметрам аэрофотосъемки:

- Фокусное расстояние 100 мм;
- Высота полета 800 м;
- Размер снимка 23х23 см;
- Масштаб аэрофотосъемки равен 1/8000;
- Продольное перекрытие в блоке составляет 67%;
- Поперечное перекрытие 33%.



△ - Опорная точка.

○ - Определяемая точка.

Рис. 1. Макетный блок с тройными продольными перекрытиями снимков

Первый макетный блок использовался для отладки программного обеспечения и сравнения точности его обработки с оценкой точности обработки второго макета.

Второй макетный блок подобен первому. Отличие состоит в том, что в блоке отсутствуют тройные продольные перекрытия снимков (рис. 2).

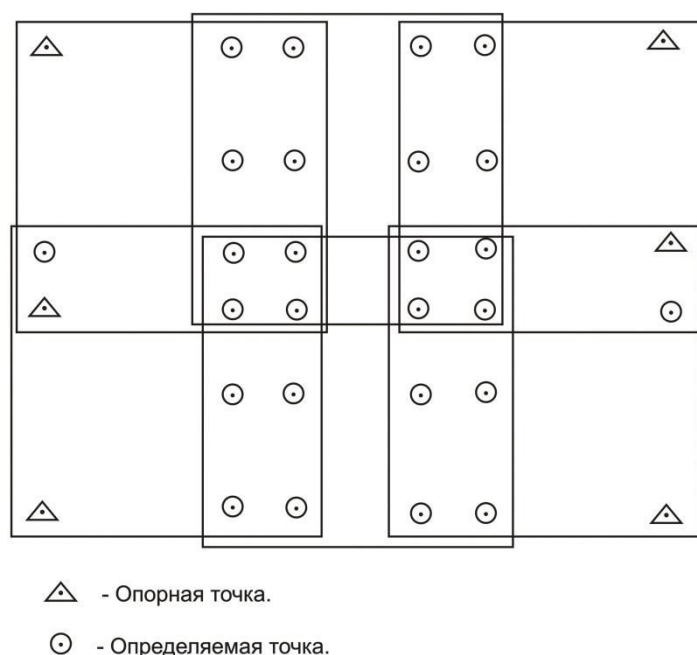


Рис. 2. Макетный блок с двойными продольными перекрытиями снимков

Макетные снимки соответствуют следующим параметрам аэрофотосъемки:

- Фокусное расстояние 100 мм;
- Высота полета 800 м;
- Размер снимка 23х23 см;
- Масштаб аэрофотосъемки равен 1/8000;
- Продольные перекрытия в блоке составляют 40%;
- Поперечные перекрытия 33%.

В пределах первого блока было задано 6 опорных и 24 определяемых макетных точки. Во втором блоке – 6 опорных и 26 определяемых макетных точки. По формулам (1) вычислялось положение этих точек на снимках [2].

$$\begin{aligned}
 x - x_0 &= -f \frac{a_1(X - X_0) + b_1(Y - Y_0) + c_1(Z - Z_0)}{a_3(X - X_0) + b_3(Y - Y_0) + c_3(Z - Z_0)}, \\
 y - y_0 &= -f \frac{a_2(X - X_0) + b_2(Y - Y_0) + c_2(Z - Z_0)}{a_3(X - X_0) + b_3(Y - Y_0) + c_3(Z - Z_0)},
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где X, Y, Z – координаты точек местности;

x, y – координаты точек снимка;

X_0, Y_0, Z_0 – координаты центра фотографирования;

f – фокусное расстояние снимка;

x_0, y_0 – координаты главной точки снимка;

a_i, b_i, c_i – направляющие косинусы.

В координаты точек на снимках вводились случайные ошибки в соответствии с нормальным законом распределения ошибок. Средняя квадратическая ошибка положения точек на снимках составляла около 30 микрометров. Для каждого снимка задавались приближенные элементы внешнего ориентирования и

выполнялось построение фототриангуляционной сети. Фотограмметрическая сеть строилась и уравнивалась одновременно по всем снимкам блока методом связок.

По результатам обработки сети выполнялась оценка точности. Оценивалась достоверность уравнивания, которую характеризовали средние отклонения уравненных координат определяемых точек и уравненных элементов внешнего ориентирования снимков от их истинных значений. Также оценивалась устойчивость решения. Для этого вычислялось среднее квадратическое отклонение уравненного положения точек на снимках от их «измеренного» положения по формулам

$$m_x = \sqrt{\frac{\sum (x_{изм} - x_{ур})^2}{n-1}}, m_y = \sqrt{\frac{\sum (y_{изм} - y_{ур})^2}{n-1}}, \quad (2)$$

$$m_{xy} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2},$$

где m_x – среднее квадратическое отклонение по оси X;

m_y – среднее квадратическое отклонение по оси Y;

m_{xy} – плановое среднее квадратическое отклонение на снимке;

$x_{изм}$, $y_{изм}$ – «измеренные» координаты точек на снимках;

$x_{ур}$, $y_{ур}$ – уравненные координаты точек на снимках.

Для более надежной оценки точности построение каждого блока выполнялось 1000 раз. Итоговая оценка точности показана в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Точность уравнивания сети

$m_{XГ}$, М	$m_{YГ}$, М	$m_{ZГ}$, М	$m_{Xс}$, М	$m_{Yс}$, М	$m_{Zс}$, М	m_{α} , мин.	m_{ω} , мин.	m_{γ} , мин.
Макет 1								
0,34	0,23	0,54	0,38	0,32	0,26	0,88	1,06	0,48
Макет 2								
0,39	0,26	0,53	0,37	0,35	0,30	0,71	1,00	0,57

Таблица 2. Устойчивость уравнивания сети

	m_x , МКМ	m_y , МКМ	m_{xy} , МКМ
Макет 1	17	14	22
Макет 2	16	14	22

Из таблиц видно, что точность результатов обработки и устойчивость решения задачи практически одинаковая.

Таким образом, на основе уравнений коллинеарности можно строить фототриангуляционную сеть, в которой отсутствуют тройные продольные перекрытия снимков.

Перспективными задачами при обработке материалов аэрофотосъемки с беспилотной авиамодели являются:

- Построение пространственной фототриангуляционной сети с самокалибровкой снимков;
- Создание цифровой модели рельефа местности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ессин, А.С. Фотограмметрическая обработка материалов аэровидеосъемки для создания ортофотопланов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.С. Ессин. – Омск, 2006. – 23 с.
2. Лобанов, А. Н. Фотограмметрия / А. Н. Лобанов. – М.: Недра, 1984. – 552 с.
3. Пат. № 2177603 Российская Федерация, G01 C11/30. Способ ориентирования пары снимков / Л.В. Быков, А.П. Макаров, Б.К. Малявский. – № 2001101975/28 ; заявл. 22.01.01 ; опубл. 27.12.01, Бюл. №36. – С. 205.
4. Пат. № 2235292 Российская Федерация, G01 C11/30. Способ создания ортофотопланов по материалам аэровидеосъемки / Л.В. Быков, А.П. Макаров, Б.К. Малявский, А.С. Ессин, М.А. Шумилов. – № 2002128971; заявл. 29.10.02; опубл. 27.08.04, Бюл. № 24. – С. 536.

© А.С. Ессин, С.С. Ессин, 2007

К ВОПРОСУ О ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ ЛАЗЕРНОЙ АЭРОСЪЕМКИ

Построение лазерного изображения иллюстрирует рис. 1. На носителе устанавливается система импульсных излучателей, объединены конструктивно в линейку (которую называют «гребенка» – push broom). Положение излучателей и приемников излучения фиксировано и таким образом в процессе съемки фиксируется направление на точку из точки съемки S . Кроме того, при лазерной съемке измеряется расстояние от точки S до точки местности M . Таким образом, для каждой точки лазерного изображения полностью определен вектор R . Соответственно по одному снимку можно восстановить положение точки на местности.

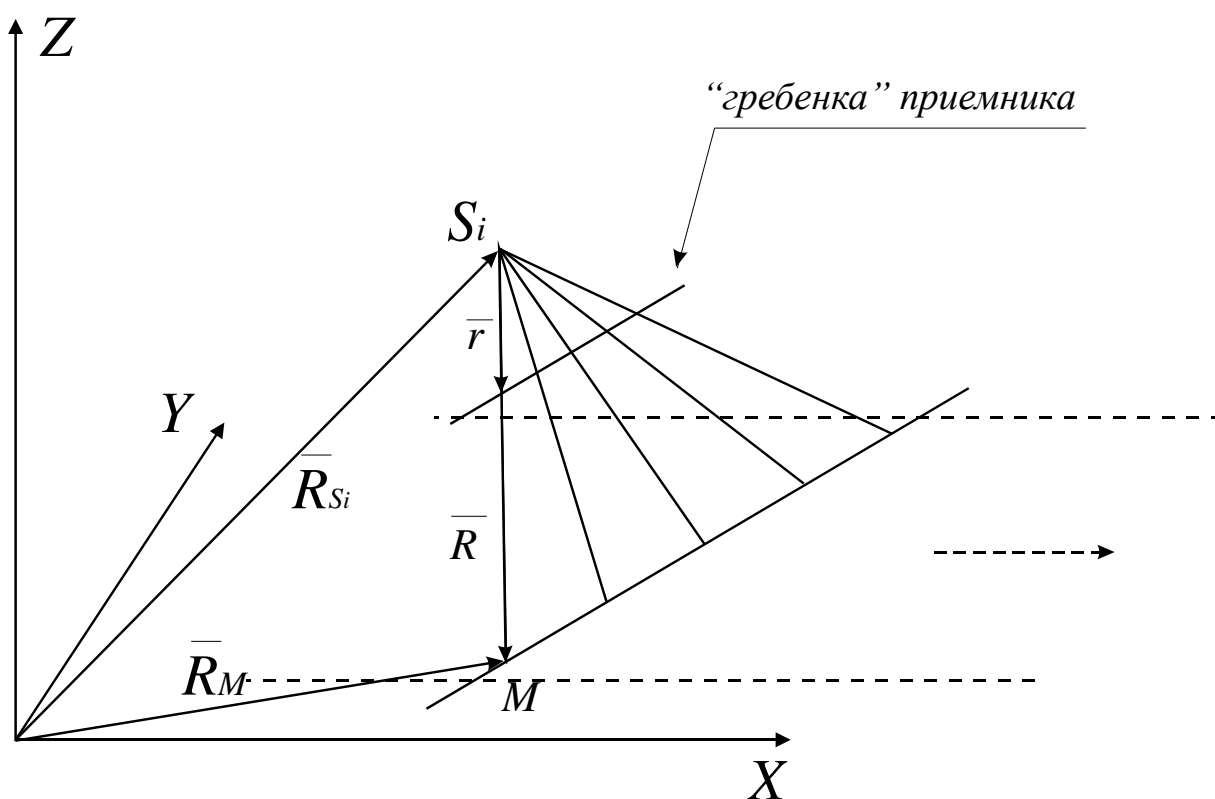


Рис. 1

Существует две проблемы: результаты лазерной съемки не всегда можно представить в виде изображения и даже если это осуществить, то изображение будет иметь недостаточное число градаций яркости, то есть будет иметь низкие изобразительные свойства.

Измерительная точность лазерной аэросъемки ограничена системой навигации. Как и в любой сканерной системе точность определения координат

точек местности по лазерному изображению зависит от точности определения элементов внешнего ориентирования строки изображения.

Связь между координатами точек на местности и на лазерном снимке определяется следующим соотношением:

$$R = R_S + N \cdot A_{\alpha\omega\kappa} \cdot r \quad (1)$$

или

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{S_i} \\ Y_{S_i} \\ Z_{S_i} \end{pmatrix} + N \cdot A_{\alpha\omega\kappa} \begin{pmatrix} x - x_o \\ 0 \\ -f \end{pmatrix} \quad (2)$$

где X, Y, Z – координаты точки местности;

$X_{S_i}, Y_{S_i}, Z_{S_i}$ – положение носителя в момент формирования i -ой строки изображения;

x_o и f – элементы внутреннего ориентирования, задаваемые конструктивными элементами антенной решетки, и эквивалентное фокусное расстояние;

x – координата точки на строке, определяющая положение приемника на антенне;

$A_{\alpha\omega\kappa}$ – матрица, определяющая угловое положение линейки приемника относительно системы координат $SXYZ$.

$$N = \frac{|R|}{|R'|} = \frac{S}{\sqrt{(x - x_o)^2 + f^2}} \quad (3)$$

где S – измеренное расстояние от точки S до точки M .

Из (2) следует, что точность определения координат точки $M\{X, Y, Z\}$ зависит от точности определения X_S, Y_S, Z_S , ошибок определения условного положения α, ω, κ и точности измерения расстояния S .

Таким образом, в соответствии с (2) для обработки измерений лазерного воздушного сканирования можно использовать известные методики фотограмметрической обработки сканерных снимков и соответствующий математический аппарат; существующие формулы также можно использовать и для оценки точности построения [1].

Также по измерениям, выполненным при лазерном сканировании можно получить на основе (2) изображение местности в центральной проекции, которое обрабатывается точно также как и любые другие сканерные снимки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гук, А.П. Цифровая фотограмметрическая обработка сканерных изображений. автореф. дис. на соис. учен. степ. док-ра техн. наук./ А.П. Гук. – М. – 1991.

© А.П. Гук, Н.А. Гук, 2007

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ДЛЯ УСТАНОВЛЕНИЯ ГРАНИЦ МУНИЦИПАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

Задача установления границ муниципальных образований является одной из важных задач проведения экономической реформы. Действительно все финансовые взаимоотношения субъектов Федерации и муниципальных образований основываются на правильном и однозначном установлении границ и категорий земель. Особенно сложно решить эту задачу для малообжитых районов, где границы совмещаются с естественными границами природных образований.

В настоящее время проектирование производится: по границам муниципальных районов на топографической карте масштаба 1:100 000 или 1:200 000, по границам поселений в масштабе 1:25 000 или 1:50 000, по черте населенных пунктов в масштабе 1:2 000 или 1:5 000. Территориальное землеустройство в соответствии с Земельным кодексом Российской Федерации требует, после проектирования - границы должны выноситься в натуру. То есть каждый угол поворота границы должен быть застолблен на местности межевым знаком. Для республики Саха (Якутия), самого земельного субъекта Российской Федерации работы по межеванию границ наслегов, районов представляются архитрудоемкими и ничем не оправданными по материальным затратам. По самым скромным подсчетам расходы на проведение территориального землеустройства Республики Саха (Якутия) превысят 10 млрд. рублей. Поэтому предлагается устанавливать и вносить границы в государственный земельный кадастр по картографическим материалам.

Нанесение границ и координирование каждого угла поворота границ с точностью топографической карты, внесение этих границ в Государственный земельный кадастр позволит решить поставленную федеральным законом №131 задачу по установлению границ муниципальных образований. Наличие добротных землеустроительных материалов по проектам границ муниципальных образований в бумажном и электронном носителе позволит в любой момент поднять и разобраться в границах, а при возникновении земельного спора оперативно выехать и восстановить с применением ЖПС систем границу в любом месте, если надо, смежевать участок границы на местности, и таким образом разрешить земельный спор в зачатке. При этом, в принципе, не исключается установление границ муниципальных образований путем межевания для муниципальных районов республики со средней плотностью населения.

В этой связи возникает закономерный вопрос – точность определения планового положения закоординированных точек, углов поворота границ муниципальных образований. Как выше сказано масштаб при проектировании границ органов местного самоуправления поселений выбран 1:25 000 и 1:50

000. Масштаб 1:25 000 является самым мелким масштабом на котором производится топографическая съемка, которая осуществляется преимущественно стереотопографическим методом. На основании 1:25 000 масштаба камерально составляются топографические карты масштаба 1:50 000 и 1:100 000 путем уменьшения последних в соответствии с установленными требованиями. С уменьшением масштаба некоторые детали контуров опускаются или объединяются с другими, т.е. производится обобщение или генерализация объектов. Таким образом при определении точности следует говорить о точности определения положения характерных контуров: вершин гор, водоразделов, русел рек, опушек леса, марей, берегов озер, просек в тайге и т.п. Необходимую точность определения координат обычно приравнивают к точности положения контуров на топографической карте.

Предельные погрешности наиболее важных предметов и контуров на топографических картах равны 0,8 мм, а всех других предметов и контуров с ясно выраженными границами – 1,2 мм в масштабе карты. Средние квадратические погрешности определения примем равными $\pm 0,4$ мм для наиболее важных предметов и контуров и $\pm 0,6$ мм – для остальных. Также следует учитывать ошибки привязки границ к контурным точкам карты, ошибки интерполяции и т.д. В результате получим, что средние ошибки координирования предметов и контуров местности с четкими очертаниями, одновременно являющиеся границей муниципальных образований относительно точек съемочной сети на незастроенной территории будут лежать в пределах топографической карты 1:100 000:

- Для районов с равнинным рельефом, 50-80 метров;
- Для районов с горным и предгорным рельефом, до 200 метров.

Следует учитывать, что топографическая карт отражает определенную часть объектов, расположенных на поверхности Земли, список которых поределен масштабом карты, причем на время составления карты. Естественно со временем местность меняется, и карта лишь частично отражает состояние местности. Следует заметить, что кроме появления новых объектов и утраты старых изменяются контуры, границы природных объектов: русла рек, контуры леса, озера, и других водных объектов и т.д.

С точки зрения установления границ и категорий земель естественные изменения границ являются более «опасным» значимым фактором, чем даже появление или утрата какого-либо объекта.

В связи с этим, большой интерес вызывает оценка возможности использования космических снимков для установления границ, как наиболее объективного средства получения достоверной информации о поверхности Земли для малообжитых районов.

Для этого необходимо оценить следующие факторы:

- Доступность территории для космических средств: возможность получать снимки на определенную дату (с учетом погодных условий) и наличие архивных снимков;

- Возможность выявления естественных границ и опознавания изображения этих границ на местности (вынос в натуру);
- Точная идентификация границ в используемой системе координат;
- Трудозатраты при выполнении работ.

Исследования космических снимков среднего разрешения, полученные со спутниковых съемочных систем Landsat и SPOT, показывают, что большинство объектов необходимых для проектирования границ легко читаются на снимках, точность определения координат точек по этим снимкам удовлетворяет требованиям проектирования границ. Таким образом, космические снимки среднего разрешения можно использовать как основной материал для проектирования границ малообжитых районов, на которые нет обновленных топографических карт. В докладе приведены примеры проектирования границ по космическим снимкам.

© К.А. Худогизов, 2007

УДК 528.7

Л.Г. Евстратова, А.А. Саваренко

СГГА, Новосибирск

ОПЫТ СОЗДАНИЯ ОРТОФОТОПЛАНОВ ПО МАТЕРИАЛАМ АЭРОСЪЕМКИ ЦИФРОВОЙ НЕМЕТРИЧЕСКОЙ КАМЕРОЙ

Высокая стоимость цифровых фотограмметрических камер является основным фактором, сдерживающим переход к цифровой аэросъемке.

Поэтому возникает естественное желание использовать для выполнения аэрофотосъемки неметрические цифровые камеры, стоимость которых существенно ниже. В связи с этим оценка сферы применения аэроснимков, полученных неметрическими цифровыми камерами, возможностей создания по ним фотограмметрических моделей и фотограмметрической продукции: карт, фотопланов и ортофотопланов, представляет в настоящее время большой интерес.

Как показано в [1], изображение, получаемое любой камерой, имеет свою собственную внутреннюю метрическую точность. Теоретически, используя цифровые методы фотограмметрической обработки и соответствующую математическую модель, можно получить цифровое трансформированное изображение, соответствующее по точности внутренней метрической точности изображения или с такой же точностью определить по этим снимкам координаты точек местности.

Выбор математической модели как раз и является основной проблемой, которую нужно решить при обработке неметрических снимков, так как от этого будет зависеть точность полученных результатов.

Для построения адекватной математической модели обработки снимков, полученных неметрической цифровой камерой необходимо знать элементы внутреннего ориентирования камеры и правильно описать дисторсии объектив.

Используя данные о дисторсии можно выполнить трансформирование исходного цифрового изображения, геометрия которого будет близка к центральной проекции и затем обрабатывать снимки по стандартным фотограмметрическим технологиям.

Таким образом, для практического использования неметрических камер нужно выполнять калибровку этих камер и обеспечить условия, чтобы во время съемки элементы внутреннего ориентирования не изменялись.

Эффективная методика калибровки, позволяющая практически определить дисторсию и элементы внутреннего ориентирования с достаточной точностью, была разработана М.А. Белошапкиным.

После цифрового трансформирования изображения за влияние дисторсии полученные снимки можно обрабатывать стандартными фотограмметрическими средствами.

Данная методика была апробирована на реальных снимках, полученных цифровой неметрической камерой Canon EOS 5D.

Основные характеристики камеры Canon EOS 5D:

- Фокусное расстояние 35 мм;
- Размеры цифровой матрицы 36,2×25,1 мм;
- Размер элемента изображения 8,207×8,195 мкм;
- Количества элементов в матрице 12,7 мегапикселей;
- Затвор шторного типа.

Для сравнения камеры Canon EOS 5D и аэрофотосъемочных камер вычислим эквивалентное фокусное расстояние:

$$f_{\text{экв}} = K_{\text{э}} \cdot f_{\text{ц}}, \quad (1)$$

$$K_{\text{э}} = \frac{l}{l_{\text{ц}}}, \quad (2)$$

где $K_{\text{э}}$ – коэффициент эквивалентности;

$l \times l$ и $l_{\text{ц}} \times l_{\text{ц}}$ – соответственно формат кадра АФА и цифрового снимка.

Таким образом, для формата кадра 18×18 см, $K_{\text{э}}=5$, $f_{\text{экв}} = 172$ мм, для формата кадра 23×23 см, $K_{\text{э}}=6,4$, $f_{\text{экв}} = 224$ мм.

Аэрофотосъемка цифровой неметрической камерой Canon EOS 5D была выполнена в октябре 2006г. с целью создания ортофотоплана масштаба 1:2000.

Съемка выполнялась с вертолета МИ-2 с использованием автоматического аэросъемочного комплекса, разработанного Белошапкиным М.А. (ООО «АэроГис»).

Съемочный участок расположен в Новосибирской области, в долине реки Иня, его площадь составила 1024 га. Застройка сельского типа. Съемочный участок пересекает железная дорога по насыпи. Перепад высот в пределах съемочного участка достигает 20 м. Высота фотографирования – 520 м, масштаб снимков – 1:15 000. Продольное перекрытие снимков составило не менее 60%, межмаршрутное перекрытие не менее 30%. Создание ортофотоплана выполнялись в программном комплексе “Photomod 4.1”.

Влияние дисторсии, значение которой было определено в результате калибровки камеры по методике М.А. Белошапкина, учитывалось путем введения коэффициентов для радиальной модели дисторсии.

Общее количество снимков на территорию полигона 219, маршрутов 4.

Было выполнено построение маршрутной фототриангуляции. Для внешнего ориентирования использовалось 21 опорная точка, координаты которых были определены геодезическими методами со средней квадратической ошибкой 0,10 м. В результате уравнивания блочной сети были получены средние квадратические ошибки $m_x = 0.12\text{м}$, $m_y = 0.04\text{м}$, $m_z = 0.18\text{м}$, вычисленные по расхождениям координат на опорных точках и контрольных точках.

Оценка точности полученного ортофотоплана выполнялась традиционными методами по контрольным точкам и по расхождениям контуров на линиях монтажа снимков (рис. 1).



Рис. 1



Рис. 2. Фрагмент ортофотоплана

Визуально линии монтажа практически не различимы на ортофотоплане, что свидетельствует о высокой метрической точности всего ортофотоплана.

Детальность полученных изображений обеспечивает возможность дешифрирования большинства элементов объектов, показываемых на картах масштаба 1:2000. Однако следует отметить, что основные недостатки цифровых неметрических камер является маленький формат кадра и как следствие – большой объем фотограмметрической обработки, который возрастает примерно в k^2 раз по сравнению аэрофотоснимками соответствующего масштаба.

Таким образом, результаты выполненных экспериментальных работ показали, что материалы цифровой аэросъемки можно использовать при создании ортофотопланов и карт масштаба 1:2000.

В результате выполненных практических работ можно сделать следующие выводы.

1. Для использования неметрических снимков нужно выполнить калибровку камеры и цифровое трансформирование исходных изображений за влияние дисторсии.

2. Методика калибровки, предложенная М.А. Белошапкиным, позволяет с достаточной точностью учесть влияние дисторсии для построения фотоплана 1:2000.

3. Изобразительные свойства цифровых снимков позволяют создавать ортофотопланы и карты с коэффициентом увеличения снимок-карта $7-8^x$.

4. Количество фотограмметрических работ по сравнению с обработкой снимков, полученных аэросъемочной камерой возрастает примерно в k^2 раз, что приводит к увеличению стоимости продукции.

5. Основное преимущество цифровой съемочной камеры – оперативность получения информации; исключение процесса фотохимической обработки и возможность использования для аэросъемки малых летательных аппаратов.

6. Повышение производительности фотограмметрической обработки за счет автоматизации измерений приведет к широкому распространению цифровой съемки для создания ортофотопланов сравнительно небольших участков.

© Л.Г. Евстратова, А.А. Саваренко, 2007

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВРАЩАТЕЛЬНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ СТРУКТУР ЗЕМЛИ

Задача математического моделирования фиксированного участка земной коры рассматривалась авторами ранее в работах [1-6].

В настоящее время успешно разрабатываются модели гравитации, использующие *аналогию* с электромагнитным полем. Эта аналогия была отмечена еще Хевисайдом [7], но около 100 лет назад на нее перестали обращать внимание. Фактически только сейчас появились парадигмы, преодолевающие этот исторический казус: работы А.А. Логунова [8], В.Е. Панина [9], А.В. Викулина [10] и др. Суть этой аналогии сводится к тому, что мы живем не просто в гравитационном поле, а в поле гравитационно-вращательном, поскольку вращается все. Подобно тому, как вращение электрона вызывает магнитную силу, так и вращение (кручение) масс вызывает силу, направленную вдоль оси вращения (по правилу буравчика). Движение, которое эта сила вызывает, в [8] названа *трансляцией*.

Главное различие этих двух полей заключается в пространственно-временных масштабах [11]. Так, в масштабах атома гравитационные взаимодействия пренебрежимо малы по сравнению с электрическими, но на планетарном уровне все наоборот – Солнечная система удерживается только гравитационными силами. Если электромагнитная волна распространяется со скоростью света, то тектоническая волна движется со скоростью 200 км в год [10].

Задержка новой парадигмы в 100 лет сказалась на нашем понимании гравитационно-крутильных полей. Так, например, если резервуарами электрической и магнитной энергий являются соответственно конденсаторы и индуктивности, а излучателями и приемниками поля являются антенны, то в случае гравитационно-крутильных полей аналогичные им резервуары и антенны скрыты в свойствах отдельных областей земной коры. В значительной степени эти области локализованы. По данным [10] 80-85% всей сейсмической энергии Земли сосредоточено в Тихоокеанском кольце, а 10-15% – в Алтайско-Гималайском кольце, расположенном перпендикулярно к первому.

Известны примеры локальных *трансляций*, т.е. подъемов и опусканий земной коры. Таковыми являются кольцевые структуры [12], диапиры [13]. Энергоемкость пород оценивалась в [14].

В настоящее время активно используются современные спутниковые методы для слежения за геодинамическими процессами. Данные спутниковых определений движений земной поверхности могут быть использованы для экспериментального подтверждения или опровержения существующих моделей движений участков поверхности Земли как планеты. Это касается, в частности, поддержанной в некоторых странах модели движения так называемых литосферных плит (последняя версия - NNR-NUVEL1A) [15]. Однако теория

движения литосферных плит остается до настоящего времени всего лишь гипотезой, активно поддерживаемой американскими учеными.

Здесь предлагается математическая модель, объясняющая природу глобальных, региональных и отчасти локальных геодинамических явлений вращательными движениями блоков. Выполненные к настоящему времени и продолжающиеся спутниковые определения на территории Земли могут быть решающими для установления истинной природы геодинамики Земли. Следствия этих исследований коснутся не только чисто фундаментальной науки, но и практических ее приложений.

В данной работе мы исходим из того, что динамическая система управляет своими подсистемами через резонансные воздействия. Подсистема, чтобы не быть разрушенной, должна эволюционировать, уходя от резонанса. Поэтому одна из задач исследования природных систем – определить спектральные характеристики их подсистем, представленных некоторыми моделями. Эти модели и определяют сценарии поведения системы. В нашем подходе принимается модель сценариев в рамках механики Гамильтона – Лагранжа с последующим статистическим уточнением. Деформации блока происходят против действия сил упругости, а также против силы тяжести. В работе [1] подсистема рассматривалась в виде цепочки блоков.

Здесь мы рассмотрим модель вращающейся кольцевой структуры. Не все ученые связывают кольцевые структуры с вращением. Есть мнение, что они возникли в результате столкновения с небесными телами.

Более аргументирована позиция проваливания участков земной коры в работе [16]. На рис. 1 представлены отдельные наиболее крупные кольцевые структуры, находящиеся на суше, а также «просвечивающие» сквозь океанические толщи, нанесены на тектоническую карту планеты.

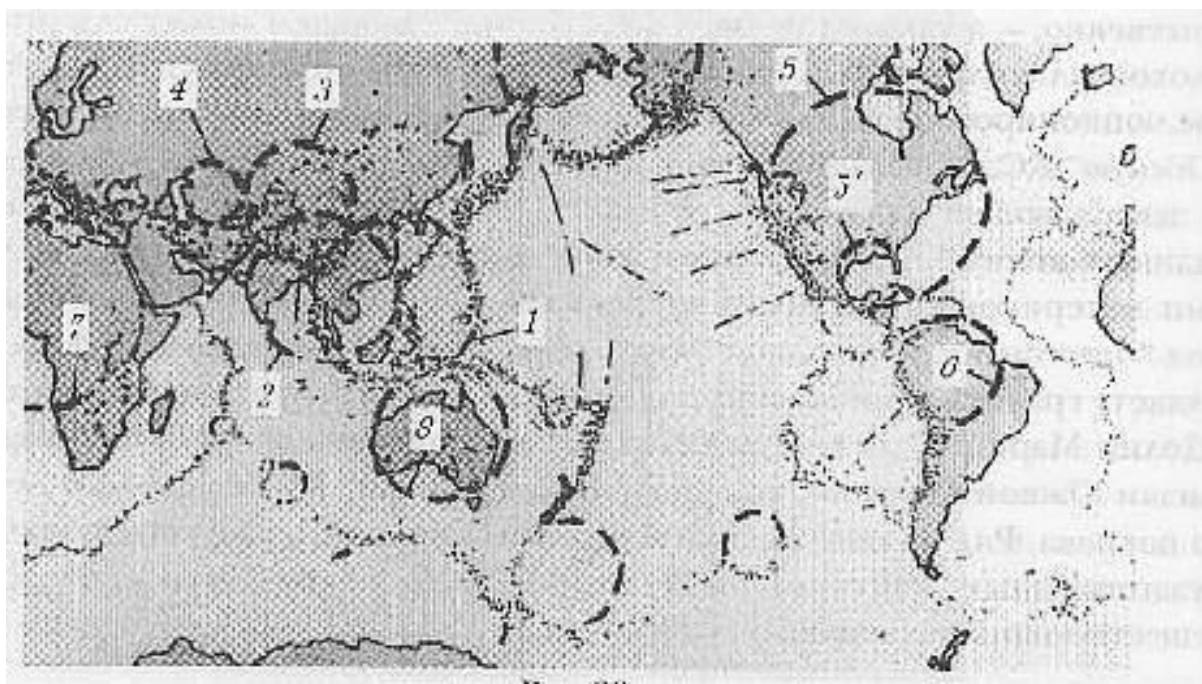


Рис. 1. Крупные кольцевые структуры Земли

Интерес вызывает, например, фотография Южной Америки с бассейном Амазонки в кольцевой структуре (рис. 2, сверху), и ниже, в том же масштабе, фотография лунной кольцевой структуры в зеркальном отображении.

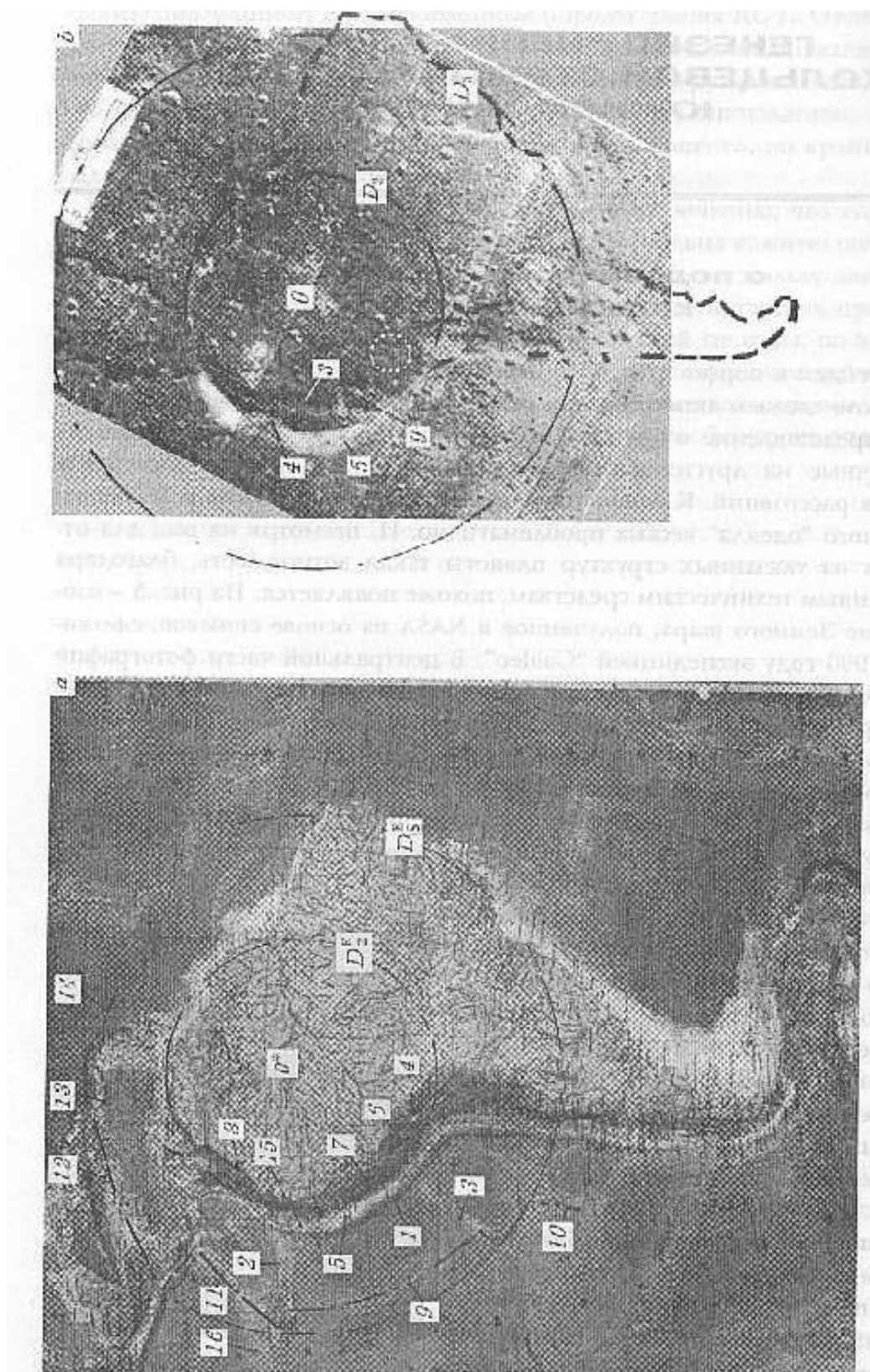


Рис. 2. Кольцевые структуры Южной Америки и Луны

Приведенные иллюстрации, заимствованные в [16], демонстрируют роль кольцевых структур в ландшафте Земли, и, по-видимому, других планет. Однако их генезис может связываться с другой парадигмой. Мы принимаем точку зрения, изложенную в [10].

Будем представлять кольцевую структуру как n дисков с моментами инерции I_j , $j=1(1)n$, причем жесткости на кручение последовательных участков между дисками равна κ_j , $j=1(1)n-1$. Тогда для кинетической и потенциальной энергий получим

$$T = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n I_j \dot{\omega}_j^2,$$

$$U = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{n-1} \omega_j (\kappa_{j+1} (\omega_j - \omega_{j+1}) + \kappa_j (\omega_j - \omega_{j-1}))$$

Этим энергиям соответствует [17] однородная система уравнений

$$-\kappa_i u_{i-1} + (\kappa_i + \kappa_{i+1}) u_i - \kappa_{i+1} u_{i+1} = p^2 I_i u_i, \quad j=1(1)n, \quad (1)$$

причем

$$\omega_i = u_i \sin(pt + \alpha), \quad i=1(1)n,$$

где частота p и фаза α характеризуют упругость системы.

Данная модель имеют отношение и к инженерной геодезии.

С помощью фотограмметрических методов определяются координаты точек блока на заданной территории. Для изучения блока в динамике необходимо иметь тот же блок со сдвигом по времени. Диапазон времени определяется движением тектонической волны и местом расположения данного объекта. Определение этих параметров возможно с помощью фотограмметрии, при измерении по изображениям, полученных в различное время. Точность получения пространственных координат зависит как от оборудования, с помощью которого получены данные изображения, так и от внешних параметров: разрешение фотоматериалов, высота фотографирования.

Из классической фотограмметрии известно, что точность измерения координат одиночной модели определяется из формул

$$m_z = \frac{k_z H}{b} m_\rho,$$

$$m_{xy} = \frac{k_{xy} H}{f} m_\rho,$$

где коэффициенты $k_z=2,3$ и $k_{xy}=2,5$.

Точность как плановых, так и высотных координат зависит от масштаба съемки, который, в свою очередь, зависит от высоты фотографирования и фокусного расстояния камеры. При увеличении фокусного расстояния и укрупнении масштаба съемки уменьшается охват снимаемой территории, что вынуждает использовать методы пространственной фототриангуляции, ухудшающей точность определения измеряемых координат. Поэтому

предпочтительно производить дальнейшие измерения по одиночной модели. Для построения одиночной модели большой территории желательно иметь космические снимки максимально высокого разрешения на территорию с максимальными гравитационно-крутильными полями, полученные с большим временным диапазоном. В настоящее время производится накопление изображений на данные территории для дальнейших измерений и сравнении по времени.

Таким образом, здесь представлена математическая модель вращательных кольцевых структур Земли, для подтверждения которой необходима адекватная интерпретация результатов геодезических и фотограмметрических наблюдений за динамикой земной поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов, Ю.И. Математическое моделирование и рекуррентная идентификация геодинамических систем на основе механики Гамильтона - Лагранжа. [Текст] / Ю.И.Кузнецов, В.К. Панкрушин // Сб. материалов науч. конгр. «ГЕО - Сибирь 2005», Т. 2. - Новосибирск: СГГА, 2005. - С. 3 - 14.
2. Середович, В.А. Идентификация движений и напряженно деформированного состояния самоорганизующихся геодинамических систем: монография [Текст] / В.А. Середович, В.К. Панкрушин, Ю.И. Кузнецов, Б.Т. Мазуров, В.Ф. Ловягин; под общ. ред. В.К. Панкрушина. - Новосибирск: СГГА, 2004.
3. Кузнецов, Ю.И. Анализ движения блока земной коры на основе аэрокосмического мониторинга [Текст] / Ю.И. Кузнецов, В.И. Тихонов, А.В. Черновская // Сб. материалов науч. конгр. «ГЕО - Сибирь 2005», Т.3,ч.1. - Новосибирск: СГГА, 2006. - С. 111-114.
4. Кузнецов, Ю.И. Математическое обеспечение решения задачи определения вращательных движений геодинамических объектов по геодезическим данным / Ю.И. Кузнецов, В.К. Панкрушин // Сб. материалов науч. конгр. «ГЕО - Сибирь 2005», Т.3,ч.2. - Новосибирск: СГГА, 2005. - С. 146-155.
5. Кузнецов, Ю.И. Идентификация геодинамических систем на основе упруго-вязких механики Гамильтона - Лагранжа и рекуррентного фильтра Калмана / Ю.И. Кузнецов, В.К. Панкрушин // Вест. СГГА. - 2006. Вып. 11.- С. 65-79.
6. Кузнецов, Ю.И. Аэрокосмический мониторинг в анализе движения блока земной коры. / Ю.И. Кузнецов, В.И. Тихонов // Вест. СГГА. - 2006. - Вып. 11С. 94-97.
7. Heaviside O. A gravitational and electromagnetic analogy // Part I, The Electrician, 31. - pp. 281-282 (1893).
8. 8. Логунов, А.А. Лекции по теории относительности и гравитации / А.А. Логунов. - М.: Наука, 1987.
9. Панин, В.Е. Физическая мезомеханика поверхностных слоев твердых тел / В.Е. Панин // Физ. мезомеханика. - 1999 - Т.2, №6. - С.5-23.
10. Викулин, А.В. Физика волнового сейсмического процесса / А.В. Викулин. Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2003. -150 с.
11. Кузнецов, Ю.И. Алгебраические основы моделирования природных процессов: монография / Ю.И. Кузнецов. - Новосибирск: СГГА, 2006. - 224 с.
12. Стажевский, С.Б. Геодинамика и кольцевые структуры /С.Б. Стажевский // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Междунар. конф. СО РАН. - Новосибирск, 2005.
13. Кэри, У. В поисках закономерностей развития Земли и Вселенной / У. Кэри - М.: МИР, 1991.

14. Хачай, О.А. Новый метод оценки и классификации устойчивости массива горных пород с использованием парадигмы физической мезомеханики / О.А. Хачай, О.Ю. Хачай. – Новосибирск.
15. Антонович, К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: монография В 2-х т. Т.1 / К.М. Антонович; ГОУ ВПО «Сиб. гос. геодез. акад.». – М.:ФГУП «Картгеоцентр», 2005. – 334 с.
16. Стажевский, С.Б. Генезис «неправильных» кольцевых структур Луны и Земли / С.Б. Стажевский. – Новосибирск: СО РАН, 1999.
17. Гантмахер, М.Ф. Осцилляционные матрицы и ядра и малые колебания механических систем / М.Ф. Гантмахер, М.Г. Крейн. – М.; Л.: ГИТТЛ, 1950.

© Ю.И. Кузнецов, Б.Т. Мазуров, В.И. Тихонов, 2007

УДК 528.852

О.Н. Колесникова

Компания «Совзонд», Москва

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПК ENVI ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ

Компания «Совзонд» в последнее время уверенно развивает направление проектной деятельности, стремясь предоставить заказчику наиболее оптимальное решение его задач – начиная от поставки специализированного программного обеспечения для обработки космических снимков вплоть до решения тематических задач в различных отраслях (картография, экология, геология, сельское и лесное хозяйство, телекоммуникации, муниципальное и городское управление, строительство, энергетика, нефтегазовая отрасль).

Наиболее важной и значимой задачей в картографии является получение источника достоверной и актуальной информации на территорию, подлежащую картографированию. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса в настоящее время являются одним из источников такой информации. В мире уже успешно эксплуатируются десятки космических аппаратов (КА) ДЗЗ. В различных стадиях разработки находятся более 200 новых проектов по реализации перспективных возможностей наблюдения и съемки Земли из космоса. Основным преимуществом космических снимков, получаемых съемочной аппаратурой современных КА, является оперативность их получения и высокая экономическая эффективность при использовании.

Однако, поскольку данные снимки имеют достаточно сложную геометрию, задача их строгой фотограмметрической обработки с применением специальных алгоритмов геометрической коррекции становится достаточно актуальной для целей создания высокоточной картографической основы.

В отличие от цифровой фотограмметрической обработки традиционных аэрофотоснимков, полученных с помощью обычных фотокамер, где применяемые математические методы сформировались и успешно применяются достаточно давно, технология цифровой обработки космических снимков требует применения новых, существенно отличающихся математических моделей и методов обработки.

Алгоритмы фотограмметрической обработки, заложенные в ENVI, созданные с использованием моделей сенсоров, корректно описывающих

процессы формирования обрабатываемого снимка, позволяют с использованием минимального количества опорных точек и вспомогательной информации в виде метаданных получать ортотрансформированные с максимально возможной точностью изображения, цифровую модель высот местности. Например, для ортотрансформирования изображений, получаемых с большинства современных аппаратов, достаточно использовать всего 5-8 опорных точек, а в случае обработки изображений, поставляемых с коэффициентами рационального многочлена (RPC), достаточно всего лишь одной-двух точек на снимок.

Программный комплекс ENVI позволяет осуществить все этапы технологической схемы обработки космических изображений: загрузка снимков и метаданных к ним (поддерживается более 100 форматов), радиометрическая коррекция изображения, работа с цифровой матрицей рельефа, ортотрансформирование изображений, работа с векторной информацией.

Основные преимущества построения технологических процессов обработки изображений на базе программного комплекса ENVI для задач картографирования:

- Полученные в результате фотограмметрической обработки ортофотопланы пригодны для обновления топографических карт масштаба 1:5000 и мельче;
- Созданные по ориентированным парам космических снимков модели рельефа местности могут быть использованы для обновления рельефа на топографических картах;
- Удобные алгоритмы автоматической векторизации результатов классификации просто незаменимы при создании тематических карт;
- Дополнительный модуль SFE (Spatial Feature Extraction module) позволяет автоматизировать процесс дешифрирования космических снимков при создании топографических карт;

Использование программного комплекса ENVI для обработки материалов космических съемок в технологии создания и обновления карт с использованием ДДЗЗ позволит выполнять проекты с максимальным удобством, в кратчайшие сроки и экономически эффективно.

ENVI признан во всем мире как лидер в анализе мультиспектральных и гиперспектральных изображений.

Многие алгоритмы анализа изображения в программном комплексе ENVI были специально разработаны для обработки больших объемов информации, содержащихся в гиперспектральных снимках. Комбинации спектральных каналов

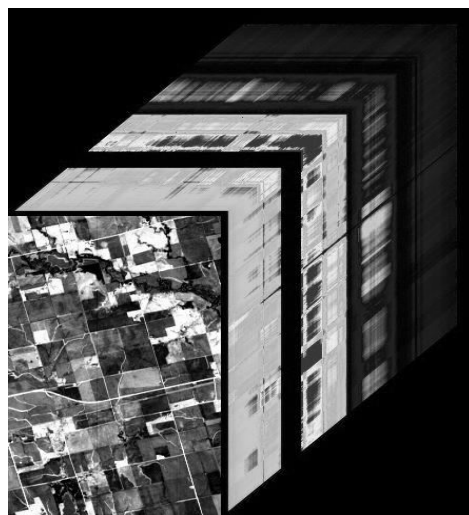


Рис. 1. Гиперспектральный куб

помогают визуально дешифровать различные типы изменений. Обычно при синтезировании каналов используются только три спектральные зоны. Сотни спектральных зон гиперспектрального снимка чрезвычайно трудно визуализировать, поэтому для отображения таких данных используют гиперспектральный куб.

ENVI содержит спектральные библиотеки и инструменты для выполнения спектрального и топографического анализа, анализа растительности и классификации изображений по следующим алгоритмам:

- K-means, Isodata;
- Способ параллелепипедов (Parallelepiped decision rule);
- Алгоритм минимального спектрального расстояния (Евклидова метрика, Minimum distance);
- Алгоритм расстояния Махаланобиса (Mahalanobis Distance);
- Способ максимального правдоподобия (Maximum likelihood);
- Классификация с помощью метода спектрального угла (Spectral Angle Mapper);
- Двоичное кодирование (Binary Encoding);
- Дерево принятия решений (Decision Tree);
- Нейронная сеть (Neural Network).

Например, с помощью алгоритма «Дерево принятия решений» (Decision Tree) возможен совместный анализ различных данных (цифровая модель рельефа DEM – высота, угол и направление уклона; гидрогеологические особенности – глубина залегания подземных вод, характер грунтов; особенности растительного покрова) для выделения районов, подверженных эрозионным процессам, пожароопасных участков.

Достоинством программы является наличие удобных алгоритмов автоматической векторизации результатов классификации, что особенно важно при оперативном анализе результатов в современных ГИС-пакетах.

Инструменты, работающие с “целыми” пикселями, включают как стандартные алгоритмы классификации с обучением, например, минимальное расстояние (Евклидова метрика) или способ максимального правдоподобия, так и алгоритмы, разработанные специально для анализа гиперспектральных данных, например, метод спектрального угла (SAM) и приспособление к спектральным особенностям (spectral feature fitting).

Ряд инструментов предназначен для субпиксельного анализа гиперспектральных данных:

SFF (spectral feature fitting) позволяет разделять материалы, образующие спектр пиксела, на основе характерных зон поглощения данного материала.

Субпиксельный анализ позволяет находить на снимке объекты (материалы), размер которых гораздо меньше размера пиксела. Алгоритмы субпиксельного анализа включают линейное спектральное несмешивание (linear spectral unmixing) и фильтр по эталонам (matched filtering). Оба эти алгоритма позволяют определять материалы, образующие спектр пиксела на основе эталонных спектральных кривых.

Отличительной особенностью программного комплекса ENVI является открытая архитектура и наличие языка программирования IDL (Interactive Data Language), с помощью которого можно существенно расширить функциональные возможности программы для решения специализированных задач: создавать собственные и автоматизировать существующие алгоритмы обработки данных и выполнять пакетную обработку данных. Открытая архитектура ENVI обеспечивает удобство обработки и предоставляет пользователю возможность получить необходимую информацию быстро и просто.

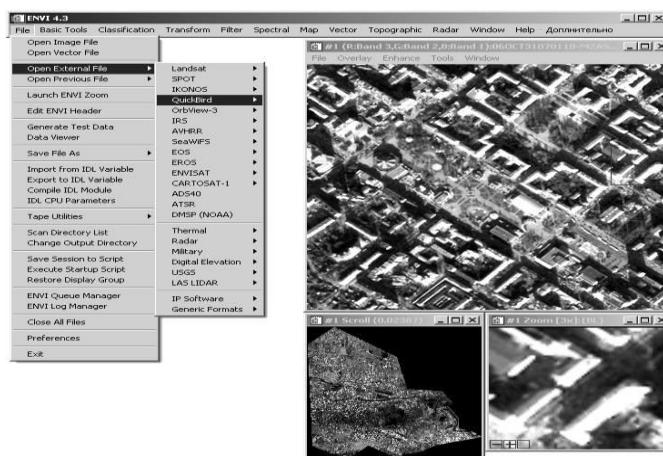
В начале сентября вышла новая версия программного комплекса ENVI 4.3. В числе новых возможностей новой версии хотелось бы отметить:

- Появление принципиально нового инструмента ENVI Zoom, который на начальном этапе не будет включать всех возможностей ENVI, особенно по выполнению спектрального и мультиспектрального анализа, но впоследствии полностью его заменит. Этот инструмент появился вследствие проведенного маркетингового исследования пользователей сообщества ИТТ с учетом их пожеланий. ENVI Zoom будет иметь абсолютно новый интерфейс с расширенными возможностями по визуализации изображений, удобный файл и image-менеджер, удобную панель инструментов для интерактивного улучшения изображений и многое другое. Запуск ENVI Zoom и обработку данных можно будет произвести из ENVI 4.3, так же, как и запуск ENVI 4.3 и обработка возможны из ENVI Zoom;

- Поддержка данных с индийского спутника Cartosat-1: использование RPC полиномов рационального многочлена во время выполнения процедуры ортотрансформирования, а также создание цифровых моделей рельефа (ЦМР) и топокарт масштаба 1:10 000 с помощью модуля DEM, встроенного в ENVI;

- ENVI Spatial Feature Extraction Module (SFE) - новый модуль ENVI для автоматического дешифрирования линейных и площадных объектов, который позволит автоматически определять и выделять линейные и площадные объекты (такие, как дороги, строения, водоемы, береговые линии, сельскохозяйственные поля, взлетно-посадочные полосы и др.) из изображений.

Программный комплекс ENVI 4.3 лицензирован ведущими операторами космических данных, поэтому ENVI обеспечивает поддержку ДДЗ, полученных со спутников QuickBird, Ikonos, Orbview, Cartosat-1, Formosat-2, Resoursat, SPOT, IRS, Landsat и др. Также ENVI поддерживает широкий диапазон растровых и векторных форматов, таких, как ArcView, ArcInfo, MapInfo и многие другие.



В текущей версии ENVI включена поддержка для пяти дополнительных модулей: SFE, модуля для создания ЦМР (DEM), модуля атмосферной коррекции FLAASH, двух дополнительных модулей SARscape Basic и SARscape in SAR, предназначенных для обработки материалов радиолокационных съёмок, выполненных радаром с синтезированной апертурой (SAR), актуальность использования которых возрастает в связи с запуском в 2007 году группировки радарных спутников нового поколения: TerraSAR-X, L и Cosmo-SkyMed 1-4. Данные, полученные с этих спутников, будут иметь разрешение не хуже 1 м с возможностью построения высокоточной ЦМР на основе интерферометрических изображений.

Модуль DEM предоставляет пользователям возможность создавать высокоточные ЦМР с использованием стереоизображений, полученных со спутников QuickBird, IKONOS, OrbView-3, Cartosat-1, Formosat-2, ASTER, SPOT 1-5 для ортотрансформирования, топографического анализа, трёхмерной визуализации и создания векторных карт.

С помощью модуля FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) можно получать более точную информацию из изображений, полученных с любого мультиспектрального или гиперспектрального сенсора, регистрирующего электромагнитное излучение в ближнем инфракрасном диапазоне, включая сенсоры вертикального или наклонного визирования.

В заключение хотелось бы отметить, что диапазон решаемых задач с помощью ПК ENVI достаточно широк - ENVI объединяет все инструменты для выполнения работ разного уровня сложности: от ортотрансформирования и пространственной привязки изображения до получения необходимой информации и её интеграции с данными ГИС.

Все желающие могут пройти обучение в Центре обучения компании «Совзонд» по теме: «Использование ПК ENVI для анализа и обработки ДДЗЗ». В рамках тренинга рассматриваются вопросы геометрической и радиометрической коррекции данных дистанционного зондирования, возможности тематической обработки, спектрального анализа и анализа растительности с использованием вегетационных индексов, а также основы использования языка программирования IDL для расширения функциональных возможностей ENVI.

В ходе обучения слушатели получают уникальные учебно-методические пособия на русском языке, разработанные с учётом особенностей обработки данных в программном комплексе ENVI. Учебные пособия включают теоретический материал к каждому разделу, сборники упражнений и описание всех основных функций ПК ENVI. Обучение проводится с использованием текущей версии программного комплекса ENVI + IDL. По окончании обучения выдается сертификат корпорации ИТТ международного образца.

Кроме работы с программным комплексом ENVI, большое внимание уделяется обзору рынка существующих и перспективных космических аппаратов, перспективам развития отрасли ДЗЗ, вопросам дистанционного

зондирования, современному фонду космических снимков и их сравнительным характеристикам (особое внимание уделяется снимкам высокого пространственного разрешения), геометрической и радиометрической коррекции космических снимков, тематическому дешифрированию и спектральному анализу данных.

В ближайшее время планируется новый трехдневный специализированный курс по обработке радарных данных в ПК ENVI с использованием дополнительных модулей для обработки материалов радиолокационных съёмок, выполненных радаром с синтезированной апертурой (SAR) - SARscape Basic и SARscape InSAR.

Более подробно с программами курсов можно ознакомиться на сайте компании «Совзонд» <http://www.sovzond.ru/edu/>.

Компания «Совзонд» является эксклюзивным представителем корпорации ИТТ по распространению ПК ENVI на территории России и стран СНГ.

© О.Н. Колесникова, 2007

УДК 528.5:528.7

Т.А. Широкова, Д.В. Комиссаров, А.В. Комиссаров
СГГА, Новосибирск

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ВНЕШНЕГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ СКАНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Одним из важных факторов, влияющих на общую точность сканерной съемки, является схема размещения и количество специальных марок, используемых для внешнего ориентирования сканов и ошибки величин, измеряемых наземными лазерными сканерами (НЛС). Для исследования влияния указанных факторов на точность определения элементов внешнего ориентирования скана ($X_0, Y_0, Z_0, \alpha, \omega, \kappa$) будем использовать общеизвестную в фотограмметрии формулу внешнего ориентирования геометрической модели местности [1], в которую будут входить пространственные координаты точек объекта во внешней системе координат ($X_{вн}, Y_{вн}, Z_{вн}$) и системе координат скана ($X_{ск}, Y_{ск}, Z_{ск}$).

Поскольку исходные уравнения являются нелинейными по отношению к неизвестным ($X_0, Y_0, Z_0, \alpha, \omega, \kappa$), то решение их выполняется итерационным методом.

Поскольку измеряемыми величинами при наземном лазерном сканировании являются R, φ, θ , то представим через них координаты $X_{ск}, Y_{ск}, Z_{ск}$

$$\left. \begin{aligned} X &= R \times \cos \varphi \times \sin \theta \\ Y &= R \times \sin \varphi \times \sin \theta \\ Z &= R \times \cos \theta \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где R – измеренная дальность от точки стояния сканера до точки объекта;
 φ – горизонтальный угол измеренного направления;

θ – зенитное расстояние измеренного направления, отсчитываемое от оси Z сканера.

Тогда формулы перехода от системы координат $O_{ск}X_{ск}Y_{ск}Z_{ск}$ к системе $O_{вн}X_{вн}Y_{вн}Z_{вн}$ с учетом (1) можно представить в виде функций

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= X_0 + a_1 R \cos \varphi \sin \theta + a_2 R \sin \varphi \sin \theta + a_3 R \cos \theta - X_{вн} = 0 \\ F_2 &= Y_0 + b_1 R \cos \varphi \sin \theta + b_2 R \sin \varphi \sin \theta + b_3 R \cos \theta - Y_{вн} = 0 \\ F_3 &= Z_0 + c_1 R \cos \varphi \sin \theta + c_2 R \sin \varphi \sin \theta + c_3 R \cos \theta - Z_{вн} = 0 \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

где $a_1, a_2, a_3, \dots, c_3$ – направляющие косинусы, которые являются функциями от продольного (α) и поперечного (ω) углов наклона и угла разворота (κ) системы координат сканера относительно внешней [2].

При наличии трех и более марок уравнения (2) решаются по методу наименьших квадратов. Выполнив переход к уравнениям поправок можно записать

$$A_{3n,6} X_{6,1} + L_{3n,1} = V_{3n,1}, \quad (3)$$

где $A_{3n,6}$ – матрица коэффициентов уравнений поправок, которые являются частными производными от функций F_1, F_2, F_3 по каждому из неизвестных;

$X_{6,1}$ – вектор неизвестных величин;

$L_{3n,1}$ – вектор свободных членов уравнений поправок;

$V_{3n,1}$ – вектор невязок;

n – количество специальных марок.

После перехода к нормальным уравнениям получим

$$B_{6,6} X_{6,1} + C_{6,1} = 0, \quad (4)$$

где

$$B_{6,6} = A_{6,3n}^T A_{3n,6},$$

$$C_{6,1} = A_{6,3n}^T L_{3n,1}.$$

Средние квадратические ошибки (СКО), характеризующие точность определения элементов внешнего ориентирования сканов, определяются по формулам

$$\left. \begin{aligned} m_{X_0} &= \mu \sqrt{Q_{X_0 X_0}}, \quad m_{Y_0} = \mu \sqrt{Q_{Y_0 Y_0}}, \quad m_{Z_0} = \mu \sqrt{Q_{Z_0 Z_0}} \\ m_{\alpha} &= \mu \sqrt{Q_{\alpha \alpha}}, \quad m_{\omega} = \mu \sqrt{Q_{\omega \omega}}, \quad m_{\kappa} = \mu \sqrt{Q_{\kappa \kappa}} \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где $Q_{X_0 X_0}, Q_{Y_0 Y_0}, \dots, Q_{\kappa \kappa}$ – диагональные элементы обратной весовой матрицы – $(A^T A)^{-1}$;

μ – СКО единицы веса, вычисляемая по формуле

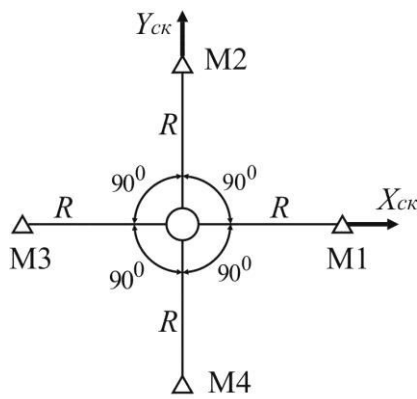
$$\mu = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{3n} V_i^T V_i}{3n - 6}}. \quad (6)$$

В общем виде получить зависимости диагональных элементов обратной весовой матрицы ($Q_{6,6} = B_{6,6}^{-1}$) от измеряемых величин очень сложно. Поэтому ограничимся случаем, когда угловые элементы внешнего ориентирования скана малы, тогда $\cos \alpha \approx \cos \omega \approx \cos \kappa \approx 1$, $\sin \alpha \approx \alpha$, $\sin \omega \approx \omega$ и $\sin \kappa \approx \kappa$. Для упрощения вывода формул также предположим, что специальные марки расположены на одинаковом расстоянии от НЛС и через равные углы 90° по дуге окружности (рис. 1а). В соответствии с рисунком 1а можно записать координаты четырех марок в системе координат скана:

$$M1 = (R \sin \theta; 0; R \cos \theta), \quad M2 = (0; R \sin \theta; R \cos \theta), \\ M3 = (-R \sin \theta; 0; R \cos \theta), \quad M4 = (0; -R \sin \theta; R \cos \theta).$$

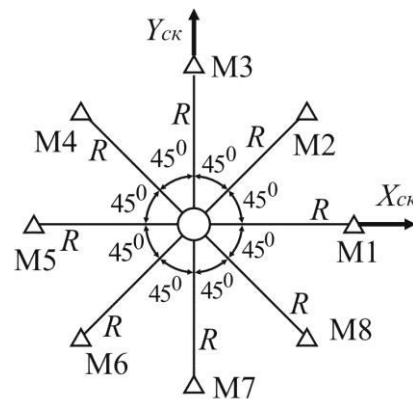
С учетом координат специальных марок и сделанных допущений матрица коэффициентов нормальных уравнений примет вид

$$B_{6,6} = \begin{bmatrix} 4 & 0 & 0 & -4R \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 0 & -4R \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 \\ -4R \cos \theta & 0 & 0 & 2R^2(1 + \cos^2 \theta) & 0 & 0 \\ 0 & -4R \cos \theta & 0 & 0 & 2R^2(1 + \cos^2 \theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4R^2 \sin^2 \theta \end{bmatrix}.$$



вид сверху

а)



вид сверху

б)

○ -точка стояния сканера

△ -места размещения специальных марок

Рис. 1. Схема размещения специальных марок

После нахождения определителей матрицы коэффициентов нормальных уравнений, алгебраического дополнения для диагонального элемента матрицы $B_{6,6}$ и выполнения необходимых преобразований, получим формулу обратного весового коэффициента

$$Q_{X_0 X_0} = \frac{1 + \cos^2 \theta}{4(1 - \cos^2 \theta)}. \quad (7)$$

Аналогично получены формулы для остальных диагональных элементов обратной весовой матрицы

$$Q_{Y_0 Y_0} = \frac{1 + \cos^2 \theta}{4(1 - \cos^2 \theta)}, \quad Q_{Z_0 Z_0} = \frac{1}{4}, \quad (8)$$

$$Q_{\alpha\alpha} = Q_{\omega\omega} = Q_{\kappa\kappa} = \frac{1}{4R^2 \sin^2 \theta}.$$

При количестве специальных марок, равном 8, расположенных, как показано на рисунке 1б, выражения для диагональных элементов обратной весовой матрицы будут иметь вид:

$$Q_{X_0 X_0} = Q_{Y_0 Y_0} = \frac{1 + \cos^2 \theta}{8(1 - \cos^2 \theta)}, \quad Q_{Z_0 Z_0} = \frac{1}{8}, \quad (9)$$

$$Q_{\alpha\alpha} = Q_{\omega\omega} = Q_{\kappa\kappa} = \frac{1}{4R^2 \sin^2 \theta}.$$

Результаты выполненных теоретических исследований и практических работ свидетельствуют, что СКО единицы веса μ , вычисляемая при обработке данных наземного лазерного сканирования, в основном зависит от точности измерения расстояний НЛС.

Анализируя формулы (5) – (9), можно сделать следующие выводы для случая, когда ось вращения лазерного сканера расположена примерно отвесно:

- Точность определения элементов внешнего ориентирования скана возрастает пропорционально $\sqrt{n}$;
- Чем больше θ отличается от 90° (марки лежат не в одной плоскости со сканером), тем менее точно определяются величины X_0 , Y_0 , α , ω и κ ;
- Точность определения величины Z_0 зависит только от количества марок;
- При увеличении отстояния специальных марок от сканера возрастает точность определения угловых элементов внешнего ориентирования скана. Однако при этом увеличиваются ошибки измерения расстояний, следовательно, и СКО единицы веса.

Проверка правильности полученных выводов была произведена с помощью программы, составленной в среде Delphi и позволяющей моделировать процесс внешнего ориентирования сканов по заданным значениям СКО измерения расстояний сканером, приближенным величинам угловых элементов внешнего ориентирования и координатам (X, Y, Z) специальных марок.

На основе математического моделирования выполнены исследования влияния различного расположения специальных марок на точность внешнего ориентирования сканов, в результате которых установлено самое

неблагоприятное размещение марок, а именно когда марки находятся вдоль одной линии и на одной высоте со сканером, что вызывает большие ошибки в определении угловых элементов внешнего ориентирования α и ω . Если высоты Z_m всех специальных марок равны, но не равны Z_0 , то ошибки в определении величин X_0 и Y_0 возрастают пропорционально разности $(Z_m - Z_0)$.

Теоретические и экспериментальные исследования точности внешнего ориентирования сканов и опыт выполнения работ по сканерной съемке объектов показали, что наиболее лучшим вариантом размещения специальных марок является, когда марки располагаются равномерно по окружности в количестве восьми штук на конкретном расстоянии от сканера для каждого обеспечивающем наиболее высокую точность. Если на практике невозможно разместить марки подобным образом, то их местоположение необходимо выбирать так, чтобы разница измеряемых величин R , φ и θ для марок обеспечивалась как можно больше. Для выявления окончательного варианта конфигурации размещения специальных марок на конкретном объекте лазерной съемки предлагается использовать разработанную в процессе исследований программу, предназначенную для моделирования процесса внешнего ориентирования сканов и оценки его точности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Laser mirror scanner LMS-Z420 technical documentation and users instructions [Текст]. – Riegl Austria, 2002.
2. Лобанов, А.Н. Фотограмметрия [Текст] А.Н. Лобанов. – М.: Недра, 1984. – 552 с.

© Т.А. Широкова, Д.В. Комиссаров, А.В. Комиссаров, 2007

УДК 528.7

А.В. Черемушкин

СГГА, Новосибирск

ИМИТАЦИЯ АЭРОФОТОСЪЕМОЧНОГО ПРОЦЕССА В УЧЕБНЫХ ЦЕЛЯХ

Целью теоретического и практического профессионального обучения является приобретение знаний, умений и навыков, достаточных для полноценной профессиональной деятельности. Многолетняя практика преподавания свидетельствует о том, что с внедрением наглядных средств обучения в учебный процесс позволяет повысить эффективность и качество занятий.

От степени точности преподаваемой информации, во многом зависит правильность приобретаемых при обучении навыков. Учебная аэрофотосъемочная практика является одним из важных звеньев при подготовке специалистов по направлению фотограмметрия и дистанционное зондирование. Однако, процесс аэрофотосъемки связан с большими финансовыми затратами, которые требуются на обслуживание авиационной техники, химико-фотографическую обработку полученных материалов. Следовательно, возникла необходимость в создании нового метода для обучения процессам аэрофотосъемки. Этим

методом являлась имитация аэрофотосъемочного процесса, которая выступает в роли наглядности выполняемых процессов. На практике сущность метода заключается в следующем. По заданному сценарию полетного задания задаются параметры съемки, исходными данными которых являются: масштаб аэрофотографирования, продольное и поперечные перекрытия.

Масштаб фотографирования находится в пределах от 1:10 до 1:30. При расчете макета необходимо учитывать, чтобы отношение разности минимальной $h_{\min}$ и максимальной $h_{\max}$ отметок «местности» (т.е. высот элементов макета) к высоте фотографирования H_{ϕ} не должно превышать 0,2 в пределах площади подлежащей съемке.

$$\frac{h_{\max} - h_{\min}}{H_{\phi}} \leq 0.2 \quad (1)$$

Длина и ширина макета задается с таким расчетом, чтобы в маршруте располагалось 5-7 снимков, и количество маршрутов не менее 3.

Согласно заданным условиям фотографирования и применяемого фотоаппарата, как и в реальной аэрофотосъемке, выполняют предварительные расчеты: высоты фотографирования H_{ϕ} , базиса фотографирования b_x , и расстояний между маршрутами b_y .

Высоту фотографирования определяют через масштаб фотографирования m и фокусное расстояние камеры.

Базис фотографирования b_x в масштабе съемки рассчитывают по формуле:

$$b_x = \frac{\ell_x (100 - q_x)}{100} \quad (2)$$

где ℓ_x – сторона снимка,

q_x – продольное перекрытие.

Базис фотографирования на местности B_x рассчитывают по формуле с учетом масштаба:

$$B_x = b_x \cdot m \quad (3)$$

По аналогичным формулам (2) и (3) в зависимости от заданного поперечного перекрытия снимков и поперечной стороны кадра рассчитывается расстояние между съемочными маршрутами в масштабе съемки b_y и на местности B_y [1].

Оси маршрутов прокладывают над макетом в виде прямых линий, на высоте равной высоте фотографирования. Расстояние между маршрутами соответствует расчетному B_y . На каждом маршруте отмечают центры фотографирования согласно рассчитанному B_x .

Фотографическую съемку можно выполнить как обычной камерой, так и цифровой. Аппарат размещают под центрами фотографирования и выполняют экспонирование. При переходе с маршрута на маршрут камеру разворачивают на 180° как при реальной аэрофотосъемке. По окончании съемки следует обработка материалов.

При съемке на фотографическую пленку выполняют химико-фотографическую обработку, подпись фильма, контактную печать, накидной монтаж и оценку качества «залета».

При использовании цифровой камеры, по окончании съемки, полученную информацию переносят в компьютер. В программе Photoshop проверяется фотографическое и фотограмметрическое качество «залета». При необходимости можно отредактировать фотографическое качество изображения. Накладывая изображения снимков, друг на друга, оценивается фотограмметрическое качество. Фрагмент накидного монтажа приведён на рис. 1.

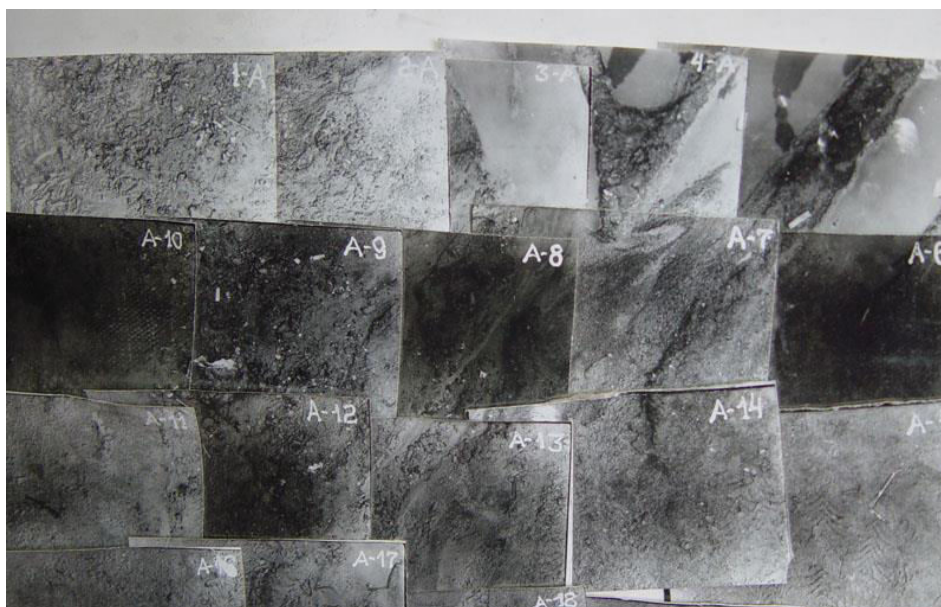


Рис. 1. Фрагмент накидного монтажа

Итак, ввиду того, что организация аэрофотосъемочной практики связана с большими финансовыми затратами, данный метод позволяет: повысить качество подготовки, за счет наглядности процессов аэрофотосъемки; сократить расходы ресурсов авиационной техники; топлива; затрат на эксплуатацию. Данный метод обучения применяется на кафедре Фотограмметрии и ДЗ с 2002 года.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зиман, Я.Л. Задачи и упражнения по самолетовождению при аэрофотосъемке / Я.Л. Зиман. – М.: Недра, 1964 – 240 с.

© А.В. Черемушкин, 2007

СОЗДАНИЕ ПЛАНОВО-ВЫСОТНОГО ОБОСНОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ МЕСТНОСТИ НА ОСНОВЕ КАРКАСНОЙ АЭРОФОТОСЪЕМКИ

Появление на мировом и Российском рынках материалов дистанционного зондирования среднего и высокого пространственного разрешения, полученных с помощью коммерческих спутниковых систем Landsat-7, SPOT-5, IRS-1C/D, IKONOS, QUICKBIRD, делает возможным разработку технологий фотограмметрического создания и обновления крупномасштабной картографической основы по данным космической съемки. Данные материалы имеют достаточно сложную геометрию. Использование точной дифференциальной баллистической модели движения космического аппарата и модели ориентации оптической оси сканирующего устройства, предполагающей ее изменения во времени, позволяет при наличии достаточного числа опорных точек привязать сканерный снимок к земному эллипсоиду с погрешностью, не превышающей двух элементов разрешения снимка. Но данная точность орбитальных данных, характеризующих положение снимков в пространстве, недостаточна для использования снимков при создании и обновлении топографических карт и планов. Поэтому после предварительной обработки снимков, включающей геометрическую и радиометрическую коррекцию на всех уровнях, приходится дополнительно трансформировать снимки по опорным точкам, применяя различные перспективные и нелинейные преобразования.

Повысить точность привязки космических снимков можно несколькими способами. В первую очередь это выбор оптимальной геометрической модели ориентирования и трансформирования снимка. Кроме того, в теории и практике фотограмметрии накоплен большой опыт обработки одиночных изображений. Подбор оптимальной схемы размещения опорных точек, создание виртуальных квазиопорных точек, корреляционные алгоритмы идентификации опорных точек, - все эти способы позволяют значительно повысить точность и надежность привязки изображений к системе координат на местности.

Как правило, для определения координат точек планово-высотной подготовки проводятся полевые работы. Иногда полевую привязку выполнить невозможно либо экономически нецелесообразно. В этом случае материалы съемки могут быть привязаны по существующим картам и планам, причем масштаб карты, на которой выбираются опорные точки, должен быть на один масштабный ряд крупнее, чем масштаб создаваемой карты. Данный вид привязки дешев и достаточно эффективен. В результате экспериментов, выполненных в Западно-Сибирском филиале ФГУП «Госземкадастръемка», было установлено, что при привязке одиночного сканерного снимка к плановой основе, масштаб которой на один масштабный ряд крупнее масштаба создаваемой карты, при тщательной отбраковке

«слабых» опорных точек, возможно получить точность привязки, равную разрешающей способности снимка. А при использовании в ориентировании метода квазиопорных точек, разработанного проф. Зотовым Р.В., можно добиться повышения точности привязки в 2-3 раза по отношению к одиночным опорным точкам [1,2]. При этом происходит существенная компенсация ошибок координат точек снимка и карты. Представляется, что метод квазиопорных точек позволит выполнять привязку по картам того же масштаба, что и масштаб создаваемой карты.

Однако на территории нашей страны существует определенный дефицит в картографических материалах на некоторые районы. Так, например, в северных, труднодоступных регионах практически отсутствуют топографические карты масштаба 1: 10000, а карты масштаба 1: 25000 в большинстве своем устарели и не пригодны для качественного ориентирования. В случае отсутствия материалов прошлых лет необходимо выполнять полевую привязку опознаков. Полевая привязка в малообжитых, а особенно на слабо освоенных территориях, достаточно дорога, и в первую очередь из-за трудностей, связанных с транспортировкой людей и оборудования, а также в поисках самих опознаков.

В качестве альтернативного варианта привязки в Западно-Сибирском филиале ФГУП «Госземкадастрсъемка» было решено при картографических работах в труднодоступных районах ЯНАО опробовать метод, основанный на проложении каркасных маршрутов аэрофотосъемки.

Сущность способа создания планово-высотного обоснования по каркасным маршрутам заключается в следующем. Планово-высотная подготовка сцен должна проходить по опорным точкам, расположенным в углах сцены, и соответственно в местах перекрытия сцен. Поэтому маршрут аэрофотосъемки прокладывается как раз по местам перекрытия сцен и по краям крайних сцен (рис. 1).

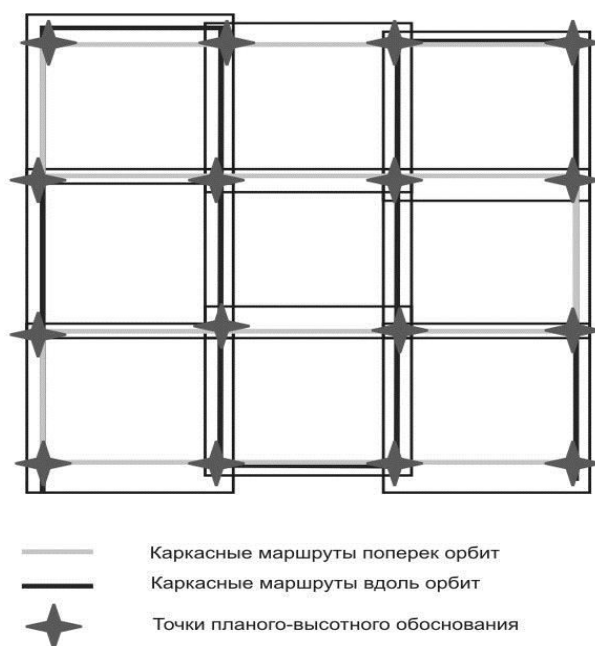


Рис. 1. Схема расположения каркасных маршрутов аэрофотосъемки на космических снимках

Аэрофотосъемка выполняется со спутниковой привязкой центров фотографирования. Таким образом, при уравнивании и обработке маршрута по связующим точкам получается жесткий каркас, в котором с достаточной точностью определены координаты необходимых элементов для создания опоры для ориентирования космических снимков. Все взаимное уравнивание (блоков аэрофотосъемки и сцен космических данных) можно выполнять при помощи программы Photomod. В случае малого количества опознаваемых объектов на той или иной сцене и в целях удешевления работ возможно ориентирование сцен со сшивкой их в так называемый «моноблок». Моноблок представляет собой сшитые с необходимой точностью сцены в единую. Создание данного моноблока также предусмотрено программой Photomod. Полосы сканирования космического изображения вытянуты по широте (например, у Spot 5 - 600 км), и узкие по долготе (например, у Spot 5 – 120 км). Сцены созданы с отклонениями в местах продольного перекрытия (особенно это видно при использовании сцен разных дат съемки) и без отклонений (так как получены при простой нарезке полосы) в местах поперечного перекрытия. Следовательно, при ориентировании удачно сшитого моноблока существенно уменьшается необходимое количество опорных точек, а, значит, объем и стоимость привязки. По предварительным сметным расчетам, выполненным в Западно-Сибирском филиале ФГУП «Госземкадастрсъемка», оценивалась экономическая целесообразность данного способа. Экономически выгодно применять способ каркасных маршрутов на больших территориях, когда использование полевой привязки очень накладно в связи с труднодоступностью мест. К примеру, стоимость привязки одного района ЯНАО по каркасным маршрутам составила 200% от полевой привязки. Когда площадь территории была увеличена до двух районов, относительная стоимость составила 145% , а при работе по четырем районам этот показатель уже равняется 80%, а это уже существенное удешевление работ. При построении моноблоков относительный показатель стоимости по одному району составил 140 %, по 2-м – 120%, а по четырем – 60%.

Данные расчеты обосновывают экономическую целесообразность применения планово-высотной привязки космических снимков по каркасным маршрутам аэрофотосъемки на труднодоступных территориях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зотов, Р.В. Особенности использования квазиопорных точек для фототриангулирования и современный подход к расчету точности изготовления карт и планов / Р.В. Зотов // Совершенствование геодезических работ по сельскохозяйственному картографированию земельных ресурсов Западной Сибири. – Омск: ОСЧИ, 1983. – С. 9–15.
2. Беспалов, И.А. Методика привязки космических снимков по квазиопорным точкам / И.А. Беспалов, Т.В. Осинцева // Межвуз. сб. молодых учен., аспирантов и студентов / СибАДИ. – Вып. 4, ч. 1. – Омск, 2007. – С. 42–45.

© Л.В. Быков, И.А. Беспалов, 2007

RESEARCH OF THE NEW GIS METHOD FOR THE PREDICTION OF CASPIAN SEA FLUCTUATION IMPACTS ON THE PROTECTED AREAS LOCATED ALONG COASTAL LINE FOR THE ENVIRONMENTAL MONITORING PURPOSES

Abstract:

The present day water level fluctuations of the Caspian negatively affect on protected area located along Coastal Line. For the Caspian Sea costal areas, it is highly important to make correct planning of future coastal infrastructure and prediction of possible emergencies as a result of Caspian Sea water level fluctuation. The main objective of this research is to present the up-to-date developed method of how to predict the Caspian Sea Level fluctuation impact on the coastal areas by monitoring visually results of Geographical Information System processing analysis based on the accurate spatial data acquired from high-resolution stereo satellite imagery. As a result of this research it was calculated the forecast what coastal areas of Absheron National Park will be flooded in cases of Caspian Sea water level rises.

ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОГО ГИС МЕТОДА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ НА ПРИБРЕЖНЫЕ ОХРАНЯЕМЫЕ ПРИРОДНЫЕ ЗОНЫ С ЦЕЛЮ МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Резюме:

На сегодняшний день колебание водного уровня Каспийского моря отрицательно влияет на особо охраняемые территории, расположенные вдоль прибрежной линии. Для прибрежных зон Каспийского моря очень важно проводить правильное планирование прибрежных инфраструктур и прогнозирование возможных отрицательных процессов в результате колебания уровня воды. Целью исследования является разработка методики для прогнозирования воздействий колебаний Каспийского моря на прибрежные зоны посредством мониторинга результатов геоинформационной обработки космических стереоизображений с высокой разрешающей способностью и полученных по ним высокоточных пространственных данных. В результате были выявлены участки, которые могут быть затоплены при повышении уровня моря.

Introduction

Caspian Sea Fluctuations are periodic which are caused by various natural factors what makes negative impacts on the strict nature reserves, sanctuaries and national parks located along coastal line of Caspian Sea. It is very important to make correct planning of future coastal infrastructure and prediction of possible accidents. For the realization of these goals it is inevitable to make appropriate reliable instrument working with accurate technological principles and supporting decision makers in their everyday activities related with the sustainable development of coastal zones.

Materials and Methods

As the territory of the research was taken the eastern part of Absheron peninsula called Shakhova Kosa where is located Absheron National Park represented in Fig.1. Source materials used for accurate precise stereo model, digital elevation model and digital orthophoto map preparation are represented below:

1m high-resolution IKONOS Standard Stereo Imagery (EPIPOLAR) - Pan-Sharpener Multispectral (PSM), Bands: Red, Green, Blue and Near Infrared. Standard accuracy of the source IKONOS stereo satellite imagery is approximately the following: Horizontal - ± 11.5 m (RMSE), Vertical - ± 13 m (RMSE).

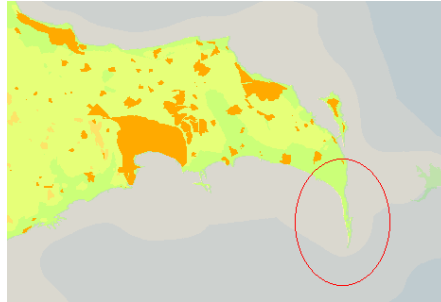


Fig.1: Research Area

For the improvement of accuracy of standard stereo product to the level of precision stereo and application of prepared products it was important to pass the photogrammetric processing stages as Collection of Ground Control Points, Triangulation of stereo satellite imagery, Automatic DTM Generation, Interactive DTM Editing, Orthorectification and Quality Control of all products for the modeling of potential coastal line fluctuation.

STAGE 1: Collection of Ground Control Point

Preliminary planned positions of Ground Control and Check Point were identified in office conditions based on the standard stereo products for easier and exact planning of well visible point on the both of images of stereo pair for the further measurements by high-accuracy GPS systems. Accuracy, of measured GCP point met the following standards: Horizontal accuracy: 0.1 m ($1 - \sigma$) in each of horizontal directions, Vertical accuracy: 0.1 m ($1 - \sigma$) in vertical direction For the measurement was used the GPS Receiver with following parameters: 2 frequency 24 canal Real Time (Leica RS530) where one GPS was in the role of base and the second in the role of GPS-rover.

STAGE 2: Triangulation and creation of Precise Stereo Model

The triangulation process is important for the improvement of original accuracy of Stereo Model, which is approximately the following: Horizontal - ± 11.5 m (RMSE), Vertical - ± 13 m (RMSE), by refining IKONOS satellite imagery supported vendor-provided rational polynomial coefficients. This process was done using preliminary collected Ground Control and Check points along with the using of tie point calculated employing area-based matching using normalized correlation coefficients based on the images of stereo pair. As a result of the triangulation IKONOS epipolar imagery achieved the following accuracy: Horizontal - ± 1 m (RMSE), Vertical - ± 2 m accuracy (RMSE). The process of triangulation was conducted using Leica photogrammetry suite software orthobase environment.

STAGE 3: Automatic Digital Terrain Model Generation and Interactive DTM Editing

Generation of Digital Terrain Model was implemented based on the preliminary triangulated Stereo Model with improved accuracy using special Automatic Terrain Extraction mechanism working based on the area based image matching mechanism. Image matching refers to the automatic identification and measurement of corresponding image points that are located on the overlapping area of multiple images. But taking into account the possibility of correlation errors there is the necessity for additional interactive terrain editing using stereo plotting techniques working in the stereo mode. Afterwards, based on the all three dimensional spatial data was generated triangular regular network which is later being converted to Grid Format flexible in usage with resolution of 1m.

STAGE 4: Orthorectification

This stage is implemented for the removal of relief distortions available in the satellite imagery and the important role in this process plays accurate Digital Terrain Model. The effects of topographic relief displacement are accounted for by utilizing a Digital Terrain Model during the orthorectification procedure.

The accuracy of digital orthophoto map was controlled by the used in the triangulation ground control and check points and as a result of quality control it was calculated that digital orthophoto map accuracy reached - ± 2 m (RMSE).

STAGE 5: Modeling of Caspian Sea level fluctuation by automatic interpolation

The accurate Digital Terrain Model affords us easily to interpolate the sections of the relief with the required height interval and represent the interpolation results in the linear form (Fig.2) what can be overlaid over the accurate digital orthophoto map obtained in the different periods as it is shown in Fig.3. The visualization modeling of the resulted interpolated data is possible both in two and three dimensional modes. This is the basic mechanism necessary for the modeling of the potential flooding of the costal areas. Based on these results it is easily possible to calculate area of the potentially flooded area represented in Fig.4 and Fig.5 with potential level rises to -27 and -28 height levels. Total area of the research is 7.62 sq. km where in case of level rise to -27 will be flooded 2.48 sq. km, and in case of level rise to -26 will be flooded 4.11 sq. km.



Fig.2 Interpolated Digital Terrain Model
Sections data over satellite imagery



Fig.3 Overlay of Interpolated



Fig.4 Flooding of the research area in case of Caspian Sea level rise to -27 height level



Fig.5 Flooding of the research area in case of Caspian Sea level rise to -26 height level

Conclusions:

The results of this research present that the processing of high-resolution stereo satellite imagery and preparation of precise stereo model, digital terrain models and digital orthophoto maps are absolutely suitable for the environmental modeling of potential Caspian Sea water level fluctuations. It means that it is possible to transform this photogrammetric methodology into the technological form that can be used by the decision makers and all other parties involved in the activities related with the coastal management. The high-resolution satellite imagery satisfied the needs of coastal environmental management giving almost the same results as aerial photography. Besides nowadays acquisition of satellite imagery is easily accessible periodically what gives possibility for the permanent tracking of coastal line change dynamics. Using the advantages of high-resolution satellite imagery it is possible to extract majority of all relief topographical details along the coastal areas and over whole territory using stereo plotting techniques what is very important for the further Geographical Information Systems modeling of the potential Caspian Sea fluctuation.

References:

- An Introduction to the Caspian Sea and the Caspian Environment Programme, Page 16, III. Challenges to be Addressed, Sea Water Level Fluctuation.
- Leica Geosystems, IKONOS Sensor Model Support our Guide, Page 1, Introduction to IKONOS Sensor Model Support.
- Leica Geosystems, ERDAS Field Guide, Page 303, 304, Orthorectification.
- Journal of Photogrammetry Engineering & Remote Sensing, Article: Geometric Processing of IKONOS Geo Stereo Imagery for Coastal Mapping Application, Kaichang Di, Ruijin Ma and Ron Li.

© Emil R. Bayramov, 2007

ОСОБЕННОСТИ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СНИМКОВ, ПОЛУЧЕННЫХ СЪЕМОЧНЫМИ КАМЕРАМИ С РАЗЛИЧНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

В последнее время для съемки различных объектов все чаще используются цифровые съемочные камеры. Большинство из них работает в режиме автофокусировки, то есть не позволяет установить фиксированного значения фокусного расстояния. Это вызывает определенные затруднения в фотограмметрической обработке полученных снимков. Во-первых, существующее программное обеспечение не предназначено для обработки снимков с разным фокусным расстоянием, во-вторых, при изменении значения фокусного расстояния возникнет разномасштабность снимков. Следовательно, необходимо выполнить такие преобразования, которые позволят обрабатывать снимки с различными параметрами. Рассмотрим особенности обработки снимков, полученных камерами с различными параметрами.

При фотограмметрической обработке выполняется стереоскопическое наблюдение снимков, которое является наиболее объективным, так как измерение координат точек выполняется точнее, чем при монокулярном наблюдении. Для получения стереоэффекта необходимо выполнить ряд условий:

- Необходимо иметь пару изображений объекта, полученных с разных точек пространства;
- Разделить зрение: левый глаз должен видеть только левое изображение, правый – правое;
- Угол разворота между снимками не должен превышать 8° ;
- Угол конвергенции должен быть не более 16° ;
- Разномасштабность снимков не должна превышать 15%.

Построение модели обычно выполняется с помощью цифровой фотограмметрической станции – стереоплоттера.

Исходными данными при работе на стереоплоттере являются: пара цифровых изображений, параметры съемочной камеры и съемки, каталог координат опорных точек, среднее значение высот точек местности.

Для обработки снимков нужно выполнить следующие процессы:

1. Внутреннее ориентирование снимков. Здесь выполняется переход от системы координат цифрового изображения в плоскую систему координат снимка, то есть выполняется аффинное преобразование:

$$\left. \begin{aligned} x &= a_0 + a_1 x_{изм} + a_2 y_{изм} \\ y &= b_0 + b_1 x_{изм} + b_2 y_{изм} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$ – элементы преобразования;

x, y – координаты координатных меток в плоской системе координат снимка;

$x_{изм}, y_{изм}$ – координаты координатных меток, измеренные в системе координат цифрового изображения.

2. Взаимное ориентирование снимков. Как известно, для того, чтобы построить геометрическую модель местности, необходимо задать паре снимков такое положение относительно друг друга, которое они занимали в момент съемки. Тогда одноименные лучи пересекутся, и множество точек пересечения образуют поверхность, подобную сфотографированному объекту.

Как видно из рис.1, величина фокусного расстояния не повлияла на процесс построения модели. Для определения элементов взаимного ориентирования в базисной системе координат решается уравнение вида (1):

$$Y_1'Z_2' - Y_2'Z_1' = 0. \quad (2)$$

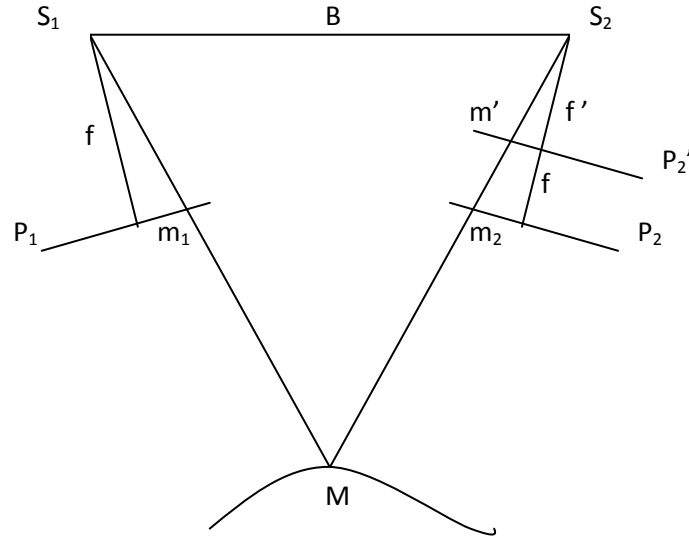


Рис. 1. Съемка объекта камерами с разным фокусным расстоянием

Запишем уравнение (2) в приближенном виде с учетом того, что у левого и правого снимков разное фокусное расстояние (3):

$$x_1 y_2 \alpha_1' + x_1 \kappa_1' f_2 - y_1 x_2 \alpha_2' - (y_1 y_2 + f_1 f_2) \omega_2' - x_2 \kappa_2' f_1 + y_1 f_2 - y_2 f_1 = 0. \quad (3)$$

Введем обозначение $f_2 = f_1 + \Delta f$, тогда уравнение (3) будет иметь вид (4):

$$x_1 y_2 \alpha_1' + x_1 \kappa_1' (f_1 + \Delta f) - y_1 x_2 \alpha_2' - (y_1 y_2 + f_1 (f_1 + \Delta f)) \omega_2' - x_2 \kappa_2' f_1 + f_1 q + y_1 \Delta f = 0. \quad (4)$$

Элементы взаимного ориентирования снимков можно определить по формулам:

$$\alpha_1' = \frac{f_1 (q_6 - q_4) - 2a \Delta f}{2ab}, \quad (5)$$

$$\alpha_2' = \frac{f_1 (q_5 - q_3) - 2a \Delta f}{2ab}, \quad (6)$$

$$\omega_2' = \frac{f_1 (q_4 + q_6 - 2q_2)}{2a^2}, \quad (7)$$

$$\omega_2' = \frac{f_1 (q_5 + q_3 - 2q_1)}{2a^2}, \quad (8)$$

$$\kappa'_1 = \frac{f_1((f_1 + \Delta f)\omega'_2 - q_2)}{b(f_1 + \Delta f)}, \quad (9)$$

$$\kappa'_2 = \frac{(f_1 + \Delta f)\omega'_2 - q_1}{b}. \quad (10)$$

Из сказанного следует, что теоретически процесс взаимного ориентирования выполняется, и модель должна быть построена.

Работа с моделью на стереоплоттере может осуществляться двумя способами:

– Выполняется переход от координат точек модели к координатам точек левого и правого снимков;

– Ведущим является левый снимок.

Рассмотрим принцип работы с моделью вторым способом.

При наведении марки на точку левого снимка компьютер считывает координаты x_n, y_n . Затем вычисляются координаты точки модели X, Y, Z . При этом для вычисления используются формулы (11):

$$\left. \begin{aligned} X &= Xs_1 + (Z - Zs_1) \frac{a_1^n(x_n - x_o) + a_2^n(y_n - y_o) - a_3^n f_1}{c_1^n(x_n - x_o) + c_2^n(y_n - y_o) - c_3^n f_1} \\ Y &= Ys_1 + (Z - Zs_1) \frac{b_1^n(x_n - x_o) + b_2^n(y_n - y_o) - b_3^n f_1}{c_1^n(x_n - x_o) + c_2^n(y_n - y_o) - c_3^n f_1} \\ x_n - x_o &= -f_2 \frac{a_1^n(X - Xs_2) + b_1^n(Y - Ys_2) + c_1^n(Z - Zs_2)}{a_3^n(X - Xs_2) + b_3^n(Y - Ys_2) + c_3^n(Z - Zs_2)} \\ y_n - y_o &= -f_2 \frac{a_2^n(X - Xs_2) + b_2^n(Y - Ys_2) + c_2^n(Z - Zs_2)}{a_3^n(X - Xs_2) + b_3^n(Y - Ys_2) + c_3^n(Z - Zs_2)} \end{aligned} \right\}. \quad (11)$$

При вычислении координат точек снимков по формулам (11) алгоритмом не предусмотрено одновременное использование разного значения фокусного расстояния, то есть компьютер будет производить вычисления, используя значение f_1 . Поэтому необходимо ввести коэффициент преобразования фокусного расстояния:

$$k = \frac{f_1}{f_2}. \quad (12)$$

Тогда формулы для определения координат точек правого снимка будут выглядеть так (13):

$$\left. \begin{aligned} k(x_n - x_o) &= -f_1 \frac{a_1^n(X - Xs_2) + b_1^n(Y - Ys_2) + c_1^n(Z - Zs_2)}{a_3^n(X - Xs_2) + b_3^n(Y - Ys_2) + c_3^n(Z - Zs_2)}, \\ k(y_n - y_o) &= -f_1 \frac{a_2^n(X - Xs_2) + b_2^n(Y - Ys_2) + c_2^n(Z - Zs_2)}{a_3^n(X - Xs_2) + b_3^n(Y - Ys_2) + c_3^n(Z - Zs_2)}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Если у снимков разный масштаб, то в вычисленные координаты необходимо ввести масштабный коэффициент:

$$m = \frac{m_2}{m_1}. \quad (14)$$

Тогда формулы (13) будут выглядеть так:

$$\begin{aligned} \frac{k(x_n - x_0)}{m} &= -f_1 \frac{a_1^n (X - Xs_2) + b_1^n (Y - Ys_2) + c_1^n (Z - Zs_2)}{a_3^n (X - Xs_2) + b_3^n (Y - Ys_2) + c_3^n (Z - Zs_2)}, \\ \frac{k(y_n - y_0)}{m} &= -f_1 \frac{a_2^n (X - Xs_2) + b_2^n (Y - Ys_2) + c_2^n (Z - Zs_2)}{a_3^n (X - Xs_2) + b_3^n (Y - Ys_2) + c_3^n (Z - Zs_2)}. \end{aligned} \quad (15)$$

При работе на стереоплоттере на левом снимке координаты измеряются в пикселях. После вычислений по формулам (15) марка на правом снимке должна попасть на одноименную точку, то есть должен определиться соответствующий номер пикселя.

Определим значение координаты x в пикселях. Координаты в пикселях вычисляются по формуле:

$$n_x = \frac{x}{\Delta_x}, \quad (16)$$

где Δ_x – размер элемента сканирования (пикселя).

$$n_x = \frac{k(x - x_0)}{m\Delta_x}. \quad (17)$$

Введем обозначение:

$$\Delta'_x = \frac{m}{k} \Delta_x, \quad (18)$$

где Δ'_x – преобразованное значение элемента сканирования.

Как известно, при работе со стереопарой снимки должны иметь одинаковое разрешение, следовательно, размер элемента сканирования должен быть одинаковым. Коэффициенты m и k можно ввести в расстояния между координатными метками.

$$\Delta_x = \frac{l_x}{n_x}, \quad (19)$$

где l_x – расстояние между координатными метками.

$$\Delta'_x = \frac{l'_x}{n_x}, \quad (20)$$

где l'_x – преобразованное значение расстояния между координатными метками по оси xx .

Подставим выражение (19) в выражение (18):

$$\Delta'_x = \frac{m}{k} \cdot \frac{l_x}{n_x}. \quad (21)$$

Сравним выражения (20) и (21):

$$l'_x = \frac{m}{k} \cdot l_x. \quad (22)$$

Аналогичные выполняется преобразование расстояние между координатными метками по оси u .

Изменение расстояния между координатными метками позволило построить модель с использованием существующего алгоритма и наблюдать построенную модель в стереоскопическом режиме.

© Е.А. Медведева, 2007

УДК 528.7:528.92:004

А.П. Гук, В.Н. Никитин

СГГА, Новосибирск

MONOSDS – ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ МОДУЛЬ ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЦИФРОВОЙ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Современная цифровая фотограмметрическая станция (ЦФС) является сложным высокотехнологичным продуктом, предназначенным для решения широкого спектра задач, возникающих при измерении цифровых изображений. Хотя в настоящее время различные программные компоненты позволяют выполнять строгую фотограмметрическую обработку снимков и сбор информации по снимкам, они весьма сложны в освоении, требуют продолжительного обучения и высокой профессиональной подготовки оператора. Однако задачи обработки цифровых аэрокосмических изображений возникают не только перед инженерами–аэрофотогеодезистами, но и перед специалистами лесного хозяйства, геологами, экологами, которым требуется более простой в освоении и использовании продукт.

В связи с этим на кафедре фотограмметрии и дистанционного зондирования Сибирской государственной геодезической академии была поставлена задача по разработке программных средств цифровой фотограмметрии, обеспечивающих эффективную и удобную работу пользователя, не требующих специальной подготовки оператора. Общим требованием к такой системе является максимальное упрощение процесса цифровой обработки, унификация интерфейсов, принципов работы различного программного обеспечения, отказ от использования стереорежима.

В рамках данной концепции разработан программный пакет MonoSDS, расширяющий возможности цифровой фотограмметрической станции SDS по обработке цифровых материалов космической, воздушной и наземной съёмки в монорежиме. К его основным функциональным возможностям относятся:

- Привязка снимков различного типа к растровым и векторным картам по опорным точкам и по контурам в интерактивном режиме;
- Импорт и экспорт данных о геопривязке цифровых изображений для распространённых ГИС-систем (MapInfo, ArcGIS, GeoTiff);
- Возможность выполнения аналитической пространственной фототриангуляции с использованием программного комплекса PHOTOCOM;
- Перенос информации со снимка на карту (рисовка контуров по одиночному снимку);

- Трансформирование контуров с использованием различного типа преобразований (в зависимости от исходной информации);
- Трансформирование снимков;
- Обновление цифровых карт, топографической информации в геоинформационных системах;
- Совместимость с форматами и классификаторами распространённых в России типов цифровых карт.

MonoSDS предназначен для создания и обновления контурной части цифровых карт и планов по материалам съёмки различных видов. Его отличительной особенностью является наличие двух графических панелей, каждая из которых может одновременно отображать растровое изображение и цифровую картографическую информацию.

Две графические панели могут использоваться для решения традиционных задач стереофотограмметрии путём идентификации соответствующих точек, изображенных на разных снимках съёмочного маршрута. С их помощью также удобно выполнять пространственную привязку данных по опорным точкам в интерактивном режиме, а двунаправленный обмен векторными данными между панелями позволяет выполнять обновление фрагментов цифровой карты. Координатная связь между графическими панелями и различные режимы отображения позволяют визуально контролировать корректность собранной семантической информации, не перегружая цифровой снимок. При необходимости на экране можно оставить только одну из графических панелей.

Программа обладает широкими возможностями по динамическому трансформированию данных. В настоящий момент реализованы модули для выполнения аффинного преобразования, проективного преобразования, трансформирования по зонам, радиального трансформирования второго порядка (для компенсации дисторсии), эпполярного трансформирования, преобразования данных по законам центральной проекции. Модули трансформирования могут гибко сочетаться между собой. Для привязки снимков при отсутствии достаточного количества точно идентифицируемых опорных точек привязка может выполняться по контурам цифровой карты в интерактивном режиме. В этом случае оператор визуально совмещает характерные контура цифровой карты с контурами на снимках, добиваясь наилучшего совпадения. Такой режим необходим, например, для привязки снимка лесной территории с заросшими ориентирами по элементам квартальной сети. Результаты привязки цифровых изображений могут быть использованы в распространённых ГИС-системах, таких как MapInfo, ERDAS Imagine, ArcGIS и др.

В MonoSDS может быть выполнена строгая фотограмметрическая обработка одиночных снимков путём их внутреннего и внешнего ориентирования, а при использовании программного комплекса PHOTOCOM – также пространственная фототриангуляция.

MonoSDS выполняет общее управление комплексом программ MonoSDS и PHOTOCOM, осуществляет сбор необходимой для пространственной фототриангуляции информации и использует результаты сгущения опорных данных для привязки и трансформирования аэрофотоснимков, первичного сбора картографической информации.

Характерной особенностью MonoSDS является возможность динамического трансформирования не только векторных данных, но и цифровых изображений. При наличии матрицы рельефа возможно выполнение ортофототрансформирования.

Функции редактирования векторной и семантической информации снабжены функцией многоуровневого отката и возврата произведённых изменений, включая групповое удаление объектов [1]. Состояние редактируемой картографической информации фиксируется только при выполнении операции сохранения. В случае использования дополнительного модуля-сервера возможно одновременное редактирование общей картографической базы данных разными пользователями. Данная функция может быть использована для параллельной оцифровки материалов маршрутной или блочной аэрокосмической съёмки. При этом реализованные функции разрешения конфликтных ситуаций исключают одновременное редактирования одного и того же контура разными пользователями, а все выполненные одним пользователем действия после подтверждения произведённых изменений немедленно отображаются на рабочих местах других пользователей, подключённых к общей картографической базе.

Одной из главных задач, решённых в MonoSDS, является задача совместимости программного обеспечения с различными форматами цифровой картографической информации. Это достигнуто за счёт использования гибкого информационного обеспечения [2]. Под информационным обеспечением здесь понимается система классификации и кодирования семантической информации, правила отображения картографических объектов в условных знаках, правила пространственно-логического описания объектов. С помощью встроенного программного обеспечения можно описать не только общую структуру классификатора, но и правила взаимодействия его отдельных полей. Проведённые эксперименты показали, что таким образом можно успешно моделировать такие разные по строению классификаторы, как MapInfo, ArcView, ЦФС ЦНИИГАИК, «Нева», «Панорама». Библиотека условных знаков также может быть настроена в соответствии с используемым классификатором и требованиями заказчика.

В результате использования настраиваемого информационного обеспечения MonoSDS получил возможность работать практически с любыми цифровыми картами. Это особенно важно при обновлении карт, используемых в различных ГИС-проектах, так как в случае несоответствия информационного обеспечения цифровой карты и ЦФС значительная часть накопленной пользователями семантической информации может быть утрачена.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Никитин, В.Н. Разработка модуля управления пространственными данными для использования в распределённых цифровых фотограмметрических системах [Текст] / В.Н. Никитин // Фотограмметрические технологии в XXI веке: Сб. материалов науч. - технической конф., посвящённой 60-летию кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования. 9-11 декабря 2003 г. / СГГА. – Новосибирск, 2003. – С. 35-39.
2. Никитин, В.Н. Подсистема классификации для цифровой фотограмметрической станции [Текст] / В.Н. Никитин // Сб. науч. тр. аспирантов и молодых учёных. Сиб. гос. геодез. акад. / Под общ. ред. Т.А. Широковой. – Вып. 2. – Новосибирск: СГГА, 2005. – С. 7-13.

© А.П. Гук, В.Н. Никитин, 2007

БИОФИЛЬТРУЮЩАЯ СИСТЕМА ВОДНЫХ РАСТЕНИЙ ЛИТОРАЛИ НА ПУТИ МИГРАЦИИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Огромное функциональное значение в литоральной зоне водоемов имеет пояс прибрежно-водных гигрофитов и погруженных макрофитов, которые представляют своеобразный *растительный фильтр* на пути антропогенных поллютантов, мигрирующих с суши. Прибрежно-водные растения аккумулируют биогенные элементы и органические вещества, ионы различных химических элементов, а также задерживают приносимые с водосбора взвеси путем образования органоминеральных скоплений на листьях, стеблях и водных придаточных корнях [3].

Пояс прибрежно-водных гигрофитов (рогоз широколистный *Typha latifolia*, тростник южный *Phragmites australis*, водолуб болотный *Eleocharis palustris* и др.) заполняет периферийные участки водоемов сплошным покровом, активно встраивается в биогеохимические процессы перераспределения химических элементов, задерживая часть биогенов и загрязняющих веществ, поступающих в экосистему с прилегающей территории. Практически все поллютанты (тяжелые металлы, короткоживущие изотопы), проходя через *биофильтр* прибрежной экосистемы, осаждаются или сорбируются [2, 3].

Техногенно-трансформированные водные экосистемы. Достаточно полно изучено влияние водной растительности на процессы перераспределения металлов в районах действия горно-обогатительных и металлургических предприятий (Бортникова и др., 2003; Елпатьевский и др., 2000; Хожина, Храмов, 1999; Хожина и др., 2001; Богуш, 2004). Показано, что поглощение металлов макрофитами в хвостохранилищах затопленного типа (техногенные озера) происходит настолько активно, что их концентрация в сухом веществе исследуемых растений существенно превышает содержание в иловых растворах и свободных водах, а по некоторым металлам - приближается к таковой в твердом веществе донного осадка, особенно в подземной части растений. Таким образом, пояс прибрежно-водных гигрофитов и истинно водных растений (макрофитов) может рассматриваться как своеобразный биогеохимический барьер на пути миграции металлов с дренажными и инфильтрационными водами [2].

Однако трансформация форм нахождения металлов при их проникновении в растения несет негативные последствия. Водная растительность интенсивно поглощает металлы, которые находятся в поровых (иловых) и свободных водах техногенных озер в подвижных формах, и, следовательно, легкодоступных для растений. При отмирании растений верхний детритовый слой донных отложений обогащается подвижными формами металлов, которые могут стать источниками вторичного загрязнения придонного слоя воды и соответственно бентосных организмов токсичными элементами [1].

Автором данной публикации изучена концентрационная функция прибрежно-водных гигрофитов и погруженных макрофитов в шламонакопителях Селенгинского целлюлозно-картонного комбината (СЦКК), в которые по пульпопроводам подаются технологические шламы сульфатцеллюлозного производства и шлам-лигнин с очистных сооружений СЦКК после химической очистки сточных вод [5,6]. Подобно хвостохранилищам затопленного типа, детально изученных в работах, цитируемых выше, шламонакопители сульфатцеллюлозных производств по сути своей также представляют собой своеобразные техногенные озера.

Твердые отходы, поступающие в шламонакопители, являются основными концентраторами тяжелых металлов сульфатцеллюлозных производств. В технологический цикл СЦКК металлы поступают с сырьем и химическими реактивами, и в конечном итоге, пройдя всю технологическую цепочку варки небеленой целлюлозы, накапливаются в твердых отходах в количествах, значительно превышающих технолого-геохимический фон (табл. 1).

Таблица 1. Концентрирование металлов в твердых отходах Селенгинского ЦКК

Элемент	Фон (древесина)	Твердые отходы, мг/кг сухой массы			
		шламлигнин	активный ил	технологический шлам	отходы каустизации
Hg	н / о	0.008	0.0008	0.015	0.01
Cd	0.014	0.15	0.27	1.7	1.8
Pb	0.07	3.3	1.7	12.8	7.5
Cu	0.7	31	33	94	44
Zn	8	61	87	202	192
Mn	48	259	445	1224	1900
Fe	28	4630	9383	5997	9800
Al	37	41673	25606	106493	9000
Sr	16	48	63	196	450

Примечание: анализы проведены в Институте геохимии СО РАН атомно-эмиссионным анализом (аналитики – А.И. Кузнецова, Н.Л. Чумакова); Hg - методом ААС, «холодный пар» (аналитик - Л. Д. Андрулайтис); то же в табл. 2.

Складирование отходов сульфатцеллюлозных предприятий в шламонакопителях приводит к загрязнению поверхностных и грунтовых вод, почв, атмосферы, что, в конечном итоге, практически всегда проявляется в накоплении целого ряда химических элементов в биообъектах. Для оценки негативного воздействия отходов СЦКК в течение трех лет проводили отбор типичных («сквозных») для данной местности растений (рогоз широколистный *Typha latifolia*, водолуб болотный *Eleocharis palustris*), образующих бордюрный пояс вокруг шламонакопителей. В качестве фоновых концентраций металлов в органах выбранных видов растений приняты значения, полученные автором для идентичных видов из района Выдрино-Танхой (Леонова, 2003), в которых диапазон концентраций микроэлементов не выходит за пределы регионального фона для растений Восточной Сибири [4].

Согласно результатам многолетних исследований [5,6] показано, что тяжелые металлы не накапливаются в водных растениях, несмотря на довольно

высокие содержания их в технологических шламах, поступающих в шламонакопители СЦКК. Концентрации Cd, Pb, Cu, Zn, Mn в органах растений шламонакопителей не превышают фоновых значений для растений из района Выдрино-Танхой (табл. 2).

Таблица 2. Среднее содержание ($X \pm x_{0.05}$) и интервал содержаний (знаменатель) в прибрежно-водных растениях шламонакопителя СЦКК, мг/кг сухой массы

Элемент	Корни (n)	Стебли (n)	Листья (n)	Соцветия (n)	Фон
Рогоз широколистный (<i>Typha latifolia</i>)					
Pb	$\frac{2.13 \pm 0.72}{(5)}$ 0.3 – 4.2	$\frac{0.58 \pm 0.18}{(5)}$ 0.1 – 1.0	$\frac{0.37 \pm 0.09}{(5)}$ 0.1 – 0.6	$\frac{0.15 \pm 0.04}{(4)}$ 0.1 – 0.3.	0.1 - 9.6
Cd	0.67 (1)	0.14 (1)	0.19 (1)	0.11 (1)	0.05 – 0.2
Cu	$\frac{5.3 \pm 1.2}{(5)}$ 3.0 – 8.4	$\frac{2.7 \pm 0.7}{(5)}$ 1.0 – 4.5	$\frac{2.2 \pm 0.7}{(5)}$ 1.1 – 4.3	$\frac{3.8 \pm 1.4}{(4)}$ 0.6 – 7.2	2.8 – 34
Zn	10.6 – 21.3 (2)	5.8 – 15.2 (2)	5.2 – 11.8 (2)	12.1-19.9 (2)	13 – 34
Mn	$\frac{30.4 \pm 8.8}{(3)}$ 15.2 – 45.7	$\frac{18.6 \pm 1.7}{(3)}$ 15.2 – 20.3	$\frac{60.9 \pm 23.5}{(3)}$ 32.3 – 107.6	–	9.4 – 33
Mo	$\frac{0.56 \pm 0.23}{(4)}$ 0.15 – 1.2	$\frac{0.31 \pm 0.11}{(4)}$ 0.10 – 0.61	$\frac{0.86 \pm 0.58}{(4)}$ 0.11 – 2.58	$\frac{0.42 \pm 0.15}{(3)}$ 0.18 – 0.72	0.14 – 0.61
B	$\frac{10.1 \pm 2.2}{(4)}$ 4.6 – 15.2	$\frac{7.6 \pm 3.8}{(4)}$ 2.0 – 18.3	$\frac{10.9 \pm 4.4}{(4)}$ 3.2 – 23.6	$\frac{9.7 \pm 2.2}{(3)}$ 6.1 – 13.9	4.8 – 9.0
Водолуб болотный (<i>Eleocharis palustris</i>)					
Pb	$\frac{0.94 \pm 0.3}{(5)}$ 0.1 – 1.8	$\frac{0.51 \pm 0.21}{(5)}$ 0.1 – 1.25	$\frac{0.34 \pm 0.13}{(3)}$ 0.1 – 0.56	$\frac{0.41 \pm 0.03}{(5)}$ 0.1 – 0.92	0.4 - 4.9
Cd	0.22 (1)	0.06 (1)	0.12 (1)	0.17 (1)	0.05 – 0.2
Cu	$\frac{4.3 \pm 1.0}{(5)}$ 1.4 – 7.4	$\frac{2.7 \pm 0.4}{(5)}$ 1.2 – 3.7	$\frac{2.7 \pm 0.5}{(3)}$ 1.8 – 3.7	$\frac{3.2 \pm 1.2}{(5)}$ 0.9 – 7.9	5 – 30
Zn	41.9 (1)	21.3 (1)	–	34.3 (1)	12 – 47
Mn	$\frac{62.8 \pm 25.8}{(4)}$ 27.9 – 139.7	$\frac{31.3 \pm 3.6}{(4)}$ 25.1 – 37.6	$\frac{37.2 \pm 10.7}{(3)}$ 18.6 – 55.9	$\frac{16.1 \pm 4.3}{(4)}$ 9.3 – 27.3	5 – 48
Mo	$\frac{0.59 \pm 0.11}{(4)}$ 0.28 – 0.84	$\frac{0.41 \pm 0.06}{(4)}$ 0.25 – 0.5	$\frac{0.36 \pm 0.18}{(3)}$ 0.18 – 0.74	$\frac{0.27 \pm 0.04}{(4)}$ 0.18 – 0.37	0.2 – 2.3
B	$\frac{12.9 \pm 5.1}{(4)}$ 5.6 – 27.9	$\frac{8.7 \pm 5.1}{(4)}$ 1.2 – 25.1	$\frac{8.6 \pm 5.1}{(3)}$ 1.8 – 18.6	$\frac{9.5 \pm 3.1}{(4)}$ 4.6 – 18.5	2 – 10

Примечание: ($X \pm x_{0.05}$) - среднее и ошибка среднего; n – количество усредненных проб.

Это обстоятельство можно объяснить тем, что в отличие от хвостохранилищ сульфидсодержащих отходов обогащения барит-полиметаллических руд, поровые воды которых характеризуются низкими значениями pH, например, 4.5-6.1 в хвостохранилище Талмовские пески [2],

места складирования отходов сульфатцеллюлозных предприятий представляют собой своеобразные *щелочные аквальные ландшафты*. Воды шламоотстойников СЦКК, как правило, имеют рН 9-10, что обусловлено поступлением технологических шламов из цеха каустизации щелоков и регенерации извести (ЦКРИ), где белый щелок, необходимый для варки целлюлозы, получают в результате каустизации зеленого щелока известью.

Наряду с «техногенными озерами» автором были исследованы и некоторые природные водоемы, подвергающиеся значительному техногенному воздействию. В Алтайском крае примером таких техногенно-трансформированных водоемов может служить оз. Горькое (водоем-преемник коммунально-бытовых стоков г. Рубцовска) и Денисов пруд (г. Змениногорск), на котором до 1972 г. стояла фабрика по обогащению свинцово-цинковой руды. Водная растительность этих водоемов и по настоящее время играет роль своеобразного биофильтра, аккумулируя повышенные относительно фона концентрации отдельных тяжелых металлов (табл. 3).

Таблица 3. Содержание тяжелых металлов (мкг/г сухой массы) в прибрежно-водных гигрофитах и макрофитах из водоемов урбанизированных территорий

Водоем	Hg	Cd	Pb	Cu	Zn	Cr	Ni	Co	Fe	Mn
Гигрофиты (Рогоз широколистный <i>T. latifolia</i> , * надземная часть, ** - корни)										
Оз. Горькое	*0.077	0.021	2.5	3.0	26	4.0	0.33	< 0.5	133	203
	*0.11	0.22	2.3	4.3	38	9.6	3.1	< 0.5	3650	125
Гидрофиты плавающие (многокоренник обыкновенный <i>Spirodela polyrrhiza</i>)										
Оз. Горькое	0.12	0.77	8.5	14.0	175	21.0	5.8	2.0	4570	405
Гидрофиты погруженные (рдест гребенчатый <i>Potamogeton pectinatus</i>)										
Денисов пруд	0.1	0.18	6.0	3.3	29	8.7	3.4	0.9	1700	1080
Гидрофиты погруженные (рдест блестящий <i>Potamogeton lucens</i>)										
р. Ромашка	0.091	0.88	7.2	32.8	368	26.5	19	7.9	8840	2710
усл.-фон.	0.013	0.31	2.0	12.3	40	9.0	6.1	3.4	2450	2230
Интервалы концентраций металлов в водных растениях незагрязненных водоемов										
Фоновые водоемы	0.022±	0.1-	5.8±	8.0±	25.1	7-13	6.6±	1.1±	535.5±	412±
	0.001	0.5	0.5	0.2	± 0.7		0.2	0.09	24.1	38

Примечание: анализы проведены в АЦ ОИГТиМ СО РАН методом ААС (аналитики – Н.В. Андросова, В.Н. Ильина); Hg - методом ААС, «холодный пар» (аналитик - Ж.О. Бадмаева).

Незагрязненные водные экосистемы. Согласно многочисленным литературным источникам (Киприянова и др., 1995; Микрякова, 1998; Куриленко, Осмоловская, 2006 и др.), сформировалось мнение, что водная растительность, произрастающая в условиях природных (незагрязненных) водоемов, проявляет себя в качестве биофильтрующей системы не так контрастно, как в природно-нарушенных условиях (техногенные озера и водоемы урбанизированных территорий). Это вполне объяснимо, поскольку концентрации металлов в воде и донных отложениях незагрязненных водоемов значительно ниже по сравнению с таковыми в техногенно-

трансформированных. Наши многолетние исследования не противоречат этому утверждению (табл. 4).

Таблица 4. Содержания тяжелых металлов (мкг/г сухой массы) в погруженных макрофитах (преимущественно рдестах *Potamogeton sp.*) из водоемов Восточной и Западной Сибири

Водоем	Hg	Cd	Pb	Cu	Zn	Cr	Ni	Co	As	Fe	Mn
Озера разных ландшафтных зон Алтайского края (1998 г.)											
1	0.007	0.6	0.7	2.8	5.1	3.9	2.3	1.1	<1	1091	115
2	0.008	0.02	2.4	4.9	14	7.1	3.6	1.5	2.2	2073	678
3	0.008	0.05	0.7	2.8	15	4.7	2.8	0.8	2.4	1642	253
4	0.038	0.04	3.8	4.4	25	3.4	3.9	2.3	-	8800	815
5	0.022	0.008	1.3	2.5	7	3.8	2.4	1.0	1.5	1319	155
Озера Пуровского района Ямало-Ненецкого автономного округа (2000 г.)											
6	0.05	0.6	12	3	170	-	4	11	-	1200	1205
7	0.04	0.03	0.1	3.8	21	6.5	6	1.6	-	960	160
8	0.4	0.11	0.12	3.8	81	-	7.3	7.6	-	2900	458
Озера Томской и Новосибирской областей (2003 г.)											
9	0.011	0.07	2.3	0.4	8.4	7.9	0.5	0.9	-	770	1321
10	0.011	0.04	5.6	0.8	9.4	8.6	0.8	-	2.14	910	2013
Водохранилища Сибири											
11	0.007± 0.001	-	2.3 ± 0.4	13.4 ± 1.9	26.6 ± 2.1	11.2 ± 1.8	5.2 ± 0.8	2.3 ± 0.5	-	1373 ±175	798 ± 115
12	0.01	-	12.1	10	23	15	10	1.1	-	806	613
13	0.009± 0.001	0.1 ± 0.02	2.5 ± 0.3	5.8 ± 1.0	24.9 ± 2.3	7.4 ± 2.9	4.7 ± 1.4	1.7 ± 0.5	2.7 ± 0.7	2884.5± 951.5	506.8 ± 19.5
Средняя Обь	0.022	0.26	3.2	7.8	45	9.0	5.0	1.7	<1	2500	549
Нижняя. Томь	0.079	0.39	3.7	6.0	56	6.0	6.6	4.5	5.3	1976	250
Интервалы концентраций металлов в водных растениях незагрязненных водоемов											
Фоновые водоемы	0.022± 0.001	0.1-0.5	5.8± 0.5	8.0± 0.2	25.1 ± 0.7	7 -1 3	6.6± 0.2	1.1± 0.09	-	535.5± 24	412± 38

Примечание: ¹ - оз. Кривое, ² - оз. Чаячье, ³ - оз. Ракиты, ⁴ - оз. Колыванское, ⁵ - оз. Горькое (Алтайский край); ⁶ - безымянное озеро (с.ш. 65 04 907, в.д.78 14 638); ⁷ - безымянное озеро (г. Новый Уренгой); ⁸ - озеро (г. Ямбург); ⁹ - оз. Кирек Томской области; ¹⁰ - оз. Белое Новосибирской области; ¹¹ - Иркутское -; ¹² - Братское -; ¹³ - Новосибирское водохранилища.

Таким образом, в целом водная растительность – это мощный аккумулятор металлов, который извлекает их из воды и донных осадков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богуш, А.А. Поведение металлов (Zn, Cd, Pb, Cu, Ba, Fe) в техногенных потоках: диссертация на соиск. учён. степ. канд. г.-м. наук / А.А. Богуш. – Новосибирск, 2004. - 167 с.

2. Бортникова, С.Б. Техногенные озера (формирование, развитие и влияние на окружающую среду) / С.Б. Бортникова, О.Л. Гаськова, А.А. Айриянц / Новосибирск: Изд-во СО РАН Филиал «ГЕО», 2003. – 120 с.
3. Дикийёва, Д. Химический состав макрофитов и факторы, определяющие концентрацию минеральных веществ в водных растениях / Д. Дикийёва, И.А. Петрова // Гидрологические процессы в водоемах. – Л.: Наука, 1983. – С. 107-213.
4. Ковалевский, А.Л. Биогеохимия растений / А.Л. Ковалевский. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1991. – 294 с.
5. Леонова, Г.А. Технолого-геохимические циклы миграции тяжелых металлов в системе Селегинский целлюлозно-картонный комбинат - сточные воды – биота: диссертация на соиск. учён. степ. канд. г.-м. наук / Г.А. Леонова. – Иркутск, 1992. – 193 с.
6. Леонова, Г.А. Технолого-геохимические циклы и баланс тяжелых металлов в сульфатцеллюлозном производстве / Г.А. Леонова // Геоэкология. – 1996. – №1. – С. 98-103.

© Г.А. Леонова, 2007

УДК 556.3/551.3

В.А. Льготин, Ю. В. Макушин, Г.А. Плевако
ОАО «Томскгеомониторинг», Томск

МОНИТОРИНГ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ КАК ИНФОРМАЦИОННАЯ ОСНОВА УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ НЕДРНА ТЕРРИТОРИИ СИБИРСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА

Территория Сибирского Федерального округа (СФО) включает 16 субъектов Федерации с общей площадью 5114,8 тыс. км² и населением 20,5 млн. чел.

Состояние геологической среды (недр) на территории СФО определяется воздействием на нее как природных, так и техногенных факторов, причем роль последних неуклонно возрастает. Интенсивное хозяйственное освоение территории часто сопровождается неблагоприятными последствиями. Эксплуатация месторождений (нефтяных, рудных, угольных, подземных вод) приводит к существенным изменениям в подземной гидросфере и развитию опасных экзогенных геологических процессов (ЭГП) - оседание и провалы дневной поверхности, развитие оползней, подтопление значительных территорий и др.

В пределах крупных промышленных центров наблюдается загрязнение почв, грунтов, поверхностных и подземных вод химическими, органическими, радиоактивными, бактериологическими веществами и тяжелыми металлами. В населенных пунктах СФО получили широкое развитие такие опасные ЭГП, как подтопление, заболачивание, оползни, овражная эрозия, активизирующиеся вследствие хозяйственной деятельности и наносящие значительный материальный ущерб.

В этой связи для обеспечения устойчивого развития территорий субъектов Федерации СФО и округа в целом проводятся работы по государственному мониторингу состояния недр (ГМСН).

В организационном плане создание ГМСН на территориях субъектов Федерации, входящих в СФО, следует относить к началу 1995 года, когда во многих субъектах были организованы Территориальные Центры мониторинга.

До 2005 г. мониторинговые исследования в каждом субъекте Федерации проводились по самостоятельным программам, часто не согласованным со смежными территориями ни по видам и составу работ, ни по регламенту наблюдений, что значительно усложняло обобщение полученных результатов по изучаемым гидрогеологическим структурам на территории СФО.

С 2005 г. мониторинговые исследования ведутся по согласованной со всеми субъектами Федерации Программе на основе единого технического (геологического) задания.

Целевым назначением работ по ведению ГМСН является обеспечение органов государственной власти и управления государственным фондом недр объективной информацией о состоянии недр и происходящих в них процессах для рационального недропользования, обеспечения жизнедеятельности и безопасности населения.

Основными геологическими задачами ГМСН на территории СФО являются:

- Оценка текущего состояния недр, выявление тенденций его изменения под воздействием природных и техногенных факторов;
- Разработка рекомендаций по рациональному недропользованию и охране недр, а также по предотвращению или снижению негативного воздействия опасных ЭГП;
- Информационное обеспечение органов управления государственным фондом недр и других органов государственной власти на региональном и территориальном уровнях, в т.ч. в оперативном режиме.

Значительная площадь округа, разнообразные природно-климатические, ландшафтные особенности территории, сложные геолого-тектоническое строение, гидрогеологические и инженерно-геологические условия, высокая техногенная нагрузка на геологическую среду в наиболее освоенных районах определяют особенности и технологию мониторинговых исследований.

Специфической особенностью и непременным условием осуществления ГМСН является непрерывный во времени характер исследований.

Стратегия развития ГМСН на территории СФО основывается на единой технологии получения, систематизации и обработки фактографической информации с использованием компьютерных информационно-справочных баз и банков данных и геоинформационных систем (ГИС).

Основой ГМСН является специальным образом организованная государственная опорная наблюдательная сеть (ГОНС) постов и пунктов наблюдений за подземными водами и ЭГП.

Информационные потоки о состоянии недр формируются по результатам регулярных наблюдений при ведении ГМСН, разовых наблюдений в форме отчетных материалов недропользователей, а также организаций, осуществляющих контроль состояния геологической среды. Огромный массив информации сосредоточен в многочисленных фондовых материалах, отражающих результаты разномасштабных съемочных, поисково-разведочных, тематических, научно-исследовательских работ по изучению геологического

строения, гидрогеологических и инженерно-геологических условий территории.

Таким образом, информационные ресурсы, определяющиеся наиболее полным набором исходных данных о состоянии геологической среды, достигли таких объемов, что любые выводы, сделанные прежними «ручными» способами, в принципе, уже не могут удовлетворять степень обоснованности и уровнем проработки фактического материала.

Картографическая база данных предназначена для наглядной визуализации данных на основе полнофункциональных ГИС с возможностью свертки информации, перехода к разным масштабам, объединения объектов, построения тематических карт и пространственного анализа данных.

Для создания цифровых тематических карт, отражающих состояние геологической среды, отработана методика их построения.

Обобщенная фактографическая и картографическая информация лежит в основе выработки и принятия управленческих решений для оптимального размещения производительных сил, рационального использования и охраны геологической среды.

ГМСН территории СФО осуществляется на 2-х уровнях: региональном и территориальном.

Мониторинговые исследования территориального уровня проводятся в пределах субъектов Федерации территориальными центрами (ТЦ) ГМСН с использованием ГОНС.

На региональном уровне обобщаются результаты мониторинговых исследований территориального уровня.

Содержание мониторинга на территориальном уровне составляют результаты геологического изучения и использования недр и протекающих в них процессов, в том числе систематические наблюдения, специализированные обследования, характеризующие изменение состояния геологической среды или отдельных ее компонентов. Работы ведутся ТЦ ГМСН по следующим направлениям:

1. Стационарные наблюдения за состоянием подземных вод и ЭГП по ГОНС федерального уровня;

2. Обследование источников техногенного воздействия и водозаборов подземных вод;

3. Сбор и систематизация информации о состоянии недр и других компонентов природной среды по объектам геологоразведочных работ, участкам пользования недрами и другим видам хозяйственной деятельности, оказывающим влияние на состояние недр, а также из смежных систем мониторинга (Росгидромета, Роспотребнадзора и др.);

4. Вся полученная в процессе наблюдений (мониторинга) информация по подземным водам и ЭГП, а также собранная из разных источников, заносится в базы данных;

5. Подготовка регламентной продукции по результатам мониторинговых исследований, отчетности недропользователей, информации, поступающей из смежных систем мониторинга окружающей среды.

На региональном уровне работы по ГМСН ведутся ОАО «Томскгеомониторинг», выполняющим функции регионального центра ГМСН, по следующим направлениям:

1. Создание цифровых моделей базовых тематических карт и ведение дежурных карт на территорию СФО;

2. Дешифрирование данных дистанционного зондирования Земли (объектов техногенной нагрузки, опасных экзогенных процессов - овражная эрозия, речная боковая эрозия, плоскостной смыв и т. д.);

3. Создание и информационная поддержка Интернет-сайта;

4. Подготовка регламентной продукции, включающей:

– Сводные ежегодные информационные бюллетени о состоянии геологической среды на территории СФО, отчеты по государственному учету вод;

– Реестры наблюдательных сетей за подземными водами и ЭГП;

– Информационные сводки о состоянии подземных вод и о проявлениях ЭГП;

– Прогнозы развития ЭГП на процессоопасные сезоны;

5. Организационно-методическое сопровождение работ.

Следует отметить, что в территориальных центрах ГМСН в настоящее время сосредоточен значительный объем информации о состоянии геологической среды, который используется для подготовки рекомендаций по предупреждению экологических проблем, природно-техногенных чрезвычайных ситуаций. Разрабатываемые по данным мониторинга ТЦ ГМСН рекомендации используются административными органами самоуправления для принятия мер по предотвращению чрезвычайных ситуаций или оперативной ликвидации их последствий. Так, например, в Алтайском крае на основе информационных отчетов и сводок Алтайского Центра о геодинамической обстановке и активизации опасных ЭГП на оползневом склоне в г. Барнауле производилось планирование заблаговременного сноса жилых домов и переселение жителей в безопасное место с участков, где существует прямая угроза воздействия оползневых процессов в ближайшее время. В Томской области данные мониторинга развития оползневых процессов на участке Лагерный сад в г. Томске регулярно используются для корректировки работ по инженерной защите, проводящихся в этой части города. В Иркутской области по рекомендациям ИТЦ ГМГС начались работы по чистке и берегоукреплению р. Черемшанки (г. Черемхово) с целью снижения активности подтопления.

Своевременное принятие управленческих решений с применением материалов ГМСН позволяет минимизировать ущерб от проявлений ЧС и сократить финансовые затраты на их ликвидацию. Не случайно в последние годы растет ежегодное количество запросов от государственных органов власти и управления, органов местного самоуправления, Комитетов по вопросам ГО и

ЧС, недропользователей. На начало декабря 2006 г. получено уже более 960 запросов, писем и заявок.

К сожалению, сложившаяся к настоящему времени ГОНС за подземными водами и ЭГП часто не позволяет получать полную и исчерпывающую информацию о состоянии геологической среды, т.к. ее состояние и размещение не всегда соответствуют современным требованиям к объему и содержанию получаемой информации.

До сих пор не решен вопрос по определению статуса ГОНС и ее сохранению, что может привести к ее полному исчезновению в ближайшем будущем.

На территории СФО в 2005 г. были начаты работы по выбору объектов ГМСН, которые позволили бы оптимизировать наблюдательные сети за подземными водами и ЭГП в направлении их востребованности, оперативности и достоверности получаемой информации. Организация новых пунктов наблюдений и восстановление уже имеющихся требует значительных капитальных вложений, поэтому понятно, что при существующем финансировании оптимизация государственной опорной наблюдательной сети в рамках ГМСН не может быть реализована.

Актуальной проблемой является защита действующих пунктов наблюдения от несанкционированного доступа и целесообразность оборудования их приборами для непрерывного слежения за уровнем подземных вод, особенно пунктов наблюдения, расположенных в труднодоступной местности.

При ведении мониторинга ЭГП необходимо более широко использовать материалы аэро- и космического зондирования, цифровую съемочную аппаратуру, особенно на протяженных участках (водохранилища, железные и автомобильные дороги федерального значения).

Следует отметить, что выполняемые виды и объемы работ в рамках действующего Государственного контракта не позволяют в полной мере решить все задачи мониторинга состояния недр по причине недостаточного финансирования работ из федерального бюджета и отсутствия финансирования из территориальных бюджетов в большинстве субъектов Федерации СФО. По этой причине для обеспечения рационального и безопасного использования геологической среды на территории СФО необходима постановка и реализация отдельных федеральных Проектов, которые позволят решить ряд наиболее острых проблем мониторинга геологической среды.

Среди них можно выделить следующие:

1. Оптимизация государственной опорной наблюдательной сети, включая обоснование количества и местоположения пунктов (участков) наблюдения, оценку их технического состояния и информативности, определение комплекса ремонтно-восстановительных работ, разработку регламента наблюдений с учетом целевого назначения и особенностей гидрогеологических и инженерно-геологических условий;

2. Выявление и паспортизация объектов и проявлений ЭГП, в том числе техногенно обусловленных, на основе проведения специального инженерно-

геологического обследования с широким применением данных ДЗЗ. В рамках этой работы необходимо провести оценку подверженности территории различным видам геологических процессов с выделением характерных участков развития конкретных видов ЭГП, оценки динамики событий и явлений, их прогноза, а также организации их более детального изучения на отдельных участках мониторинга;

3. Оценка состояния ресурсов и качества подземных вод, используемых в качестве источника хозяйственно-питьевого водоснабжения в естественных и нарушенных условиях, на основе изучения и обобщения фондовых, производственных материалов, данных обследования водозаборов, эксплуатирующих подземные воды с оценкой их качества согласно требованиям СанПиНа.

Как показывает опыт в других регионах РФ, без повышения эффективности управления недрами реальное улучшение их состояния и их рациональное использование невозможно. В свою очередь, эффективность управления напрямую зависит от качества и количества используемой геологической, гидрогеологической, гидрохимической и иной информации.

© В.А. Льготин, Ю. В. Макушин, Г.А. Плевако, 2007

УДК 631.427

М.В. Якутин, Ч. Лхагвасурэн, А.Н. Цвельчугов

ИПА СО РАН, Новосибирск

Ховдский Государственный Университет, Ховд, Монголия

СГГА, Новосибирск

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПОЧВЕННОЙ МИКРОБИОЛОГИИ В ЭКОЛОГИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ ПАСТБИЩ В ПОЛУПУСТЫНЯХ ЗАПАДНОЙ МОНГОЛИИ

Экосистемы аридных и семиаридных областей отличаются повышенной уязвимостью, и поэтому даже сравнительно слабые антропогенные воздействия могут существенно нарушать природное равновесие, стимулировать процессы прогрессирующей деградации и опустынивания.

Термин «опустынивание» был введен в литературу в 20-е годы XX века для обозначения процесса смены растительного покрова на пастбищах в результате выпаса. В 1977 году на конференции ООН по борьбе с опустыниванием в Найроби было принято определение опустынивания, как «уменьшения или уничтожения биологического потенциала земли, которые, в конечном счете, могут привести к возникновению условий, аналогичных естественной пустыне». Т. е., к опустыниванию (чрезмерной деградации) приводит антропогенное воздействие на аридные и семиаридные экосистемы, превышающее способность этих экосистем к самовосстановлению [1].

Малонаселенность и сохранение в значительной мере традиционного хозяйственного уклада определяют преимущественно экстенсивный характер природопользования в Монголии. Господствующие на ее территории экосистемы степей и полупустынь изменены сравнительно слабо и нередко

функционируют в режиме, близком к естественному. Но в настоящее время антропогенные нагрузки на природные комплексы Монголии возрастают, в интенсивное хозяйственное использование вовлекаются все новые территории и все более широкий круг экосистем [2]. В современных аридных и семиаридных экосистемах Монголии многовековая пастбищная дигрессия привела к усилению процессов опустынивания, что проявляется в закустаривании степных экосистем, изменении роли доминантов в сообществах, изменении экологических условий, позволяющих поселяться видам, свойственным полупустынной и пустынной зонам (галофиты, облигатные псаммофиты и пустынные сорные виды) [1].

Таким образом, в условиях усиливающегося антропогенного пресса наблюдается ускоренная деградация экосистем аридных и семиаридных территорий, и основная причина такой деградации – увеличение пастбищной нагрузки. В этих условиях становится актуальным поиск и разработка надежных быстрых и относительно простых методов экологического мониторинга аридных и семиаридных экосистем. Речь идет, прежде всего, о методике оценки современного состояния и нарушенности экосистем с учетом характера и степени антропогенного воздействия на природные комплексы. Оценка степени нарушенности пастбищ по состоянию растительности является наиболее распространенной, но этот показатель не может использоваться для целей мониторинга после палов, массового выпаса скота и т.д., т.е. в тех случаях, когда растительность на исследуемом участке отсутствует.

Западная Монголия является одной из 11 основных областей Центральной Азии. Эта территория имеет площадь более 100000 км² и приурочена к депрессии, пролегающей между хребтами Монгольского Алтая и Хангая. За данной территорией утвердилось название Котловина Больших озер. Наиболее характерными экосистемами в Западной Монголии являются сухие степи и полупустыни [3]. В условиях Западной Монголии наибольшую актуальность имеют мониторинговые исследования экосистем, находящихся под различной по силе пастбищной нагрузкой.

Таким образом, цель настоящего исследования состояла в оценке применимости современных микробиологических методов для целей почвенно-экологического мониторинга и в оценке влияния пастбищной нагрузки на запас биомассы почвенных микроорганизмов в бурых пустынно-степных почв Западной Монголии.

Основа деструкционного звена биологического круговорота в наземных экосистемах – почвенные микроорганизмы [4]. В настоящей работе изучались основные показатели структуры (общая биомасса) и функционирования (дыхательная активность и метаболический коэффициент) сообщества почвенных микроорганизмов.

Объекты настоящего исследования были выбраны во время совместной российско-монгольской экспедиционной поездки в Ховдском аймаке Республики Монголия в июле 2006 г. вблизи Больших озер Хара-Ус-Нур, Хара-Нур и Дургэн-Нур на больших массивах бурых пустынно-степных щебнистых

почв. Объектами исследования стали участки пастбищ, находящиеся на протяжении последних десятилетий под различно по силе пастбищной нагрузкой. Основные характеристики исследованных экосистем приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные характеристики исследованных экосистем

№ п/п	Экосистема	Проективное покрытие (%)	Высота травостоя (см)	Пастбищная нагрузка
	Кустарниковое полупустынное сообщество	10	5-50	Слабая нагрузка, осеннее-весенний выпас скота
	Кустарниковое полупустынное сообщество	15	3-20	Средняя нагрузка, выпас скота в течение всего года
	Кустарничково-разнотравное полупустынное сообщество	5	2-10	Сильная нагрузка в течение всего года

Образцы почв в исследованных экосистемах отбирались в июле 2006 г. из слоев 0-10, 10-20 и 20-35(40) см. В каждом слое отбирались 4 индивидуальных образца по общепринятой методике [5], которые затем доставлялись в лабораторию для анализов.

В почвенных образцах определялись следующие показатели: органический углерод ($C_{орг}$) по методу Тюрина [6], углерод в биомассе почвенных микроорганизмов (C биомассы) методом фумигации-инкубации [7] в модификации [8]. Статистическая обработка полученных результатов проводилась методами вариационного и дисперсионного анализов [9].

Лето 2006 года в Западной Монголии не отличалось по температурам и количеству осадков от среднемноголетней нормы. Влажность всех отобранных почвенных образцов была низкой: 0,75 - 3,50%.

Минимальная концентрация почвенного органического вещества была зафиксирована в нижних (20-35(40) см) горизонтах исследованных почв на участках с сильной и средней пастбищной нагрузкой (рис. 1).

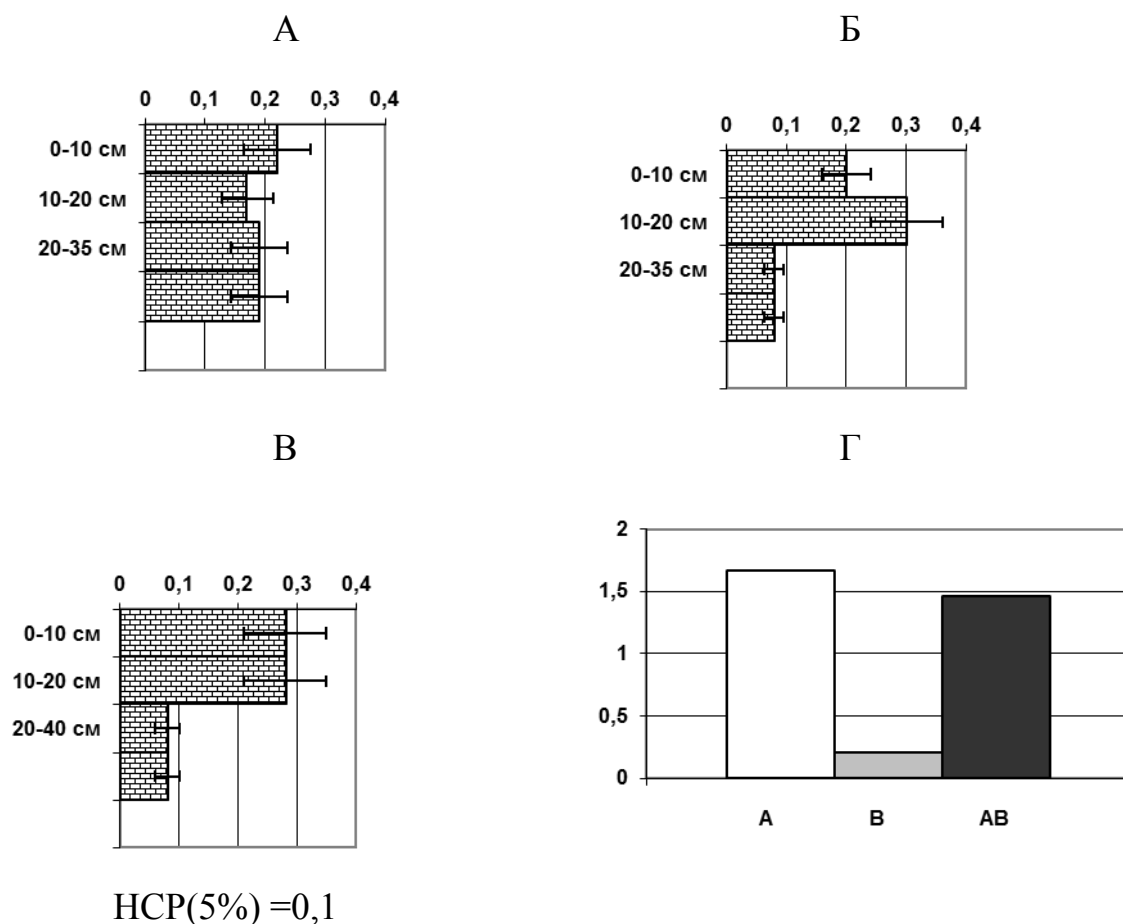


Рис. 1. Почвенный органический углерод (%) в профилях изученных почв:

А – на участке со слабой пастбищной нагрузкой, Б – на участке со средней пастбищной нагрузкой, В – на участке с сильной пастбищной нагрузкой, Г – значения F критерия для различных факторов, влияющих на $C_{орг}$ (А – пастбищная нагрузка, В – глубина по профилю почвы, АВ – взаимодействие факторов)

Также была отмечена тенденция к увеличению концентрации $C_{орг}$ при усилении пастбищной нагрузки. Но при оценке силы влияния различных факторов на концентрацию $C_{орг}$ по критерию Фишера оказалось, что ни фактор, определяемый силой пастбищной нагрузки, ни фактор, определяемый изменением глубины по профилю почвы, не являются значимыми (рис. 1г).

Таким образом, показатель концентрации почвенного органического вещества не может использоваться в практике экологического мониторинга для

оценки степени деградации экосистем на бурых пустынно-степных почвах при усилении пастбищной нагрузки.

Максимальный запас С биомассы микроорганизмов был зафиксирован в верхнем (0-10 см) горизонте бурой пустынно-степной почвы, находящейся в условиях сильной пастбищной нагрузки (рис. 2). В этом же слое в почвах пастбищ, находящихся под слабой и средней пастбищной нагрузкой, С микроббиомассы был почти в 2 раза ниже. В слое 10-20 см прослеживалась тенденция к увеличению С биомассы микроорганизмов при усилении пастбищной нагрузки. В горизонте 20-35(40) см данный показатель резко снижается во всех изученных почвах, но различия между различными участками по запасам С биомассы оказались незначимыми.

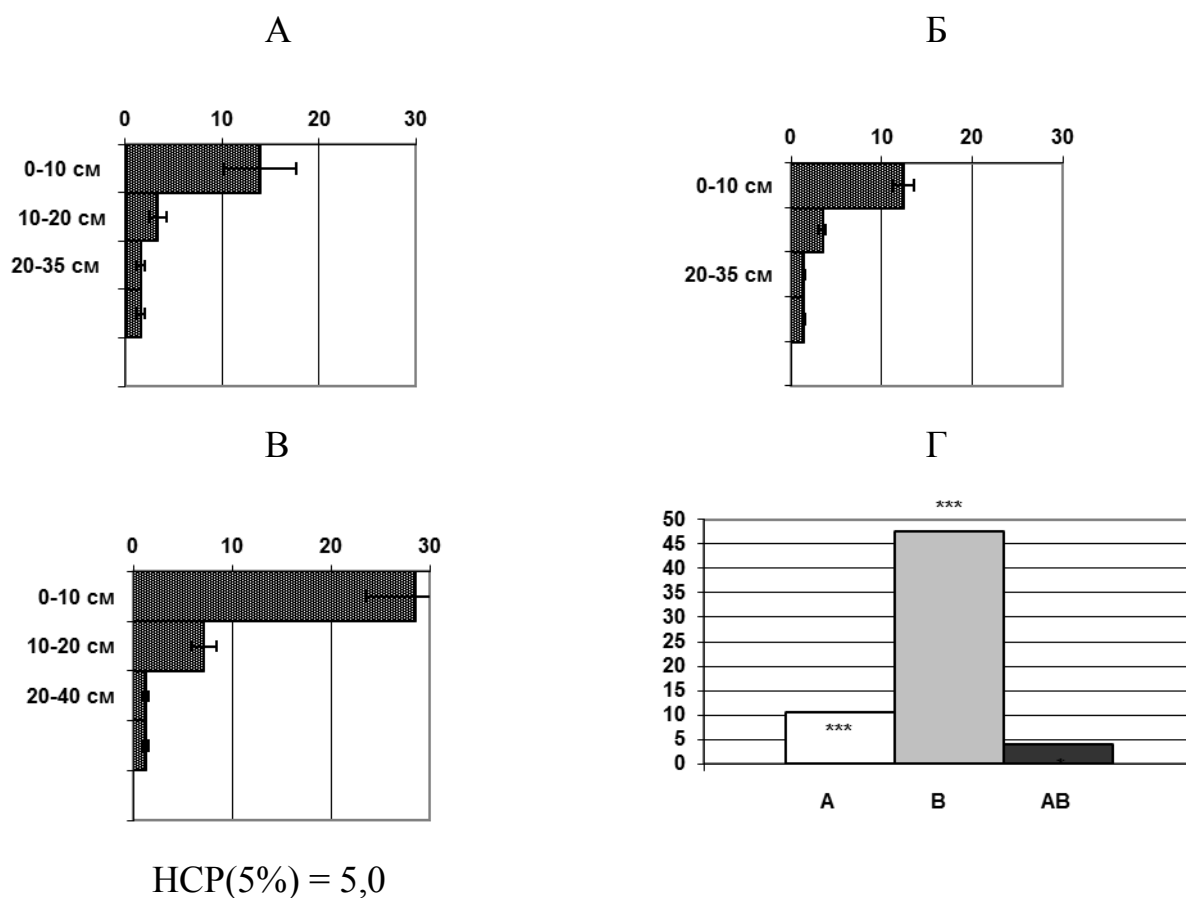


Рис. 2. Углерод в биомассе почвенных микроорганизмов (мг С / 100 г почвы) в профилях изученных почв:

А – на участке со слабой пастбищной нагрузкой, Б – на участке со средней пастбищной нагрузкой, В – на участке с сильной пастбищной нагрузкой, Г – значения F критерия для различных факторов, влияющих на С биомассы (А – пастбищная нагрузка, В – глубина по профилю почвы, АВ – взаимодействие факторов; * - $p < 0,05$, *** - $p < 0,001$)

При оценке силы влияния различных факторов на С биомассы микроорганизмов с использованием критерия Фишера продемонстрировано сильное влияние факторов, определяемых силой пастбищной нагрузки и глубиной по профилю исследованных почв на данный показатель (рис. 2г).

Таким образом, при усилении пастбищной нагрузки в экосистемах полупустынь Западной Монголии наблюдается постепенное увеличение запасов

С биомассы микроорганизмов. И данный показатель может успешно использоваться в практике экологического мониторинга.

Важным показателем состояния деструкционного блока экосистемы является показатель доли С биомассы микроорганизмов в общем запасе $C_{орг}$. Данный показатель в исследованных экосистемах изменялся от 6-7% на участках со слабой и средней пастбищной нагрузкой до 10% на участке с сильной пастбищной нагрузкой. Влияние факторов, определяемых пастбищной нагрузкой и глубиной по профилю исследованных почв с использованием критерия Фишера, оказалось значимым на уровне 0,01 и 0,001 соответственно.

Таким образом, при усилении пастбищной нагрузки наблюдается постепенное увеличение запасов С биомассы и доли С биомассы в $C_{орг}$ в бурых пустынно-степных почвах Западной Монголии.

Можно сделать вывод о возможности использования современных микробиологических методов в экологическом мониторинге пастбищ на бурых полупустынных почвах Западной Монголии. Показатель общего запаса почвенного органического вещества не может быть предложен в качестве мониторингового в зоне полупустынь Западной Монголии. Наилучшим показателем для целей экологического мониторинга в этих экосистемах являются показатели запасов углерода биомассы почвенных микроорганизмов и доли С биомассы микроорганизмов в $C_{орг}$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гунин, П.Д. Современные процессы деградации и опустынивания экосистем восточноазиатского сектора степей и лесостепей / П.Д. Гунин, И.М. Микляева // Современные глобальные изменения природной среды. В 2-х томах. Т.2.- М.: Научный мир, 2006. - 776 с.
2. Гунин, П.Д. Охрана экосистем Внутренней Азии / П.Д. Гунин, Е.А. Востокова, Е.Н. Матюшкин.- М.: Наука, 1998.- 219 с.
3. Сеницын, В.М. Центральная Азия / В.М. Сеницын.- М.: Гос. изд-во географ. лит-ры, 1959.- 456 с.
4. Тейт, Р. III Органическое вещество почвы: Биологические и экологические аспекты / Р. III Тейт.- М.: Мир, 1991. – 400 с.
5. Методы почвенной микробиологии и биохимии.- М.: Изд-во МГУ, 1991. – 303 с.
6. Аринушкина, Е.В. Руководство по химическому анализу почв / Е.В. Аринушкина.- М.: Изд-во МГУ, 1970.- 487 с.
7. Schinner, F. Methods in soil biology / F. Schinner, R. Ohlinger, E. Kandeler, R. Margesin. – Berlin: Springer-Verlag, 1996. - 420 p.
8. Voroney, R.P. Determination of KC and KN in situ for calibration of the chloroform fumigation-incubation method / R.P. Voroney, E.A. Paul // Soil. Biol. Biochem.- 1984,V.16.- P. 9-14.
9. Плохинский, И.А. Биометрия / И.А. Плохинский. – М.: Изд-во МГУ, 1970. – 358 с.

© М.В. Якутин, Ч. Лхагвасурэн, А.Н. Цвельчугов, 2007

УДК 574.2

Н.С. Груничев, Т.А. Хоренко

ИрГТУ, Иркутск

ВЛИЯНИЕ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ПРИБАЙКАЛЬЯ

Ресурсный потенциал Иркутской области обусловил ведущую роль в структуре ее промышленности топливно-энергетического комплекса, химической, лесной, деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности, цветной металлургии, горнодобывающих комбинатов и производств. Предприятия этих отраслей являются основными загрязнителями природной среды, и их влияние на окружающую среду крупных городов значительно изучено. Но в вопросах экологической безопасности не бывает узких проблем, любое загрязнение пагубно влияет на окружающую среду.

В Плане приоритетных мероприятий природоохранной политики на территории Иркутской области отмечена необходимость рассмотрения воздействия хозяйственной деятельности на природный комплекс побережья Малого моря и о. Ольхон.

Авторами изучались состояние и динамика роста жилья, туризма, автотранспорта и сельскохозяйственной техники, принадлежащей населению, для выявления наиболее значимых факторов, влияющих на экологическую обстановку на побережье Малого моря и о. Ольхон.

Эта территория насчитывает более 55 поселений, в которых проживает 9388 человек [1]. Строительство промышленных предприятий в этой части Прибайкалья не предусмотрено. Ее освоение осуществляется за счет совершенствования использования уже обжитых земель и хозяйствования на расширяемых землях поселений.

Загрязнение окружающей среды происходит за счет жизнедеятельности поселений и обустройства земель, которые находятся в собственности населения и организаций. Серьезными источниками загрязнения являются автомобильный транспорт, мусорные свалки, печное отопление.

Население Ольхонского района проживает в основном в индивидуальных домах и отдельных квартирах. При этом на долю индивидуальных домов и отдельных квартир приходится 99% всего жилья. Средний годовой прирост жилья по уровню его благоустройства показан на рис. 1.

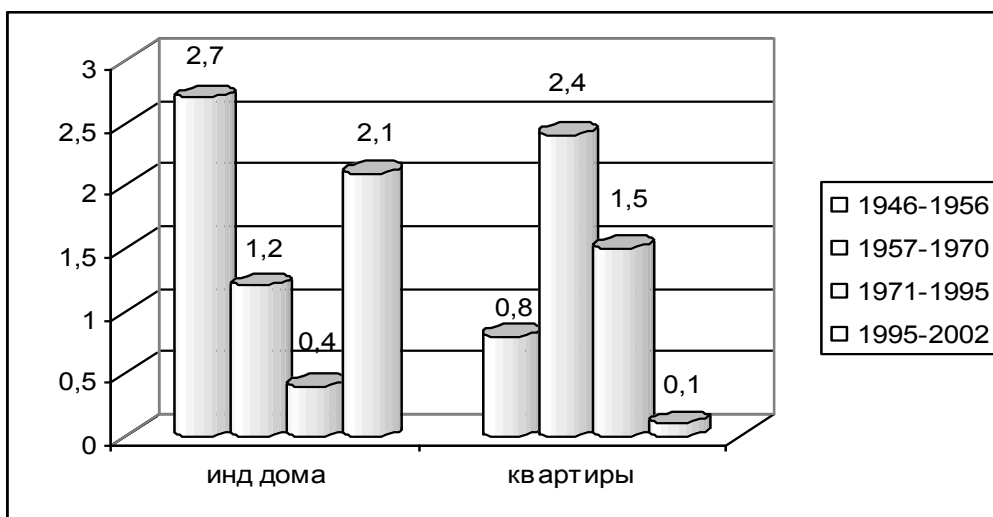


Рис. 1. Средний годовой прирост жилья по уровню его благоустройства

В экологическом отношении проблему загрязнения в этой части Прибайкалья представляют неблагоустроенные индивидуальные дома и квартиры. При таком жилье в атмосферу выбрасываются продукты сгорания отопительных печей, в почву сливаются использованные в хозяйстве загрязненные воды и накапливаются твердые бытовые отходы, утилизация которых не производится.

Следует особо отметить, что значительная доля строящегося индивидуального жилья приходится на последние годы (рис. 2).

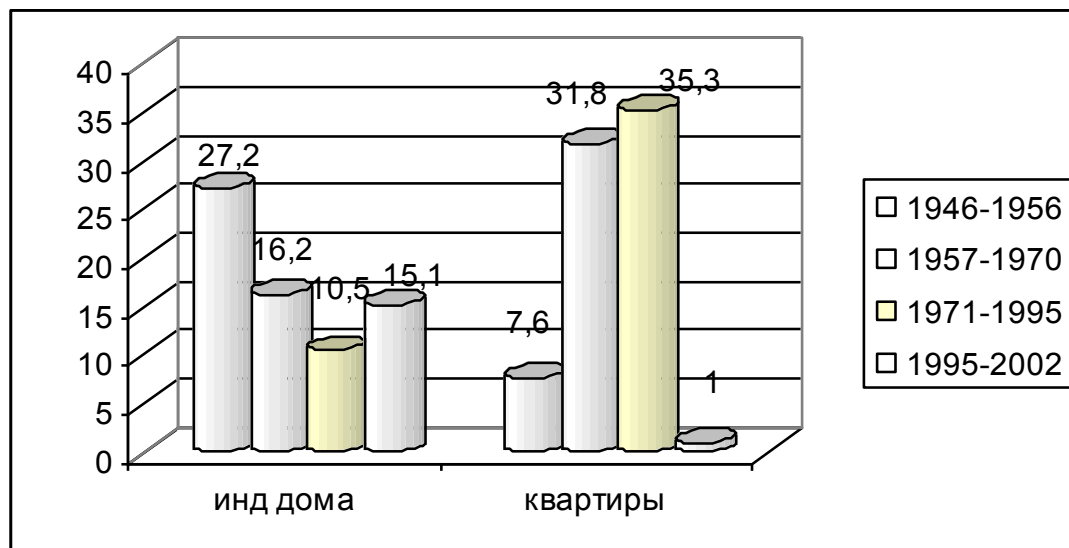


Рис. 2. Динамика численности домохозяйств в Ольхонском районе

Особенностью индивидуального строительства являются большие обустраиваемые площади, высокая степень благоустройства жилья, и как следствие - повышенное потребление тепла и воды.

Рост индивидуального строительства обусловлен улучшением быта населения и быстро развивающимся туризмом. В настоящее время улучшение

дорожной сети в направлении Байкала, и, в частности, к Малому морю, резко повысило посещаемость байкальских берегов.

На остров в последние годы хлынул поток практически неконтролируемого «дикого» туризма, и, как следствие этого, резко возрос поток автотранспорта, используемого населением и различными организациями для перевозки туристов к месту отдыха на Байкале и на внутренних перевозках (табл. 1). На сегодняшний день автомобильный транспорт является основным средством передвижения туристов на Байкале. На данный район приходится наибольшее число отдыхающих – 40% [3].

Таблица 1. Численность автотранспорта по перевозке туристов

	2000 год	2002 год	2004 год	2005 год
Легковые автомобили	67349	75650	80845	86544
Автобусы	6150	6210	6370	6480
Всего	73499	81860	87215	93024

Примечание: * В таблице приводятся данные о транспорте, находящемся в собственности местного населения и используемом организациями и отдельными гражданами для отдыха на Байкале.

Помимо «дикого» туризма, в последние годы увеличилось число организованного туризма. Происходит строительство небольших летних туристических баз и кемпингов на побережье Малого моря. Принятая концепция развития туризма в Иркутской области на период до 2010 года выделила Ольхонский район в числе приоритетных для развития туризма, а это, в свою очередь, увеличит число выездного туризма.

Любое воздействие отдыхающих влечет за собой изменения в почвенном покрове. Природные комплексы Малого моря находятся в угнетенном состоянии. Все это, совместно с традиционным для местного населения выпасом скота, приводит к нарушению экологического равновесия на территории Ольхонского района.

Туризмом охвачены не только люди, профессионально занимающимся бизнесом, но и местное население. Для туризма приспособляются жилые дома для отдыха приезжающих, организуются водные и автомобильные экскурсии по озеру Байкал и прилегающим к нему территориям, устраивается досуг людей (рыбалка, охота и прочие атрибуты отдыха).

На основании вышеизложенного следует, что в ближайшие годы экологическое состояние территории Малого моря будет формироваться на основе:

– Роста индивидуального жилищного строительства, строительства зданий и сооружений для туризма с большими обустраиваемыми площадями, высокой степенью благоустройства и повышенным потреблением тепла и воды. Формирование такой структуры поселений приведет к увеличению выбросов в атмосферу вредных веществ, образующихся при индивидуальном отоплении

жилья с использованием древесины и мазута, повышением сброса сточных вод и накоплением на территории поселений твердых отходов;

– Увеличения потока автотранспорта, обеспечивающего хозяйственную деятельность населения и перевозку людей (туристов) в Прибайкалье. Поток автотранспорта в 2005 году по сравнению с 2000 годом возрос в 1,3 раза. В результате загрязнение атмосферы выхлопными газами будет расти.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Административно-территориальное деление и численность населения Иркутской области: стат. сб. / Иркутскстат. – Иркутск, 2006. – 85 с.
2. Жилищные условия населения Иркутской области: стат. сб. – Иркутск, 2006. - 113 с.
3. Туризм и отдых в Иркутской области / Иркутскстат. – Иркутск, 2006. - 32 с.

© Н.С. Груничев, Т.А. Хоренко, 2007

ЗОНАЛЬНО-ПРОВИНЦИАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ СУММАРНОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ В ПРЕДЕЛАХ НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ

Суммарная солнечная радиация (Q), как основная составляющая радиационного баланса, является основополагающим фактором в формировании ландшафтно-зональных различий. Новосибирская область (НСО), расположенная в основном на низменных просторах Западно-Сибирской равнины, в глубине материка, несёт на себе характерные особенности географического распределения этого показателя.

Суммарная солнечная радиация – это то количество прямой и рассеянной радиации, которое поступает непосредственно от солнечного диска (прямая радиация), и в меньшей степени (в основном, 25% от количества суммарной радиации) рассеивается облаками и составляющими частицами самой атмосферы. Классическая особенность Q заключается в том, что её поступление на земную поверхность определяется главным образом высотой Солнца над горизонтом, а, следовательно, широтой места. О влиянии подстилающей поверхности на какие-либо её изменения говорить не приходится. Подобная зависимость отсутствует. Суммарная радиация – это та из немногих величин, которая не зависит от характера подстилающей поверхности, а, напротив, сама она оказывает непосредственное и кардинальное на неё воздействие.

Итак, суммарная радиация является основополагающей как в формировании климата, так и в развитии ландшафтов, в их распределении по земной поверхности. Образно выражаясь, суммарная радиация – это погодообразующий, климатообразующий и ландшафтообразующий фактор, т.е. это основа основ формирования и взаимодействия всех компонентов географической оболочки Земли.

Новосибирская область, располагаясь между $54^{\circ} 44'$ и $57^{\circ} 12'$ с.ш., имеет достаточно большую площадь. Это не могло не сказаться на широком диапазоне количественных значений поступающей на её территорию суммарной солнечной радиации. Разделённая р. Обью на две неравные части, НСО на западе представляет достаточно однородную равнину, на востоке – всхолмлённые возвышения с определённым ростом высот в восточном и особенно в юго-восточном направлениях.

В соответствии с этим и воздействие Q на ландшафты – равнинные и предгорные – неидентично. Именно рельеф накладывает чёткий отпечаток на её классический ровный ход на западе области и нарушает его горизонтальную изменчивость на востоке. И если в первом случае мы можем говорить о непререкаемой роли Q в формировании классической широтной зональности, то во втором – о её значении в распределении высотной поясности гор. Правда, в нашем случае, в связи с небольшими абсолютными высотами, перепады Q не столь велики и, соответственно, вертикальная зональность представлена не

столь богато, как в других регионах. Кроме того, искажение на востоке той классической широтной смены величин Q , которую мы наблюдаем на западе области, является наглядным представлением её провинциальности.

Итак, с севера на юг, в Левобережье НСО, годовые значения Q в многолетнем выражении изменяются от 1460 МДж/м² до 1620. В Правобережье, на севере региона, Q составляет уже 1540 МДж/м², а на юге уменьшается с запада на восток от Новосибирского водохранилища с 1600 до 1540 МДж/м² в Буготакских сопках и предгорьях Салаирского кряжа.

В тёплый период года, с июня по август, пространственная изменчивость суммарной радиации становится ещё более выровненной, органически сочетаясь с географическими широтами. В таком случае она возрастает в Левобережье от 3400 МДж/м² на севере НСО до 3800 – на юге, и в Правобережье – от 3400 МДж/м² на севере – до 3700 – на юге.

В меньшей степени, чем высота Солнца над горизонтом, значения суммарной радиации определяются облачностью. Для оценки влияния этой величины на Q можно предложить достаточно характерный показатель – продолжительность солнечного сияния (ПСС). Иными словами, чем больше ПСС, тем меньше облачных дней в году, а, следовательно, выше суммарная радиация. Новосибирская область является именно тем регионом, где продолжительность солнечного сияния высокая.

Достаточно сказать, что по территории области ПСС изменяется от 1900 часов в году на севере до 2100 на юге в Левобережье, и от 1900 до 1980 часов соответственно – в Правобережье. В широком диапазоне всего ареала Новосибирской области ПСС намного (на 300-600 часов) превосходит районы Европейской территории России, расположенные на тех же широтах, и приравнивается к более южным – Кубани, Поволжью, Украине.

Исходя из всего сказанного, можно представить территорию НСО как объект последовательно сменяющих друг друга зон и подзон. А.П.Слядневым [1] прослежена пространственная изменчивость целого ряда климатических показателей с целью выявления их влияния на агроклиматические ресурсы Западно-Сибирского региона. Но в основе этого процесса лежит суммарная радиация и такие тесно связанные с ней показатели, как продолжительность солнечного сияния и радиационный баланс. Зонально-провинциальные особенности климатообразующих факторов, представленные Л.В.Ворониной [2] для ареала засоленных почв, можно детализировать непосредственно для территории Новосибирской области.

Зональный ход вышеназванных ландшафтоформирующих показателей осложняется циркуляцией атмосферы, облачностью и рельефом, в связи с чем на территории области можно выделить три провинциальных сектора: западное Левобережье, восточное Левобережье и Правобережье (табл. 1, 2, 3).

Таблица 1. Зонально-провинциальные особенности климатообразующих факторов Новосибирской области. Продолжительность солнечного сияния за год, в часах.

Зона	Подзона	Западный сектор Левобережья НСО	Восточный сектор Левобережья НСО	Правобережье НСО, крайний восточный сектор
Тайга	Подтайга	1900-1920	1900-1920	1850-1910
Лесостепь	Северная	1920-1940	1920-1950	1910-1940
	Южная	1940-2000	1950-1990	1940-1970
Степь	Колочная	2000-2050	1990-2000	1970-1980
	Типичная	2050-2100	-	-
	Сухая	2100-2150	-	-

Таблица 2. Зонально-провинциальные особенности климатообразующих факторов НСО. Суммарная радиация МДж/м² в год.

Зона	Подзона	Западный сектор Левобережья НСО	Восточный сектор Левобережья НСО	Правобережье НСО, крайний восточный сектор
Тайга	Подтайга	1460-1500	1500-1520	1500-1540
Лесостепь	Северная	1502-1530	1520-1540	1540-1580
	Южная	1530-1580	1540-1610	1580-1600
Степь	Колочная	1580-1600	1610-1620	1600-1610
	Типичная	1600-1620		
	Сйхая	1620-1640		

Таблица 3. Зонально-провинциальные особенности климатообразующих факторов НСО. Радиационный баланс, МДж/м² в год

Зона	Подзона	Западный сектор Левобережья	Восточный сектор Левобережья	Правобережье, крайний восточный сектор
Тайга	Подтайга	1220-1260	12800-1300	1340-1380
Лесостепь	Северная	1260-1380	1300-1400	1380-1400
	Южная	1380-1460	1400-1460	1400-1420
Степь	Колочная	1460-1500	1460-1500	1420-1440
	Типичная	1500-1560		
	Сухая	1560-1580		

Итак, Q, как и ряд других ландшафтообразующих показателей (радиационный баланс, ПСС, испаряемость) являются формирующими элементами климата, а потому можно продолжить дальше оценку ландшафтных особенностей природы НСО по зонам и провинциям. Климатическими показателями в таком случае могут быть: суммы температур выше 0°C, суммы температур выше 10°C, годовые суммы осадков, суммы осадков за весь тёплый период, либо только за август-сентябрь, суммы температур воздуха ниже -5°C,

дефицит воздуха за июнь-июль, либо за август-сентябрь. Данные закономерности достаточно полно освещены в работах А.П.Сляднева, Л.В. Ворониной [3,4]. Все эти и многие другие климатические элементы, вне сомнения, в первооснове своей формируются под воздействием прямых и рассеянных солнечных лучей, т.е. суммарной радиации.

Эколого-географическое значение Q [5] проявляется в весьма неодинаковом её поступлении даже в сумме за год. Пространственная изменчивость Q способствует формированию болотных ландшафтов на севере области, лесостепных – в её центральной части и, наконец, сухостепных – на крайнем юге. Комплексные показатели, отражающие соотношение тепла и влаги, фиксируют избыток влаги и недостаток тепла в подтаёжных ландшафтах, оптимальное их соотношение – в лесостепных и острый недостаток влаги и некоторый избыток тепла – в степных. Отсюда экологический дискомфорт природы выражается в засушливости климата НСО, которая активно возрастает к югу. Здесь Q максимальна и поэтому формируются степные ландшафты. Далее засушливость климата убывает в центральной части области, как явный отголосок снижения Q , и достаточно редко встречается на севере, где Q пределах нашей области минимальна.

Экологический акцент Q упирается не только в труднопроходимые обширные болота севера области или обширные пространства солонцов и солончаков её южной половины, не только в малогумусные слабоплодородные чернозёмные почвы нашего региона, но и, как следствие всех перечисленных явлений, – в горение лесов в засушливые годы, в оврагообразование в Правобережной части области в период ливневых дождей, в колебание засоленности почв в зависимости от усиления либо ослабления солнечной активности, а, следовательно, находится в непосредственной зависимости от роста или падения суммарной солнечной радиации в разные годы.

Последний момент прослежен А.Н.Смирновой [6] за 47 лет. Автором установлено, что интервал цикличности Q составил 11 лет, но отмечается тенденция и к более длительным периодам. Из анализа построенных автором графиков следует, что на юго-востоке Западной Сибири, на общем фоне чередования циклов отмечается тенденция к увеличению приходящей солнечной радиации в большинстве месяцев и за год в целом.

Уменьшение Q установлено лишь в сентябре, где максимальная величина линейной скорости снижения поступающей радиации составила 286 МДж/м^2 за год. Общее линейное увеличение поступившей в течение 47 лет суммарной радиации составило около 100.1 МДж/м^2 . Наименьшая изменчивость месячных сумм Q характерна для холодного времени года, в частности, в декабре величина среднего квадратического отклонения составила $5,7 \text{ МДж/м}^2$, в июне – $56,7 \text{ МДж/м}^2$, что, вероятно, обусловлено более неустойчивым режимом облачности в летний период по сравнению с зимним.

Таким образом, экологическая значимость суммарной радиации, как и её ландшафтно-зональное значение, на фоне пространственного перераспределения имеет и временную изменчивость. Последняя способна

переориентировать разную степень экологического риска в разные по интенсивности солнечной радиации годы. Наконец, повышение либо падение Q способствует потеплению либо похолоданию климата. В таком случае, климат и его основные показатели – температура воздуха, осадки – выступают как необходимое следствие основной причины – изменения Q .

С другой стороны, в географической оболочке все взаимодействия переплетены настолько, что и циркуляция атмосферы, как один из основных глобальных явлений, находится в тесной взаимосвязи с таким гигантом природы, как солнечная суммарная радиация. Возрастание суммарной радиации способно привести в движение обширные массы воздуха, либо сместить их в другие широты, либо вызвать общее перераспределение циркуляционных процессов. В свою очередь, и глобальные, и местные процессы циркуляции способны изменить поступление на земную поверхность Q .

В данном случае вступает в действие ослабление либо усиление облачности, а на последнюю огромное влияние оказывает рельеф. Именно по этой причине на зональное распределение суммарной радиации накладывается провинциальное. И в Правобережье Новосибирской области, где к югу и юго-востоку рельеф осложняется поднятиями, глобальные процессы циркуляции атмосферы координируются местными перемещениями воздушных масс, возрастает облачность, резко падает поступление прямой радиации, растёт рассеянная радиация и в итоге убывает суммарная радиация. И в данном случае экологическое значение Q сводится к усилению либо ослаблению прозрачности воздуха, к перемещению воздушных масс из других регионов с другими климатическими свойствами, что в конечном счёте по-разному сказывается на здоровье людей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сляднев, А.П. К вопросу о теоретических и методических основах климатического районирования / А.П.Сляднев // География Западной Сибири. – Новосибирск: НГПИ, 1969. – Вып. 42. – С.3-21.
2. Воронина, Л.В. Тепловой режим почв солонцовых комплексов/ Л.В.Воронина. – Новосибирск: Наука, 1992. – 142с.
3. Сляднев, А.П. Географические основы климатического районирования и опыт их применения на юго-востоке Западно-Сибирской равнины / А.П.Сляднев // География Западной Сибири. – Новосибирск, 1965. – С. 3-122.
4. Воронина, Л.В. Эколого-географические особенности теплового режима засоленных почв/ Л.В.Воронина. – Новосибирск: СГГА, 2006. – С. 76-81.
5. Исаченко, А.Г. Введение в экологическую географию / А.Г.Исаченко. – СПб: Петербургский ун-т, 2003. – 192 с.
6. Смирнова, А.Н. Воздействие солнечной радиации на заболоченные ландшафты юго-востока Западной Сибири/ А.Н.Смирнова. – Новосибирск: Новосиб. Гос. ун-т, 2006. – С. 18.

© Л.В. Воронина, А.Н. Смирнова, 2007

ИССЛЕДОВАНИЕ И КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ МОРСКИХ ДОННЫХ ЭКОСИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОДВОДНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ

Расширение хозяйственной деятельности на шельфе и более широкое вовлечение морских ресурсов в сферу деятельности человека требуют привлечение современных методов и средств проведения экологического мониторинга, направленного на контроль антропогенного воздействия на окружающую среду и сохранение биоразнообразия. Одним из перспективных направлений в исследовании состояния геосистем шельфа является мониторинг, проводимый с помощью подводных роботов.

Использование подводной робототехники является основой для проведения точного и объективного мониторинга морских донных экосистем. Особенное значение такие исследования имеют при создании баз данных по экосистемам, включающим информацию о гидрохимическом состоянии морской среды, о характере донных ландшафтов, распределении сообществ и массовых видов бентоса, плотности его поселения и биомассе на изучаемых акваториях с возможностью картографирования данных. Наиболее эффективно подводные аппараты могут быть использованы для экологического мониторинга водной среды в придонных слоях, включая оценку гидрохимического состояния воды по параметрам, определяемым с помощью датчиков. Для оценки качественного состояния и плотности поселения макробентоса необходимо проводить экспертный анализ биоты на основе видео и фотосъемки дна.

Следует отметить, что выбор параметров, которые необходимо оценивать при мониторинге экосистем, зависит, с одной стороны, от наличия и возможностей использования различных датчиков и оборудования в конкретных условиях, а с другой стороны, тем минимальным их набором, который позволяет адекватно оценить состояние экологической системы. Кроме того, важно использование комбинированных исследований на определенных полигонах с применением традиционных гидробиологических, гидрохимических, гидрофизических методов и с применением подводных технических средств. Это позволит количественно изучить взаимосвязи между экологическими параметрами на характерных полигонах и затем распространять полученную с помощью подводных роботов информацию на всю исследуемую акваторию.

В Институте проблем морских технологий ДВО РАН разрабатывается технология проведения исследований донных экосистем с помощью подводных аппаратов. Эта технология включает в себя методики проведения обследования морского дна, донных биоценозов, сбора и обработки информации, ее картографирования с оценкой состояния экосистем.

Исследование и мониторинг экологических систем с помощью подводных аппаратов является наиболее экологически безопасным методом и соответствует самым современным мировым стандартам. В совокупности с

применением традиционных методик для установления корреляционных связей между численностью видов макробентоса, мезобентоса, мейобентоса и т.п., он позволяет обследовать большие территории и получить количественные данные для формирования баз данных по водным экологическим системам. Эта технология сравнима с методом водолазной съемки, но имеет ряд существенных преимуществ, связанных с большей производительностью, высокой степенью достоверности и информативности, неограниченными возможностями исследований по площади и глубине, позволяет до минимума уменьшить риск для жизни персонала, связанный с выполнением подводных исследовательских работ.

Основные задачи, решаемые нами и связанные с изучением состояния донных экосистем на базе информации, получаемой с подводного аппарата, можно определить как:

- Мониторинг водных сред в придонных слоях;
- Мониторинг донных сообществ;
- Мониторинг донных ландшафтов.

В результате наблюдения за донными экосистемами появляется возможность исследовать их абиотические составляющие, изучить функционирование популяций и сообществ, а также оценить продукционные свойства экосистем. При этом могут решаться такие задачи изучения ресурсного потенциала шельфа, как исследование мест, пригодных для марихозяйственной деятельности, оценка рекреационных возможностей акваторий, инспекция подводных сооружений с точки зрения влияния их на экологическое состояние окружающей среды и т.д.

Технология исследования морских донных экосистем основывается на использовании информационно-измерительного комплекса подводного аппарата TSL, созданного в ИПМТ ДВО РАН, в состав которого входят бортовая система управления, обеспечивающая произвольные движения аппарата, включая зависание, навигационная система, позволяющая определять местоположение и ориентацию на основе спутниковой, акустической и бортовой навигационных систем. Эти особенности аппарата позволяют в реальном режиме времени выбирать заданную траекторию движения робота. Аппарат TSL оснащен цветными видеокамерой и цифровой фотокамерой, ориентированной вертикально вниз [1].

Обработка технологии мониторинга донных экосистем с помощью подводного аппарата TSL проводилась по выбранным трансектам на полигонах в различные периоды времени. При выполнении работ подводный аппарат двигался фиксированным курсом по заданной трансекте и выполнял съемку изображений с заданным периодом, что позволяет получать достоверную для анализа информацию. Результаты работы (цветные видеоизображения морского дна, цифровые цветные фотоизображения, параметры съемки и данные измерений) записывались в бортовой компьютер для последующей обработки специальной программой, позволяющей читать данные об изображениях морского дна и параметрах съемки, полученных с помощью подводного

аппарата, из сопровождающих файлов и заносить их в базу данных. Эти данные включают в себя информацию о географических координатах точки съемки, высоту над грунтом и глубину движения аппарата, температуру в точке съемки, электропроводность. Предусмотрено как ручное внесение данных из отдельных файлов в базу, так и автоматическая обработка каталогов. Разработанная специализированная программа выводит на экран фотографии места съемки (изображения имеют формат 1020·1024 пиксела, рис. 1), дату и параметры съемки, размер отснятой области дна, меню для внесения в базу данных дополнительной качественной и количественной информации по макробентосу и донным ландшафтам, что позволяет значительно облегчить обработку первичной информации. Данная программа формирует базу данных в формате Microsoft Access, что делает ее доступной для использования в пакете программ ArcGIS или других для отображения точек съемки на географической карте. Получаемая в результате анализа информация может быть использована при изучении, как отдельных компонентов, так и морских экосистем в целом.

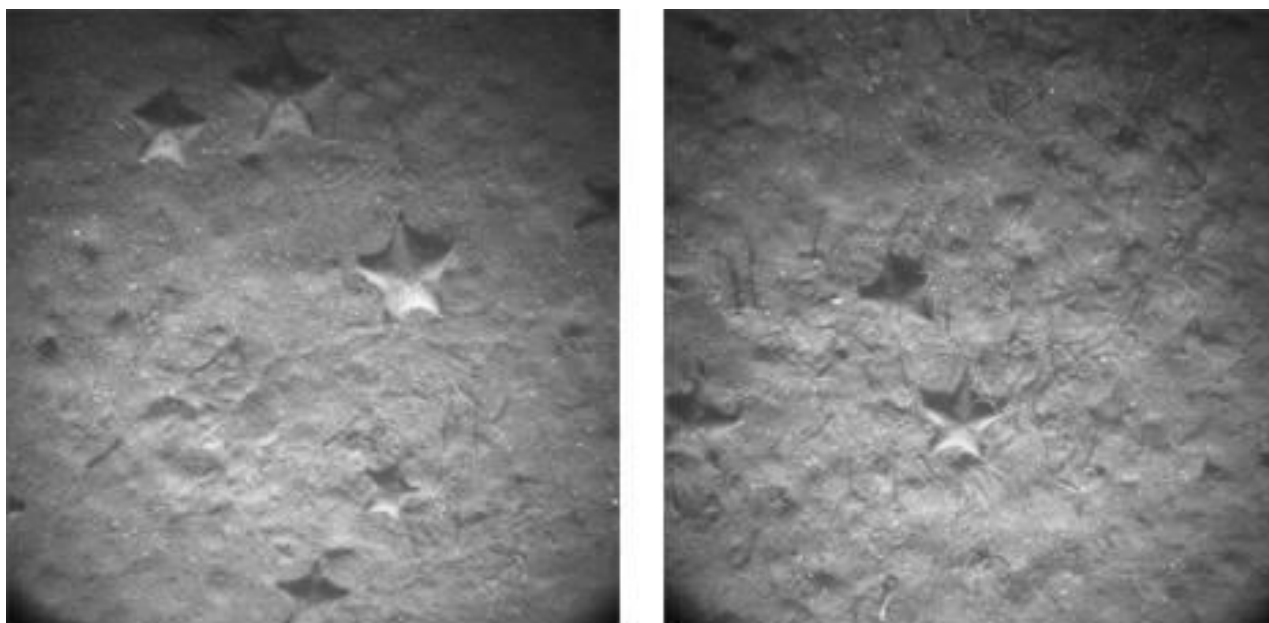


Рис 1. Фотоизображение морского дна в районе Дальневосточного государственного заповедника (съемка 2006 г.)

Оценка плотности поселения донных гидробионтов и гидрохимического состояния вод имеет определяющее значение при ведении мониторинга экосистем, изучении динамики численности видов, расчета запасов и продукции бентосных животных. Методика исследования распределения и оценки плотности поселения хорошо различимых донных видов беспозвоночных и водорослей по фотоизображениям с подводного аппарата позволяет оценить видовой состав, численность и массу особей каждого вида в районе исследований. Методика включает два варианта исследований. Первый вариант используется при отсутствии какой-либо информации о грунтах и распределении макробентоса в районе исследований. Во втором варианте, при

наличии информации о площадях различных типов грунтов и распределении на них гидробионтов, количество станций и трансект движения аппарата определяется в соответствии с площадями грунтов и количеством на них гидробионтов для достижения заданной точности определения плотности поселения и биомассы.

Расчет плотности поселения донных объектов выполняется на основе обработки последовательности цифровых изображений, полученных на контрольных галсах. Подсчитывается количество особей определенного вида гидробионтов в каждом кадре. На основе полученных данных рассчитывается плотность поселения каждого вида на единицу площади, обычно, как принято в гидробиологии, на один квадратный метр.

Биомасса особей в кадре определяется на основании измерения размера каждой особи по имеющейся в кадре специальной световой масштабной сетке и затем рассчитывается по зависимости массы от длины особи, которая определяется предварительно на основании имеющихся наших или литературных данных. Результаты расчетов заносятся в специализированную базу данных.

Поскольку ландшафт является надежным репрезентатором состояния морской донной экосистемы, а структуру бентоса можно рассматривать как индикатор физико-химических процессов и гидродинамических характеристик бухт и заливов [2], внедрение подводных аппаратов в практику исследований донных биоценозов и ландшафтов эффективно для оценки экологического состояния прибрежной зоны моря. Создание системы полигонов мониторинга донных экосистем с использованием подводной робототехники позволит эффективно собирать информацию и заложить основу для проведения долговременного слежения за состоянием экологических систем, а ландшафтное картографирование геосистем шельфовой зоны и мониторинг донных экосистем позволит решать задачи охраны окружающей среды, сохранения биоразнообразия прибрежных морских районов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 05-08-33333 и 06-08-96928).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дулепов, В.И. О применении необитаемых подводных аппаратов для исследования водных экосистем / В.И. Дулепов // Подводные технологии. – 2005. – №1. – С. 59-67.
2. Преображенский, Б.В. Основы подводного ландшафтоведения (Управление морскими экосистемами) / Б.В. Преображенский, В.В. Жариков, Л.В. Дубейковский. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – 352 с.

© В.И. Дулепов, Н.Н. Лелюх, 2007

УДК 681.324

Р. Грабаум, Б. Майер

ООО «OLANIS Экспертные системы», Лейпциг, Германия
(OLANIS Expertensysteme GmbH, Permoserstr. 15, 04318 Leipzig)

Е.Н. Смоленцева

ИПА СО РАН, Новосибирск, Россия

МЕТОД МУЛЬБО: ОПТИМИЗАЦИЯ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ В ГЕРМАНИИ НА ОСНОВЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ

В настоящее время всё больше процессов организуется на базе геоинформационных систем. Особенно важными являются методы, помогающие не только оценить сложившуюся ситуацию, но и принять решение, т.е. найти оптимальный выход, например, при возникновении в процессе природопользования экологического конфликта, в частности в агроландшафтах.

Метод мультикритериальной оценки и оптимизации природопользования и землеустройства MULBO (от немецкого *MUltikreterielle LandschaftsBewertung und Optimirung*) представляет собой геоинформационную систему, помогающую принять решение в вопросах планирования и использования территорий, особенно в случае экологических конфликтов.

Основными составляющими системы являются оценка ландшафтных функций и мультикритериальная их оптимизация. Используя этот метод, можно рассчитать оптимальные варианты использования территории.

Суть метода. Метод MULBO является геоинформационной системой, помогающий принимать решения в вопросах планирования и использования территорий.

Программное решение для ландшафтной оптимизации LNOPT 1.0, созданное Р. Грабаум [1], было разработано в 2001 – 2004 годах в рамках исследовательской кооперации с Центром Исследования Окружающей Среды (UFZ, Leipzig-Halle), а затем улучшено и расширено фирмой OLANIS [2]. Система мультикритериальной оптимизации базируется на одном из методов теории игр, который представлен программным решением LNOPT и предлагает пользователям разнообразные возможности расчёта планировочных геокодированных сценариев. LNOPT 2.0 работает с Windows 32-битными системами.

В рамках метода проводится оценка ландшафтных функций на основе конкретных площадей, представленных в ГИС полигонами. Понятие ландшафтная функция (или функция ландшафта) характерно для немецкой школы географических наук, что в нашем представлении соответствует процессам (как позитивным, так и негативным), протекающим в конкретной экосистеме. Выбор этих функций определяется федеральными и региональными законами и/или знаниями экспертов.

Реализация метода состоит из 7 последовательных шагов (рис. 1).

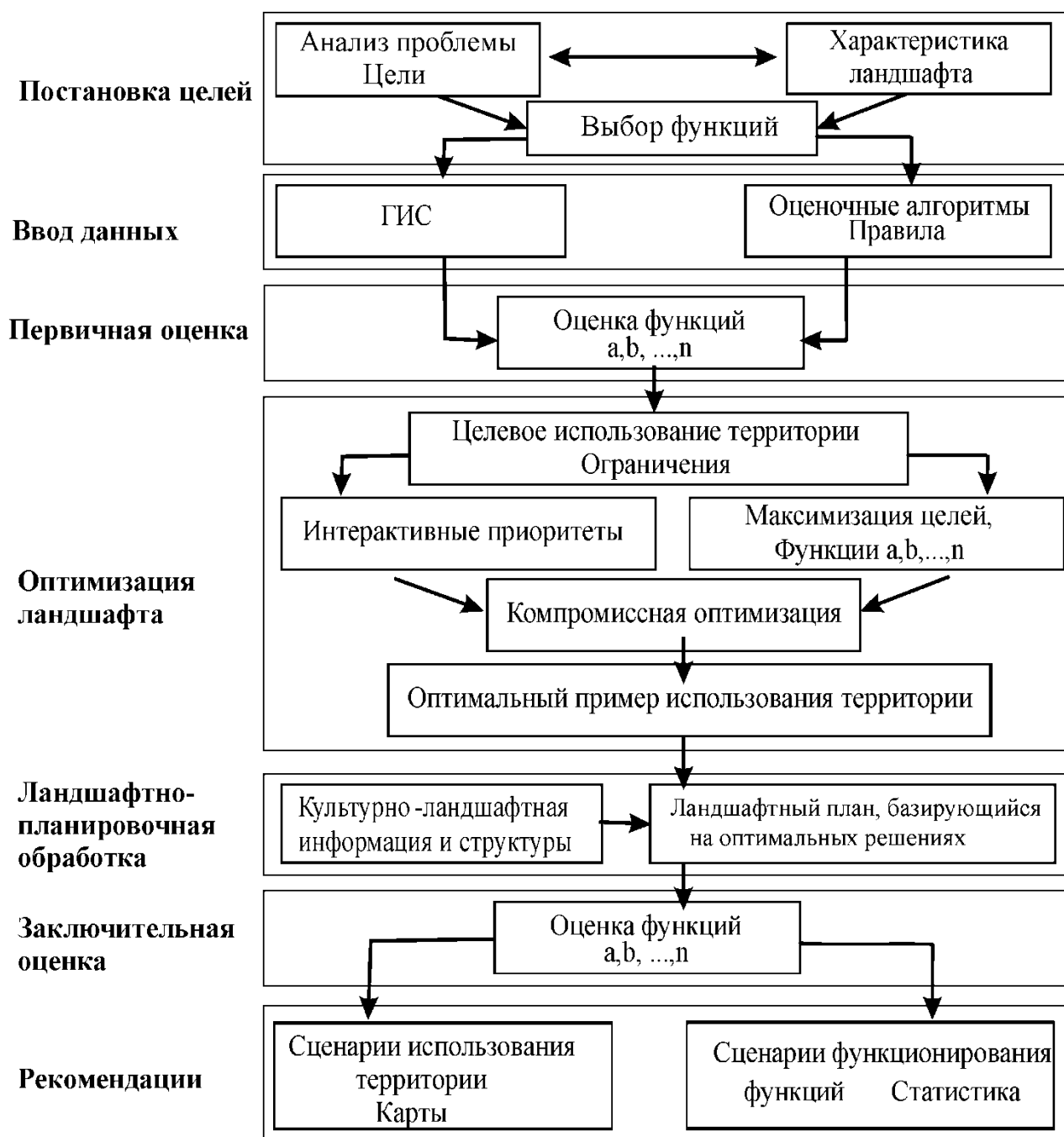


Рис. 1. Схематическое представление метода MULBO

Сначала на основании имеющейся общей характеристики региона, соответствующих законов, программ развития и планирования природопользования, ландшафтного анализа выбираются те функции ландшафта, которые особенно важны. Именно они впоследствии будут оцениваться. Функциональные оценки проводятся при помощи подготовленной в ГИС (например, ARC-GIS) базы данных для изучаемой территории. Методики по оценке каждой функции применяются, исходя различных предметно-научных рекомендаций, например, модели расчётов водного и температурного балансов, продуктивности пахотных и естественных угодий, эрозионных процессов и пр.

Оценки предлагают учитывать не только сегодняшнее состояние ландшафта, но и позволяют прогнозировать возможные варианты (рассчитанные сценарии) его дальнейшего развития. Пространственные результаты оценки представляют собой предпосылку для проведения оптимизации ландшафта. Математическая основа мультикритериальной оптимизации выдаёт при помощи нескольких целевых функций (часто противоположных или конкурирующих) результат, который может быть рассмотрен как оптимальный компромисс между поставленными целями.

При проведении оптимизации ландшафта используются следующие параметры: целевые функции, элементы и площади.

Целевые функции – это функции ландшафта, которые анализируются и оцениваются, и которые посредством оптимизации должны быть улучшены.

Элементы – элементы использования территории или классы использования, которые в процессе оптимизации учитываются как выходящие (целевые) типы использования территории (природопользования).

Для проведения оптимизации должны быть выполнены следующие условия:

1. В основе оптимизации должны лежать функциональные постановки целей (например, улучшение, сохранение или уменьшение одной или нескольких функций).

2. Наличие в ГИС площадей оптимизации (наименьшие совместные геометрии). Малые площади после стыковки/сшивки должны быть, как правило, исключены.

3. Упорядоченная последовательность результатов оценки (это значит, полные положительные числа) исследованных функций должна быть представлена:

- Для всех площадей, которые должны быть вовлечены в процесс оптимизации,

- Для всех классов и элементов использования ландшафтов,

- Для всех целевых функций, которые оптимизируются.

4. Результаты оценки территории должны быть представлены дифференцированно между отдельными площадями, точнее между различными классами или элементами использования ландшафта.

В результате оптимизации создаётся пространственно-привязанный проект по изменению землепользования территории. Каждый из оптимизируемых процессов должен быть представлен в виде векторной карты, отражающей пространственное распределение процесса по определённым критериям. При необходимости вводятся математические модели, описывающие зависимости между отдельными процессами в системе.

Преимущества метода МУЛЬБО:

- Возможность улучшения (сохранения) многих функциональных целей при планировании большого количества площадей на ограниченной территории (например, в случае коллективного владения);

- Принятие во внимание любых избираемых площадей исключения и площадей ограничения без потери оптимальности;

- Использование метода и расчёт целевых значений из планировочных и политических заданных величин посредством простого ввода в программу;
- Предложение нескольких вариантов решения (сценариев развития);
- Быстрое картографическое представление результатов и способность лёгкого преобразования и приспособляемости метода.

Результаты применения многокритериальной оптимизации ландшафта в рамках MULBO. Проектные решения, послужившие основой метода МУЛЬБО, были разработаны в рамках исследований биоразнообразия аграрных ландшафтов в ФРГ на территории общества «Wein-Weida-Land» на Кверфуртер плато (Querfurter Platte) земли Саксония-Анхальт [3].

Регион характеризуется нагрузкой аграрными ландшафтами (пашня) и небольшим количеством дополнительных структур, таких как лесополосы или залежь. Высокопродуктивные лёссовые почвы со средним почвенным баллом 88 (по шкале 7-100) дают высокие урожаи (60-70 ц/га зерновых). С высокоинтенсивным аграрным природопользованием связаны экологические проблемы: дефляция почв, водная эрозия, пониженное биологическое разнообразие, загрязнение водных объектов удобрениями и средствами защиты и пр.

Целью проекта было увеличить биологическое разнообразие и улучшить распределительные функции ландшафта без существенного ограничения производственных основ сельскохозяйственных предприятий.

Учитывая первичную оценку ландшафта (рис. 1) и имеющиеся в распоряжении планово-картографические материалы, на первом этапе для оценки и оптимизации были выбраны 5 ландшафтных функций: предрасположенность к водной эрозии; предрасположенность к ветровой эрозии; новообразование грунтовых вод; влагонакопление; производство продукции растениеводства.

После первого этапа оценки были рекомендованы к оптимизации следующие функции ландшафта: предрасположенность к водной эрозии, увеличение влагозапаса в почве и производство сельскохозяйственной продукция.

Оценка образования грунтовых вод на изучаемой территории дала менее дифференцируемые результаты. Поэтому в дальнейшем данная функция оптимизации не подлежала. Предрасположенность к ветровой эрозии, по причине её сильной зависимости от линейных элементов ландшафта, была принята во внимание только после обработки результатов оптимизации.

Ожидаемые от оптимизации функциональные и регионально-специфические цели в области качества окружающей среды были достигнуты. Среди них:

1. Уменьшение денудации почв и уменьшение дефляционноопасных площадей на 10%;
2. Улучшение функции влагоудержания как минимум на один оценочный класс было достигнуто на 3,4 % территории (путём преобразования части пашни в лес;
3. Оставшаяся пашня сконцентрировалась на почвах с почвенным баллом более 80 и лишь частично – на почвах с балом менее 80.

В настоящее время готовятся материалы для подготовки проектных решений по адаптивно-ландшафтному землеустройству в аридных регионах НСО.

Рекомендации для использования метода. Метод MULBO использует математическую модель, позволяющую решать многие ландшафтно-экологические и территориальные вопросы, например, создание оптимальных биотопов или рациональное развитие агро- или урбано-ландшафтов под влиянием изменяющихся общественных условий. Метод даёт возможность устанавливать функционально оптимальные варианты природо- и землепользования вне агроландшафтов. Модель предлагается также использовать при поиске сбалансированных участков территорий в рамках строительных планов и для изучения устойчивости окружающей среды.

Работа по адаптации метода для условий России и подготовка материалов доклада проводились при поддержке Министерства науки и образования ФРГ проект WTZ (RUS 04/008).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. GRABAUM, R. Verfahren der polyfunktionalen Bewertung von Landschaftselementen einer Landschaftseinheit mit anschliessender «Multicriteria Optimization» zur Generierung vielfältiger Landnutzungsoptionen / R. GRABAUM / Dissertation Universität Leipzig. – Shaker-Verlag Aachen, 1996. – 180 p.
2. GRABAUM, R. Entwicklung einer Softwarelösung für eine neue Methode der Landschaftsoptimierung in Verbindung mit dem Verbundprojekt 4.1 am UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle / R. GRABAUM, T. KILDAL // Bedeutung von Landschaftsstrukturen und Landnutzung für das Überleben von Tier- und Pflanzenarten. Abschlussbericht. – OLANIS Expertensysteme GmbH: Leipzig. – 2004. – P. 32 - 145.
3. MEYER, B.C. Landschaftsbewertung und – optimierung sowie Entwicklung von Szenarien nach der Methode der multikriteriellen Landschaftsoptimierung / B.C. MEYER, H. MÜHLE, R. GRABAUM // Einfluss der Landnutzung auf Landschaftshaushalt und Biodiversität in agrarisch dominierten Räumen. - Leipzig: UFZ-Bericht, 2001. - №16. - P. 7-30.

© П. Грабаум, Б. Майер, Е.Н. Смоленцева, 2007

УДК 543.42; 537.528

К.А. Ломанович, В.С. Тесленко

ИГиЛ СО РАН, Новосибирск

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СПЕКТРАЛЬНОГО ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ С ПОМОЩЬЮ ДИАФРАГМЕННЫХ РАЗРЯДОВ

Введение. Оперативное определение примесей в воде – одна из актуальных задач современности. Существующие методы анализа водных ресурсов не достаточно оперативны. Одной из основных целей данной работы являлось создание простого и дешевого прибора для спектрального анализа жидкостей в малых объемах ($\sim \text{мм}^3$). Представленный в данной статье метод основан на электронной фотосъемке и цифровой обработке спектров излучения от электрического разряда в отверстиях диэлектрических пленок (диафрагм) и пластин. Такой разряд называется «диафрагменным» [1]. Диафрагменный разряд исключает паразитный спектр от электродов за счет их выноса из зоны

разряда. В данном случае область высокой концентрации тока находится в отверстии диафрагмы, где за счет нагрева жидкости происходит ее испарение с последующим разрядом между двумя жидкими электродами.

Методы и способы реализации. В данной работе рассматриваются два метода возбуждения атомно-молекулярных колебаний и два соответствующих способа регистрации спектров воды и примесей в водных растворах:

1. Возбуждение электрического разряда в отверстиях диэлектрической пластины с толщиной $h \ll d$ (d – диаметр отверстия) [2, 3, 4, 6]. Условно, этот способ возбуждения мы будем называть поперечным разрядом, относительно щели спектрографа.

2. Возбуждение электрического разряда в отверстиях диэлектрической пластины, с толщиной $h \gg d$. Такой разряд можно технически реализовать в капилляре, капилляр располагается вдоль щели.

Постановка экспериментов. Эксперименты проводились при атмосферном давлении и комнатной температуре. Общая схема экспериментальной установки представлена на рис. 1а. Электрическая схема разрядного контура и рабочей кюветы представлена на рис. 1б.

Конденсатор $C=2-100$ мкФ заряжался до необходимого напряжения U . Коммутация тока осуществлялась механическим коммутатором K или разрядником РУ-62. С помощью шунта R контролировался разрядный ток в кювете. Регистрация тока осуществлялась с помощью цифрового осциллографа Tektronix TDS 210, данные с которого записывались на персональный компьютер. Собственная индуктивность разрядной цепи установки составляла $L_0=5$ мкН. В части экспериментов в разрядную цепь включалась дополнительная индуктивность. Спектры записывались с помощью цифровой видеокамеры с последующей обработкой на компьютере при помощи специально разработанной программы.



Рис. 1а

Рис. 1. Принципиальная схема постановки экспериментов: 1, 2 – металлические электроды, 3 – диэлектрическая пластина с отверстиями, 4 – кювета с электролитом, l_1 , l_2 – расстояние между электродами и диафрагмой, h – толщина диэлектрической пластины.

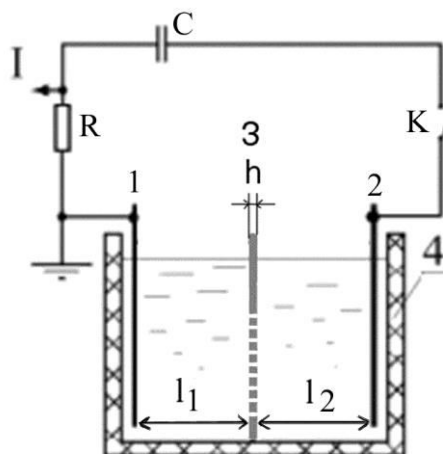


Рис. 1б

Результаты экспериментов. Исследовались спектры свечения для двух режимов: а) в диапазоне напряжений 5–8 кВ, высоковольтный разряд, б) в диапазоне напряжений: 100–400 В, так называемый автоколебательный режим, низковольтный разряд. Основная часть экспериментов проводилась в режиме (б), как перспективная разработка для безопасной эксплуатации прибора.

На рис. 2 представлены осциллограмма тока (I) и свечения (L) в автоколебательном режиме разряда (а) [6].

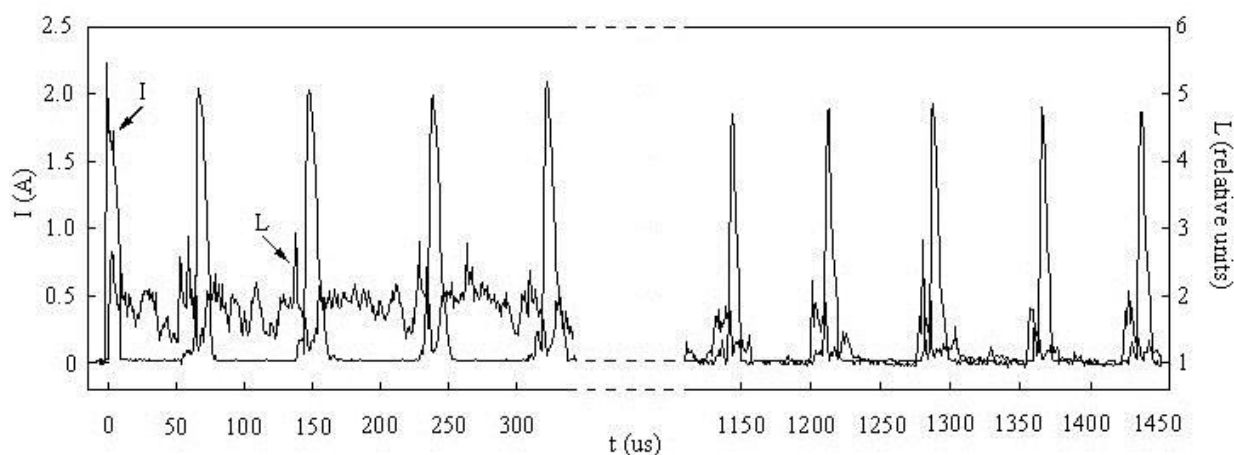


Рис. 2

Режим (а), высоковольтный диафрагменный разряд. В постановке 1 в качестве разрядного промежутка была задействована лавсановая диафрагма

толщиной $h=50\text{мкм}$ в виде сектора сферы с фокусным расстоянием $F=55\text{мм}$, с множеством отверстий ($N\sim 2700$) диаметра $0,15\pm 0,05\text{ мм}$. В качестве испытываемой жидкости использовался водный раствор хлорида натрия с концентрацией $K=0,5\text{--}20\%$. В качестве источника тока использовался генератор одиночных импульсов тока ГИТ-2. Напряжение разряда варьировалось в диапазоне от 5 до 8 кВ. Емкость накопительного конденсатора составляла 2 мкФ. Коммутация тока осуществлялась разрядником РУ-62. Детальное описание постановки экспериментов представлено в работе [5]. Для этой постановки экспериментов были получены зависимости интенсивности свечения спектральных линий от задаваемого напряжения на разрядной ячейке (рис. 3а) и концентрации хлорида натрия (рис. 3б). Выявлена квадратичная зависимость яркости свечения спектральной линии от напряжения разряда.

Проведен количественный анализ зависимости яркости свечения спектральной линии от плотности электролита в кювете. На рисунке 3б приведена зависимость яркости свечения от разряда из кюветы от весовой концентрации раствора хлорида натрия ($K, \%$) для напряжения на разрядной ячейке $U=8\text{ кВ}$. Замечено, что с увеличением концентрации отверстия по центру диафрагмы перестают светиться, что влечет за собой снижение светового потока. Также сделан вывод об эффективности спектрального анализа растворов с малой концентрацией примесей в воде описываемым методом.

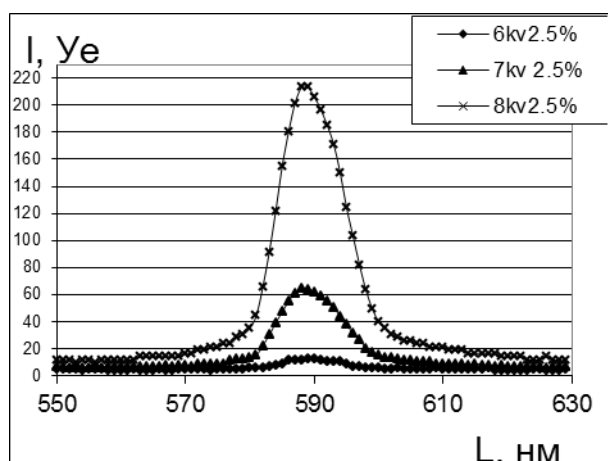


Рис. 3а

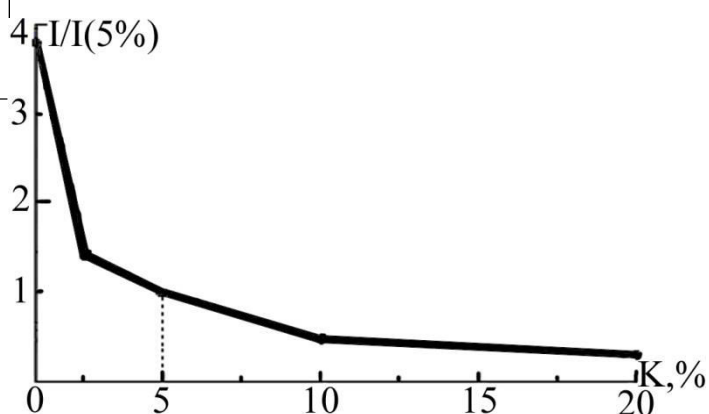


Рис. 3б

Режим (б), низковольтный диафрагменный разряд. Низковольтный диафрагменный разряд, также как, в режиме (а), осуществлялся на N отверстиях ($N=1\text{--}25$). В варианте $N=25$ отверстия диаметром $d=50\text{мкм}$ были сделаны во фторопластовой пленке толщиной 20мкм в виде линии длиной 6 мм, которая располагалась вдоль щели спектрографа. В данной работе (рис. 4) представлены только результаты исследований для одного отверстия ($N=1$).

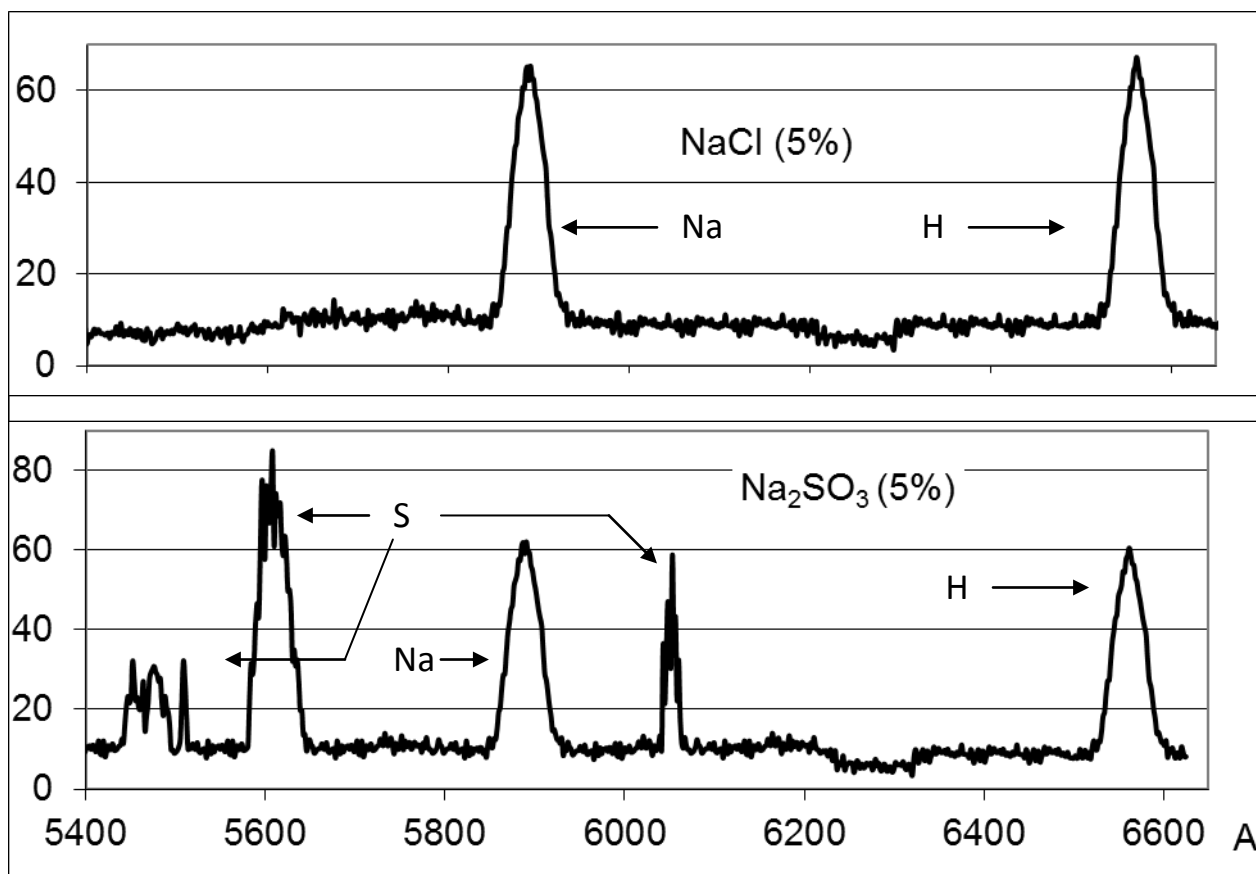


Рис. 4

Новизна исследований заключается в том, что был детально изучен автоколебательный режим диафрагменного разряда с применением скоростной киносъемки совместно с регистрацией ампер-секундных характеристик (рис. 2) [2, 3, 6]. Для представленных спектрограмм (рис.4) осуществлялся анализ жидкостей в режиме автоколебаний тока на отверстии диаметром 0,2 мм при напряжении $U=300\text{В}$, без дополнительной индуктивности. Проведен качественный и количественный анализ пробных растворов хлорида натрия и сульфида натрия. Полученные спектры свечения для исследованных растворов приведены на рис. 4.

Из представленных спектрограмм видно, что обе спектральные характеристики содержат линии натрия (Na) на длине волны 5890 Å. Разрешающая способность оптической системы и видеокамеры составляли 2Å/pix. В обеих характеристиках так же наблюдается линия водорода (H) на длине волны 6560 Å. Для раствора сульфида натрия регистрировались линии серы (S), которые представлены на нижней спектрограмме рис. 4.

ВЫВОДЫ

1. Показана возможность количественного спектрального анализа веществ в водных растворах с помощью диафрагменного разряда.
2. Показана принципиальная возможность реализации спектрального анализа примесей в воде при напряжениях 100-400 Вольт, в режиме автоколебаний тока.
3. В представленной методике исключена эрозия металлических электродов.

4. Показана возможность экспресс-анализа жидкости с цифровой записью спектров и их обработкой на компьютере.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты: № 05-08-18145, № 06-02-17453). Авторы благодарны Г.Н. Санкину за постановку задачи исследований спектров при высоковольтном электрическом разряде в жидкости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дробышевский, Э.М. Излучение и равновесный состав плазмы импульсного диафрагменного разряда в электролитах / Э.М. Дробышевский и др. // ЖТФ. – 1977. – Т. 47, вып. 2. – С. 255-262.
2. Тесленко, В.С. Генерация автоколебательных процессов при диафрагменном разряде в электролите / В.С. Тесленко, А.П. Дрожжин, А.М. Карташов // Письма в ЖТФ. – 2001. – Т. 27, вып. 20. – С. 83-88.
3. Дрожжин, А.П. Импульсный диафрагменный разряд в жидкости / А.П. Дрожжин, А.М. Карташов // Динамика сплошной среды. – 2001. – вып. 117. – С. 130-132.
4. Зуев, Б.К. Разряд при вскипании в канале новый источник автоматизации и возбуждения для атомно-эмиссионного определения металлов в потоке / Б.К. Зуев и др. // Журнал аналитической химии. – 2002. – Т. 57. – №10. – С. 1072-1077.
5. Санкин, Г.Н. Многоочаговый диафрагменный электроразрядный генератор ударных волн в жидкости / Г.Н. Санкин и др. // Приборы и техника эксперимента. – 2004. – №4. – С. 114–118.
6. Тесленко, В.С. Автоциклический кольцевой пробой в электролите с вынужденным коллапсом пузырьков / В.С. Тесленко, А.П. Дрожжин, Г.Н. Санкин // Письма в ЖТФ. – 2006. – Т. 32. – вып. 4. – С. 24-30.

© К.А. Ломанович, В.С. Тесленко, 2007

СЕЛЕКТИВНЫЙ ХАРАКТЕР ЗИМНЕГО СОЛЕПЕРЕНОСА В ПОЧВАХ БАРАБИНСКОЙ РАВНИНЫ

От уровня исследований миграции влаги и растворенных в ней солей в промерзающих почвах зависит решение многих теоретических и практических вопросов, имеющих большое значение для геофизиологии, агрофизики, почвоведения, мелиорации и других областей.

Массоперенос в промерзшей почве солей и выход их в снег исследован на данный момент крайне узко. Лишь на территории Якутии Н.П. Анисимовой и Т.В. Головановой (1980) проведен ряд экспериментов по выявлению факта рассоления почвы при выносе водорастворимых солей в прилегающий к почве снег. Но авторами не были отделены статьи привноса солей из атмосферы от статьи поступления их из почвы.

Данный же эксперимент был поставлен зимой 1983-1984 гг. на территории Барабинской равнины, в районе п. Октябрьский, на черноземе обыкновенном, окультуренном. Было заложено 5 опытных участков на расстоянии друг от друга 200-300 см, поэтому считаем, что участки идентичны и условия водопроницаемости почвы на них одинаковы.

На каждом участке в декабре были сделаны ниши и произведен отбор проб промерзшей почвы послойно. На участках №1 и №2 в выдолбленном слое почвы на глубину 25-30 см произвели заложение солей: NaCl, NaHCO₃ – по 100 г, Na₂SO₄ – 200 г. Соли были смешаны с вынутой из ниши почвой и утрамбованы затем в ней. На участке №1 искусственно засоленную систему оставили открытой, тем самым позволив почве естественным образом бороться с избыточным засолением. Систему на участке №2 перекрыли на контакте почва-снег деревянной рамой со стеклом, лишив почву возможности естественным способом выводить избыточные соли на поверхность и далее в снег.

На участке №3 и №4 произвели искусственное засоление непосредственно на поверхности почвы теми же солями и в тех же соотношениях, помещенными на поверхность, очищенную от снега и травы. Причем систему на участке №3 также перекрыли рамой со стеклом, обеспечив условия герметичности, а систему на участке №4 оставили в естественных условиях на непосредственном контакте почва-снег.

Участок №5 послужил в данном случае контрольным, представляющим собой картину естественного, фоновое химического содержания солей в почвенном профиле в конце зимы.

На территории Барабинской равнины промерзание грунта от поверхности начинается, в среднем, с ноября, в зависимости от характера протекания зимы. К середине декабря при средней температуре воздуха - 15°C промерзший слой составляет 15-20 см. При подобных условиях закладка солей во второй декаде декабря наиболее рациональна.

Следующим этапом исследования является измерение влажности и температуры почвы в течение зимы послойно, а также отбор проб образцов почвы до начала оттаивания. Для территории Барабы отбор необходимо произвести в конце марта, пока оттепель не позволила солям, выпавшим из раствора зимой, снова перейти в жидкую фазу.

Так, в марте 1984 г. был произведен отбор промерзшего грунта послойно и в лабораторных условиях сделан химический анализ водной вытяжки из почв.

В табл. 1 отражена общая картина изменения температуры почвы в течение зимы (по данным Х.Х. Мелеска), в табл. 2 – изменение влажности почвы послойно на участках отбора проб. Данные химических анализов проб покомпонентно приведены в табл. 3.

По табл. 1 видно, что с глубиной температура почвы повышается, соответственно движение влаги и пара будет направляться вверх по профилю от областей теплых к более холодным.

Таблица 1. Температура почвы зимой 1983-1984 гг. на стационарном участке (по данным Х.Х. Мелеска)

Место замера	25.12.1983г.	22.01.1984г.	05.02.1984г.	19.02.1984г.	26.02.1984г.	18.03.1984г.
Открытая система, почва	-2,0	-5,0	-7,5	-6,5	-5,8	-3,9
Глубина 5 см	-1,5	-4,0	-8,0	-6,5	-5,0	-3,0
Глубина 20 см	0	-2,0	-4,0	-6,5	-4,5	-1,5

Данный факт подтверждается табл. 2. К концу зимы влажность почвы значительно увеличилась в каждом слое, причем подтягивание влаги происходит не только к поверхности, но и к фронту промерзания из глубоких слоев почвы.

Таблица 2. Изменение влажности в конце и начале зимы 1983-1984 гг. на опытных участках, %

Интервал отбора, см	Участок № 5 (естественный фон)	Участок № 1 (соли на глубине 25-30 см, система открыта)	Участок № 2 (соли на глубине 25-30 см, система закрыта)
0-5	6,0	1,4	2,8
5-10	19,7	3,4	1,1
10-20	13,8	8,0	4,9
20-30	-	-	-
30-40	-	-	-
40-50	42,9	57,3	66,1

Проанализируем картину динамики почвенного профиля зимой с геохимических позиций. Обращая внимание на данные табл. 3, на участках 1, 2 и 5 в слое почвы 10-20 см (а это слой, прилегающий к слою заложения солей на участках 1 и 2) количество солей различно. Причем интересен тот факт, что фоновая минерализация почвенного раствора не намного меньше, чем в искусственно засоленной почве с открытым контактом почва-снег (участок 1),

но заметно меньше, чем в искусственно засоленной почве с перекрытым контактом почва-снег (участок 2): в 1,2 и в 2 раза соответственно.

По сути, речь идет о небольшой разнице. Но интересен сам факт. Ведь открытая система себя ведет иначе, нежели закрытая.

В верхнем слое почвы 0-5 см солей на участке 1 меньше, чем на участке 2 в 1,16 раз, в слое 5-10 см – в 1,19 раз, в слое 10-20 см – в 1,84 раза. Причем в слое почвы 40-50 см, что расположено ниже места заложения солей, картина та же: минерализация почвенного раствора на участке 2 выше в 1,23 раза. По сравнению с фоном (участком 5), общая минерализация почвенного раствора на данной глубине больше примерно в 5 раз. И это весьма закономерно. Ведь заложенные на глубину соли мигрируют и вверх по профилю, и вниз. Вот только поток перемещающихся солей вверх по почвенному профилю значительно слабее потока, направленного вниз. Более того, в открытой системе наблюдаются показатели общей минерализации намного ниже и в толще почвы выше области заложения солей, и в области ниже их заложения.

Соответственно, напрашивается вывод: в системе, не перекрытой на границе почва-снег, соли быстрее и интенсивнее передвигались вверх по профилю и выходили из почвы в снег. Поэтому содержание их по всему профилю много меньше. В перекрытой системе, наоборот, на всех глубинах их содержание высоко. Вызывает еще больший интерес тот факт, что в системе, искусственно засоленной и не перекрытой, содержание солей по профилю меньше, чем в естественных условиях. Это происходит, скорее всего, за счет концентрационного и температурного градиента, которые вместе усиливают «вытягивание» солей в снег. Получается, что почва выводит тем больше солей, чем больше их в ней находится, т. е. пытается освободиться от их избытка, так сказать, самоисцеляясь.

Рассмотрим теперь участки 3 и 4, на которых искусственное засоление произвели на поверхности почвы. При непосредственном контакте со снегом часть солей непременно растворяется и остается в нем, перемещаясь по снеговому профилю в течение зимы. Другая (малая) часть растворяется в ледовой фазе почвенной влаги на поверхности. При растворении, естественно, выделяется тепло, и самый верхний слой чуть подтаивает, влага с солями по образовавшимся порам проникает вниз по профилю.

В перекрытой на границе почва-снег системе (участок 3) в приповерхностном слое (5-10 см) количество солей в 1,7 раза больше, чем в открытой системе, а в нижележащем слое почвы глубиной 10-20 см – в 1,1 раза.

Получается, что при интенсивном засолении сверху происходит кумуляция солей в приповерхностном слое почвы с частичным выносом вниз по профилю навстречу основному потоку миграции влаги.

Судя по табл. 3, интенсивность массопереноса ионов примерно одинакова, за исключением соды.

Таблица 3. Химический состав солей по данным водной вытяжки из почв опытного участка №1 - №5 (п. Октябрьский, чернозем окультуренный), март 1984 г.

Характери стика горизонтов	Интер вал, см	pH	Дата отбора	Анионы, мг\дм³				Катионы, мг\дм³					Общая минерализация, мг\дм³
				NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	
Участок №1, соли внесены на глубину 25-30 см, система открытая													
A ₀ A ₁	0-5	8,0	23.03.	1,9	50,7	5,0	7,4	4,2	2,3	13,2	2,7	1,2	88,6
A ₁	5-10	8,0	23.03.	-	57,7	5,4	11,1	4,2	1,3	15,4	3,0	1,6	99,7
A ₁	10-20	7,95	23.03.	-	61,7	10,0	11,5	4,8	2,8	20,8	3,0	1,6	116,1
B ₁	40-50	7,9	23.03.	1,9	41,4	180,6	66,0	15,4	13,1	118,1	1,3	1,4	439,2
Участок №2, соли внесены на глубину 25-30 см, система закрытая													
A ₀ A ₁	0-5	7,85	23.03.	-	55,2	10,7	6,0	4,5	2,8	18,6	3,3	1,2	102,5
A ₁	5-10	8,0	23.03.	-	63,4	11,3	10,0	4,6	2,6	22,1	3,0	1,6	118,6
A ₁	10-20	8,0	23.03.	-	51,4	91,8	2,6	10,4	8,3	46,2	0,9	2,4	213,9
B ₁	40-50	8,05	23.03.	-	47,7	257,3	48,6	15,4	11,6	157,5	1,3	2,0	541,3
Участок №3, соли внесены на поверхность, система закрытая													
A ₁	5-10	7,95	23.03.	2,5	85,7	663,7	361,2	22,2	15,2	580,5	2,1	2,6	1735,6
A ₁	10-20	7,85	23.03.	3,5	44,0	464,0	224,0	41,7	35,3	280,7	2,1	3,2	1098,4
Участок №4, соли внесены на поверхность, система открытая													
A ₁	5-10	8,35	23.03.	25,98	191,78	139,29	344,04	15,21	7,44	292,11	3,13	11,18	1030,16
A ₁	10-20	8,15	23.03.	6,08	95,55	167,98	409,41	14,73	9,37	289,56	2,58	6,22	1001,48
Участок №5, естественный фон, контакт почва-снег													
A ₀ A ₁	0-5	8,15	23.03.	-	60,9	5,32	6,58	4,57	2,67	16,44	3,01	1,3	100,79
A ₁	5-10	7,85	23.03.	3,22	61,63	6,52	9,03	4,55	2,47	21,75	2,93	1,39	113,49
A ₁	10-20	8,05	23.03.	-	60,22	4,57	10,9	4,13	2,11	17,63	3,01	1,39	103,96

Примечательно то, что территория Барабы относится к области сульфатно-содового засоления. Даже по участку 5 видно (табл. 3), что ионов натрия, карбонатов и сульфатов значительно больше по сравнению с другими ионами.

Обращая внимание на концентрацию карбонатов участка 3, особенно при перекрытии почвы, возникает вопрос: почему при интенсивном поверхностном засолении в нижележащих слоях содержание этого иона даже меньше, чем фоновое? Хотя в открытом участке 4 показатели выше.

Так как растворение карбонатов происходит в последнюю очередь (после растворения хлоридов и сульфатов), сода не растворилась при перекрытии почвы вся, часть ее осталась на поверхности в нерастворенном состоянии. А та часть, которая перешла в почвенный раствор, сформировала в верхних слоях промерзшего грунта концентрационный градиент, за счет которого произошло подтягивание соды к вышележащим горизонтам, уменьшив ее содержание даже ниже фонового.

Исходя из вышеописанного, можно отметить, что, во-первых, массоперенос по всему почвенному профилю происходит в течение всей зимы даже в промерзшем грунте, а во-вторых, наблюдается селективный перенос солей. Интенсивнее всего мигрирует натрий, карбонаты и сульфаты, это ионы тех солей, которыми и загрязнена данная территория. И, в-третьих, происходит вынос солей при естественных условиях из почвы в прилегающий снег.

© И.Н. Белоус, В.А. Казанцев, 2007

УДК 631.417

М.В. Якутин, Л.Ю. Анопоченко

ИПА СО РАН, Новосибирск

СГГА, Новосибирск

КАРТОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В МОНИТОРИНГЕ ЗАПАСОВ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ ПРИЧАНОВСКОЙ ТЕРРИТОРИИ БАРАБЫ

Картографический метод создания глобальной системы мониторинга предполагает развертывание работ при обследовании и изучении любой территории в двух основных направлениях:

1. Создание базовой инвентаризационной картографической документации, отражающей современное состояние и оценку природных ресурсов;

2. Картографирование динамики изменений природной среды, предусматривающее обновление инвентаризационных карт, создание специальных карт динамики и прогноза, т. е. систематическое картографическое слежение за состоянием природной среды и ее изменениями, обусловленными хозяйственной деятельностью людей [1].

Картографический метод исследования обладает всеми свойствами научного метода. Он имеет четко очерченный круг задач, систему определенных и взаимосвязанных приемов анализа и преобразования картографического изображения. В данной работе производился анализ разновозрастных карт.

Главная цель сравнения таких карт – повторное определение состояния и пространственного положения явлений, изучение их динамики и эволюции. Сравнивая карты, на которых явления изображены в различные моменты времени, можно выявить изменения, произошедшие за любой промежуток времени и оценить картометрически приращения координат, изменения расстояний, площадей. По разновременным картам можно оценить не только величину изменения, но и его направление [2].

Органическое вещество, накопленное в почвах, составляет главную часть мировых запасов связанного углерода. В почвах планеты содержится примерно $30 \cdot 10^{14}$ кг органического углерода. Количество органического материала, удерживаемого почвенной матрицей, соответствует разности между общей продукцией биомассы и ее потерями вследствие разложения. Конечные уровни накопления органического вещества на конкретном участке обусловлены не только общей продуктивностью и разложением, но и химическими и физическими особенностями как экосистемы в целом, так и самого растительного материала [3].

В связи с увеличением в атмосфере планеты концентрации CO_2 в последние 150 лет и нарастанием вследствие этого парникового эффекта важнейшая роль почв как природного депо органического углерода становится все более очевидной. Особенный интерес исследователей привлекают молодые формирующиеся экосистемы и почвы, для которых характерен переходный режим биологического круговорота с накоплением органического вещества [4].

Озеро Чаны – самый крупный естественный водоем Западной Сибири - привлекает особое внимание исследователей, так как, являясь бессточным водоемом, оно служит индикатором в выявлении фаз повышенной и пониженной водности. Озерная система Чаны – Абышкан – Сумы – Чебаклы активно усыхает на протяжении длительного времени в связи с усилением аридности климата юга Западной Сибири. Площадь водного зеркала этой озерной системы сократилась с 15 тыс. км² (конец XVIII века) до 1293 км² в настоящее время [5].

Территория обсыхающей озерной депрессии Чаны – Абышкан – Сумы – Чебаклы является хорошим объектом для изучения особенностей применения картографических методов в экологическом мониторинге территорий пойм, обсыхающих соленых озер. Главным здесь является анализ динамики изменения почвенных контуров на территории обсыхающего дна озер Чаны – Абышкан – Сумы - Чебаклинской системы. Для этого был применен картографический метод исследования с использованием карт разных годов издания [6-10].

Анализ динамики изменения почвенных контуров на территории обсыхающего дна озер Чаны – Абышкан – Сумы - Чебаклинской системы производился с помощью программного продукта MapInfo. В процессе работы над картографическим материалом было выделено 23 разновидности почв, которые для удобства обсчета были сгруппированы в 8 групп.

На рис. 1 приведена карта-схема расположения почв, сформировавшихся в поймах обсыхающей озерной системы Чаны – Абышкан – Сумы – Чебаклы с 1786 по 2006 гг.

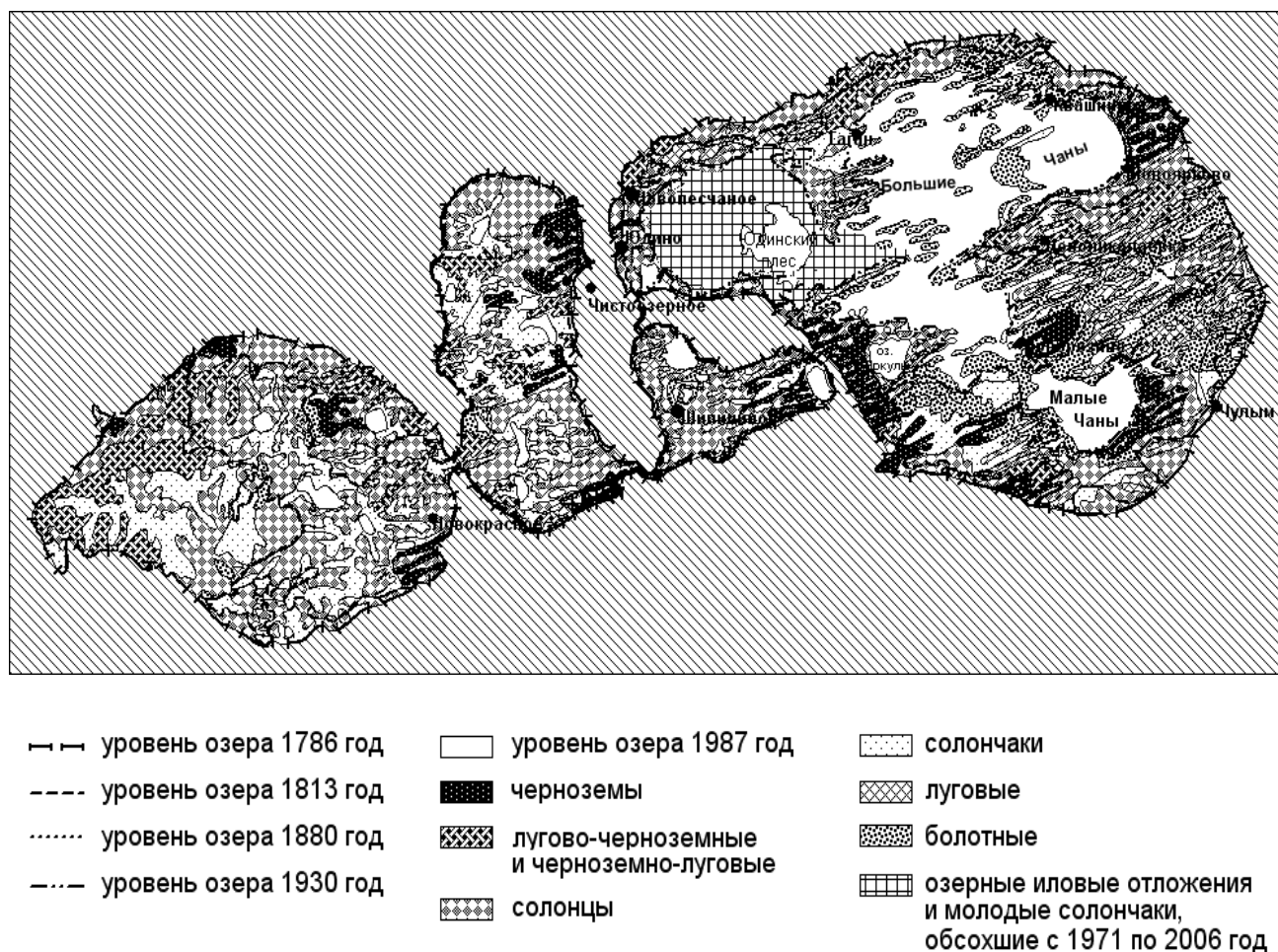


Рис. 1. Карта-схема расположения почв, сформировавшихся в поймах обсыхающей озерной системы Чаны – Абышкан – Сумы - Чебаклы с 1786 по 2006 гг.

На основании построенной карты-схемы стало возможным оценить динамику изменения площадей различных почв и динамику накопления общих запасов органического углерода в профилях молодых формирующихся почв.

Сукцессия почв и экосистем начинается сразу же после выхода участка поймы из-под воды. График на рис. 2 наглядно демонстрирует динамику обсыхания Причановской территории Барабы и особенности трансформации почв с течением времени. Максимальные площади пойм озерной системы Чаны – Абышкан – Сумы – Чебаклы обсохли 90-157 лет назад. Второй по масштабам период обсыхания 157-184 года назад. Отчетливо видно, что 90 лет назад процесс обсыхания озер Чановской озерной системы замедлился.

В течение первых 40 лет после обсыхания участков озерного дна на них формируются болотные почвы, солонцы и солончаки. Соотношение площадей

самых молодых почв с возрастом не более 40 лет выглядит следующим образом: болотные почвы - 81,5%, солонцы луговые - 11,3%, солончаки - 7,2%. Общая площадь обсохших земель за этот период составляет 434 км².

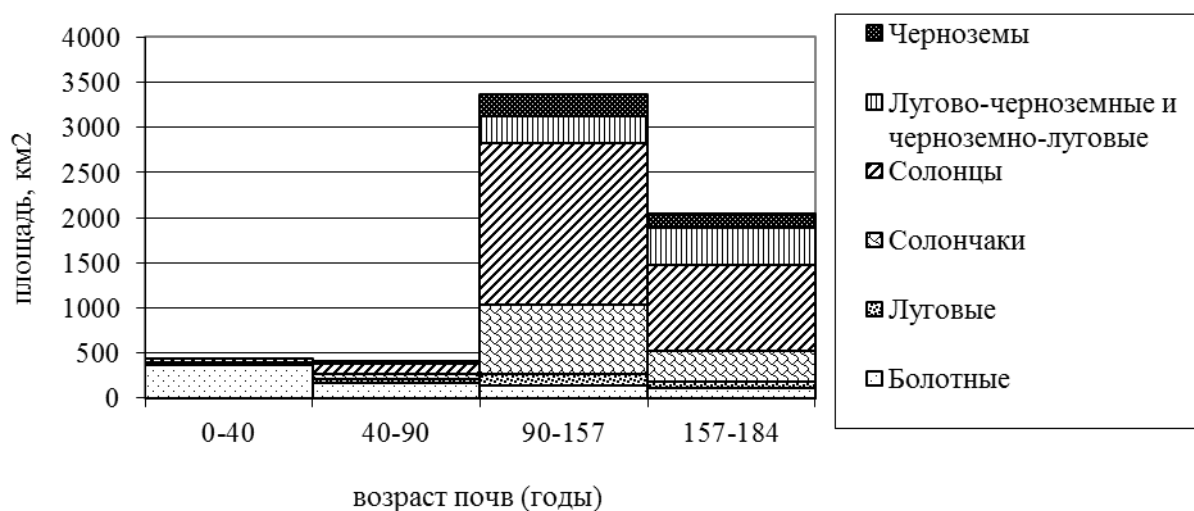


Рис. 2. Площади различных почв, сформировавшихся в обсохших поймах озерной системы Чаны – Абышкан – Сумы – Чебаклы

На следующей стадии формирования (возраст почв 40-90 лет) появляются такие почвы, как луговые, лугово-черноземные, черноземно-луговые и черноземы. Площадь болотных почв уменьшается (с 353,9 км², до 161,3 км²), в то время как площади солонцов и солончаков увеличиваются с 48,9 км² до 117,6 км² и с 31,2 км² до 38 км² соответственно. Среди почв с возрастом от 40 до 90 лет максимальную площадь занимают болотные 34,9%, далее идут солонцы луговые, которые занимают 28,2% площади, луговые - 14,1%, солончаки - 13%, лугово-черноземные и черноземно-луговые - 2,5%, черноземы - 7,3%. Общая площадь территории поймы, обсохшей за это время, составляет 416,0 км².

С дальнейшим увеличением возраста почв (90-157 лет) связана их дальнейшая эволюция. Происходит снижение доли болотных почв в почвенном покрове: их общая площадь на этой стадии составляет 131,5 км². Незначительно увеличиваются площади следующих почв: луговые (общая площадь составляет 129,1 км²), лугово-черноземные и черноземно-луговые (300,7 км²), черноземы (248,9 км²). Значительно увеличилась доля площадей, занятых солонцами (общая площадь - 1785,4 км²) и солончаками (общая площадь - 769,0 км²). Среди почв, сформировавшихся на участках поймы, обсохшей 90-157 лет назад, наибольшие площади занимают солонцы (52,4%) и солончаки (22,4%). Общая площадь лугово-черноземных и черноземно-луговых почв составляет 9,1%, черноземов - 7,7%, луговых - 4%, болотных - 3,8%. За этот период обсохла территория с общей площадью 3 431,3 км².

Максимальный возраст имеют почвы, сформировавшиеся 157-184 года назад. На этой стадии почвообразования площади, занятые солонцами и солончаками, составляют 953,6 км² и 344,0 км², соответственно. Лугово-черноземные и черноземно-луговые почвы занимают 408,8 км², черноземы 164,5 км², а болотные почвы только 107,7 км². Среди почв данной возрастной группы наибольшие площади к настоящему времени занимают солонцы (46,8%), лугово-черноземные и черноземно-луговые почвы (20,0%) и солончаки (16,9%). Общая площадь черноземов составляет 8,1%, болотных почв - 5,3%, луговых – 2,6%. Общая площадь территории поймы, обсохшей за это время, составляет 2 040,2 км².

Таким образом, в итоге эволюции почв, формирующихся в поймах обсыхающих озер, происходит формирование почв черноземного ряда (черноземы и лугово-черноземные почвы), которые занимают высокие элементы рельефа. Это можно рассматривать как проявление закономерного процесса развития молодых почв по зональному типу. Но особенности процесса почвообразования на данной территории таковы, что максимальные площади в итоге оказываются занятыми почвами солонцово-солончакового комплекса.

В свете усиливающегося парникового эффекта, связанного с увеличением поступления парниковых газов в атмосферу, становятся все более актуальными работы связанные с оценками запасов органического углерода в его природных депо. В данном случае мы сделали попытку оценить запасы углерода, закрепившегося в почвенном органическом веществе почв, сформировавшихся за все время обсыхания озерной системы Чаны – Абышкан – Сумы – Чебаклы (табл. 1). Для расчетов нами было принято, что чернозем в слое 0-100 см содержит в среднем 30 кг С / м², лугово-черноземные и черноземно-луговые почвы – 25 кг С / м², солонцы – 12,5 кг С / м², солончаки – 10 кг С / м², луговые почвы – 20 кг С / м², болотные почвы – 32,5 кг С / м² [11], озерные иловые отложения и молодые солончаки – 0,5 кг С / м².

Таблица 1. Запас С_{орг} в 0-100 см слое почв, сформировавшихся в пойме обсыхающей озерной системы Чаны – Абышкан – Сумы – Чебаклы (т)

Почвы	Периоды обсыхания озерной системы Чаны – Абышкан – Сумы – Чебаклы (гг.)				
	1786-1813	1813-1880	1880-1930	1930-1970	1971-2006
Черноземы	4 395 000	7 467 000	894 000	-	-
Лугово-черноземные, черноземно-луговые	10 220 000	7 517 500	262 500	-	-
Солонцы	11 920 000	22 317 500	1 470 000	611 250	611 250
Солончаки	172 000	-	190 000	156 000	156 000
Луговые	1 232 000	-	1 176 000		
Болотные	3 500 250	-	5 242 250	11 501 750	11 501 750
Озерные иловые отложения					223 030

Итого	31 439 250	37 302 000	9 234 750	12 269 000	12 492 030
					102 737 030

Общий запас углерода гумуса почв, сформировавшихся на обсыхающих территориях Чановской озерной системы, составил 102 737 030 т.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Картографические методы в научных исследованиях. – Новосибирск: Наука, 1986. – 96 с.
2. Берлянт, А.М. Картографический метод исследования / А.М. Берлянт. – М.: Изд-во МГУ, 1988. – 252 с.
3. Тейт, Р. III Органическое вещество почвы: Биологические и экологические аспекты / Р. III Тейт. – М.: Мир, 1991. – 400 с.
4. Титлянова, А.А. Режимы биологического круговорота / А.А. Титлянова, М. Тесаржова. – Новосибирск: Наука, 1991. – 150 с.
5. Пульсирующее озеро Чаны. – Л.: Наука, 1982. – 304 с.
6. Карта озер Чаны, Сумы, Абышкан. Тобольской и Томской губернии. Составлена членом Императорского географического общества Н.М. Ядринцевым, 1880 год, Масштаб: в английском дюйме 10 верст // Изв. Императорского Географ. об-ва. – Т. 22. – С.-Пб., 1887. – 676 с.
7. Озеро Чаны на карте Колыванского наместничества, карта №384, Масштаб: 15 верст в дюйме. – Архив главного штаба, 1786.
8. Чемоданов, С.Г. Вопросы географии Сибири: сб. 3 / С.Г. Чемоданов. – Томск: Изд-во Томского гос. ун-та, 1953. – 214 с.
9. Карта Новосибирской области. Барабинский район. Масштаб 1: 200 000. – ПО «Инженер. геодезия» Роскартографии. – Новосибирск, 1997.
10. Почвенная карта Новосибирской области. Масштаб 1: 400 000 / Гл. управление геодезии и картографии при Совете министров СССР. – М., 1987.
11. Запасы органического углерода в почвах Западной Сибири / А.А. Титлянова, Г.И. Булавко, Н.П. Миронычева-Токарева, М.Ф. Хвощевская // Почвоведение. – 1994. – № 10. – С. 49–53.

© М.В. Якутин, Л.Ю. Анощенко, 2007

УДК 631.417.2:504.53.064

Б.М. Кленов, А.Г. Гриценко

ИПА СО РАН, СГГА, Новосибирск

ГИДРОЛИЗУЕМОСТЬ ГУМИНОВЫХ КИСЛОТ КАК ОДИН ИЗ ВОЗМОЖНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОЧВЕННО-ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

В настоящее время хорошо известно, что все виды антропогенных воздействий изменяют почву как физическую и химическую среду обитания живых организмов и ведут к сокращению биоразнообразия, а, значит, и к сокращению уровня органического вещества (ОВ) почв. Кроме того, сокращение уровня ОВ сопровождается изменением его качества и структуры, т.е. природы в целом. В связи с этим встает вопрос устойчивости экологического функционирования гумуса (УЭФ) как компонента биогеоценоза. Проблема УЭФ гумуса одна из наименее решенных в почвенной экологии.

Проблема устойчивости гумуса возникает после освоения почв и последующего длительного использования их в земледелии и с поступлением в них различных продуктов антропогенной деятельности. Устойчивостью, или в прежнем понимании буферной способностью, гумус при обработке почв или при поступлении в них различных продуктов промышленных выбросов и кислотных дождей, а также ксенобиотиков или ненормированного количества минеральных удобрений обладает лишь до определенного предела. В почвах естественных ненарушенных биогеоценозов разложение органических остатков и синтез гумусовых веществ находится примерно в равновесии, поэтому потеря гумуса не происходит. Наоборот, происходит его увеличение, хотя и очень медленное. Однако в освоенных почвах, как правило, с убранным урожаем органического вещества отчуждается больше, чем восполняется с остатками или даже с внесенными органическими удобрениями. За счет усиления биологического окисления органического вещества в пахотных почвах и, как правило, усиления при этом эрозии почв, особенно в эрозионноопасных районах, постоянно идут потери гумуса, хотя и ослабевающие со временем. Таким образом, потери гумуса являются показателем ослабления его УЭФ. Однако, кроме общих потерь гумуса, которые в настоящее время достаточно точно устанавливаются в различных регионах мира, имеет место изменение структуры даже самых устойчивых в природе таких соединений углерода, как гумусовые кислоты. Таким образом, в оставшемся в почве гумусе природа гумусовых кислот не остается такой же, как в исходной (целинной) почве. Проблема изменения самой природы гумусовых кислот в зависимости от различных антропогенных факторов изучена наименее всего.

Среди соединений гумуса наибольшей устойчивостью выделяются гуминовые кислоты (ГК), поэтому представляется целесообразным их использовать в качестве своеобразных маркеров при осуществлении почвенно-экологического мониторинга. Одним из свойств ГК, используемых в данном случае, может служить их отношение к действию растворов минеральных кислот, т.е. гидролизуемость. Это свойство ГК изучают при выяснении их химической природы. Продукты гидролиза представлены обычно легко минерализуемыми соединениями белковой или углеводной природы. Об этом свидетельствуют проведенный нами обзор мировой литературы и собственные данные [Кленов, 2001]. Остаток ГК после гидролиза служит показателем не только химической устойчивости. Химическая устойчивость ГК, зависящая от количества входящих в их состав соединений, устойчивых к биологическому разложению, следовательно, может служить одним из дополнительных критериев УЭФ.

Связь между химической устойчивостью ГК и экологическими условиями формирования их в частности и гумуса в целом гумуса известна давно и подтверждается исследованиями последних лет [Геммерлинг, 1946; Рыдалевская, Терешенкова, 1956; Piper, Posner, 1972; Olk et al., 1996; Кленов, 2001 и др.]. Хотя в каждом исследовании условия проведения гидролиза были несколько различными, все авторы приходили к единому заключению, что

количество С и N в гидролизате зависит от почвы и прежде всего от всего комплекса биоклиматических условий. Например, в наиболее увлажняемых почвах подзолистого типа гидролизуемость ГК выше, чем в черноземах. ГК почв, например, каштановых, развивающихся в ещё более выраженных аридных условиях, гидролизуются слабее. Кроме того, отмечено, что гидролизуемость ГК зависит от характера сельскохозяйственного использования почв. Таким образом, различное отношение гумусовых кислот к гидролизу можно использовать не только в качестве диагностического признака при характеристике почв, но и в качестве критерия при оценке степени антропогенного нарушения структуры ГК.

В гидролизат, содержание которого оценивается по углероду, переходят вещества наименее устойчивой части молекул ГК. Остаток после гидролиза позволяет с известной долей условности судить о степени химической, а, следовательно, экологической устойчивости ГК. Исходя из данных соображений, мы предприняли попытку разработать упрощенную модификацию гидролиза не с целью изучения природы вещественных составляющих ГК, а для разработки одного из критериев оценки экологической устойчивости их.

Препараты ГК в количестве 100-200 мг с заведомо известным содержанием углерода, выделенные из горизонта А наиболее контрастных по своему генезису почв общепринятыми методами [Орлов, Гришина, 1981], обрабатывали 200 мл 10% серной кислотой и выдерживали при периодическом перемешивании на водяной бане в течение 20 часов. Впоследствии в гидролизате был определен выход углерода (в % от общего его количества в анализируемой навеске) общеизвестным методом мокрого сжигания по И.В. Тюрину.

Приведенные в таблице данные показывают, что наибольшей гидролизуемостью обладают ГК дерново-подзолистых почв. По мере нарастания сухости климата и соответственно закономерного изменения всего комплекса экологических условий (типа растительности, почвенной фауны и микрофлоры, гидротермического режима) гидролизуемость ГК снижается. Не рассматривая даже природу гидролизата, которая в учении о почвенном гумусе хорошо известна, формально, прежде всего, можно сделать заключение, что УЭФ ГК существенно различается в почвах, развивающихся в контрастных условиях.

Таблица 1

Почва, место отбора образца, угодье	Выход углерода в гидролизате, %
Дерново-сильноподзолистая со вторым гумусовым горизонтом, Томская область, Бакcharский район, елово-кедрово-пихтовый зеленомошно-осочковый лес	38,6
Серая лесная, Новосибирская область, Тогучинский район, залежь	31,5
Чернозем выщелоченный, Новосибирская область, Ордынский район, целина	28,4
То же, пашня, около 150 лет	25,1

Темно-каштановая почва, Алтайский край, Ключевской район, целина	24,9
То же, пашня, 20 лет	23,8

С другой стороны, показатель гидролизуемости в пахотном аналоге, например, чернозема выщелоченного, ниже, нежели в целинном варианте. Значит, антропогенная нагрузка на почву также упрощает структуру ГК. Снижение гидролизуемости служит показателем того, что ГК теряют биологическую активность. А поскольку ГК в гумусовом горизонте всех рассмотренных почв являются преобладающими, значит, снижение их гидролизуемости может быть доказательством снижения биопротекторной функции почвы. Незначительное различие гидролизуемости ГК в пахотном и целинном варианте темно-каштановой почвы объясняется коротким сроком использования ее в качестве пашни. Опыт изучения потерь гумуса в почвах Западной Сибири указывает на то, что выход старопашотной почвы на новый стационарный гумусовый уровень, когда происходят все основные потери гумуса и структурные изменения его составляющих, отмечается примерно в течение 30 лет.

Отработанная ускоренная модификация определения гидролизуемости ГК, безусловно, может быть использована для оценки степени антропогенного пресса на почву в целом и ее гумусовую составляющую в частности. При изучении же природы веществ гидролизата целесообразно применять один из вариантов гидролиза, описанных в выше цитируемой литературе.

Описанный вариант гидролиза – одна из попыток поиска критериев для оценки изменения УЭФ под влиянием антропогенного воздействия. Кроме того, в силу простоты выполнения методика может быть использована студентами на практических занятиях по экологии почв.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Геммерлинг, В.В. Сравнительная характеристика органических веществ почв разного типа / В.В. Геммерлинг // Учен. Зап. Моск. ун-та. Сер. Почвоведение. – 1946. – Вып. 105.
2. Кленов, Б.М. Устойчивость гумуса автоморфных почв Западной Сибири / Б.М. Кленов. - Новосибирск: СО РАН, филиал "ГЕО", 2000. – 176 с.
3. Орлов, Д.С. Практикум по химии гумуса / Д.С. Орлов, Л.А. Гришина. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. – 272 с.
4. Рыдалевская, М.Д. К познанию природы азотистых соединений гуминовых кислот / М.Д. Рыдалевская, И.А. Терешенкова // Учен. записки Ленингр. ун-та. Сер. биол. наук. – 1956. – Вып. 42. № 221. – С. 131-140.
5. Olk D.C., Cassman K.G., Kingchesh P., Sanger L.G., Anderson J.M. Changes in chemical properties of organic matter with identified rice cropping in tropical lowland soil // Europ. J. Soil Sci. – 1996. – V. 47. – P. 293-303.
6. Piper T.J., Posner A.M. Humic acid nitrogen // Plant a. Soil. – 1972. – V. 36. - № 3. – P. 595-598.

© Б.М. Кленов, А.Г. Гриценко, 2007

ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Концепция выявления зон повышенной аварийности объектов нефтегазового комплекса (НГК), связанных с геодинамическими процессами, должна базироваться на разработанных и адаптированных геоинформационных технологиях, а также на обобщении отечественного и зарубежного опыта в вопросах комплексирования материалов дистанционного зондирования и методов исследования природно-техногенных систем.

Природно-технические системы (ПТС) нефтегазового комплекса (месторождения, скважины, объекты обустройства, нефте- и газопроводы и др.) в период их длительного функционирования могут находиться в обстановке постоянного активного воздействия на них геодинамических процессов [1]. Аномальные геодинамические события *природного* генезиса надежно зарегистрированы в нефтегазоносных регионах и на отдельных месторождениях УВ.

Однако в настоящее время имеется ряд причин, которые, являясь общими для нефтегазового комплекса, не позволяют в должной мере оценить практическую важность решения этой проблемы. Основные причины состоят в следующем:

- Недооценивается роль современной геодинамической активности разломных зон платформенных регионов, которые считались стабильными в геодинамическом плане структурами;
- Случаи аномальных (катастрофических) событий на объектах нефтегазового комплекса относятся к явлениям, не связанным с проявлением современной геодинамической активности разломных зонах;
- Отсутствует нормативно-правовая база оценки современного геодинамического состояния недр в районах функционирования ПТС нефтегазового комплекса с обоснованием допустимых уровней деформационного воздействия, обеспечивающая устойчивость ПТС и защищенность экосистем.

В этой связи является очень важным опора на аэрокосмические методы, обеспечивающие значительный прирост необходимой информации о линеаментно-блоковой структуре (ЛБС) земной коры в комплексе с традиционными методами, позволяют создавать физико-геологические модели качественно нового содержания на основе слоисто-блокового строения геологических объектов на разном иерархическом уровне [2], учитывающие в том числе фактор эколого-геодинамической опасности для человека.

Создаваемые на основе дистанционного и наземного мониторинга постоянно пополняемые компьютерные базы данных должны определять и поддерживать управленческие природоохранные и технологические решения,

направленные на обеспечение экономически и экологически рационального функционирования объектов НГК, что невозможно без создания экспертных технологий на базе геоинформационных систем (ГИС) [3].

ГИС-технологии начали разрабатываться более 35 лет назад. На сегодняшний день они претерпели значительные изменения, но остались, к сожалению, на уровне информационных систем и не более. Автоматизация производства при разработке месторождений нефти и газа предъявляет к системе контроля, прежде всего, требования аналитических решений в вопросах промышленной и экологической безопасности, что должно отвечать планированию экономической стратегии вложения средств в наиболее полное извлечение углеводородов и их транспортировку. Конечной целью данных систем, построенных на основе ГИС-технологий, является выработка экспертных решений, обеспечивающих надежность работы объектов НГК.

Современный этап развития информатизации нефтегазового комплекса характеризуется переходом от информационно-справочных к разработке и созданию информационно-аналитических и информационно-управляющих систем, позволяющих давать оценку изменений ситуаций при различных, как эндогенных, так и экзогенных воздействиях, в конечном итоге отслеживая изменения параметров, которые отвечали бы реальной динамике природных процессов.

Подобные системы должны быть ориентированы на работу:

- С картографическими базами данных;
- С аэрокосмическими изображениями, полученными в определенных спектральных диапазонах и регламентированных временных интервалах съемок;
- Получаемых данных (параметров) при разработке месторождений и их не противоречивую интерпретацию с имеющейся аэрокосмической и картографической информацией;
- А также на обработку результатов наблюдений мониторинга за природно-техногенными системами с целью выработки экспертных решений.

Оценка влияния палеогеодинамических процессов на формирование нефтегазоносных структур, на физические и физико-химические свойства пород и флюидов, а также современных аномальных деформационных процессов, проявляющихся как на поверхности, так и в недрах при изменении состояния динамических систем, является главным фактором управления системой разработки месторождения и актуальной проблемой внедрения методов эколого-промышленной безопасности [4].

На рис. 1 приведена схема выработки экспертных решений для определения уровня эколого-промышленной безопасности объектов НГК на стадии проектной документации при освоении территорий нефтегазовым комплексом.

Вышесказанное позволяет сделать вывод о важности и необходимости ведения мониторинга за современными геодинамическими процессами,

оказывающими влияние на эколого-промышленную безопасность объектов трубопроводного транспорта и инфраструктуры добывающего комплекса [5].

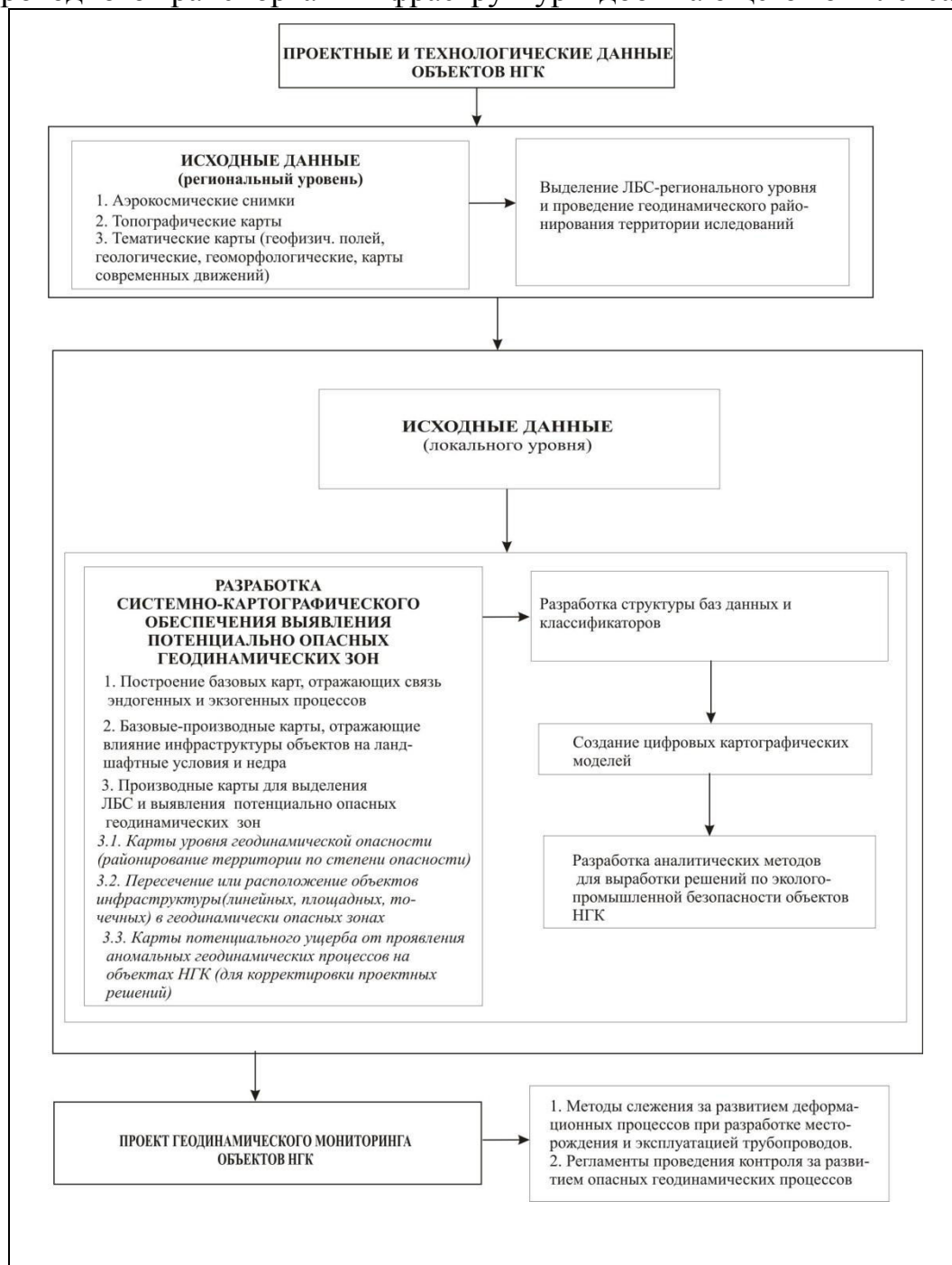


Рис. 1. Схема выработки экспертных решений на основе ГИС-технологий

Одним из примеров получения пространственно-временной информации о динамике изменения ландшафтных условий в геодинамически опасных зонах и их связи с активизацией глубинных процессов используется технология локального аэромониторинга «Биосфера ТМ» [6] на базе мотодельтаплана «Поиск-06 ТМ», оборудованная бортовым программно-аппаратурным комплексом в следующем составе:

- Спутниковая навигационная система GARMIN GPS II Plus с программным обеспечением;
- Тепловизионная камера с программным обеспечением и периферией, размещенная в карданном подвесе с демпферами и виброгасителями;
- Профессиональная цифровая телевизионная камера высокого разрешения DV с 3 ПЗС-матрицами и фото режимом – Sony DCR-VX9000, предназначенная для выполнения съемки в надир;
- Маятниковая система подвеса аэросъемочной аппаратуры, снабженная демпферами и виброгасителями;
- Бортовой вычислительный комплекс на базе Rover Book Discovery.

Специальный программный комплекс обеспечивает захват видеокadra синхронного получения GPS-данных центра видеокadra и отслеживает проекцию летательного аппарата на местности в программной среде MapInfo.

Комплексная интерпретация данных локального мониторинга и материалов наземных геолого-геофизических изысканий свидетельствует о существенном преимуществе описанной выше системы по сравнению с традиционно применяемыми в практике дистанционного зондирования нефтяных месторождений аэрофотоматериалами.

В первую очередь это касается повышения информативности при дешифрировании динамичных экзогенных процессов, линейные размеры которых варьируются от метров до десятков метров. Возможность изучения деталей морфологии, текстуры и структуры изображения, а также изменения морфометрических параметров и их планового положения в сезонном и многолетнем циклах съемки, позволяет получить дополнительную информацию о динамике состояния опасных геодинамических зон на поверхности Земли и прогноза их развития с целью разработки научно обоснованных мероприятий по защите инженерных сооружений (рис. 2). Система также позволяет выявлять участки земель, загрязнённых углеводородами, на участках размещения геотехнических систем нефтепромыслов, эксплуатируемых с нарушениями технологического режима или находящихся в неисправном состоянии (рис. 3).



Рис. 2. Контроль состояния дренажных сооружений и системы межпромысловых коммуникаций в предполагаемых опасных геодинамических зонах

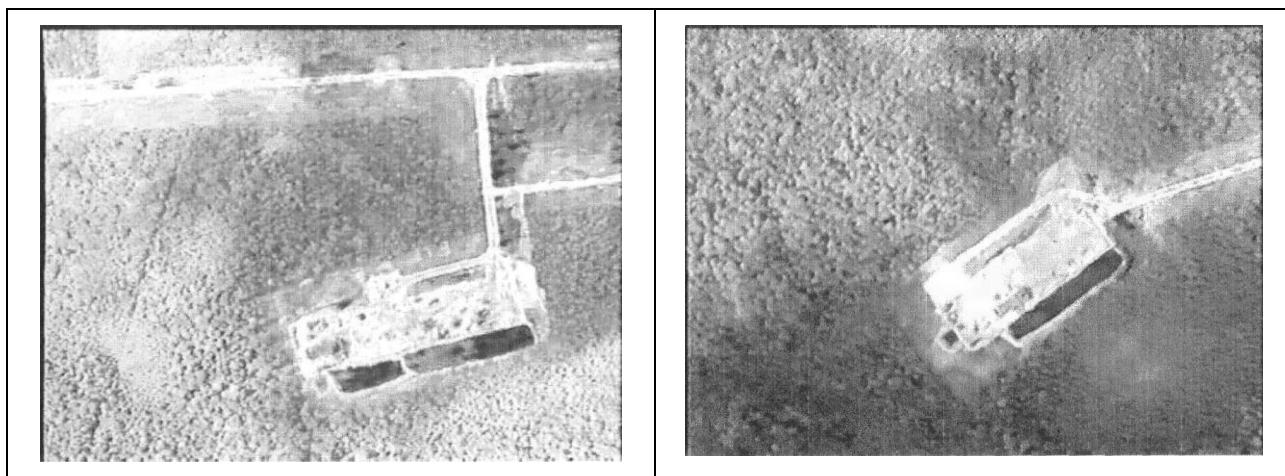


Рис. 3. Картографирование кустовых площадок, размещенных в опасных зонах, с целью проведения мониторинга за развитием негативных экологических процессов

Создание подобной системы на базе сверхлегкого самолета класса "Ультра-Лайт" позволит в перспективе обеспечить независимую от Авиапредприятий эксплуатацию системы локального мониторинга "Биосфера ТМ" со значительной экономией средств и обеспечением автономного режима выполнения работ по локальному геоэкологическому мониторингу природно-антропогенных геосистем на нефтегазовых месторождениях [7].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кравцов, В.В. Геодинамическая цикличность как фактор потенциальной аварийности природно-техногенных систем в нефтегазовых районах / В.В. Кравцов, А.И. Никонов // Нефтепромысловое дело. - 1996. - № 8-9. - С. 20-23.
2. Кузьмин, Ю.О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании / Ю.О. Кузьмин // М.: Агентство Экономических Новостей, 1999 г.
3. Никонов, А.И. Геоинформационное картографирование для оценки воздействия на окружающую среду объектов нефтегазовой промышленности / А.И. Никонов и др. // Геоинформатика. - 2001. - №1. - С. 3.-9.
4. Кузьмин, Ю.О. Геодинамическая природа аварийности скважин и трубопроводных систем / Ю.О. Кузьмин, А.И. Никонов // Перспективы развития экологического страхования в газовой промышленности. - М.: ВНИИГАЗ, 1999. - С. 315-328.
5. Кузьмин, Ю.О., Никонов А.И. Геодинамический мониторинг объектов нефтегазового комплекса / Ю.О. Кузьмин, А.И. Никонов // Фундаментальный базис новых технологий нефтяной и газовой промышленности: сб. науч. тр. - М.: Наука, 2002. - Вып.2. - С. 427-433.
6. Топчиев, А.Г. Технология аэрокосмического мониторинга в нефтегазовом деле / А.Г. Топчиев. - М.: Изд-во РГУ нефти и газа, 2002 г.
7. Топчиев, А.Г. Информационно-аналитические системы контроля нефтезагрязнений / А.Г. Топчиев, М.Е. Тужиков // Нефть. Газ и Бизнес. - 2006.- №7.- С. 56-61.

© А.И. Никонов, М.Е. Тужиков, 2007

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ КАЗАХСТАНСКОГО СЕКТОРА КАСПИЙСКОГО МОРЯ

Сложившаяся в настоящее время экологическая ситуация в прибрежной зоне казахстанского сектора Каспийского моря характеризуется прогрессирующей деградацией природной среды, вызванной совокупностью дестабилизирующих факторов, в том числе природных и антропогенных.

1. Современное экологическое состояние воздушного бассейна

Атмосферный воздух – одна из основных сред обитания человека, и от его качества во многом зависит здоровье организма, уровень физического развития, репродуктивные возможности, подверженность болезням и продолжительности жизни не только человека, но всего биоразнообразия.

Экологическое состояние атмосферного воздуха в Атырауской области предопределяется объемами выбросов загрязняющих веществ от нефтегазовых комплексов. В Атырауской области имеется 188 предприятий и объединений, осуществляющих выбросы вредных веществ в атмосферу и 5637 стационарных источников, из которых 2135 организованных и 16 оборудовано очистными сооружениями. По наблюдениям за выбросами добывающих предприятий с 1979 года по сегодняшний день отмечается, что отечественные производители нефти больше уделяют внимание технологии и проблеме улучшения экологической обстановки в регионе, чем иностранные производители. Так как, за этот промежуток времени иностранные производители нефти уменьшили выбросы в атмосферу в 1,87 раза, имея новейшее оборудование, то отечественные производители этот показатель улучшили в 3,61 раз [1].

В состав объектов нефтедобывающих комплексов, имеющих источники выделения загрязняющих веществ, входят, как правило: промысел, газоперерабатывающий завод и внешние объекты. Основными источниками выделения вредных веществ на площадке промысла являются скважины, замерные устройства, центральный манифольд, блоки ингибитора коррозии и метанольной установки.

К числу основных источников выбросов загрязняющих веществ в атмосферу газоперерабатывающего завода относятся:

- Дымовые трубы технологических установок и печей;
- Факельные системы технологических установок и товарного парка;
- Вентиляционные шахты промышленных помещений, в которых установлено технологическое оборудование;
- Склады готовой продукции, резервуарный парк нефти, товарные парки пропана, бутана, склады серы;
- Другие.

2. Современное экологическое состояние водной среды

Особенностью Каспийского региона является то, что весь подземный и поверхностный стоки в конечном итоге замкнуты на Каспий. Бессточность приводит к региональной концентрации токсикантов, геохимическому соленакоплению и негативно влияет на экологическое состояние Каспийского моря.

Считалось, что большинство загрязняющих веществ поступает в Каспийское море с водой впадающих в него рек. Подъем уровня Каспия несколько изменил ситуацию, теперь большое количество загрязнений поставляет побережье, которое долгое время подвергалось бесконтрольному загрязнению нефтью и нефтепродуктами, бытовыми и промышленными отходами в результате деятельности многочисленных буровых, месторождений, судоходства, морской транспортировке, промышленных, сельскохозяйственных и коммуникационных объектов.

Ситуация усугубляется из-за влияния нагонных явлений, что вызывает поступление нефтепродуктов с побережья в Каспийское море и приводит к возрастанию нефтяного загрязнения до показателей, превышающих ПДК.

2.1 Загрязняющие вещества водной среды Северного Каспия

Для экосистем Северного Каспия наиболее характерными загрязнителями являются: нефть и нефтепродукты, тяжелые металлы и фенолы.

Нефть и нефтепродукты относятся к наиболее опасным веществам, загрязняющим поверхностные воды. Поступив в водоем, они могут находиться в различных миграционных формах: растворенной, эмульгированной, сорбированной на водной растительности и твердых частицах донных отложений, пленочной, твердообразной. Судьба попавшей нефти в море определяется суммой следующих процессов: испарение, эмульгирование, растворение, окисление, образование нефтяных агрегатов, седиментация и биodeградация.

В момент поступления в водоем основная масса нефтепродуктов сосредоточена в пленке, затем со временем происходит перераспределение долей основных миграционных форм. Поведение нефти, попавшей в водную среду, зависит от химической природы и соотношения, входящих в нефть компонентов. Смешиваясь с водой нефть, образует эмульсии двух типов: «нефть в воде» и обратное – «вода в нефти». Прямые эмульсии менее устойчивы. После удаления летучих и растворимых фракций остаточная нефть образует вязкие обратные эмульсии, которые стабилизируются высокомолекулярными соединениями типа смол и асфальтенов. Под влиянием абиотических процессов образуются нефтяные комочки, которые выбрасываются на берег или оседают на дно, или заселяются перифитомом (водоросли, рачки и другие беспозвоночные).

Важное место в процессе разрушения нефтяных слипов принадлежит испарению. Некоторая часть нефтяных углеводородов может разлагаться в процессе физико-химического автокаталитического окисления. В ясную погоду может окислиться нефти до $2 \text{ т} / \text{км}^2 \text{ сут}$.

Окончательную судьбу нефти в море определяет активность микроорганизмов. Эксперименты показывают, что основную роль в механизме самоочищения, играет испарение (50 - 70%), фотоокисление (15 – 30 %) и биологическая утилизация (2 – 7 %). Зимой самоочищение уменьшается примерно в 3 раза по сравнению с летним периодом.

Исследования подтверждают, что практически по всему Северному Каспию наблюдается накопление нефтепродуктов в донных осадках. В среднем это содержание находится на уровне 20 мкг/кг, но местами превышает эту величину в 2 - 3 раза.

Исследования, проводимые в северо-восточной части Каспия, выявили содержание фенолов в пределах 0 - 20 мкг / дм³. ПДК фенолов в питьевой воде и воде рыбохозяйственных водоемов 1 мкг/л (0,001 мг/дм³) соответственно. Высокий уровень загрязнения фенолами связывают, главным образом, со стоками нефтеперерабатывающих заводов и других предприятий химической промышленности. Максимальные концентрации 30 мкг/ дм³ (30 ПДК) фенолов отмечаются в устьях рек Волги и Урала. В последние годы ситуация значительно улучшилась. Самоочищение морской воды от фенолов (распад фенолов) существенно зависит от его исходной концентрации. При концентрации 0,03 - 3,0 мг/ дм³ период полураспада фенола составляет 100 часов (в Каспии 0,025 - 0,036 мг/ дм³). При других концентрациях, период полураспада фенола увеличивается. Наличие нефтяного загрязнения замедляет распад фенола, поскольку этот процесс биodeградации нефтяных углеводородов образуются собственные фенолы [1].

Опасными загрязнителями воды Каспийского моря являются тяжелые металлы, поскольку в отличие от органических загрязнителей они не подвержены биодеструкции, а, видоизменяясь (переходя, в основном, в ионные формы), перераспределяются по компонентам экосистем.

3. Современное экологическое состояние почв и грунтов

Экологические функции почв определяются комплексом генетических свойств, включая содержание и состав гумуса, поглощенных оснований, высокомолекулярных соединений, рН среды, механическим, минералогическим составом, структурностью и др. Обобщающим показателем является морфологическое строение почвы, отражающее влияние основных строение почвы, отражающих влияние основных факторов почвообразования, включая антропогенные. Степень выраженности генетических горизонтов определяется глубиной и силой антропогенного влияния на ход почвообразовательного процесса, что в конечном итоге, характеризует устойчивость почвы к внешним нагрузкам. Особенно важны при этом показатели буферности почв, т.е. способности почв противостоять антропогенному разрушению профиля и связывать токсичные элементы в малоподвижные соединения, недоступные или малодоступные для живых организмов. Исследования показывают, что допустимые уровни антропогенных нагрузок при поступлении в почву нефтепродуктов, тяжелых металлов, токсичных химических элементов,

фенолов и др. значительно выше на хорошо гумусированных структурных почвах, чем малогумусных бесструктурных, так как многие почвенные органические соединения образуют с ними устойчивые комплексные соединения [2]. Почвы, обогащенные органическим веществом, особенно гуминовыми кислотами или гматами, более устойчивы к действию химических загрязнителей, чем малогумусные почвы с низкой поглощательной способностью. Это связано с тем, что гуминовые кислоты содержат большое количество различных функциональных групп, в том числе карбоксильных, аминовых, фенольных, гидроксильных, участвующих в формировании простых и сложных органно-минеральных соединений. В такой форме токсичные катионы металлов становятся малоподвижными, что снижает токсико-экологическую ситуацию почвы.

Техногенные перегрузки приводят к изменению генетического профиля, содержания гумуса, снижают степень гумификации органического вещества почвы, способствуют образованию упрощенных по строению гуминовых кислот. Хорошо гумусированные почвы лучше противостоят деформации почвы, создают оптимальную структуру, водопроницаемость, объемную массу и обеспечивают рациональное расходование почвенной влаги. Следовательно, чем выше уровень плодородия почвы, тем более устойчивы экологические их функции по отношению к антропогенному прессу.

Антропогенные нагрузки, превышающие возможные экологические функции почвы, неизбежно ведут к деградации и опустыниванию почвенного покрова вне зависимости от их таксономического уровня.

Антропогенно-преобразованные почвы широко распространены на территории Атырауской области. Площади их приурочены к производственным участкам нефтедобычи, линиям нефте – газо – водопроводов и Коммуникации (ЛЭП, радио – телефонной связи и др.), участкам разведочного и геофизического бурения, карьерам по добыче полезных ископаемых и строительных материалов, территориям населенных пунктов и сельскохозяйственных угодий. Антропогенная нагрузка на почвенный покров региона в целом высокая и продолжает увеличиваться.

В связи с ростом антропогенной нагрузки на почвенный покров важной задачей становится картографическая инвентаризация и количественно-качественная оценка различных форм нарушений почвенного покрова с выявлением их генезиса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Регионы Казахстана, 2003: стат. сб. / под ред. К.С. Абдиева. – Алматы: Агентство Республики Казахстан по статистике, 2003. – 496 с.
2. Диаров, М.Д. Состояние и меры оздоровления северного побережья и акватории Казахстанского сектора Каспийского моря. Атырауский ИН и Г МОН РК. Научный центр региональных экологических проблем / М.Д. Диаров. – Атырау, 2004. – 34 с.
3. Информационный экологический бюллетень РК. – 2002.

© Н.Б. Хахулина, 2007

СТРУКТУРА ЗАПАСОВ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ЭКОЛОГИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ МОЛОДЫХ ЭКОСИСТЕМ БАРАБЫ

Биологический круговорот является фундаментальным свойством любой экосистемы. Именно в рамках биологического круговорота осуществляется взаимосвязь живого вещества с косным и биокосным [1]. При изменении экосистемы в ходе ее развития или трансформации меняется и биологический круговорот. Существуют два фундаментальных параметра, с помощью которых описывается биологический круговорот: запас вещества и интенсивность обменных процессов [2]. Основной характеристикой состояния биологического круговорота является структура запаса веществ в подземном и надземном блоках экосистемы.

Сформировавшиеся запасы гумуса в почве – интегральный итог ряда почвенно-биологических и биохимических процессов. В травяных экосистемах основной источник гумуса – подземные остатки растений. Надземные остатки растений разлагаются на поверхности почвы, практически полностью минерализуются, и органический углерод из них включается в состав вновь формирующегося гумуса в минимальном количестве. Таким образом, гумусовые вещества в травяных экосистемах образуются в толще почвы как результат разложения остатков растений, животных и микроорганизмов организмами-деструкторами. Основу деструкционного блока в наземных экосистемах по массе и по результатам деятельности составляют почвенные микроорганизмы [3].

Таким образом, соотношение запасов углерода в гумусе, корнях растений и в микробной биомассе является важнейшей характеристикой состояния травяной экосистемы и дает возможность оценить характер ее функционирования и особенности развития и трансформации.

Среди многочисленных методов мониторинга наземных экосистем большое значение принадлежит индикационному мониторингу, суть которого заключается в определении состояния одного объекта по состоянию другого, связанного с ним и более доступного для изучения. Ведущую роль в таком мониторинге играет биоиндикация, и главным индикатором является растительный покров. При этом в мониторинге использовались до недавнего времени четыре основные характеристики растительного покрова: физиологические и морфологические особенности произрастающих растений, генетическое и фитоценотическое разнообразие растений, составляющих растительное сообщество. Первые два признака используются для получения информации об одномоментном состоянии среды, а два последних – о многолетних интервалах антропогенного воздействия [4].

Барабинская низменность, или Бараба, расположена в юго-восточной части обширной Западно-Сибирской низменности. Площадь, занимаемая

Барабинской низменностью, составляет 117,4 тыс. км². Ее протяженность с севера на юг составляет около 300 км и с запада на восток – 570 км. Особенностью территории является большое количество озер и большие площади болот и заболоченных земель, которые расположены в понижениях рельефа. В Барабе число их достигает 2555 без мелких, часто пересыхающих озер. Общая площадь зеркала воды в Барабе составляет 4918 км², т.е. 4% от всей ее площади. Озеро Чаны (включая Б. Чаны, М. Чаны, Яркуль) самое большое, имеет площадь водного зеркала 2140 км² [5].

В настоящее время озеро Большие Чаны состоит из четырех почти самостоятельных в гидробиологическом, гидрохимическом и гидробиологическом отношении плесов: Ярковского, Тагано-Казанцевского, Чиняихинского и Юдинского. В связи со значительным понижением уровня оз. Чаны в 1951-1970 гг. сократились и его рыбные запасы. В целях уменьшения потерь воды на испарение в сентябре 1971 года через группу островов посредством постройки дамб Юдинский плес был отчленен от островной части озера Большие Чаны. После 1971 г., когда площадь озера стала меньше, а приток сохранился в том же объеме, уровень стал повышаться, однако к 1975 г. он достиг лишь уровня равновесия на тот год, а с 1976 г. вновь стал несколько снижаться. В 1978 г. обнаружилось некоторое повышение его (4 см), но с 1981 г. вновь началось понижение. При сравнении карты 1961 г. и материалов аэросъемки 1977 г. видно, что площадь всего озера Чаны уменьшилась на 25% [6].

Глобальные климатические изменения в XX в., связанные с развитием парникового эффекта, ведут к усилению аридности климата на территории юга Западной Сибири. Повышение температуры воздуха вместе с незначительным увеличением количества осадков должно привести к уменьшению увлажненности территории и к дальнейшему усыханию или полному пересыханию многочисленных озер Барабинской равнины. На обсыхающих территориях активно идут процессы почвообразования. В свете существующей тенденции к усилению аридности климата можно утверждать, что площади обсыхающих участков пойм соленых озер Барабы в будущем будут увеличиваться [7].

Цель настоящего исследования состояла в оценке применимости показателей, характеризующих структуру запасов органического углерода, в экологическом мониторинге молодых экосистем Причановской котловины Барабы, формирующихся на обсыхающих участках дна соленого озера (оз. Чаны).

Исследование проведено в августе 2006 года. В качестве объектов исследования на южном берегу озера Чаны (Ярковский плес) была выбрана серия разновозрастных экосистем, сформировавшихся на обсохших в разное время участках дна озера.

1. Участок дна, только что вышедший из-под воды. Почва – эмбриозем инициальный – озерный ил с песком на уровне уреза воды озера. Абс. высота 105 м. Растительность отсутствует.

2. Экосистема – солянковый луг на солончаке луговом в 100 м от уреза воды озера. Абс. высота 105 м. Примерный возраст 10 лет.

3. Экосистема – разнотравно-злаковый луг на почве луговой солончаковатой в 200 м от уреза воды озера. Абс. высота 106-107 м. Периодически используется как пастбище. Примерный возраст 40 лет.

4. Экосистема – разнотравно-полынно-ковыльный остепненный луг на солонце глубоко на расстоянии 1 км от берега озера на юго-восточном слабонаклонном склоне невысокой гривы. Абс. высота 110 м. Примерный возраст 60 лет.

5. Экосистема – разнотравно-злаковый остепненный луг на почве черноземно-луговой на расстоянии 1,5 км от берега озера на вершине большой гривы. Абс. высота 113 м. Используется как постоянный сенокос. Примерный возраст 80 лет.

Почвенные образцы отбирались в августе 2006 года из слоев 0-10 и 10-20 см всех исследованных почв по общепринятой методике. Образцы сразу после отбора помещались в полиэтиленовые пакеты, доставлялись в лабораторию и до проведения анализов хранились в холодильнике. Подготовка к микробиологическому анализу включала в себя просеивание почвы через сито с диаметром ячеек 3 мм [8]. В почвенных образцах определялось общее содержание органического углерода [9] и содержание углерода в биомассе почвенных микроорганизмов (С биомассы) методом фумигации-инкубации [10].

Для изучения структуры запасов растительного вещества в каждой изучаемой экосистеме закладывались 10 площадок (50 x 50 см). На каждой площадке растения срезались ножницами у поверхности почвы. Срезанная зеленая фитомасса и ветошь высушивалась в лабораторных условиях до воздушно-сухого состояния и взвешивалась. С поверхности каждой площадки после срезания растений вручную собирались элементы растительного опада, потерявшие связь с растениями (подстилка). Подстилки отмывались от частиц почвы водой методом декантации на ситах с диаметром ячеек 0,5 мм, высушивались до воздушно-сухого состояния и взвешивались. Для определения запаса корней из середины каждой площадки отбирались почвенные монолиты 10x10x10 см из глубин 0-10 и 10-20 см. Затем эти почвенные монолиты размачивались в воде. После этого корни отмывались от почвы методом декантации на ситах с диаметром ячеек 0,25 мм, высушивались до воздушно-сухого состояния и взвешивались [11]. Для пересчета сухого растительного вещества в углерод использовался коэффициент 0,4 [12].

В процессе вторичной сукцессии молодые экосистемы, формирующиеся в обсыхающей пойме соленого озера, проходят несколько стадий от инициальной и далее через стадии солянкового луга и солонцового луга до стадии остепненного луга. На первой стадии – инициального сообщества – растения отсутствуют, и весь запас органического углерода в почве сформировался из озерного ила. На этой стадии общий запас органического углерода составляет 968 г/м². При этом 97,4% приходится на собственно почвенное органическое и 2,6% - углерод микробной биомассы (рис. 1, 2).

На второй стадии – солянкового луга на солончаке луговом – появляются растения-галофиты и общий запас органического углерода в экосистеме увеличивается до 5698 г/м². Доля углерода почвенного органического вещества в общем запасе снижается до 83,5%, а доля углерода микробной биомассы снижается до 1,2%. При этом 11,9% запаса органического углерода приходится на долю корней, а 3,4% - на долю надземной фитомассы.

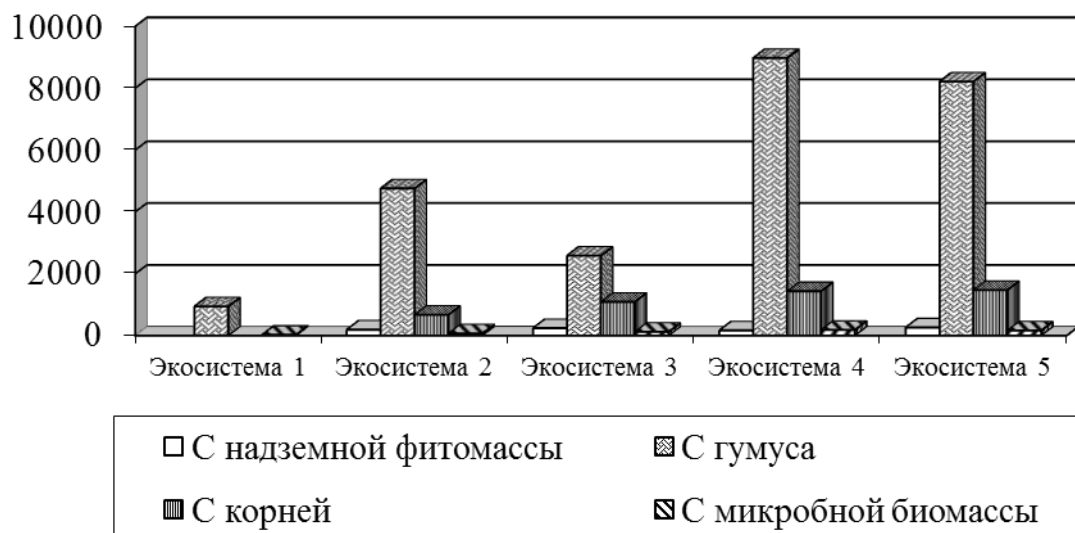


Рис. 1. Запасы органического углерода в исследованных экосистемах (г С / м²)

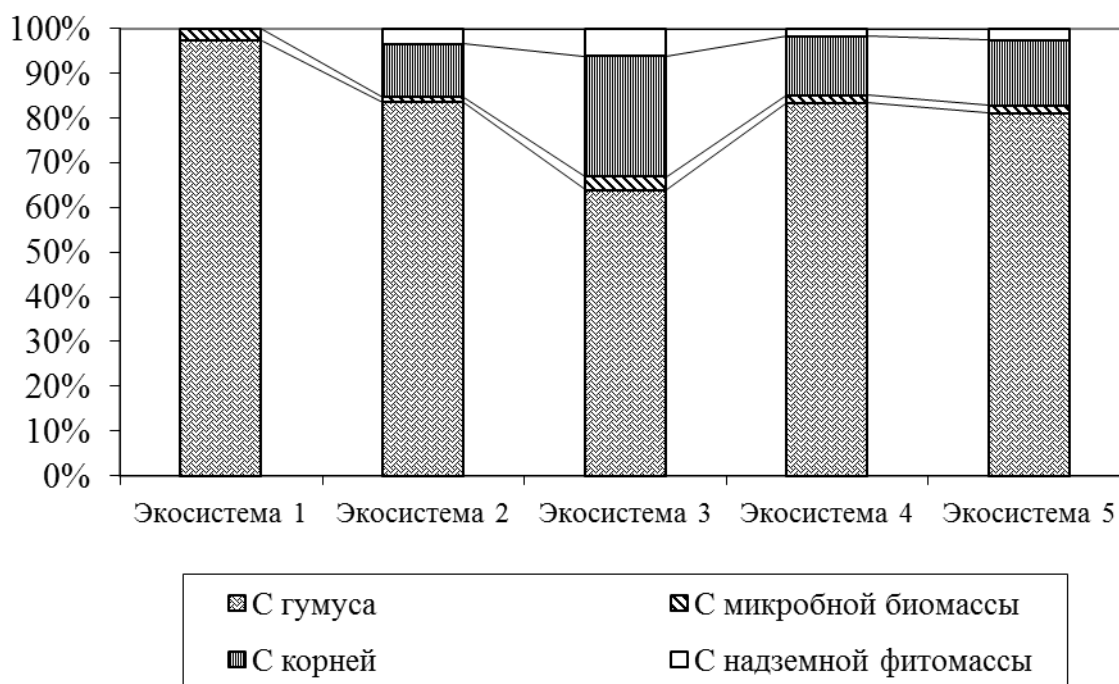


Рис. 2. Доля различных компонентов в структуре запасов органического углерода в исследованных экосистемах (%)

На третьей стадии сукцессии – стадии разнотравно-злакового луга на луговой солончаковатой почве – общий запас органического углерода в экосистеме снижается по сравнению с солянковым лугом до 4039,4 г/м². При

этом доля углерода почвенного органического вещества в общем запасе снижается до 64%. А доля углерода в корнях, надземной фитомассе и микробной биомассе увеличивается до 27%, 6% и 3% соответственно.

В общем, на третьей стадии сукцессии запас органического углерода, заключенного в продукционном звене биологического круговорота, увеличивается в 1,5 раза, а в деструкционном звене – в 2,5 раза по сравнению со второй стадией (солянковый луг). Т.е., только на третьей стадии сукцессии деструкционный блок экосистемы окончательно формируется и минерализует органическое вещество озерного происхождения.

На четвертой и пятой стадии сукцессии – стадии солонцового и остепненного лугов – запас органического углерода в экосистеме увеличивается до 10764 г/м² и 10119,2 г/м² соответственно. При этом доля углерода в почвенном органическом веществе увеличивается до 82%, а в корнях, надземной фитомассе и микробной биомассе снижается до 14%, 2% и 1,6% соответственно. Т.е., на этих стадиях экосистема достигает терминальной стадии своего развития, когда запас органического углерода во всех ее звеньях стабилизируется.

Таким образом, проведенное исследование продемонстрировало, что показатели, характеризующие структуру запасов органического углерода, могут успешно использоваться в экологическом мониторинге молодых экосистем, формирующихся на обсыхающих участках дна соленого озера. При этом наиболее показательными для всех стадий сукцессии были динамика запасов почвенного органического вещества и динамика запасов растительного вещества.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вернадский, В.И. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения / В.И. Вернадский. - М.: Наука, 1965. - 373 с.
2. Титлянова, А.А. Режимы биологического круговорота / А.А. Титлянова, М. Тесаржова. – Новосибирск: Наука, 1991. - 150 с.
3. Тейт, Р. III Органическое вещество почвы: Биологические и экологические аспекты / Р. III Тейт. – М.: Мир, 1991. – 400 с.
4. Экологический мониторинг. Методы биомониторинга: В двух частях, Ч. I: учеб. пособие. - Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 1995. - 192 с.
5. Орлова, В. В. Климат СССР Вып.4 Западная Сибирь / В.В. Орлова. – Л.: Гидрометеиздат, 1962. - 360 с.
6. Пульсирующее озеро Чаны. – Л.: Наука, 1982. - 304 с.
7. Якутин, М.В. Биомасса микроорганизмов в поймах обсыхающих соленых озер Внутренней Азии / М.В. Якутин, Л.Ю. Анопченко // Природ. условия, история и культура Западной Монголии и сопредельных регионов: материалы VII Междунар. конф.- Кызыл: ТуВИКОПР СО РАН, 2005.- Т.1. - С. 328-331.
8. Методы почвенной микробиологии и биохимии. - М.: Изд-во МГУ, 1991. – 303 с.
9. Аринушкина, Е.В. Руководство по химическому анализу почв / Е.В. Аринушкина. - М.: Изд-во МГУ, 1970. - 487 с.
10. Schinner, F. Methods in soil biology / F. Schinner, R. Ohlinger, E. Kandeler, R. Margesin. – Berlin: Springer-Verlag, 1996. - 420 p.
11. Титлянова, А.А. Биологический круговорот углерода в травяных экосистемах / А.А. Титлянова. - Новосибирск: Наука. Сиб. Отд-е, 1977. - 219 с.

12. Титлянова, А.А. Биологический круговорот углерода и его изменение под влиянием деятельности человека на территории Южной Сибири / А.А. Титлянова, С.Я. Кудряшова, Н.П. Косых, С.В. Шибарева // Почвоведение.- 2005, №10.- С. 1240-1250.

© М.В. Якутин, Л.Ю. Анопченко, И.И. Проскурникова, С.Н. Шувалов, 2007

СИНТЕЗ ОПТИЧЕСКИХ И РАДИОЛОКАЦИОННЫХ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ОПЕРАТИВНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ЛЕСНЫХ ГАРЕЙ**Введение**

Несмотря на предпринимаемые меры по охране лесов и своевременной подготовке к пожароопасному сезону, ущербы, наносимые лесными пожарами, остаются значительными. Так, по данным агентства лесного хозяйства по Ханты - Мансийскому автономному округу - Югре с начала нового столетия в течение 6 лет в автономном округе произошло 3 555 лесных пожаров на общей площади 211,33 тыс. га. При этом суммарный ущерб от лесных пожаров составил более 12 млрд. рублей. Пожары не только наносят значительный ущерб лесному хозяйству, но и создают в ряде случаев опасные ситуации для населения близлежащих населенных пунктов.

Все леса Югры разделены на зону наземной охраны и зону авиационной охраны, при этом площадь второй значительно больше из-за редкой сети населенных пунктов и трудной доступности территории. В своей работе Ханты-Мансийская авиабаза охраны лесов активно использует оперативную информацию о лесных пожарах, обнаруженных по данным центра дистанционного зондирования Земли из космоса (ДЗЗ) Югорского НИИ информационных технологий (ЮНИИ ИТ). К сожалению, достоверность обнаружения пожаров по данным ДЗЗ оставляет желать лучшего [1]. Во многом это связано с экранирующим эффектом облачности при зондировании лесных массивов в оптическом диапазоне. В 2006 г. из 372 произошедших на территории Югры лесных пожаров 133 случились по вине гроз. Сильные грозовые явления, так называемые сухие грозы, сопровождаемые облачностью, нередко здесь в летнее время. Как обнаружить пожары, закрытые облачностью? Как оценить пожарную обстановку в местах, закрытых облачностью в течение нескольких дней подряд?

В июне 2005 г. в центре ДЗЗ ЮНИИ ИТ были проведены работы по адаптации станции приема, регистрации и обработки радиолокационных данных с космического аппарата (КА) ERS-2 Европейского космического агентства (ЕКА). По договоренности с ЕКА ежедневно с марта по октябрь до 8 раз в сутки производится съемка с КА ERS-2 территории России в зоне радиовидимости станции с передачей данных на станцию. При поддержке ЕКА в центре ДЗЗ выполняются 6 проектов, связанных с разработкой методик и технологий всепогодного космического мониторинга объектов и процессов на территории Сибири. Один из проектов посвящен всепогодному обнаружению лесных пожаров и оценке их последствий в северной Сибири.

Синтез оптических и радиолокационных космических снимков

Возможность оперативного мониторинга поверхности Земли, экранированной облачностью или дымовыми шлейфами от пожаров, и независимость от условий освещенности Солнцем дают ряд преимуществ

радиолокации по сравнению с другими видами съемки. Тем не менее, существуют и определенные трудности при использовании радиолокационных снимков [2]. Так, для обнаружения пожаров мы уже не можем использовать привычные признаки в виде аномальных тепловых зон. Признаком дешифрирования становится изменение характера отражения радиосигнала из-за появления в лесном массиве в результате пожара гари. Для повышения достоверности дешифрирования радиолокационных снимков часто необходима дополнительная информации об исследуемой территории.

На рис. 1 дан радиолокационный снимок, на котором пунктиром обозначены участки лесных гарей. Как видим, информативность снимка недостаточна для визуального достоверного распознавания гарей. На радиолокационном снимке также достаточно трудно отличить гари от открытых песчаных участков. Различить же типы лесного покрова или отличить старые гари от новых на таком снимке и вовсе невозможно.

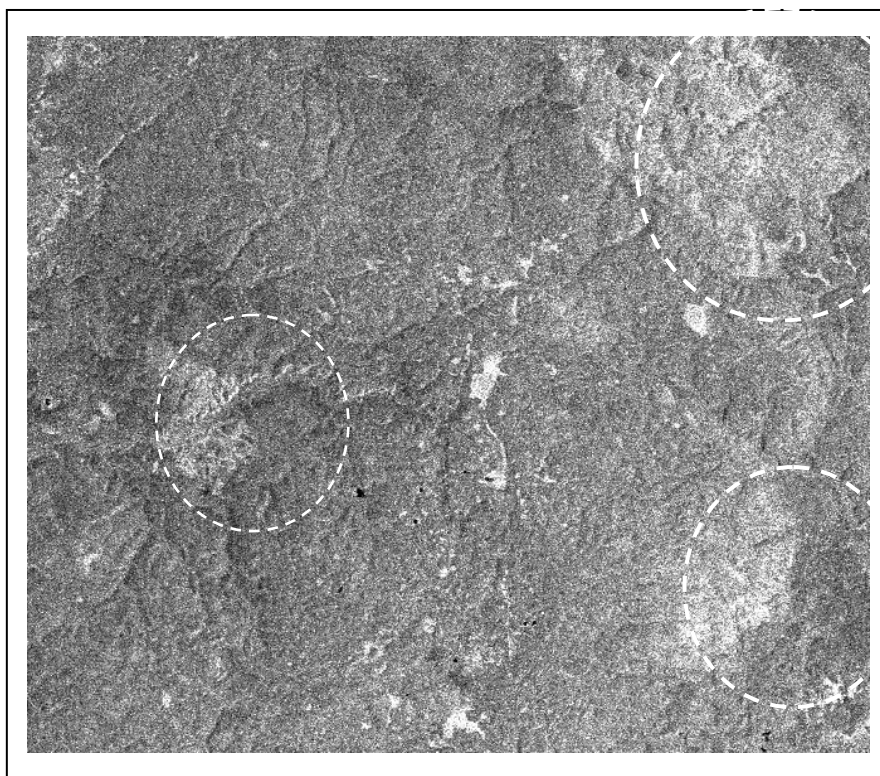


Рис. 1. Лесные гари на радиолокационном снимке с КА «ERS-2»

Для выделения на снимке необходимой информации авторами предлагается методика синтеза радиолокационного и оптического снимков. Цветное изображение более информативно, чем черно-белое, поэтому, комбинируя радиолокационный снимок со спектральными каналами оптического снимка, можно получить цветосинтезированное изображение с дополнительной информацией для анализа.

На первом этапе следует установить, какие спектральные каналы оптического снимка могут быть использованы при создании цветосинтезированного снимка. Анализ спектральных каналов снимка

показывает, что для определения контура гари можно исключить из обработки снимки в спектральном диапазоне 0,6-0,7 мкм, так как в этом диапазоне контуры гари практически неразличимы на фоне нетронутого пожарами леса, что наглядно видно на рис. 2.

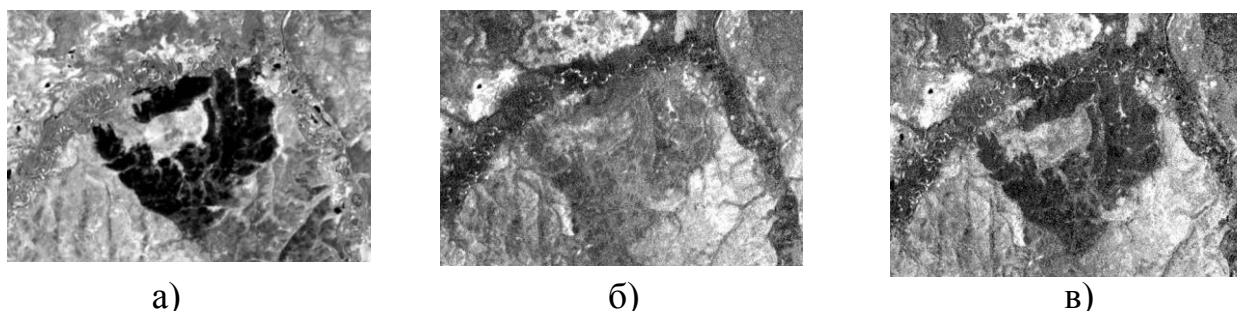


Рис. 2. Изображения гари в разных спектральных каналах оптического диапазона: а) $\lambda = 0,8-0,9$ мкм; б) $\lambda = 0,6-0,7$ мкм; в) $\lambda = 0,5-0,6$ мкм

Далее необходимо определить последовательность расположения каналов в синтезируемом изображении. Комбинируя в различной последовательности каналы, было показано, что наилучшей RGB-комбинацией является та, которая соответствует расположению компонент цвета в спектре разложения солнечного излучения: от красного к синему согласно уменьшению длины волны регистрируемого излучения каналов: красный- 5,6 см (ERS-2), зеленый- 0,8-0,9 мкм, синий- 0,5-0,6 мкм.

При такой комбинации каналов лесные гари, имеющие на радиолокационном снимке более высокую яркость, будут усилены благодаря эффекту синергизма информацией оптических каналов и станут красными. Участки снимка, соответствующие нетронутому пожаром лесу, будут зеленые. Лесные гари в этом случае хорошо распознаются на зеленом фоне. Многочисленные эксперименты по синтезу радиолокационных снимков с КА ERS-2 и спектральных каналов многоспектрального оптического снимка этой же сцены с КА «Метеор-3М» и КА серии «LANDSAT» подтвердили повышение достоверности дешифрирования лесных гарей на радиолокационных снимках[3].

Основной же целью этих исследований было повышение достоверности дешифрирования свежих гарей на оперативных радиолокационных снимках путем синтеза с архивными оптическими снимками, на которых этих гарей еще не было. На рис. 3 представлен RGB-синтез снимка с КА «LANDSAT-7», полученного 3 июля 2001 года и радиолокационного снимка с КА ERS-2, полученного 23 июля 2006 года. Гари радиолокационного изображения (участки красного цвета на цветном рисунке) хорошо видны на цветосинтезированном снимке за счет высокой яркости выгоревших участков леса. Старые гари оптического снимка не выделяются, так как они заросли лесом и не видны на радиолокационном снимке.

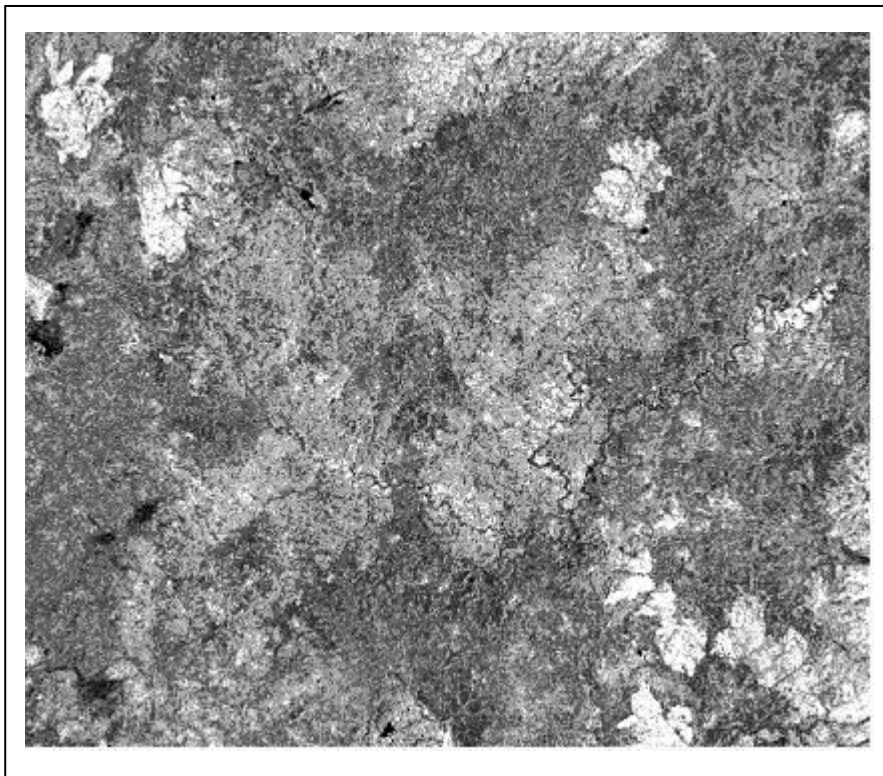


Рис. 3. Синтез снимков с КА «LANDSAT-7» за 3 июля 2001 года и с КА ERS-2 за 23 июля 2006 года

Синтез разновременных радиолокационных изображений

В случае невозможности подбора на интересующую территорию снимков оптического диапазона можно использовать RGB-синтез из трех или более радиолокационных снимков. Такой подход позволяет достаточно хорошо выделить элементы подстилающей поверхности за счет различной яркости объектов на разновременных снимках. Интересен результат при комбинации каналов с зимними снимками. При такой комбинации четко разделяются участки болотистой местности, озера, увлажненные участки местности. При использовании снимков только за летний период эти объекты выражены менее ярко. Отличия в яркости объектов позволяют использовать радиолокационные изображения для выявления изменений на исследуемых территориях.

В качестве примера обнаружения лесных гарей приведем результат синтеза трех разновременных радиолокационных снимков (рис. 4). На цветном изображении хорошо видны разновременные участки гарей, небольшие водные объекты. Красным пятном выделена гарь, появившаяся в интервале между 18 июня и 23 июля 2006 года. Более светлые участки гари соответствуют старым гарям, так как на всех трех снимках эти участки имеют высокую яркость. Цветовая палитра созданного цветосинтезированного снимка существенно

зависит от комбинации каналов. Предпочтительнее располагать радиолокационные снимки в хронологическом порядке. При такой комбинации упрощен поиск свежих гарей по цвету.

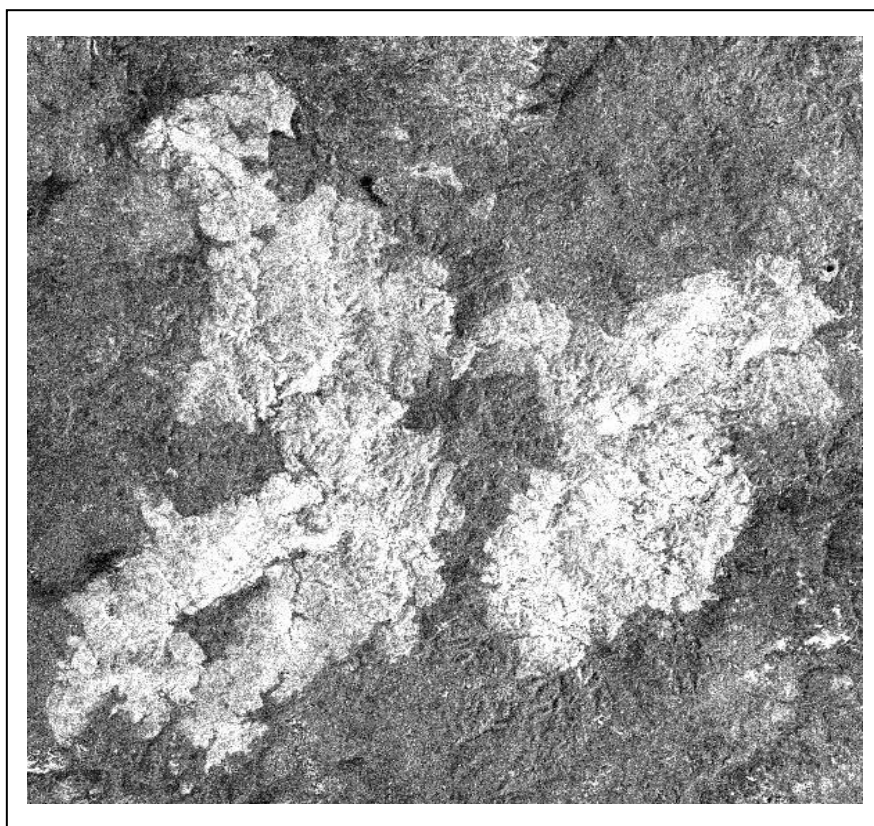


Рис. 4. Синтез трех разновременных радиолокационных снимков:
красный- 23.07.2006 г., зеленый - 18.06.2006 г., синий - 16.10.2005 г.

Таким образом, можно сделать вывод, что задача обнаружения лесных гарей с использованием радиолокационных снимков является решаемой при дополнительном привлечении оптических спектральных каналов или разновременных радиолокационных снимков на исследуемую территорию. В отличие от оптического диапазона, в котором зимние снимки являются малоинформативными, использование зимних радиолокационных снимков дает дополнительные возможности для анализа полученного материала.

Работа выполнена при поддержке Европейского космического агентства, проект Category 1 ID 3110 «All-weather detection of forest fires in Northern Siberia».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Копылов, В.Н. Основы создания центра космического мониторинга окружающей среды / В.Н. Копылов. – Екатеринбург: ПП "Контур", 2006. -144 с.
2. Использование данных дистанционного зондирования в задачах лесной отрасли / В.А. Хамедов, В.Н. Копылов, Ю.М. Полищук, С.В. Шимов // Материалы 3-й Всерос. открытой конф. «Совр. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса» (Москва, 14-17 нояб. 2005 г). – М.: Изд-во ООО «Азбука-2000», 2006. – С. 380-387.

3. Копылов В.Н. Геоинформационная технология оценки последствий лесных пожаров с использованием данных дистанционного зондирования / В.Н. Копылов, Ю.М. Полищук, В.А. Хамедов // Геоинформатика.– 2006.– № 1. – С. 56-61.

© В.Н. Копылов, Ю.М. Полищук, В.А. Хамедов, 2007

УДК 528.854.4

П.А. Калантаев

ИВМиМГ СО РАН, Новосибирск

ФУНКЦИИ СЕМАНТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

1. Введение

Технологические наборы данных ГИС могут рассматриваться как объектно-ориентированная база данных, подчиняющаяся заданным семантическим правилам и записанная в соответствии с заданным синтаксисом. Семантика опирается на то, что любой картографический объект обладает, как пространственно-геометрическими, так и функционально-описательными свойствами. Между объектами могут существовать связи различного типа, позволяющие смоделировать сколь угодно сложную сущность реального мира. С ростом WWW возникает необходимость новых способов организации информации. Новый стандарт Semantic Web [3] улучшает методы поиска, за счет новой структуры запросов геопространственного поиска, основанного на семантике пространственных и терминологических онтологий [3].

2. Определение семантического каталога базы данных

Систематические наблюдения природных явлений (ПЯ) зачастую представлены разнотипными и несоизмеримыми данными, сопровождаемыми легендами-описаниями в терминах прикладного значения. Легенды-описания данных дают естественную семантическую основу организации БД. Семантика - раздел языкознания и логики, исследующий проблемы, связанные со смыслом, значением и интерпретацией лексических единиц. Соответственно этому классическому определению семантический каталог обеспечивает организацию БД на основе логики, смысла, значения и интерпретации лексических единиц природных явлений.

Семантический каталог базы данных природных явлений - это система выдачи осмысленных ответов на поисковые запросы пользователей [4]. В проекте, на основе клиент-серверной Web-технологии, обеспечиваются три типа запросов к распределённой БД ПЯ: *навигационные, пространственные и интеллектуальные*. База данных ПЯ может быть закрытой корпоративной, и распределена на Web-серверах как локальной, так и глобальной сети.

Навигационный запрос формируется Web-клиентом в виде строки ключевых слов. В ответ на запрос сервер БД формирует Web-страницу со списком сетевых адресов размещения объектов БД.

Пространственный запрос формируется Web-клиентом в виде строки с адресом и (или) координатами географического объекта. В ответ на запрос

сервер БД формирует Web-страницу с изображением карты или аэрокосмического снимка географического объекта.

Интеллектуальный запрос формируется Web-клиентом в виде строки параметров функции обработки данных БД. В ответ на запрос сервер БД формирует Web-страницу с результатами обработки данных ПЯ. Допустим (в проекте), каждый гидрологический пост (Web -клиент) бассейна реки Обь с заданной периодичностью помещает на центральный Web-сервер показатели наблюдения. С той же периодичностью на сервере ведётся расчет статистических и физических характеристик состояния бассейна Оби, получаемых руководством (Web-клиентами) по запросу к БД. По запросу, с использованием цифровых карт и аэро- космо- снимков, на сервере моделируются 2-х и 3-х мерные сцены текущего состояния бассейна Оби. При этом центральный сервер БД обеспечивает запрос на автоматическое оповещение (по E-mail) руководства о критических ситуациях, выявленных в результате текущего обсчета данных гидрологических постов, предоставляя разнотипные, в том числе мультимедиа, данные о ситуации ПЯ. На лабораторном сервере уже функционирует БД ПЯ первой очереди (<http://loi.sccc.ru/DBRL>), реализующая навигационные (например, данные по урагану Катрина) и пространственные (например, Web-атлас НСО) запросы (рис. 1).

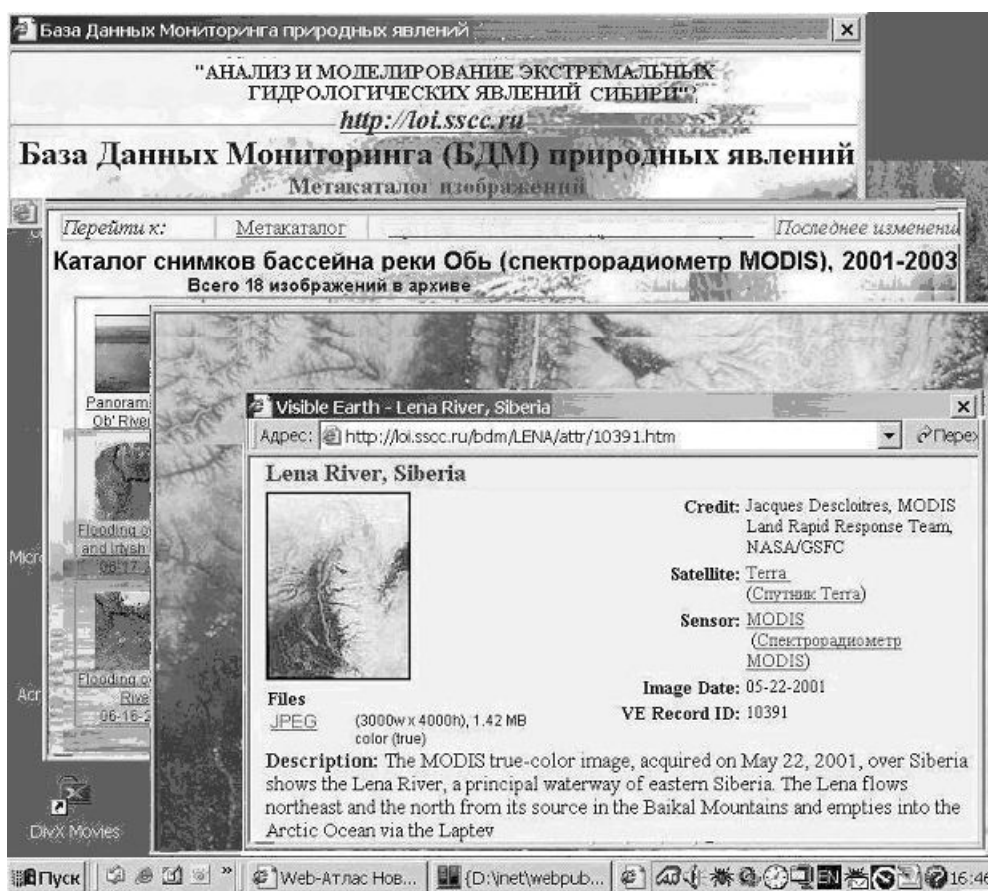


Рис.1. Web-интерфейс базы данных природных явлений

3. Стандарты описания семантики

Гибкая инфраструктура Internet позволяет легко добавлять новые универсальные услуги, такие как Semantic Web [1], позволяющий описывать семантику ПЯ в соответствии с отечественным стандартом представления пространственных данных, включающих информацию об *отношениях объектов*. Для проекта Semantic Web разработан метаязык XML (Extensible Markup Language), предназначенный для создания программных приложений обмена данными в Web, а также для смысловой обработки семантики этих данных. Semantic Web - новое направление развития платформы XML, основу которого составляют стандарты Resource Definition Framework (RDF) и языка описания Web - онтологий (OWL Web Ontology Language). Язык OWL разработан для приложений содержательной обработки информации. В сравнении с XML, RDF, и RDF Schema (RDF-S), OWL обеспечивает более полную машинную обработку Web –контента. OWL предоставляет наряду с формальной семантикой дополнительный терминологический словарь. В RDF-спецификации объявляется некоторое множество ресурсов, для каждого из которых определяются пары "свойство-значение". Описание семантики свойств в RDF называется RDF-схемой. По сути, RDF-схема позволяет определять онтологию предметной области – природных явлений. Под онтологией понимается "спецификация концептуализации предметной области". Такая спецификация представляет собой своего рода словарь понятий предметной области и совокупность явным образом выраженных предположений относительно смысла этих понятий. Развитые определения онтологий формализуются средствами языков логики первого порядка. Они допускают возможности логического вывода. *По проекту, возможности логического вывода разрабатываются для БД ПЯ второй очереди.*

4. Геосемантическая Web модель данных

В настоящее время актуальна разработка на основе Internet-стандарта Semantic Web новой модели геопространственных данных (geospatial data). Эта модель должна заменить геореляционную модель данных (georelational data model), применяемой ныне. Недостаток геореляционной модели данных (интегрирующей ГИС и реляционную СУБД) - неприспособленность реляционных таблиц для семантического анализа и полнотекстового поиска в распределённых атрибутивных БД ГИС. Эти задачи легко исполняются средствами объектно-ориентированных баз данных XML. Интеграция ГИС и баз данных XML желательна и возможна. Эффективные функции семантического анализа атрибутивных данных особенно актуальны для реализации пользовательских запросов агрегирования данных сети распределённых ГИС (например, сети центров приёма и обработки ДДЗ в РФ). Условно, ибо термин не устоявшийся, новая модель может быть названа геосемантическая Web модель данных - Geosemantic Web data model [3]. Чтобы реализовать идею организации геоинформации средствами Semantic Web, требуется эффективная распределённая человеко-машинная система, способная не только визуализировать и представлять данные, но также вести смысловую обработку данных несоизмеримых типов. Автоматизация распознавания

разнотипных данных требует новой инфраструктуры информационных определений и правил вывода.

5. Заключение

Стратегические перспективы развития платформы XML связаны с созданием семантического Web. Для достижения этой цели необходимо решить большой комплекс сложных научно-технических задач. Одна из этих задач, - моделирование тематических геоданных на основе Semantic Web, с целью информационного обеспечения для фундаментальных исследований в области наук о Земле. Web поддержка онтологий различных предметных областей геоданных позволяет осуществлять более эффективный поиск требуемой геоинформации в Web и является важным шагом к поддержке семантической интеграции геоинформационных ресурсов и других возможностей управления информационными и программными средствами распределённых ГИС и СУБД природных явлений.

Работа выполнена частично при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 07-07-00085).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. П.А. Калантаев. Семантическая организация пространственных данных. // В сборнике трудов Международной Конференции “ИНТЕРКАРТО - ИНТЕРГИС 11 Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт” 25 сент.-3 окт. 2005 г., Ставрополь-Домбай-Будапешт, изд-во СГУ, 2005 г., с.92-96.
2. А.А. Бучнев, П.А.Калантаев, В.П.Пяткин. Интернет технологии в обработке данных дистанционного зондирования Земли // Труды Международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2006», 24-28 апреля 2006, Новосибирск, Россия, т.3, ч.1. «Мониторинг окружающей среды, геоэкология, дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия», с. 43-51.
3. Berners-Lee, T., Hendler, J., and Lassila, O. (2001) The Semantic Web: A new form of Web content that is meaningful to computers will unleash a revolution of new possibilities. The Scientific American 284: 34-43.
4. А. Иванов. Принципы организации семантического каталога / <http://mywebsearch.adelite.com/articles/776.html>.

© П.А. Калантаев, 2007

УДК 530.1:528.871.6

Т.Н. Чимитдоржиев

ОФП БНЦ СО РАН, БГСХА, Улан-Удэ

В.Е. Архинчеев, А.В. Дмитриев

ОФП БНЦ СО РАН, Улан-Удэ

С.Ш. Сангадиев

БГСХА, Улан-Удэ

ПРИМЕНЕНИЕ ФРАКТАЛЬНОГО ПОДХОДА ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ И ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ЗЕМНЫХ ПОКРОВОВ ПО РАДИОЛОКАЦИОННЫМ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

В последние годы отмечается интенсивное развитие аэрокосмических технологий, основанных на применении радиотехнических систем в микроволновом диапазоне радиоволн для исследования различных типов земной поверхности, в частности для оценки био и геофизических параметров

бореальных лесов планеты. В работе [1] приведен обзор теоретических моделей, который показал, что для количественной оценки обратного радарного рассеяния от лесного покрова необходимо учитывать множество различных параметров, таких как: высота и диаметр деревьев, плотность их насаждения, распределение листьев и веток по размерам и угловой ориентации, диэлектрическая проницаемость стволов деревьев, шероховатость и диэлектрическая проницаемость почвы. При всей своей сложности, такой подход недостаточно полно описывает сложные явления, сопровождающие процессы рассеяния и переотражения волн в неоднородных средах, т.к. эти модели основаны на учете усредненного значения интенсивности обратного радиолокационного рассеяния на различных поляризациях. Необходимо так же учитывать степень неоднородности объектов исследования, посредством оценки пространственных флуктуаций сигнала, что может быть выполнено при помощи статистического анализа, основанного на расчете автокорреляционных связей или топологических фрактальных размерностей [2].

В данной работе рассматривается возможность определения лесотаксационных характеристик при помощи количественной оценки пространственных флуктуаций обратного радарного рассеяния. В качестве инструмента исследования флуктуаций применяется метод вариограмм, основанный на расчете значений фрактальной размерности неоднородных природных сред. Дается физическая интерпретация полученных результатов.

Описание экспериментальных данных

В качестве тестового был выбран участок побережья озера Байкал, представительный с точки зрения разнообразия земных покровов и охватывающий лесные массивы, гористую местность, сельскохозяйственные поля, луга, дельту реки Селенга, болота и часть озера.

Для исследования были использованы данные поляриметрического радара с синтезированной апертурой SIR-C, выполнявшего съемку 9 и 10 октября 1994 г. на восходящих витках. Изображения побережья озера Байкал были получены одновременно в L- и C-диапазонах (длина волны 23,5 и 5,8 см соответственно). Съемка в обоих случаях осуществлялась в юго-восточном направлении. Режимом работы PCA была предусмотрена одновременная съемка для всех 4 комбинаций поляризации радиоволны на излучении/приеме. На основе поляриметрических радиолокационных изображений SIR-C (HH, HV, VV) были синтезированы промежуточные поляризации на приеме. При неизменной горизонтальной поляризации на излучении угол наклона линейной поляризации на приеме составил 0 (HH), 20, 40, 60, 80, 90 (HV), 100, 120, 140, 160 градусов. Для вертикальной поляризации на излучении (угол наклона 90^0) аналогично предыдущему были синтезированы изображения с теми же углами наклона поляризации на приеме.

Данные дистанционного зондирования также были дополнены картографическими материалами различных масштабов. Кроме того, для

классификации лесных массивов использовались материалы лесоустройства с детальным описанием таксационных характеристик каждого выдела.

Методика исследования

По радиолокационным поляриметрическим изображениям, представленным в градациях серого 0÷255, на первом этапе строится поле локальных фрактальных размерностей (далее фрактальное изображение). Для создания фрактальных изображений был использован метод вариограмм, основанный на статистическом гауссовом моделировании изображений. Предполагается, что изображение может быть аппроксимировано случайным стохастическим процессом - фрактальным броуновским движением, когда среднеквадратичное смещение (дисперсия) диффундирующей частицы зависит от времени не как обычно линейным образом, а аномальным степенным образом [3]:

$$\langle (X(t) - X(0))^2 \rangle \propto t^{2H},$$

где H – критический индекс аномальной диффузии. Таким образом, ставится задача определить критический индекс, он и будет характеристикой фрактальной поверхности. В соответствии с этим методом статистическое соотношение, которое существует для расстояния между двумя пикселями и дисперсией их значений (яркостей), может быть представлено в логарифмическом виде следующим соотношением [4]: $\log([g(x + \varepsilon) - g(x)]^2) = 2H \log \varepsilon + \log C$, где g – значение яркости пикселя в точке x , ε – расстояние между точками, H – критический индекс фрактального броуновского движения, описывающий шероховатость поверхности, C – постоянный коэффициент. Он несуществен для дальнейших вычислений, поскольку фрактальная размерность (критический индекс) вычисляется по тангенсу угла наклона. Тогда фрактальная размерность может быть вычислена следующим образом:

$$D = 3 - H = 3 - B/2,$$

где B – тангенс угла наклона линии регрессии дисперсии g в зависимости от расстояния ε .

Результаты расчета и интерпретация полученных данных

На рис. 1 и 2 представлены результаты расчета фрактальной размерности, которые количественно характеризуют пространственные флуктуации обратного рассеяния. Сплошной линией обозначены данные для L-диапазона, пунктирной линией – для C-диапазона. Значения фрактальной размерности определялись для обоих витков по 30 участкам лесного массива со сходными характеристиками в окне размером 20x20 пикселей. На графиках приведены усредненные значения, среднеквадратичные отклонения обозначены соответственно вертикальными линиями: сплошными для L-диапазона, пунктирными для C-диапазона. По оси абсцисс отложен угол наклона линейной поляризации на приеме, по оси ординат локальная фрактальная размерность.

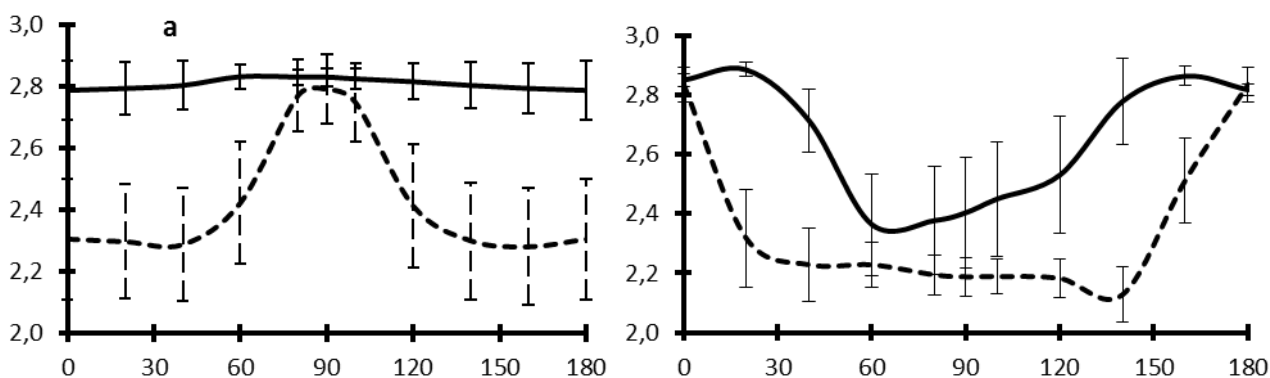


Рис. 1. Зависимость фрактальной размерности от угла наклона плоскости поляризации на приеме для леса с полнотой древостоя более $0,7 \div 0,8$:

а – для горизонтальной поляризации на излучении; б – для вертикальной поляризации на излучении

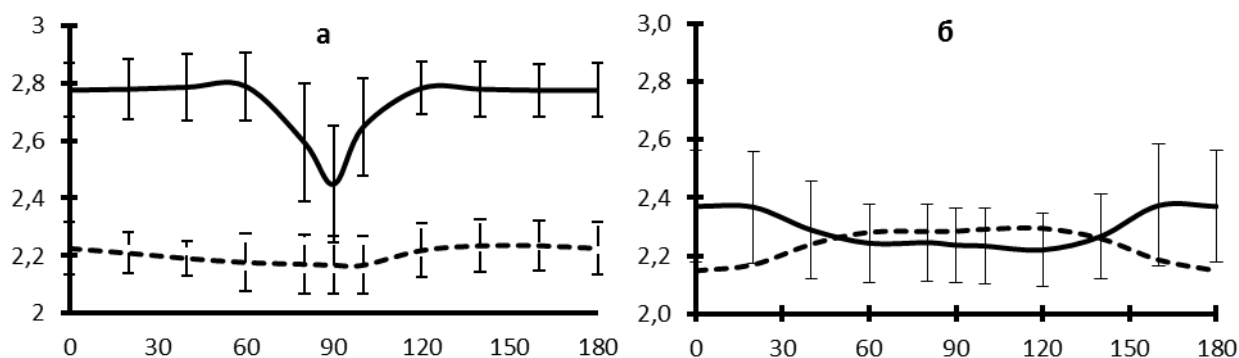


Рис. 2. Зависимость фрактальной размерности от угла наклона плоскости поляризации на приеме для леса с полнотой древостоя менее $0,7 \div 0,8$:

а – для горизонтальной поляризации на излучении; б – для вертикальной поляризации на излучении.

Как можно заметить, значения фрактальной размерности для леса со значениями полноты древостоя выше $0,7 \div 0,8$ существенно зависят от длины волны. Аналогичный результат получен в работе [1], где отмечается, что с увеличением длины волны возрастают вариации отраженного сигнала.

Вариации в С-диапазоне, вызваны сложными процессами рассеяния и переотражения электромагнитной волны от ветвей, сучьев и стволов деревьев, соизмеримых с длиной волны 5.6 см. Характер изменения кривых (рис. 1-а и 1-б) для сантиметрового диапазона показывает, что пространственные флуктуации значительны для кросс поляризации: на рис. 1-а это угол наклона поляризации 90° , соответствующий HV компоненте, на рис. 1-б это углы 0° и 180° , соответствующие VH компоненте. Угол наклона, как известно, отсчитывается от горизонтали [5]. В работе [6], установлено, что в создании эффекта деполаризации главным образом участвуют ветви деревьев и равномерность распределения их ориентации в горизонтальной плоскости (по окружности ствола) усиливает эффект деполаризации при распространении волны в направлении, близком к вертикальному (имитация аэрокосмического зондирования). Следовательно, флуктуации в промежутке углов $40^\circ \div 140^\circ$ (см.

рис. 1-а), $20^{\circ} \div 140^{\circ}$ от горизонтали (см. рис. 1-б) определяются деполяризующим эффектом ветвей и сучьев, которые располагаются в большей степени под углами от 0° до $50^{\circ} \div 70^{\circ}$ от вертикально ориентированных стволов деревьев. Подобное распределение по углам подтверждается наземными наблюдениями. Небольшое различие по углам на рис. 1 для сантиметрового диапазона определяется различием во взаимодействии волн на различных поляризациях с лесными массивами.

В L - диапазоне для леса с полнотой выше порогового значения наблюдается различная зависимость пространственных флуктуаций от угла наклона поляризации для волн с горизонтальной и вертикальной поляризациями на излучении. Как показали теоретические расчеты [6], глубина замираний выше на горизонтальной поляризации, чем на вертикальной, а волновой фронт горизонтально поляризованной волны слабее разрушается лесным пологом. Данный факт согласуется с полученными результатами (см. рис. 1-а и 1-б), которые показывают, что:

- В случае горизонтальной поляризации на излучении, флуктуации обратного рассеяния не зависят от угла наклона поляризации на приеме, т.е. волна незначительно взаимодействует с ветвями и рассеивается подстилающей поверхностью,

- Для вертикальной поляризации на излучении, волна в большей степени отражается и рассеивается ветвями, которые ориентированы в промежутке углов $20^{\circ} \div 150^{\circ}$.

Рассмотрим поляриметрические зависимости фрактальной размерности для лесных выделов с полнотой древостоя менее порогового значения. В С-диапазоне (рис. 2) поляриметрическая зависимость фрактальной размерности и соответственно пространственных флуктуаций обратного рассеяния в целом незначительна. Наблюдается лишь небольшое повышение при углах $\sim 50^{\circ} \div 130^{\circ}$ для вертикальной поляризации на излучении (рис. 2-б), что вызвано рассеянием от сучьев, веток, хвои, листвы, т.е. структурами, которые расположены под подобными углами.

В дециметровом диапазоне длин волн для вертикальной поляризации на излучении (рис. 2-б) отмечается уменьшение фрактальной размерности, при этом данное ослабление пространственных флуктуаций не превышает значения среднеквадратичного отклонения от среднего. Следовательно, пространственные флуктуации определяются в большей мере подстилающей поверхностью. Что касается волны с горизонтальной поляризацией на излучении (рис. 2-а), то заметное понижение в промежутке углов $\sim 60^{\circ} \div 120^{\circ}$ вызвано уменьшением деполяризации, вследствие меньшей полноты древостоя, в противоположность выше рассмотренному случаю (см. рис. 1-а) для L-диапазона.

Интересным, на наш взгляд, является симметричность кривых для горизонтальной поляризации (см. рис. 1-а и 2-а), в отличие от вертикальной (см. рис. 1-б), что объясняется большим взаимодействием вертикально

поляризованной волны с ветвями, которые в свою очередь имеют асимметричное распределение в силу различия геометрии естественного освещения. Данный эффект в большей степени проявляется для дециметрового диапазона длин волн, т.е. определяется крупными ветвями. Однако в силу значительных среднеквадратичных отклонений от среднего значения фрактальной размерности сложно количественно и качественно оценить ориентацию ветвей по различным направлениям от ствола.

Заключение

Приведенные результаты обработки радиолокационных изображений показали, что поляриметрические особенности флуктуаций обратного рассеяния хорошо характеризуют геометрию исследуемых лесных массивов и имеют принципиальное значение для интерпретации данных микроволнового зондирования. Развитием данного подхода может быть создание поляризационных сигнатур флуктуаций для всех возможных углов эллиптичности и наклона эллипса поляризации.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 05-02-97201.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванов В.К., Кучук Г.А., Стадник А.М., Яцевич С.Е. Методы многочастотного радиолокационного зондирования лесов // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – М.: Радиотехника. – 2005. – № 7. – С. 57-72.
2. Myint S.W. Fractal approaches in texture analysis and classification of remotely sensed data: comparisons with spatial autocorrelation techniques and simple descriptive statistics. – International Journal of remote sensing, 2003, vol. 24, no. 9, pp. 1925-1947.
3. Архинчеев В.Е. Случайные блуждания на иерархических фрактальных (гребешковых) структурах // ЖЭТФ. – 1999. – Т. 115. – N. 4. – С. 1285-1294.
4. Mark D.M., Aronson P.B. Scale-Dependent fractal dimensions of topographic surfaces: An empirical investigation with applications in geomorphology and computer mapping // Mathematical Geology. – 1984. – Vol. 16. – N 7. – P. 671-683.
5. Van Zyl, J.J., H.A. Zebker, and C. Elachi: Imaging radar polarization signatures: theory and observation. Radio Science 22(4):pp. 529-543, 1987.
6. В.П. Якубов, Е.Д. Тельпуховский, В.Л. Миронов и др. Векторное радиопросвечивание лесного полога. Журнал радиоэлектроники. 2002, №1. <http://jre.cplire.ru/jre/jan02/1/text.html>.

© Т.Н. Чимитдоржиев, В.Е. Архинчеев, А.В. Дмитриев, С.Ш. Сангадиев, 2007

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИОНАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА ПО МНОГОЗОНАЛЬНЫМ КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ

Развитие технических средств дистанционного зондирования, совершенствование средств приема, хранения и обработки материалов аэрокосмических съемок и других данных дистанционного зондирования позволили подойти к практическому созданию систем мониторинга различного уровня для решения широкого круга задач. Для России с ее огромной территорией особое значение имеют системы регионального мониторинга, основанные на использовании космических снимков.

В настоящее время стало реальностью создание действующих систем мониторинга на основе космических съемок различного уровня разрешения. В связи с этим актуальной является задача совершенствования методов обработки снимков, повышение достоверности дешифрирования для решения широкого круга задач регионального мониторинга.

Анализ существующих методов аэрокосмического мониторинга показал, что в современных системах мониторинга возникает ряд условий, позволяющих повысить эффективность дешифрирования объектов на космических снимках, связанных с наличием:

- Определенной структуры, то есть объектного состава на исследуемой территории;
- Объектов, которые не изменяют своего пространственного положения;
- Объектов, которые имеют достаточно устойчивые спектральные характеристики в заданном диапазоне съемки;
- Дополнительных данных (топографических и тематических карт, материалов аэросъемки и других материалов).

Повышение эффективности системы мониторинга связано с учетом этих условий.

Основным признаком для дешифрирования объектов на снимке является яркость изображения. Однако на соответствие между состоянием объекта и яркостью изображения влияет большое количество разнообразных факторов. Этими факторами, например, являются состояние атмосферы, положение солнца, расстояние до объекта и др. Если изображение получено в одном спектральном диапазоне, то для данного снимка большинство параметров будет одинаково [1]. В этом случае отношение яркостей изображений объектов будет равно отношению яркостей самих объектов:

$$\frac{L_{изоб_i}}{L_{изоб_j}} = \frac{L_{об_i}}{L_{об_j}} = K_{ij}, \quad (1)$$

где $L_{об_j}, L_{изоб_j}$ – яркость некоторого «опорного» объекта и его изображения на снимке соответственно;

K_{ij} – нормированное значение яркости изображения объекта.

Используя формулу (1), формируют новые изображения, значение яркости каждого элемента которых равно $P_{ij} = K_{ij}$ и зависит только от свойств объекта. В результате преобразования формируется m изображений, где m – количество съемочных каналов.

Для нормирования изображений в качестве опорных должны выбираться объекты, легко дешифрируемые на всех снимках и имеющие устойчивые собственные оптические характеристики.

Дальнейшим развитием использования предложенной методики нормирования яркостей были исследования разложения Карунена-Лозва применительно к нормированным изображениям с целью получения главных компонент.

Метод главных компонент – сложное преобразование многозональных снимков, основанное на многомерном статистическом анализе, позволяющее построить более информативные линейные комбинации исходных изображений, полученных в разных зонах спектра, и сократить количество анализируемых данных.

Метод основан на том, что многозональные изображения обладают значительной степенью корреляции между зонами. Причинами ее возникновения может быть реальная физическая зависимость между измеряемыми свойствами объектов, а также частичное перекрытие зональных диапазонов съемки, влияние пространственных вариаций атмосферы и другие.

Сущность метода главных компонент состоит в формировании по исходным многоспектральным изображениям преобразованных некоррелированных изображений (или псевдоизображений). Каждая компонента (новое преобразованное изображение) будет соответствовать разложению спектральных яркостей по базису, состоящему из собственных векторов корреляционной матрицы спектральных измерений (значениям яркостей в каждом спектральном канале). Таким образом, выделение главных компонент соответствует разложению исходного многоспектрального изображения по ортогональному базису, который строится для каждого многоспектрального изображения.

Преобразованные многоспектральные изображения вычисляются путем последовательного преобразования векторов измерений в некоррелированные векторы по формулам:

$$\bar{Y} = U \bar{X}. \quad (2)$$

В результате преобразования ковариационная матрица C_{PP}^* становится диагональной вида:

$$C_{PP}^* = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & . & 0 \\ 0 & \lambda_2 & . & 0 \\ . & . & . & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_N \end{pmatrix} = \lambda. \quad (3)$$

Для этого нужно выполнить разложение:

$$C_{PP} = U\lambda U^T. \quad (4)$$

Как известно, проблема разложения матрицы C_{PP} сведется к нахождению собственных чисел λ_i и собственных векторов U_i матрицы C_{PP} , таких, что

$$U^T C_{PP} U = \lambda. \quad (5)$$

Учитывая, что C_{PP} зависит от типа объектов и от структуры поверхности территории, то есть от набора объектов, которые содержатся на данном участке, и именно это вызывает устойчивые корреляционные связи между яркостями в спектральных зонах, уместно предположить, что собственные векторы будут являться достаточно устойчивыми признаками для совокупности набора объектов одного типа.

Методика получения постоянного базисного вектора состоит в следующем.

Сначала производится детальный анализ исследуемой территории и выявляется набор типовых участков в зависимости от географического положения изучаемой местности и степени антропогенной нагрузки. Затем из имеющихся материалов, полученных тем типом съемочной системы, которая будет использоваться для решения задач мониторинга, выбираются снимки или их фрагменты, которые наиболее полно отображают интересующий набор типовых участков.

На следующем этапе производится нормирование изображений согласно (1). После проведения нормирования для каждого изображения вычисляются собственные векторы U_i , и производится их статистическая обработка. Если типичные участки были выбраны правильно, значения собственных векторов для таких изображений будут близки, затем по ним рассчитывается базисный вектор. С использованием таких векторов можно проводить интерактивное дешифрирование получаемой информации, что значительно повысит оперативность проведения регионального мониторинга.

Возможность применения метода главных компонент при региональном мониторинге была исследована по различным видам космических снимков (Quick Bird, Spot, Ikonos). Для типовых участков местности были вычислены собственные значения, собственные векторы и их средние значения для исходных и нормированных изображений.

На рис. 1 представлен пример разложения ненормированных (а, б) и нормированных (в, г) изображений по среднему базисному вектору для снимков спутниковой системы Quick Bird.

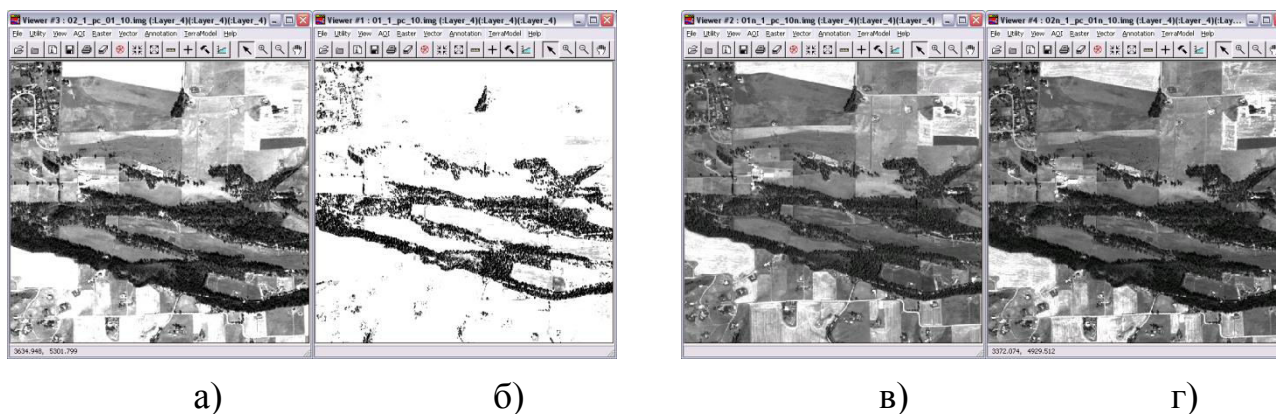


Рис. 1

Визуальное сопоставление полученных изображений показывает, что природные объекты на нормированных изображениях перекрывающихся снимков выглядят идентично, а на исходных заметно различаются. В табл. 1 приведены значения главных компонент, соответствующие изображению одной и той же точки местности на разных фрагментах снимков.

Таблица 1. Значения главных компонент

Компоненты	Значения главных компонент			
	Исходные снимки		Нормированные снимки	
	1	2	1	2
1	202	253	63	63
2	119	159	62	59
3	192	255	75	78

Анализ данных таблицы 1 показывает, что выводы по визуальной оценке изображений на рисунке 1 подтверждаются численными значениями главных компонент, полученными для одной и той же точки местности, которые для нормированных снимков стали практически равными. После нормирования яркостей в 70-75% случаев произошло уменьшение стандартного отклонения в среднем в 2,5 – 3 раза. Кроме того, стали близки средние значения собственных векторов разных снимков.

Проведенные исследования показали, что собственные векторы корреляционной матрицы нормированных многозональных изображений одних и тех же участков местности, полученных одной и той же съемочной системой, являются устойчивым признаком территории. Эти векторы можно использовать как базисные для получения главных компонент многозональных изображений.

Кроме того, проведенные практические исследования показали, что при выборе фрагментов изображений, по которым формируется единый базисный вектор, необходимо учитывать объектный состав территории. Такие фрагменты должны содержать максимально полный набор типовых участков местности. Набор таких векторов можно в дальнейшем использовать как обобщенный индикатор типов участков для выявления изменений. Также было предложено использовать собственные векторы $\bar{U}_I$ для хранения

многоспектральных изображений в системах мониторинга, что существенно сокращает объем информации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хлебникова Е.П. Влияние нормирования яркости на достоверность дешифрирования многозональных космических снимков [Текст] / Е.П. Хлебникова // Геодезия и картография. – 2005. – №12. – С. 24 –28.

© Е.П. Хлебникова, 2007

УДК 528.852

М.А. Болсуновский

ООО «Совзонд», Москва

НОВЕЙШИЕ СПУТНИКИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ 2007 – ОПТИЧЕСКИЕ И РАДАРНЫЕ – ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ

В последние три года на околоземных орбитах появилось несколько новых спутников дистанционного зондирования земной поверхности. Спутники и установленные на них сенсоры серьезно отличаются друг от друга своими технологическими особенностями, функциональными возможностями, целевой направленностью.

Таблица 1. Спутники ДЗЗ, запущенные с 2004 по 2007 г. и установленные на них сенсоры

Спутник	Страна	Год	Основное назначение	Сенсоры	Разрешение (м)	Полоса съемки (км)
Formosat-2	Тайвань	2004	Ресурсно-картографический	Панхроматический Многозональный (Г,З,К,БИК)	28	24
IRS P5	Индия	2005	Картографический	Панхроматический, две камеры	2,5	30
Монитор-Э*	Россия	2005	Ресурсно-картографический	Панхроматический Многозональный (З,К,БИК)	820	96160
EROS-B	Израиль	2006	Картографический	Панхроматический	0,7	7
Kompsat-2	Южная Корея	2006	Картографо-ресурсный	Панхроматический Многозональный (Г,З,К,БИК)	14	15
Ресурс-ДК	Россия	2006	Картографо-ресурсный	Панхроматический Многозональный (З,К,БИК)	13	28
ALOS	Япония	2006	Ресурсно-картографический, многоцелевой	Панхроматический Многозональный (Г,З,К,БИК) Многополяризационный радар	2,51010-100	357070

* – экспериментальный.

На всех аппаратах, запущенных за это время и находящихся на сегодня в коммерческом доступе, установлены оптические сканирующие системы, и лишь один из них (ALOS) – дополнительно располагает радаром с синтезированной апертурой.

Все спутники оснащены панхроматическими сканирующими системами, в то время как многозональными сканерами располагают 5 спутников. Среднее пространственное разрешение панхроматических сенсоров на новых аппаратах балансирует в районе 1-3 метров, многозональных около 4-10 метров (не учитывая экспериментального спутника Монитор-Э). В сравнении с периодом конца XX – начала XXI века очевидны две тенденции – полное превалирование оптических сканирующих систем над всеми другими видами ДЗЗ из космоса и резкое повышение разрешающей способности сенсоров. На фоне этих двух тенденций сохраняется зависимость дистанционного зондирования от атмосферных условий (в связи с оптическим диапазоном съемки) и наблюдается заметное сужение ширины полосы съемки (за счет высокого разрешения).

Снимки высокого разрешения, получаемые со многих из вышеперечисленных спутников могут активно использоваться для решения задач, связанных с различными видами мониторинга природных ресурсов и антропогенных объектов. Например, в случае контроля и мониторинга лесных ресурсов они дают возможность наблюдать и измерять даже самые незначительные по площади нарушения в лесном фонде – незаконные вырубки, вплоть до уничтожения единичных деревьев, несанкционированные постройки, стихийные свалки, центры рекреационного воздействия. Также эффективно выявление на ранней стадии очагов распространения заболеваний и вредителей, точечных загрязнений от транспортных и трубопроводных коммуникаций.

Из спутников, запущенных в последние три года в наибольшей степени удовлетворяют решению этих и многих других задач, на наш взгляд, Ресурс-ДК, Formosat-2 и Kompsat-2, что связано с присутствием на них многозональных сенсоров, очень важных для космического мониторинга. Таким же важным параметром, по которому мы выделяем первые два из этих трех спутников, является ширина снимаемой полосы - 28 и 24 км. соответственно, что существенно при решении мониторинговых задач. Наконец следует отметить большую съемочную продуктивность Ресурс-ДК и высочайшие возможности Formosat-2 в плане повторяемости съемки (до 1 суток при подходящих метеоусловиях), что очень важно для мониторинга. Выбирая снимки высокого разрешения для задач наблюдения и контроля за природными и антропогенными объектами, конечно, не следует забывать и о таких уже проверенных и очень эффективных системах как QuickBird и IKONOS.

Большим шагом в сторону еще более широкого применения космических снимков высокого разрешения в нефтегазовом комплексе должен стать запуск аппаратов нового поколения: WorldView-1 (компания DigitalGlobe) и GeoEye1 (компания GeoEye), планируемый на вторую половину 2007 года. Спутники будут обладать еще более высоким пространственным (около 50 см),

радиометрическим (11 бит на пиксел) разрешением, широкой полосой съемки (около 16 км), высочайшей производительностью, что позволит сократить время повторной съемки до 1-2 дней.

В то же время, для большинства организаций, осуществляющих различного рода мониторинг, сохраняет актуальность вопрос получения качественных, современных данных дистанционного зондирования Земли на обширные территории, пусть даже с несколько более низким пространственным разрешением.

В этом плане, наряду с использованием традиционно популярных и качественных снимков SPOT и ASTER, брешь в данных среднего разрешения, образовавшаяся после обнаружения неполадок сенсора ETM+ на аппарате Landsat 7 может быть закрыта снимками с запущенного 24 января 2006 г. спутника ALOS (Япония). Этому способствует:

1. Комплексность бортового оборудования – панхроматический и многозональный сканер, радар с синтезированной апертурой, обеспечивающая возможность совмещения разнотипных снимков.

2. Достаточно высокое пространственное разрешение каждого из сенсоров, составляющее соответственно 2,5; 10 и 6,5-100 метров.

3. Очень широкая для снимков такого разрешения полоса съемки – 70 км. Размер сцены многозонального сканера и радара – 70 X 70 км, каждый панхроматический снимок триплета 35 X 35 км (возможна одиночная съемка с размером сцены 35 X 70 км).

4. Отличные геометрические свойства снимков, позволяющие работать на масштабах вплоть до 1:10000 – 1:25000.

5. Высокие радиометрические характеристики, при стандартном 8-битном квантовании обеспечивающие хорошие результаты автоматического и визуального дешифрирования лесов и связанных с ними объектов.

6. Относительно низкая цена, составляющая 890 долларов за любую и сцен.

7. Четко выверенный и соблюдающийся Японским космическим агентством съемочный план, который позволил уже к ноябрю 2006 года (полгода активной съемки) покрыть съемкой только оптическими сканерами PRIZM (панхроматический) и AVNIR (многозональный) свыше 51 процента территории России.

8. Наличие радара с синтезированной апертурой. Наивысшее пространственное разрешение среди радарных данных (до 6,5 метра) и наличие многополяризационного режима делает его лучшим из всех радарных космических сенсоров на сегодняшний день. Данные всепогодной радарной съемки могут быть совмещены с оптическими снимками для выявления тонких процессов в лесных фитоценозах.

Еще одна перспективная тенденция, которая может реализоваться уже весной 2007 года – появление на орбите спутников, оборудованных радиолокаторами бокового обзора нового поколения. Так, немецкий спутник TerraSAR будет нести радарную аппаратуру, позволяющую осуществлять всепогодную съемку земной поверхности с пространственным разрешением до

1 метра, что дает возможность решать задачи, перечисленные выше для оптических спутников без ограничений по погоде и времени суток. Кроме того возможности интерферометрической обработки радиолокационных данных позволят строить высокоточные цифровые модели рельефа и выявлять миллиметровые подвижки на земной поверхности, что очень актуально для планирования и мониторинга объектов транспортной, строительной, нефтегазовой инфраструктуры.

© М.А. Болсуновский, 2007

УДК 528.852

В.С. Сидорова

ИВМиМГ, Новосибирск

НЕКОНТРОЛИРУЕМАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕКСТУРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ¹

Для различения природных объектов, их распознавания по изображению применяются текстурные признаки, которые отражают закономерности пространственного распределения спектральных характеристик пикселей в плоскости изображения. Целесообразность привлечения текстурных признаков зависит от природы объектов и уровня разрешения съемки. Использование их в качестве дополнения к спектральным повышает уровень распознавания [1]. Для вычисления текстурных признаков обычно используется один из спектральных диапазонов. В задачах неконтролируемой классификации, когда не предполагается какое-то предварительное знание о структуре изображения объекта, применяются статистические текстурные признаки, которые вычисляются по окрестности точки изображения и сопоставляются ей в форме K -мерного вектора по аналогии с многоспектральным. Для удобства обработки изображения в качестве окрестности точки для расчета статистик берется небольшой квадратный блок, его размер одинаков для всех точек. Для неконтролируемой классификации объектов по текстурным признакам могут быть использованы кластерные алгоритмы, применяемые для многоспектральных изображений при дистанционном зондировании. Однако текстурные признаки являются пространственными, а не точечными характеристиками объектов, поэтому существуют некоторые особенности при классификации. Одна из проблем связана с выбором размера блока для сбора текстурных статистик, от которого существенно зависят результаты классификации. Другая особенность в том, что из-за протяженности этого блока возможно появление ложных кластеров на границах. Поэтому необходим некоторый последующий пространственный анализ кластеров. В работе предлагаются пути решения этих проблем.

Неконтролируемую классификацию по текстурным признакам проведем на конкретном изображении. Рассмотрим рис. 1. Это аэроснимок лесного

¹ Работа выполнена частично при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 05-07-90057).

ландшафта Западной Сибири масштаба 1:50000 осеннего залета. Видны объекты различной яркости и текстуры. Это массивы кедровников, находящиеся в различных возрастных фазах развития. Светлые однородные (отсутствие текстуры) пятна соответствуют водным поверхностям. Известно, что лес данного типа вообще представляет собой березово-кедровое сообщество. Возобновляясь на гарях, вырубках этот тип леса закономерно проходит определенный путь развития, на ранних стадиях преобладает береза, затем ее постепенно вытесняет кедр.



Рис. 1. Эквиализованное изображение лесного ландшафта.

Здесь мы используем два признака: первый - средний тон по блоку, второй - из статистики текстурных признаков Вешки [1], которые показали свою пригодность для различения возрастных фаз простой изотропной гранулированной текстуры кедровников.

Вектор статистики Вешки $\mathbf{r}^{r,\theta}$, i -ая компонента которого является вероятностью того, что модуль разности уровней серого тона в паре соседних точек, разделенных векторным расстоянием $\{r, \theta\}$, равен i . Возьмем признак этой статистики - среднюю разность уровней серого $\mathbf{F}$ для $r = 1, \theta = 0$:

$\mathbf{F} = \sum_i^N P_i^{r,\theta} * i$, где $P_i^{r,\theta}$ - компоненты вектора смежности, а N - число уровней серого.

Изображение предварительно эквализуется. Каждая компонента полученного двумерного вектора, характеризующего текстуру, нормируется в пределах 0:255. Для представленного изображения вектор признаков рассчитывался для каждой второй точки по вертикали и горизонтали.

В основе классификации используется быстрый непараметрический алгоритм разделения многомерной гистограммы по унимодальным кластерам

[2]. Алгоритм находит все локальные максимумы гистограммы, которые могут оказаться мелкими случайными всплесками на поверхности гистограммы. Для того чтобы найти распределения векторов по существенно различным кластерам, применим метод, описанный в [3]. Построим ряд распределений векторов для различного числа уровней квантования векторного пространства как для параметра. По критерию и мере качества определим лучшие распределения построенного ряда. Мера качества для отдельного кластера (здесь и далее N - число уровней квантования):

$$M^j(N) = \frac{1}{B^j(N)} \frac{\sum_{i=1}^{B^j(N)} h_i^j(N)}{H^j(N)}, \quad (1)$$

где $h_i^j(N)$ значение гистограммы в i -той точке границы кластера j , $B^j(N)$ число точек границы кластера, $H^j(N)$ максимальное значение гистограммы. Мера качества распределения в целом - это среднее значение по $K(N)$ кластерам:

$$M(N) = \frac{1}{K(N)} \sum_{j=1}^{K(N)} M^j(N). \quad (2)$$

Для выбора размера блока текстуры приведем некоторые соображения. Для большей точности сегментации изображения этот размер должен быть как можно меньше. С другой стороны, он должен быть достаточно велик, чтобы статистика для вычисления признака обеспечивала его устойчивость. Для автоматического выбора размера блока предложим такой подход. Начиная с некоторого размера, будем постепенно его увеличивать, и для каждого решать задачу выбора лучшего распределения и определять соответствующее ему число кластеров. По достижении определенного размера блока, значения признаков должно стабилизироваться, и число кластеров распределений перестанет меняться. Из двух соседних размеров, соответствующих одинаковому числу кластеров распределений, выберем меньший. Таким образом, найдем лучший размер, лучшее распределение и число кластеров. Весь процесс автоматический.

В табл. 1 приведены некоторые характеристики лучших распределений векторов для различных размеров блока расчета текстурных статистик. По каждому размеру мы приводим два минимума меры (2) (по возрастанию) и соответствующее число кластеров. Выбран размер 14*14 пикселей. Лучшее распределение в смысле меры (2) соответствует двум кластерам, разделяющим область признаков на лес и водную поверхность. Мы же рассмотрим распределение со следующим по значению минимумом $M(N)=.246$, чтобы увидеть классификацию леса. Здесь $N=32$. Хотя значение меры довольно велико, заметим, что на рассматриваемом изображении в основном представлен лес одного типа с переходными возрастными состояниями. Дальнейшее увеличение числа уровней квантования приводит к существенному увеличению значения меры (2). На рис. 2 представлена кластерная карта, соответствующая выбранной классификации. Это классификация предварительная, т.к. возможны ложные кластеры. Такие кластеры могут находиться на границах между

несколькими объектами с разной текстурой. Предполагая, что в пространстве изображения значительная доля точек ложных кластеров относится к границам, предложим простой подход для их обнаружения. Посчитаем отношение числа граничных точек на изображении каждого кластера к его площади и сравним с заданным порогом.

Таблица 1. Характеристики лучших распределений для разных размеров блока

Размер блока	1 M	1 Число кластеров	2 M	2 Число кластеров
6*6	210	6	212	10
10*10	136	3	206	4
14*14	190	2	252	7
18*18	22	2	246	7

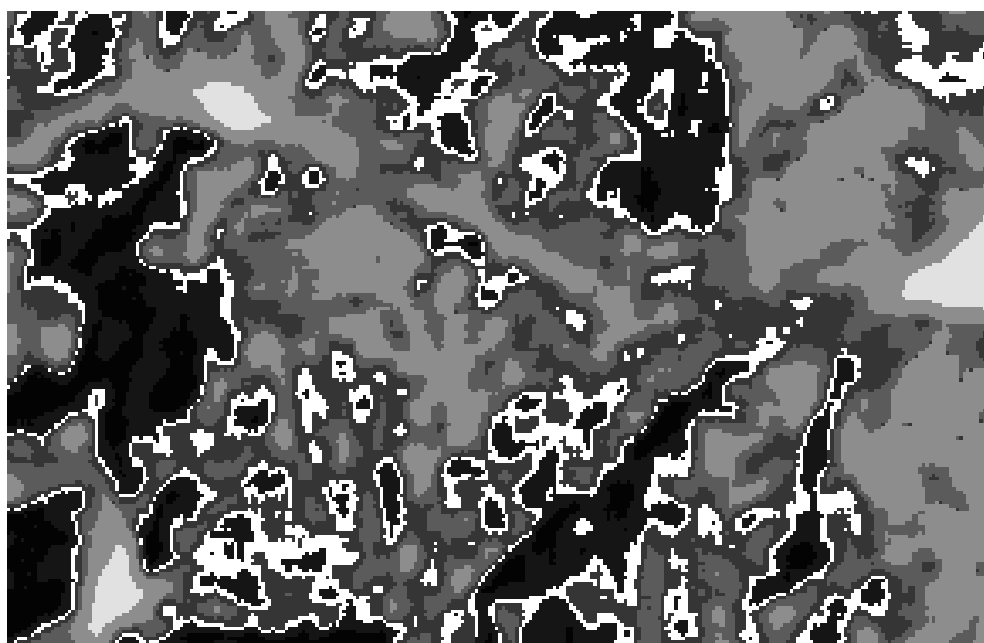


Рис. 2. Предварительная кластерная карта

Границей кластера на изображении будем считать пиксель этого кластера, если хотя бы одна соседняя точка этого пикселя в восьми направлениях принадлежит другому кластеру. Для задания порога примем допустимый минимальный размер кластера, 14*14 пикселей, граничные точки для блока составят по 4 в каждом направлении (т.к. при вычислении признаков был выбран каждый второй пиксель по вертикали и горизонтали). Для этого квадрата отношение: длина границы/площадь, - $100/196=0.49$. Это число будем считать порогом для индикации ложных кластеров. В табл. 2 характеристики семи полученных кластеров. Доля граничных точек больше порога для нескольких кластеров. Рассмотрим, например, кластер 4. Он выделен белым цветом на предварительной кластерной карте рис. 2. Видно,

что он лежит на границе между двумя кластерами. Можно автоматически найти два наиболее представительных соседа.

Таблица 2. Таблица для нахождения ложных кластеров

Номер кластера	Длина границы	Площадь	Отношение
1	8562	12587	0.68
2	3982	11854	0.33
3	8588	11561	0.74
4	4230	8656	0.48
5	5731	6548	0.87
6	1219	2523	0.48
7	267	875	0.30

Для четвертого кластера подавляющее число граничных точек соседствует со вторым и третьим кластерами. С каким из этих кластеров объединить его, определим в пространстве признаков по мере изолированности. Для этого используем формулу (1) для четвертого кластера $j=4$, при этом подсчитаем отдельно вклад в значение меры $M^4(32)$ точек границы, соседних со вторым и третьим кластерами, т.е. $B^j(32)$ теперь определенная часть точек границы.

По указанной мере изолированность четвертого кластера от второго составила 0.29, а от третьего 0.26. Поэтому четвертый кластер объединим со вторым. Аналогично установим, что ложный кластер 1 объединится с третьим, а кластер 2 с четвертым. Окончательная классификация представлена на рис.3. Здесь также произведено сглаживание границ в плоскости изображения заменой номера кластера в каждой точке кластерной карты средним значением по окрестности восьми соседей. Один кластер объединяет водные участки – самый светлый тон на карте. Остальные соответствуют четырем старшим возрастным фазам кедровников, в соответствии с классификацией лесоводов, с четвертой по седьмую фазу.

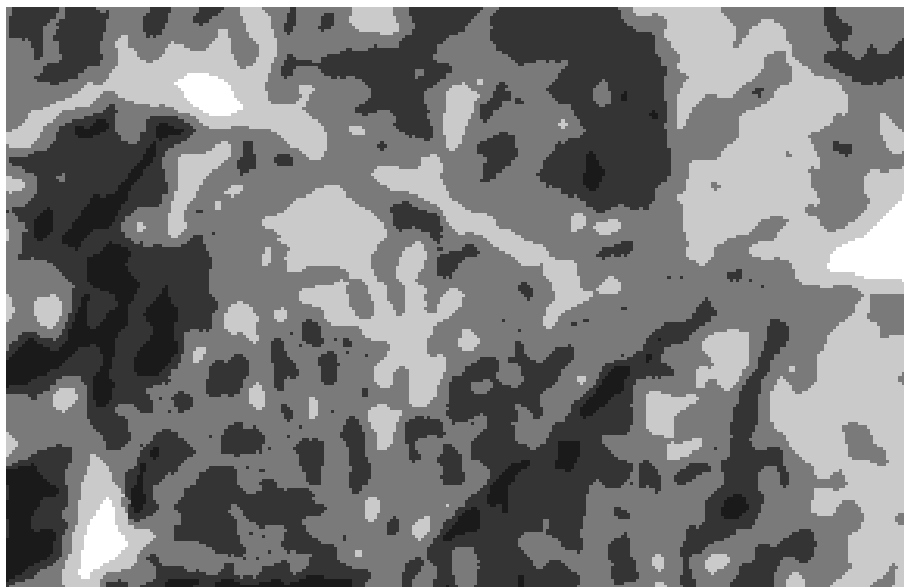


Рис. 3. Кластерная карта изображения лесного ландшафта

Таким образом, автоматически получено лучшее распределение векторов в смысле выбранной меры изолированности кластеров для заданной системы текстурных признаков изображения лесного ландшафта, и оно оказалось в соответствии с возрастным разделением кедровников по фазам развития.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Weszka J.S. Comparative Study of Texture Measures for Terrain Classification / J.S. Weszka, C.R. Dyer, A.A. Rosenfeld // IEEE Trans. Syst. Man. Cybern., SMS-6. – 1976. – P. 269-285.
2. Narendra P.M. A non-parametric clustering scheme for LANDSAT / P.M. Narendra, M. Goldberg // Pattern Recognition. – 1977. – 207 p.
3. Сидорова В.С. Оценка качества классификации многоспектральных изображений гистограммным методом / В.С. Сидорова // Автометрия №1. – Новосибирск, 2007. – С. 37-43.

© В.С. Сидорова, 2007

УДК 911.2; 631.58; 631.4; 528.93

С.Е. Перфильев

Красноярский НИИ сельского хозяйства СО РАСХН

АСПЕКТЫ КОСМИЧЕСКОГО АГРАРНО-ПРОМЫШЛЕННОГО МОНИТОРИНГА

The summary

In publication the technique of optimization agrarian landscapes structures in limits tectonics – geomorphology borders of natural landscapes is examined on the basis of division into districts and mapping of space pictures and topographical maps in GIS. The technique is approved in Joint-Stock Company «Ogurskoe» Balahtinskie area and Open Society «Plemsavod «Taeshnia» Suhobuzimskie area of Krasnoyarsk Region. Result of researches of steel «Recommendations on the organization of the grounds for manufacture of a forage the Open Society «Plemsavod «Taeshnia».

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации с 2003 года осуществляет мероприятия по созданию системы дистанционного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения (СДМЗ). Головным учреждением по созданию СДМЗ выступает Главный вычислительный центр (ГВЦ) Минсельхоза РФ.

Получение информации дистанционного зондирования осуществляют с высокоорбитальных космических аппаратов (КА) спутников серии Noaa, Terra и Aqua. Разрешающая способность снимков составляет 250 – 1000м местности. Космические снимки (КС) указанных масштабов пригодны для выяснения ежедневного состояния погод и получения предварительных метеорологических данных по облачности и движению воздушных масс.

Для определения состояния почвенного покрова, вегетации природных и культурных растений, фитосанитарной и ветеринарной обстановок в различных регионах страны привлекаются ДДЗ, получаемые с КА серии Landsat. Снимки с этих спутников имеют разрешение 15 – 30м, что позволяет составить сельскохозяйственную карту М 1:200000 и почвенную карту М 1:1000000.

Состояние аграрных земель по результатам сельскохозяйственного мониторинга (СДМЗ) оцениваются степень, глубина и площади эрозионных процессов, заболачивание и опустынивание аграрных угодий, фитосанитарное и ветеринарное состояние земель. КС разрешают обнаружить очаги и пути распространения колорадского жука, лугового мотылька, саранчи, в ветеринарии – оградить распространение сибирской язвы, ящура, птичьего гриппа. В целом, с помощью СДМЗ осуществляется обнаружение и прогноз негативных явлений на аграрных землях, что предотвращает развитие чрезвычайных ситуаций в сельском хозяйстве.

В России, специалистами ЗАО «Инженерный центр «ГЕОМИР» на базе агрофирмы ЗАО «Ильинка» Оренбургской области впервые для управления крупным агропромышленным хозяйством создана система дистанционного мониторинга сельскохозяйственного производства (СМСП). СМСП представляет собой единую систему анализа и поддержки принятия решений, которая объединяет в единое целое объективные и актуальные данные, полученные с помощью самых современных средств мониторинга окружающей среды, включая космический и авиационный мониторинг [1]. В настоящее время руководство сельскохозяйственного предприятия может принимать оперативные и стратегические решения на базе реальных данных о состоянии производства, экономики, потреблении ресурсов и сбыте продукции, собранных инструментальными средствами. Цель создания СМСП - увеличение объемов выпуска товарной продукции, уменьшение затрат на производство и повышение рентабельности. Задачей создания СМСП являлось получение достоверной информации о производственных процессах в растениеводстве и животноводстве для принятия управленческих решений.

При создании СМСП в аграрно-промышленном комплексе (АПК) «Ильинка» были разработаны и выполнены ряд мероприятий по получению, обработке и привязке к местности космических снимков, интерпретация ДДЗ в

ГИС с послойным составлением тематических карт, разработка пакетов программного обеспечения обработки и хранения информации.

С помощью СМСП в АПК «Ильинка» в основном решались задачи земледелия - состояние посевов, контроль по использованию современной техники, внедрение элементов точного земледелия, предоставление сведений для руководителей по всему аграрному спектру в режиме он-лайн (здесь и сейчас), архивация информации, ее доступность для руководителей подразделений.

В Красноярском НИИ сельского хозяйства СО РАСХН (КНИИСХ) к решению задач по использованию ДДЗ в агропроизводстве подошли с позиций ландшафтного планирования, ландшафтного картографирования, проектирования агроландшафтов и функционального зонирования систем земледелия. Ландшафтное планирование есть экологизация территории, ландшафтное картографирование отграничивает структурные элементы агроландшафтов по плодородию и продуктивности, а ландшафтное проектирование предусматривает использование структурных элементов агроландшафта различного плодородия по специализации земель и применения подсистем земледелия – обработки почв, севооборотов, внесению удобрений, семеноводства, системы машин и защиты растений.

В 2000-2002гг разработали аграрно-структурный метод (АСМ) картографирования и районирования сельскохозяйственной зоны Центральной Сибири (Красноярский край). Сущность метода заключается в ступенчатом дешифрировании аэрокосмических снимков различного разрешения по выяснению агроландшафтного устройства территории по масштабам космических снимков:

- Разрешение 500-1000м – физико-географическая область, географическая (сельскохозяйственная) провинция;
- Разрешением 200-300м – ландшафтный (сельскохозяйственный) округ и ландшафтные (агроландшафтные) области /макрогеохора/;
- Разрешением 50-100м – ландшафтные (агроландшафтные) районы и ландшафты (система агроландшафтов) /топогеохора/;
- Разрешением 10-30м – местность (агроландшафт) /мезогеохора/;
- Разрешением 1-5м - ландшафтные урочища (агромассивы) /микрогеохора/.

Весь комплекс методов и работ по картографированию и районированию агроландшафтов, картографированию агроландшафтных, агроэкологических и специальных тематических карт с использованием ДДЗ и применения ГИС был определен как система космического аграрнопромышленного мониторинга (СКАМ). Выполнение СКАМ с использованием материалов аэрокосмической съемки предусматривает осуществление ряда мероприятий:

- Анализ экономического состояния предприятия;
- Планирование, заказ и ввод полученных результатов космических съемок и топографических карт района расположения сельхозугодий АПК;

- Интерпретация материалов высотной съемки и карт для аграрных целей;
- Сбор наземной информации и составление агроландшафтной и агроэкологической карт для выяснения плодородия земель и применения систем земледелия в агромассивах;
- Составление карт обработки почв, размещения культур по площадям, защиты растений;
- Разработка рекомендаций для руководителей хозяйств по принятию стратегических и оперативных решений.

Проводимые мероприятия были направлены на выполнение следующих задач:

- Отслеживание изменения состояния почвенного покрова полей и посевов на различных участках, что позволяет установить «спелость» земель к посевным и защитным работам, и определить последовательности их обработки;
- Обозначение технологических проходов на карте обработки почв для выполнения технологических операций мощной агрегатной техникой. Этим добились экономичности, технологичности и организованности использования дорогостоящей техники;
- Переход к прецизионному (точному) земледелию, за счет разбиения агровыделов (агроурочища) на рабочие участки, отличные друг от друга по плодородию и продуктивности почв;
- Накопление и хранение данных, что позволяет отслеживать динамику процессов, а электронный формат обеспечивает наглядность их представления;
- Многофакторный анализ и визуализация собранных данных, разрешающий легко и быстро их интерпретировать;
- Контроль за исполнением принятых решений.

В основе территориального обособления агроландшафтов, их тектонико-геоморфологических структур как фундаментов ландшафтов, находятся блоковые неотектонические вертикальные и горизонтальные движения земной коры. Тектонические движения обусловлены стоячими поперечными и продольными гравитационными волнами, возникающие в результате лунно-солнечных приливов и солнечной радиации. При этом в земной коре формируются прямолинейные, криволинейные, дуговые, кольцевые трещины различной размерности. Примером тектонических трещин планетарного порядка выступают долины главных рек планеты – Волги, Енисея, Амазонки, Нила и других. Эндотрещиноватость четвертичных отложений проявляется в виде логов, лощин, оврагов и ложбин. Примером микроэндотрещиноватости почв выступают бугры пучения – булгуни криолитоморфогенеза, языковатость верхних горизонтов почв – перетекание гумуса по морозобойным трещинам в нижележащие почвенные горизонты в Восточной Сибири.

Исследованиями пространственной организации агроландшафтов Центральной Сибири (Красноярский край) по аэрокосмическим снимкам высотного положения неотектонических блоков и их рельефом установлено, что территориально агроландшафты имеют четкие природные границы и вписывается (входят) в ландшафтные местности. Указанная географическая закономерность позволяет определить *агроландшафт* как *часть или вся территория природного ландшафта (местности), находящаяся в одном неотектоническом режиме и подвергнутая постоянному или временно-сезонному управлению и воздействию агротехнологических систем с целью получения сельскохозяйственной продукции* [2].

Анализ пространственной организации агроландшафтов на агроландшафтных картах М 1:100000 и картах агромассивов М 1:25000, оконтуренных по эндотектонической трещиноватости показал аграрно – географические закономерности:

1. Система агроландшафтов территориально вмещается в природный ландшафт;

2. Каждый агроландшафт (местность) и каждый агромассив (системы урочищ) имеют в плане свой рисунок, геометрию, форму, размещение и распространение сельскохозяйственных земель, свои особенности формирования и функционирования пашни, сенокосов и пастбищ[3]. Каждый агроландшафт и каждый агромассив в пространстве повторяет тектонико-геоморфологическую форму, с поверхности это рельеф общего тектонического блока, разбитого тектоническими трещинами различной размерности и порядка.

Составленный ряд агроландшафтных и агроэкологических карт масштабов 1:25000 – 1:100000 формируют ландшафтную систему земель аграрных территорий [4,5]. Ландшафтная система земель в нашем понимании является самостоятельной категорией, отражающей систему природно-территориальных комплексов иерархии ландшафтной структуры или ландшафтного устройства земледельческой территории суши с измененными, в большей степени трансформированными природно-антропогенными почвами. В основе выделения земель ландшафтов и их структуры находятся форма или элемент мезорельефа и подпочвы (четвертичные отложения), сформированные за четвертичный период. Данный подход о введении представлений по ландшафтной системе земель вызван и обусловлен тем, что на сельскохозяйственных территориях в формировании и пространственном размещении почв антропогенные факторы превалируют над природными факторами.

В результате интерпретации высотных снимков как для территории хозяйства ЗАО «Огурское» Балахтинского района, так и для хозяйства ОАО «Племзавод «Таежный» Сухобузимского района Красноярского края, установили общую аграрно-географическую закономерность в плановом рисунке полей земель. По пространственным рисункам сельскохозяйственных угодий, приуроченных к определенному типу морфологической структуры рельефа, и

подтверждаемые рисунком гидросети, определили типы земель. Это *полевой сплошной, полевой параллельный, полевой радиальный (разлапистый), полевой центральный, полевой перистый, полевой дугообразный, полевой кольцевой и полевой террасово-пойменный тип агромаассивов.*

Интерпретация (дешифрирование) данных дистанционного зондирования (ДДЗ) при космическом аграрнопромышленном мониторинге имеет свои особенности. Применение ГИС-технологий позволяет быстро отграничивать объекты, поскольку сегодня уже не требуется навыков компонентного дешифрирования ландшафтной структуры – лес, водные объекты, рельеф, населенные пункты, сельскохозяйственные угодья. Процесс обособления географических объектов путем распознавания и оконтуривания проводится синтезом цветов, тонов и полутонов и составлением композитных снимков, что позволяет находить объекты на снимках. Внутреннее содержание контуров осуществляют методами полевых исследований. Полевые исследования разрешают составить наборы шаблонов интерпретации снимков на определенные сельскохозяйственные территории. Трудности заключаются в распознавании площадей занятости пашни парами, однолетними, многолетними насаждениями, зерновыми, зернобобовыми или корнеплодными культурами. В данном случае требуются глубокие знания используемых агротехники и агротехнологий, стадии вегетации видов культурных растений и их травосмесей (монокультур и поливидовых составов), производственной специализации земель и некоторых других особенностей.

Предложенная технология картографирования и районирования сельскохозяйственных земель по выявлению агроландшафтов как целостных структур, которые включают пашню, сенокосы, пастбища, лесные массивы, лесополосы, колки, места поселений и водные объекты и составление агроландшафтных, агроэкологических и специальных карт в ГИС послужили начальным этапом создания автоматизированного места агронома (АМА).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. [Электронный ресурс]: Режим доступа: http://www.geomir.ru/for_year/for_year_0401.htm.
2. Достиж. науки и техники АПК. – 2003. – №9. – С. 12-15.
3. Достиж. науки и техники АПК. – 2005. – №2. – С.44-45.
4. Перфильев С.Е. Методологические подходы составления ландшафтной системы земель Центральной Сибири / С.Е. Перфильев // Сб. Плодородие почв Сибири. – Барнаул, 2005. – С. 52-56.
5. Перфильев С.Е. Типизация земель и проектирование агроландшафтов юга Центральной Сибири / С.Е. Перфильев, Ю.Ф. Едигеичев, Е.Э. Маркова // Проблемы опустынивания и защита биологического разнообразия природоохозяйственных комплексов аридных регионов России. – М: «Современные тетради», 2004. – С.86-95.

© С.Е. Перфильев, 2007

ПОЛИДУГА КАК ЭЛЕМЕНТ КОНСТРУИРОВАНИЯ ПРОФИЛЕЙ МАСШТАБИРУЕМОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА

Актуальность разработки новых моделей рельефа, применяемых в фундаментальных геофизических исследованиях Земли, связана с расширяющимся потоком космических данных дистанционного зондирования Земли, со все более высоким разрешением, приближающимся к аэрофотоснимкам, при анализе которых существенную роль играют особенности рельефа, например, складки местности, скрывающие часть информации. Обязателен учет особенностей рельефа и при ортотрансформировании данных дистанционного зондирования. Рассмотренная в [1,2] масштабируемая модель рельефа для представления территории бассейнов больших рек Сибири (Иртыш, Обь, Лена), характеризуется определенной «математической гладкостью», позволяющей избегать «ступенчатость» аппроксимации, характерной для ряда пространственных моделей рельефа. Расчет модели должен обеспечиваться многопроцессорным вычислительным модулем [3]. В настоящей работе уточняются параметры геометрической формы решения интегрального уравнения масштабируемой модели рельефа.

Работа частично поддержана грантами РФФИ 05-05-98006, РФФИ 05-07-98011, РФФИ 07-07-00085-а, РФФИ 07-05-00201-а.

Краткое описание модели

Когда поверхность задана уравнением $z = f(x, y)$, то площадь поверхности вычисляется по формуле (1):

$$S = \iint_G \sqrt{(f'_x)^2 + (f'_y)^2 + 1} dx dy, \quad (1)$$

здесь G – проекция поверхности S на плоскость xOy . Решение должно обеспечивать минимальную площадь всей поверхности.

При этом на каждом участке разбиения должно сохраняться равенство объема над участком разбиения «объему соответствующей ступеньки».

То есть, для каждого участка выполнено

$$(\forall i) \iint_{G_i} f(x, y) dx dy = S_{G_i} \times h_{G_i}, \quad (2)$$

где S_{G_i} – площадь соответствующего участка, а h_{G_i} – усредненное значение высоты для данного участка.

И интеграл по всей территории, должен равняться сумме объемов конечного числа разбиений при минимальности площади обтягивающей поверхности.

$$\iint_G f(x, y) dx dy = \sum_i S_{G_i} \times h_{G_i}, \quad (3)$$

В качестве решения рассматриваем функцию, получающуюся выделением функции с минимальной по площади поверхностью для класса/семейства непрерывных функций, для которых объем или интеграл по

элементу разбиения равен фиксированным значениям, вычисляемых из стандартно заданных точек.

В работе [1] показывалось, что для одиночных фрагментов рельефа, их форма в упрощенном варианте, спроецированном для двумерного случая, имеет различный характер в зависимости от соотношения длины основания к высоте фрагмента. В этом случае, минимизируется периметр, покрывающей линии, при сохранении площади под ней. На рис. 1.a и 1.b представлены схемы решений для различных вариантов соотношения высоты и основания для одиночной ступеньки. Если a_0 - ширина ступеньки, а h_0 - ее высота, то построив на данном основании треугольник, той же площади, что и исходный прямоугольник, мы сможем посчитать длины (периметры) покрывающих линий. Сравнивая длины поверхностей для прямоугольника и треугольника, мы можем заключить, что в случае, когда $h_0 \gg a_0$, то периметр рельефа, образуемого сторонами треугольника больше периметра прямоугольника, с большими вертикальными сторонами.

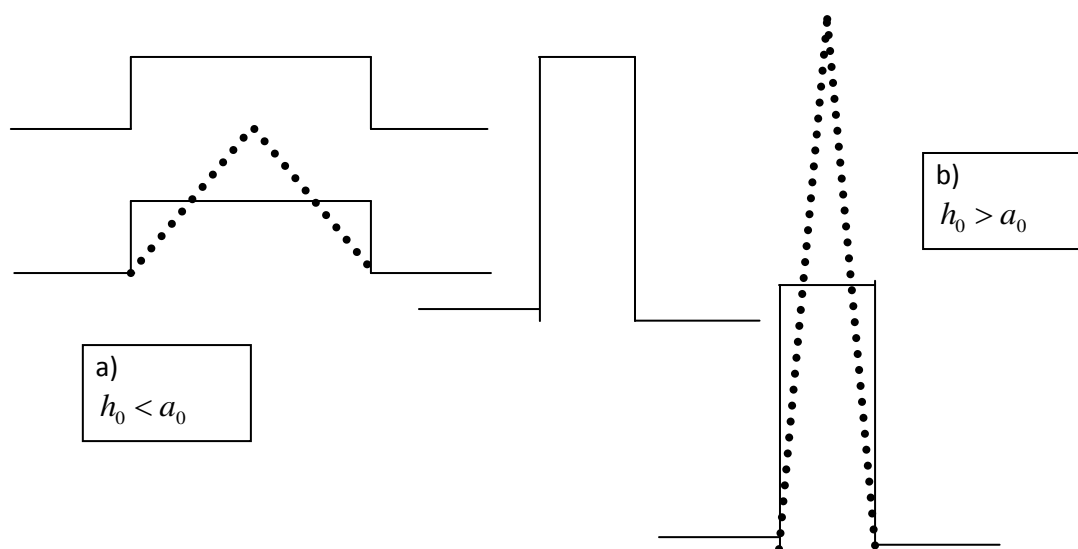


Рис. 1. Варианты выбора более оптимальных форм

В случае, если $h_0 \ll a_0$, то, напротив, периметр рельефа, образуемого сторонами треугольника становится меньше периметра прямоугольника, с большими горизонтальными сторонами. То есть, при соотношении сторон прямоугольной площади в пользу вертикального направления, форма рельефа «ближе» к прямоугольной форме, и в случае сниженного рельефа, его форма ближе к треугольной.

В обоснование вышесказанного приведены выкладки расчета полупериметров покрывающих поверхностей.

$$\begin{aligned}
l &= \sqrt{(a_0/2)^2 + h_x^2} \\
S_0 &= a_0 * h_0 = \frac{a_0 * h_x}{2} \Rightarrow h_x = 2 * h_0 \\
p_x &= 2 * l = 2 * \sqrt{(a_0/2)^2 + h_x^2} \\
p_0 &= h_0 + a_0 + h_0 = 2 * h_0 + a_0 \\
(2 * h_0 + a_0)^2 &= 4 * h_0^2 + 4 * h_0 * a_0 + a_0^2 \\
4 * h_0^2 + 4 * h_0 * a_0 + a_0^2 &< ? > 4 * ((a_0/2)^2 + h_x^2) = a_0^2 + 8 * h_0^2 \\
4 * h_0^2 - 4 * h_0 * a_0 &= 0 \\
h_{01} &= 0 \\
h_{02} &= a_0
\end{aligned} \tag{4}$$

Требуемый характер задания геометрической формы решения для случая 1.б., обеспечивают фрагменты окружности, отвечающие требованиям модели.

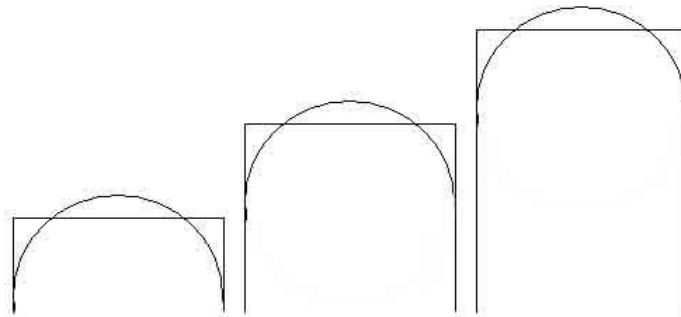


Рис. 2. Варианты форм при различных соотношениях высоты к основанию, при большем значении высоты.

Пусть $h_0 > a_0$, тогда $S = a_0 h_0 = a_0 h_p + \frac{\pi a_0^2}{8}$ отсюда $h_p = h_0 - \frac{\pi a_0}{8}$, то есть, при $h_0 \geq \frac{\pi a_0}{8}$ геометрическая форма одиночной фигуры, представляет колоколообразную форму.

Другой случай, отвечающий типу формы, представленной на рис. 1.а задается дугой на рис. 3. Параметры дуги выбираются из решения следующей системы уравнений.

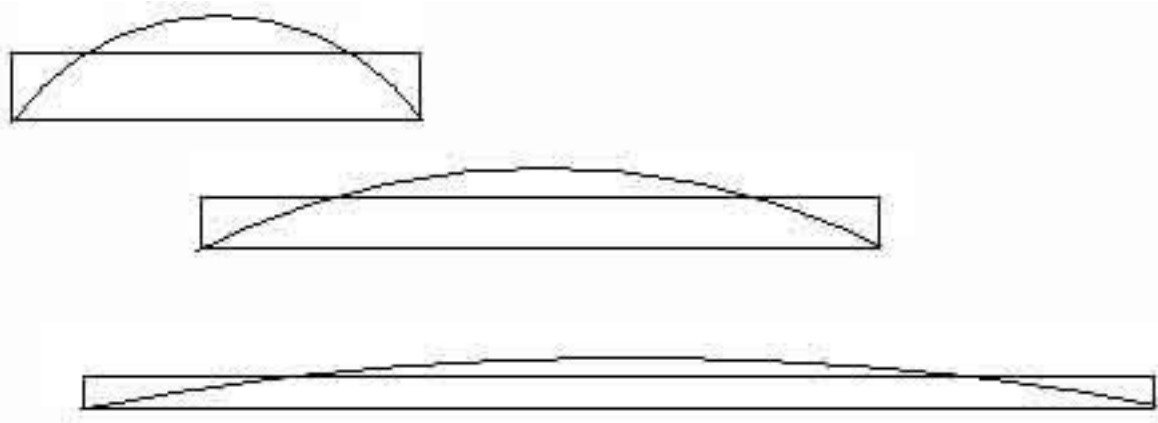


Рис. 3. Шатрообразные формы одиночного фрагмента рельефа при $h_0 \leq \frac{\pi a_0}{8}$

Если R – радиус окружности, формирующей масштабируемый рельеф и 2α это центральный угол, отвечающей дуге, то должно быть выполнено:

$$S = a_0 h_0 = R^2 \alpha - R^2 \sin \alpha \cos \alpha, \quad (5)$$

где первое слагаемое равно площади сектора, а второе слагаемое, площадь треугольника с основанием a_0 и высотой в центре генерируемой окружности.

Длина дуги $2R\alpha$ минимизируется.

Заключение

Для последовательностей

$$\langle a_1, a_2, a_3, \dots \rangle$$

$$\langle S_1, S_2, S_3, \dots \rangle$$

где верхняя строчка задает последовательность примыкающих отрезков, а вторая, нижняя строчка, задает площади прямоугольников над этими отрезками. Отыскиваемым решением является последовательность высот $\langle h_0, h_1, h_2, h_3, \dots \rangle$, задающих высоты на границах отрезков a_i и обеспечивающих построение последовательности дуг, окружностей, так, что в для функции рельефа в виде полидуги, первая производная непрерывна. Иначе говоря, в точках сопряжения касательная общая, как для левой, так и для правой дуги.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ким П.А. О геометрической форме решения интегрального уравнения масштабируемой модели рельефа / П.А. Ким // Сб. материалов междунар. науч. конгр. «ГЕО-СИБИРЬ-2006». 24 - 28 апр. 2006. Россия, Т. 3 «Мониторинг окружающей среды, геоэкология, дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия», ч. 1. – Новосибирск: СГГА, 2006. – С. 212–217.
2. Ким П.А. Один подход к визуализации масштабируемой модели рельефа / П.А. Ким // Тр. 16 Междунар. конф. по компьютерной графике и ее приложениям «ГрафиКон» 2006. 1-5 июля 2006 г. – Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2006. – С. 355-359.
3. Ким П.А. Сибирский виртуальный программно-аппаратный комплекс СВПАК-2003: ГИС-моделирование / П.А. Ким // Тр. Всерос. научно-метод. конф. «Моделирование географ. систем». – Иркутск, 2004. – С. 78-80.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ СЪЁМОЧНОЙ СИСТЕМОЙ

Моделирование процесса формирования изображения съёмочной системой в разных ландшафтных зонах, включающее описание спектральных характеристик объектов различных классов, расчёт спектральных откликов для конкретной съёмочной системы и анализ возможности их достоверного распознавания при дешифрировании, позволяет исследовать способность съёмочной системы собирать достаточное количество информации для уверенного распознавания необходимых классов.

Для априорной оценки достоверности дешифрирования, определения наиболее оптимальных комбинаций каналов съёмочных систем и методов классификации объектов разработан алгоритм моделирования процесса формирования изображения съёмочной системой, представленный на рис. 1.

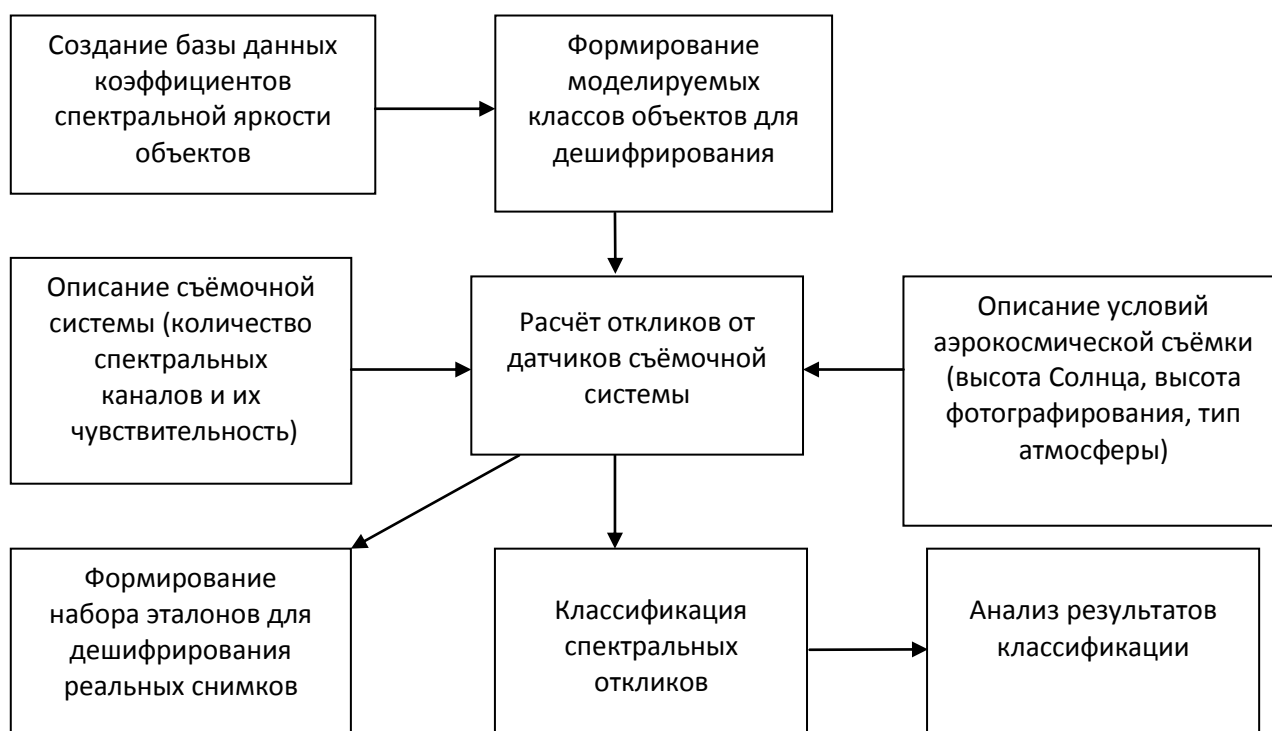


Рис. 1. Алгоритм моделирования процесса формирования изображения съёмочными системами в различных ландшафтных зонах

Съёмочная система фокусирует поток излучения, отражённого от наблюдаемого объекта со спектральной яркостью B'_λ , через объектив диаметром d , с фокусным расстоянием f и функцией светопропускания $\varphi_{ОБ,\lambda}$

на датчике площадью $S_{ДАТ}$, осуществляя переход от яркости объекта к освещённости датчика и, в конечном итоге, к энергии, падающей на датчик. Датчик, в соответствии со своей характеристикой спектральной чувствительности $\varphi_{ДАТ,\lambda}$ и передаточной функцией $\varphi_{РЕГ}$, преобразует энергию в электрический импульс (для электронных систем) или в почернение фотоматериала (для фотографических систем), которые затем в соответствии с функцией квантования $\varphi_{ЦИФР}$ преобразуются в цифровой вид, что можно выразить формулой:

$$S = \varphi_{ЦИФР} \left(\varphi_{РЕГ} \left(\int_{\lambda} \frac{\pi B'_{\lambda}}{4} \left(\frac{d}{f} \right)^2 S_{ДАТ} \varphi_{ОБ,\lambda} \varphi_{ДАТ,\lambda} d\lambda \right) \right), \quad (1)$$

где S – значение отклика, полученного от датчика съёмочной системы.

Применение формулы (1) для расчёта отклика затруднительно, так как определение отдельных параметров съёмочной системы доступно только её производителю, к тому же в процессе эксплуатации они могут изменяться.

В соответствии с закономерностями процесса переноса излучения в системе «Солнце – объект съёмки – съёмочная система» яркость объекта съёмки B'_{λ} зависит от освещённости земной поверхности $E_{с,\lambda}$, прозрачности атмосферы $T_{\beta,\lambda}$, яркости дымки $B_{D,\lambda}$ и коэффициента спектральной яркости объекта (КСЯ) r_{λ} .

Так как обычно функция преобразования датчиком падающей энергии в электрический сигнал и функция квантования данного сигнала выбираются линейными и не влияют на результаты классификации откликов параметрическими методами, формулу (1) можно записать в виде:

$$S = \int_{\lambda} \left(r_{\lambda} \frac{E_{с,\lambda}}{\pi} T_{\beta,\lambda} + B_{D,\lambda} \right) \varphi'_{ДАТ,\lambda} d\lambda. \quad (2)$$

Выполненные преобразования формулы (1) и их анализ позволил разделить модель переноса излучения на датчики съёмочной системы на три независимые части, характеризующие объект съёмки (r_{λ}), съёмочную систему ($\varphi_{ДАТ,\lambda}$) и условия съёмки ($E_{с,\lambda}$, $T_{\beta,\lambda}$, $B_{D,\lambda}$), что даёт возможность моделировать серии экспериментов с целью оценки влияния каждой из составляющих на результаты дешифрирования.

Для моделирования атмосферы выбрана однослойная двухпараметрическая модель, предложенная К.С. Шифриным, И.Н. Мининым [1], поскольку она подробно описана в литературе и имеется возможность контроля рассчитанных параметров атмосферы по справочным таблицам.

При моделировании процесса дешифрирования с использованием статистических алгоритмов важно, чтобы значения откликов, вычисленные для однотипных объектов, отличались друг от друга, таким образом, необходимо моделировать разброс спектральных характеристик отдельных объектов. В работе предлагается четыре варианта решения данной задачи.

Первый вариант предусматривает получение индивидуальных значений спектральной яркости объектов r_λ путём умножения усреднённого значения спектральной яркости $r_{\lambda,0}$ на случайную величину $n(M, \delta)$, соответствующую нормальному закону распределения с заданными параметрами (математическим ожиданием M и средним квадратическим отклонением δ):

$$r_\lambda = r_{\lambda,0} \times n\left(1, \frac{\delta\%}{100}\right) = r_{\lambda,0} + r_{\lambda,0} \times n\left(0, \frac{\delta\%}{100}\right). \quad (3)$$

Спектральные характеристики объектов, вычисленные по формуле (3), позволяют выполнять моделирование процесса классификации откликов, например, методами минимальных взвешенных дистанций, параллелепипедов. Недостатком данного варианта моделирования КСЯ является полное подобие графиков формируемых КСЯ, так как один и тот же множитель используется для всего спектрального диапазона. В таком случае для обработки смоделированных откликов нельзя применять методы классификации, использующие информацию о степени корреляции между отдельными каналами съёмочной системы (метод максимального правдоподобия, метод Байеса). Это происходит из-за 100 % корреляции данных в спектральных каналах, вследствие чего невозможно вычислить обратную матрицу от ковариационной матрицы (определитель ковариационной матрицы равен нулю).

Второй вариант получения индивидуальных значений спектральной яркости объектов заключается в выборе случайной величины n для каждого спектрального интервала в отдельности:

$$r_{\lambda_i} = r_{\lambda_i,0} \times n\left(1, \frac{\delta\%}{100}\right) = r_{\lambda_i,0} + r_{\lambda_i,0} \times n\left(0, \frac{\delta\%}{100}\right). \quad (4)$$

Недостатком данного варианта является сложность выбора размера спектрального интервала. Слишком узкий интервал приведёт к тому, что значения спектральных откликов от датчиков съёмочных систем с более широким спектральным диапазоном будут незначительно отличаться от среднего. Слишком широкий интервал, наоборот, даст 100 % корреляцию между откликами в соседних узких каналах съёмочной системы. Кроме того, при визуальном отображении графики КСЯ в этом случае выглядят «неестественно».

Третий вариант моделирования коэффициентов спектральной яркости заключается в использовании частично коррелированных значений случайной величины:

$$\begin{cases} n_0 = n\left(0, \frac{\delta\%}{100}\right) \\ n_i = n_{i-1}k_r + \sqrt{1 - k_r^2} n\left(0, \frac{\delta\%}{100}\right), \\ r_{\lambda_i} = r_{\lambda_i,0} + r_{\lambda_i,0} \times n_i \end{cases} \quad (5)$$

где k_r – коэффициент корреляции соседних спектральных диапазонов.

Такой вариант формирования индивидуальных КСЯ объектов отражает наиболее общую закономерность, существующую между яркостями изображений, полученных в разных каналах в зависимости от их спектрального диапазона: чем ближе спектральные каналы съёмочной системы, тем выше корреляция между откликами. Более сложные корреляционные зависимости таким способом описать нельзя. Второй и третий варианты моделирования КСЯ объектов являются наиболее универсальными, так как они позволяют применять более широкий перечень методов статистической классификации.

Наиболее достоверным является четвёртый вариант моделирования КСЯ объектов, основанный на полевых измерениях с высоким спектральным разрешением. После вычисления корреляционных зависимостей КСЯ в различных спектральных зонах и их математического описания эту информацию необходимо добавить в базу данных наряду со средними КСЯ для данного класса объектов и использовать её при моделировании спектральных характеристик природных объектов. Сложность реализации данного варианта связана с необходимостью выполнения большого объёма полевых работ.

Для априорной оценки точности классификации объектов можно использовать более простые методы моделирования КСЯ объектов, описанные в вариантах 1 и 3.

Часто разные классы объектов образуют между собой устойчивые сочетания, которые могут быть выделены как самостоятельные классы. Примером смешивания может служить класс «лес смешанный», образованный из классов «лес хвойный» и «лес лиственный». Алгоритм смешивания спектральных характеристик двух классов заключается в следующем. Пусть первый класс входит в состав смешанного в соответствии с равномерным распределением $r(k_H, k_B)$ с долей участия k_1 , меняющейся от k_{H_1} до k_{B_1} , тогда КСЯ смешанного класса r_λ будет вычисляться следующим образом:

$$\begin{cases} k_1 = r(k_{H_1}, k_{B_1}) \\ k_2 = 1 - k_1 \\ r_\lambda = k_1 r_{\lambda_1} + k_2 r_{\lambda_2} \end{cases}, \quad (6)$$

где k_2 – доля участия второго класса.

Для оценки достоверности дешифрирования различных объектов выполняется классификация полученных откликов, в результате чего определяется принадлежность откликов, соответствующих яркостям изображения, определённому классу и выполняется анализ точности распознавания объектов (рис. 1).

Разработанный алгоритм моделирования процесса формирования изображения съёмочной системой реализован в программе «Spectr» и использовался для исследования факторов, влияющих на достоверность автоматизированного дешифрирования многозональных космических снимков.

Для описания классов создана база данных спектральных коэффициентов яркости более 400 объектов. Для анализа точности классификации методами минимальных взвешенных дистанций, параллелепипедов и минимальных дистанций сформировано несколько групп классов, характерных для лесных территорий. В качестве моделируемых съёмочных систем заданы системы Landsat (4 канала), МКФ-6 (3 канала), МСУ-Э, МСУ-СК (3 канала).

Из трех рассматриваемых методов классификации наилучшие результаты показал метод минимальных взвешенных дистанций (среднее значение достоверности распознавания составляет 84,1 %). При классификации по методу минимальных дистанций достоверность распознавания классов ниже на 5-10 % относительно метода минимальных взвешенных дистанций. Среднее значение достоверности распознавания классов с использованием метода параллелепипедов составило 67,2 %.

На основании результатов исследования по выбору оптимальных съёмочных систем и спектральных каналов сделан вывод, что для дешифрирования растительности принципиально важно наличие спектрального канала в красном или ближнем инфракрасном диапазонах, так как в этих диапазонах коэффициенты спектральной яркости различных типов растительности значительно отличаются друг от друга. Хорошие результаты обеспечивает комбинация инфракрасного диапазона и спектрального канала в зелёной или голубой зоне спектра. Искусственные сооружения хорошо выделяются на фоне растительности в голубой зоне спектра за счёт высокого коэффициента спектральной яркости в данном оптическом диапазоне. Для каждой группы классов подобраны оптимальные сочетания съёмочных диапазонов, которые могут быть использованы при планировании аэрокосмической съёмки.

В работе проведены исследования по определению количественных характеристик объектов в классах, которые заключались в создании групп смешанных классов с различным процентным соотношением объектов и оценке качества их распознавания. Для создания групп были выбраны следующие комбинации объектов: «Сосна–Берёза», «Сосна–Дорога», «Почва заболоченная–Сосна», «Мох на болоте–Сосна», «Сосна–Болото», «Хвойные породы–Лиственные породы». Погрешность определения процентного соотношения объектов в смешанных классах составила от 5 до 40 % в зависимости от типов объектов и используемых съёмочных систем.

Таким образом, результаты исследования разработанного алгоритма моделирования процесса формирования изображения съёмочной системой, реализованного в программе «Spectr», показали, что он может быть использован для определения наиболее эффективных алгоритмов классификации, формирования набора эталонов и выработки рекомендаций по выбору типа съёмочной системы для обеспечения необходимой достоверности дешифрирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шифрин К.С. К теории негоризонтальной видимости [Текст] / К.С. Шифрин, И.Н. Минин // Тр. Гл. геофиз. обсерватории им. А.И. Войекова. – Л.: Гидрометеиздат, 1957. – Вып. 68. – С. 5 – 75.

© Ю.В. Никитина, 2007

КОГЕРЕНТНАЯ ОБРАБОТКА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Интерферометрические радары с синтезированной апертурой, основанные на сравнении фазы двух или более сигналов, рассеянных элементом земной поверхности, позволяют исследовать топографию земной поверхности и ее изменения во времени и другие детальные характеристики поверхности [1]. Для практической реализации метода необходимо иметь разнесенные в пространстве приемные точки. Необходимым условием построения цифровой модели рельефа является когерентность сигналов. Изменения интенсивности обратного рассеяния радиолокационного сигнала за время между съемками приводят к временной декорреляции. Декорреляция может возникнуть из-за выпадения осадков, деформации микрорельефа поверхности вследствие сельскохозяйственных работ или в сейсмически активных регионах, вследствие ветровых колебаний растительных покровов поверхности, что может быть обнаружено по изображению когерентности изображений.

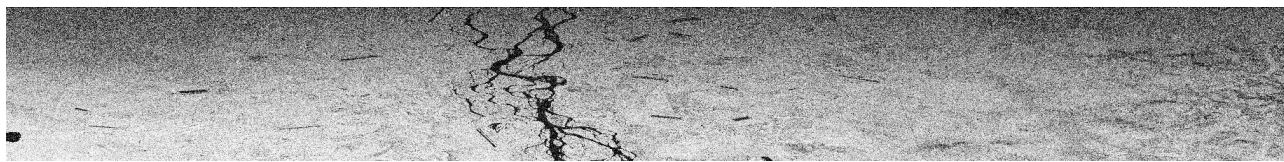
Для создания изображения когерентности радиолокационные изображения разных сеансов были совмещены. Совмещение изображений осуществлялось с помощью попиксельного корреляционного анализа по выбранному фрагменту изображения. На основе совмещенного изображения формировалось изображение интерферометрической когерентности. Степень когерентности двух комплексных радарных изображений z_1 и z_2 определяется формулой [1]:

$$\gamma_{\text{int}} = \frac{|E\{z_1 * z_2^*\}|}{\sqrt{E\{|z_1|^2\}E\{|z_2|^2\}}}, \quad (1)$$

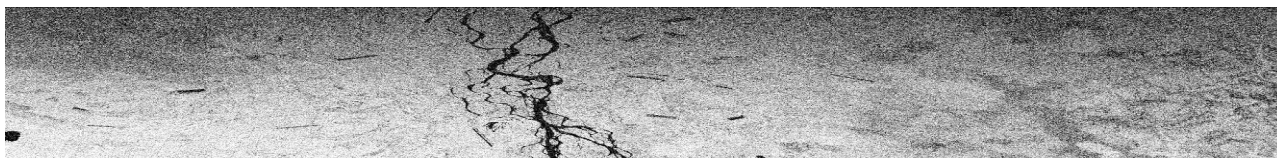
где $E\{\cdot\}$ – операция усреднения, $0 \leq \gamma \leq 1$. Z_1 и Z_2 – комплексные радиолокационные изображения, полученные с различных витков, т.е. с разнесенных в пространстве точек – так называемая интерферометрическая пара изображений. Символ $*$ означает комплексно сопряженное изображение. Формат записи комплексных изображений SLC предусматривал наличие фазового и амплитудного изображений. Размеры окна когерентности устанавливались 5x5 пикселей.

Аналогично работе [1], для того же тестового участка были сформированы изображения когерентности для L-диапазона: HH-HH, HV-HV и HH-VV (рис. 1). Дополнительно были созданы изображения когерентности для VV-VV, HH-HV, VV-HV. Первые две буквы обозначают поляризацию на излучении и приеме для первого изображения, вторые – соответственно для второго изображения, полученного на вторичном витке. Изображения когерентности для случаев HH-HV, VV-HV идентичны, однако вследствие низкой когерентности всей сцены на рисунке не представлены, случай VV-VV представлен. Изображения в С-

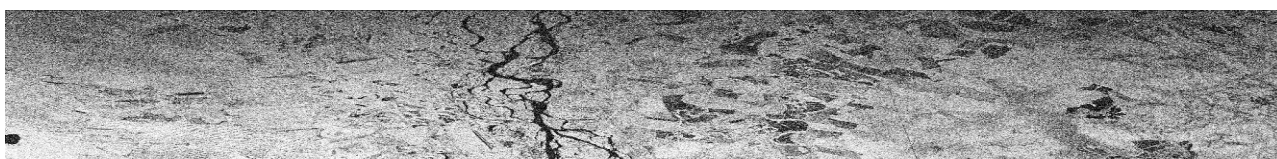
диапазоне вследствие низкой когерентности всей сцены также не рассматривались.



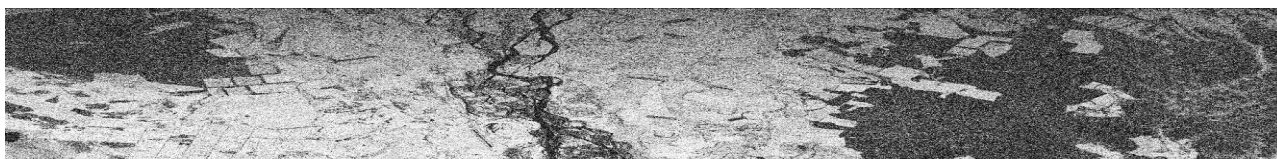
HH-HH



VV-VV



HV-HV



HH-VV

Рис. 1. Изображения когерентности на различных поляриметрических комбинациях

Сравнение дало результат, идентичный работе [1] – на когерентность влияют различные источники декорреляции:

1. HH-HH, VV-VV. Низкий уровень когерентности наблюдается на реке и еще нескольких участках покрытых водой, порядка $0.26 \div 0.31$. Другим фрагментам земной поверхности соответствует значение когерентности $0.61 \div 0.63$. Этот факт объясняется временной декорреляцией. Для воды отсутствует зависимость от поляризации, что наглядно демонстрируется во всех рассматриваемых случаях.

2. HV-HV. Наряду с низкой когерентностью участков, покрытых водой, выделяются участки с таким же темным фоном, которые соответствуют ровной поверхности со значением когерентности около 0.34. Можно предположить, что декорреляция вызвана низким отношением сигнал/шум, поскольку на ровных поверхностях преобладает зеркальное отражение и большая часть мощности сигнала отражается в противоположную сторону от радара. Лесные сообщества имеют величину когерентности 0.61.

3. HH-VV. Низкий уровень когерентности наблюдается у лесных массивов и кустарника вдоль реки, порядка 0.29. Безлесные ровные участки местности характеризуются значением когерентности 0.62. Вероятней всего, это вызвано поляриметрической декорреляцией между HH- и VV изображениями, поскольку лес и кустарник по разному рассеивают электромагнитные волны на горизонтальной и вертикальной поляризациях.

Обоснование применимости методики вычисления индексов вегетации

В работе [2] установлена высокая положительная корреляция изображений когерентности и индекса «яркости» почв [3]. Следовательно, можно провести некоторую аналогию между данными изображениями и попытаться использовать методы обработки спектрозональных снимков для интерпретации радиолокационных. Общеизвестно, что в оптическом диапазоне для более надежного разделения земных покровов принято использовать нормализованную разность значений спектральной яркости [3]. Попытаемся применить данную методику для изображений интерферометрической когерентности.

На рис. 2 представлена двумерная гистограмма яркостей, где по оси абсцисс отложены значения интерферометрической когерентности в L-диапазоне для поляриметрической комбинации HH-VV, по оси ординат для комбинации VV-VV. Наблюдается треугольное распределение яркостей, аналогичное распределению яркостей в координатах БИК – Красный диапазон. На подобном распределении построены методики определения индексов вегетации в оптическом диапазоне, рассмотренные в работе [3]. На гистограмме выделяется «почвенная линия», служащая основанием треугольника. Однако, в отличие от оптического диапазона, в данном случае вдоль нее расположены яркости элементов, различающихся по механизму обратного рассеяния. Распределение вдоль этой линии характеризуется увеличением когерентности. Ближе к началу координат расположены яркости пикселей водных объектов, как указывалось выше, это вызвано временной декорреляцией, так как водные поверхности – это быстро изменяющиеся структуры. С удалением от начала координат вдоль почвенной линии наблюдается постепенный переход от шероховатых поверхностей с низкорослой растительностью к относительно ровным поверхностям с редкой растительностью или без нее. Ближе к вершине треугольника группируются яркости пикселей, соответствующие густым лесным массивам, которые поляриметрически деполаризуют сигнал. На изображениях сополяризованных когерентностей HH-HH, VV-VV лесной массив мало отличается от безлесных участков, в случае HH-VV когерентность мала вследствие поляриметрической декорреляции между HH- и VV-поляризованными обратно рассеянными сигналами, вследствие объемного рассеяния в лесу. Между вершиной треугольника и почвенной линией располагаются яркости пикселей редколесья.

На рис. 3 изображена гистограмма яркостей в координатах HH-VV и HV-HV. Здесь наблюдается иное распределение яркостей – более светлым тоном

отображается концентрированный сгусток, имеющий сердцевидную форму. На гистограмме линиями схематично разграничены основные типы земных покровов: 1 - лесные массивы и крупные кустарники; 2- шероховатая поверхность, в том числе поля и луга; 3 - вода; 4 - ровные участки местности.

Поскольку, выше рассмотренные двумерные распределения яркостей интерферометрической когерентности имеют некоторое сходство с аналогичным распределением в координатах БИК-красная зона спектра, то воспользуемся методикой вычисления вегетационных индексов – нормализованной разностью.

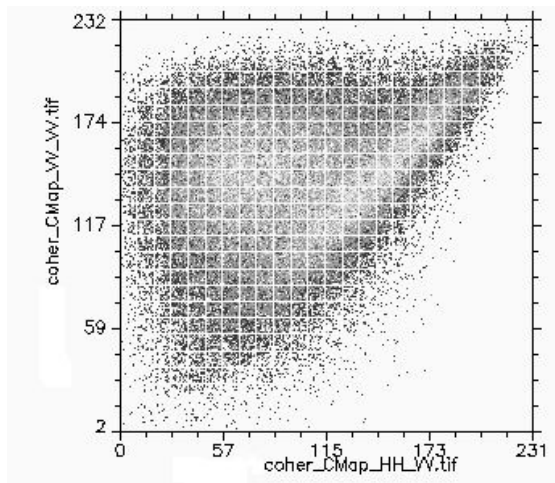


Рис. 2. Гистограмма яркостей изображений когерентности в координатах HH-VV и VV-VV

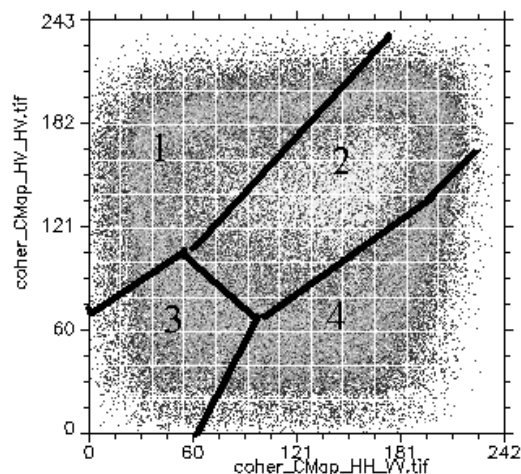


Рис. 3. Гистограмма яркостей изображений когерентности в координатах HH-VV и HV-HV

Тогда получим, следующие соотношения:

$$\frac{coher(VV - VV) - coher(HH - VV)}{coher(VV - VV) + coher(HH - VV)} ; \quad (2)$$

$$\frac{coher(HV - HV) - coher(HH - VV)}{coher(HV - HV) + coher(HH - VV)} , \quad (3)$$

где $coher(VV - VV)$ – интерферометрическая когерентность с вертикальной поляризацией на излучение и прием для первого радарного изображения и аналогичной поляризацией на излучение и прием для изображения, полученного со второго витка с другой точки. Подобным же образом обозначены изображения когерентности, полученные на других поляриметрических комбинациях и рассчитанные по формуле (1). На рис. 4 представлено изображение, полученное при помощи (3). Простой визуальный анализ показывает большую информативность данного изображения по сравнению с рис. 1. Значения выражения (2) распределяются следующим образом:

- $(-0.2 \div 0.03)$ – открытые участки местности,

- $(0.03 \div 0.27)$ – кустарник и редкий лес,
- $(0.27 \div 0.5)$ – густой лес.

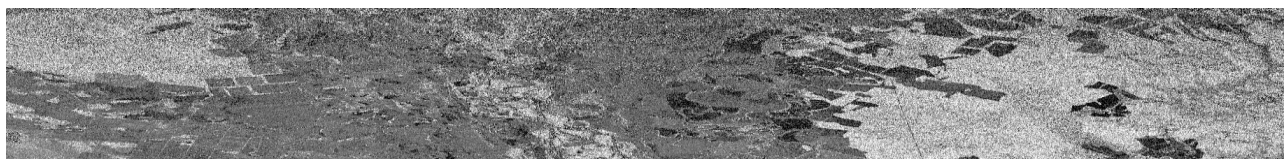


Рис. 4. Изображение когерентности, полученное при помощи (3)

Величины, полученные при помощи (3) распределяются несколько другим образом:

- $(-0.5 \div -0.2)$ – относительно ровные гладкие поверхности,
- $(-0.2 \div 0.0)$ – шероховатые поверхности без кустарника и леса,
- $(0.0 \div 0.3)$ – кустарник, редкий лес с невысокими величинами надземной биомассы,
- $(0.3 \div 0.5)$ – густой лес с более высокой биомассой.

Заключение

Графически обоснована целесообразность применения методики вычисления вегетационных индексов к изображениям когерентности. Предлагаемый подход к обработке данных интерферометрической радиолокационной пары изображений достаточно хорошо классифицирует земные покровы по физическому механизму обратного рассеяния на различных поляризациях. Нормализованная разность изображений когерентности продемонстрировала возможность разделения лесных массивов по величине биомассы и открытых поверхностей по величине шероховатости.

Полученные результаты могут быть использованы для оценки поверхностной шероховатости безлесных участков и объемной неоднородности лесных массивов. Шероховатость может быть полезна при проектировании в землеустройстве, объемная неоднородность позволит оценить полноту древостоя лесных сообществ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 05-02-97205.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. S.R. Cloude, K.P. Papathanassiou. Polarimetric SAR Interferometry // IEEE Trans. Geoscience and Remote sensing, 1998. vol.36. no.5, pp. 1551-1565.
2. V.L. Mironov, T. N. Chymitdorzhiev, P.N. Dagurov, A.V. Dmitriev. Coprocessing of radar coherence and spectral optical data. //Proc. IGARSS 2005, Seoul, Korea, 2005.-vol. VI. - pp. 3913-3915.
3. Чимитдоржиев Т.Н., Ефременко В.В. Об использовании различных индексов вегетации в дистанционном зондировании экосистем / Т.Н. Чимитдоржиев, В.В. Ефременко – Исследование Земли из космоса, 1998 г., № 3. С. – 49-56.

© Т.Н. Чимитдоржиев, С.Ш. Сангадиев, 2007

**ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ ПАРАГЕНЕТИЧЕСКИХ
ЛАНДШАФТОВ ТУНДРОВОГО ТИПА В ОКРЕСТНОСТЯХ ОЗЕРА ДЖУЛУКУЛЬ
(РЕСПУБЛИКА АЛТАЙ)**

В статье приводятся результаты расчета и анализа количественных параметров компонентов ландшафта тундрового типа, полученных в результате обработки многозональных и радиолокационных снимков. Данные сведения необходимы, прежде всего, для поиска и разработки оптимальных вариантов автоматической классификации снимков, которые являются необходимым инструментом познания закономерностей функционирования природных ландшафтов и направленности их трансформации под воздействием, как неблагоприятных факторов внешней среды, так и хозяйственной деятельности человека.

Для разработки технологий автоматизированной классификации, интерактивного дешифрирования и аналитической интерпретации космических изображений необходимо исследовать количественные параметры компонентов ландшафта оказывающих непосредственное влияние на композиционные характеристики снимка в разных диапазонах спектра. Получение дополнительных данных является ещё одной попыткой увеличить существенную размерность данных, и следовательно информацию которую можно извлечь из данных дистанционного зондирования [1].

Материалы, объекты и методы исследования

В качестве объекта изучения выбрана территория, находящаяся в труднодоступном районе Республики Алтай – межгорная котловина озера Джулукуль, южный склон Шапшальского хребта.

Среди высокогорных ландшафтов на данной территории выделяются следующие типы: гляциально-нивальные, тундровые, альпийские и субальпийские луговые, тундрово-степные [3]. В полевой период нами были обследованы тундровые и тундрово-степные ландшафты как наиболее оригинальные по своей структуре, так как представляют собой смешение видов различных по условиям местообитания экологических групп. Располагаются они в высокоприподнятой межгорной Джулукульской котловине (1700-2200 м), выполненной ледниковыми суглинисто-щебнистыми, супесчано-глинистыми, валунно-галечниковыми отложениями. Отличительными особенностями данной территории являются разнообразие форм рельефа и связанные с ними особенности распределения почвенно-растительного покрова.

Использовались следующие исходные данные:

1. Радиолокационные снимки (разрешение 90 м) в С- и Х-диапазоне (длина волны 5,6 и 3,1 см соответственно);
2. Многозональный снимок Landsat TM (разрешение 28,5 м, 7 спектральных диапазонов);

3. Результаты наземных исследований проведённых с помощью GPS и технологии дешифрирования космического снимка в режиме реального времени.

Исследование спектральных отражательных свойств ландшафтов тундрового типа проводилось по многозональным снимкам Landsat TM в семи спектральных диапазонах. Для каждого типа тундры отбирались характеристики спектрального отклика в 10 точках, с последующим нахождением средней величины для каждого спектрального диапазона, и последующей визуализацией в виде графика (рис.1).

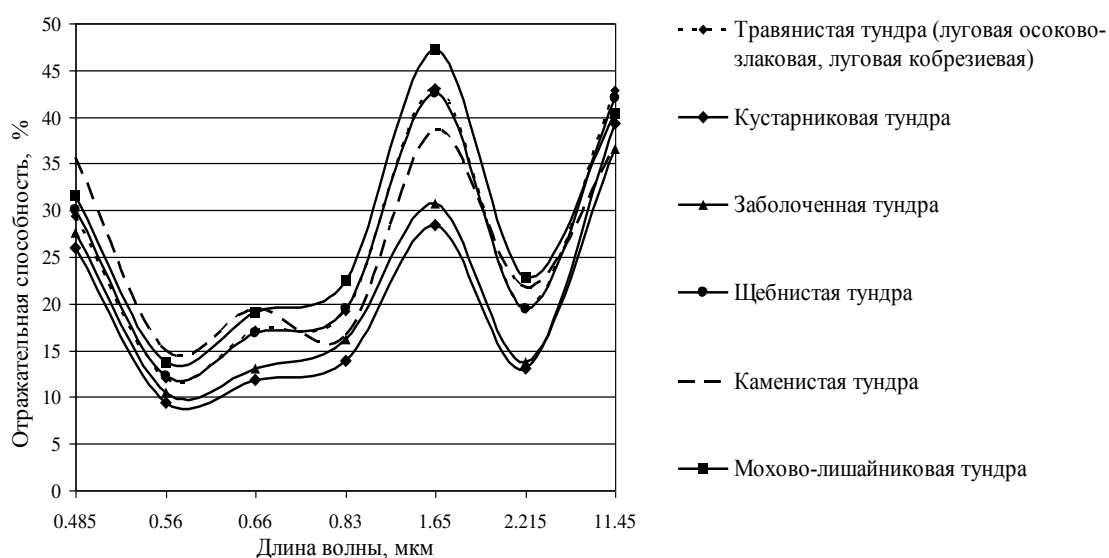


Рис. 1. Характеристики спектрального отклика различных типов тундры (данные сенсора Landsat TM)

Результаты исследований и обсуждение

Основными количественными параметрами компонентов ландшафта, которые могут изучаться дистанционно по многозональным снимкам, являются в первую очередь их спектральные отражательные свойства. Необходимо учитывать, что прямым отражением ландшафта на космических снимках являются растительный и почвенный покров, рельеф, геологическое строение. От степени выраженности каждого из компонентов ландшафта на многозональном снимке, меняются соответственно и спектральные отражательные свойства. В одних случаях на спектральные отражательные свойства ландшафта оказывает большее влияние только растительность (сплошное покрытие растительностью), в других случаях почвенный покров, геологическое строение, рельеф и т. д., а также технические параметры космосъёмки. Неоднородная отражающая среда, т.е. среда в которой на спектральную отражательную способность оказывают влияние различные компоненты ландшафта, формирует некий интегральный показатель, который также позволяет идентифицировать различные ландшафты тундрового типа, но применительно для территории с одинаковой почвообразующей породой. К таким формациям растительности, имеющим интегральный показатель

отражения на изучаемой территории относятся - щебнистая, каменистая, мохово-лишайниковая тундры, в которых на совокупную спектральную отражательную способность большое влияние оказывает почвенный покров и щебнистый материал на поверхности (рис.1).

Наименьшей отражательной способностью в видимой части спектра (0.485-0.66 мкм) имеют кустарниковая, заболоченная и травянистая тундры, связано это в основном с наличием в этих типах тундр, кроме мхов и лишайников, значительного количества высших сосудистых растений (кустарниковая тундра – карликовая берёзка, ива; травянистая тундра – злаковое разнотравье). Связано это с повышенным содержанием у высших сосудистых растений хлорофилла, который имеет максимум поглощения в видимой части спектра.

Классификация снимков по характеристикам спектрального отклика обязательно должна сочетаться с ландшафтно-индикационным методом дешифрирования. Связано это с тем, что спектральные кривые некоторых формаций тундры идентичны (рис. 1), следовательно, при классификации с использованием только спектральных характеристик, возможна неправильная интерпретация снимка, а применение ландшафтно-индикационного метода позволяет исключить ошибки такого плана. Для этого необходима информация о ландшафтных связях, которую устанавливают в полевых условиях с обязательным фиксированием географических координат в системе глобального позиционирования (GPS), а также информация о морфометрических характеристиках рельефа, рассчитываемых по радиолокационным снимкам (экспозиция склонов, крутизна склонов, карта высот, максимальная площадь сбора и т. д.). Выявление прямых и косвенных зависимостей между зафиксированными в многозональных снимках спектральными характеристиками объектов и морфометрическими характеристиками рельефа позволяет с использованием ландшафтно-индикационного метода выделять различные формации тундрового типа. Так, например, заболоченная и кустарниковая тундры имеют схожие спектры, но они формируются в разных геоморфологических условиях. Формирование заболоченной тундры на изучаемой территории происходит в понижениях рельефа и на пологих террасированных склонах. Такие участки можно выделить с помощью расчёта карты максимальной площади сбора. Максимальная площадь сбора показывает для каждого элемента матрицы (квадрата на карте) максимальную площадь, с которой в него могут собираться со всех склонов сыпучие и жидкие вещества [2]. Выделение локальных депрессий служит косвенным признаком заболоченной тундры.

Приведённые в статье спектральные характеристики парагенетических ландшафтов тундрового типа, а также известная зависимость между морфометрическими характеристиками рельефа позволили провести пространственный кластерный анализ снимка с обучением (Supervised classification – метод максимального правдоподобия) с выделением в качестве обучающей выборки эталонов различных типов тундры (рис. 2).

Предварительно перед классификацией была проведена корреляционная статистическая обработка семи каналов многозонального снимка методом главных компонент, которая позволила выделить наиболее информативные спектральные каналы. Диагностические признаки эталонных классов, соответствующие определённому типу тундры, определялись авторами на основе совокупного анализа всей имеющейся информации.

Результаты классификации снимка с обучением, а также расчёты морфометрических характеристик рельефа и установленная в полевых условиях зависимость с почвенным покровом позволили составить ландшафтный профиль изучаемой территории (рис. 3).

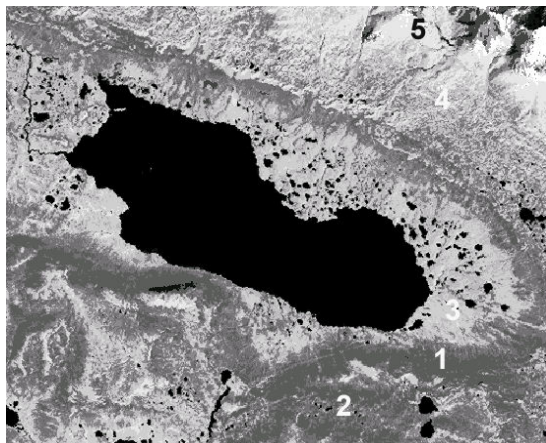


Рис. 2. Классификация снимка с обучением (Supervised classification):

1- кустарниковая тундра; 2 – заболоченная тундра; 3 – травянистая тундра; 4 – щебнистая и каменистая тундры; 5 – мохово-лишайниковая и каменистая тундры

Координаты (в десятичных градусах: долгота / широта):
 стартовая позиция - 89.67957392 / 50.40624544
 конечная позиция - 89.75295610 / 50.55007450
 азимут - 18°

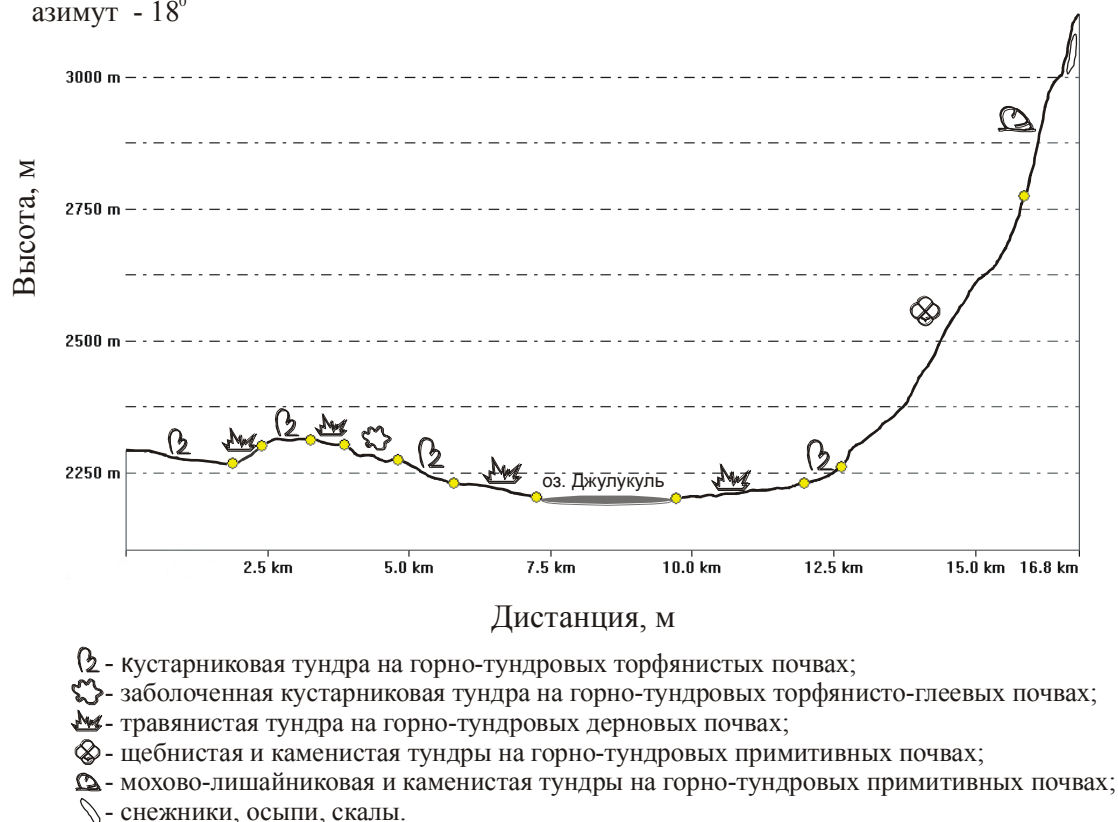


Рис. 3. Ландшафтный профиль Джулукульской межгорной котловины и Шапшальского хребта

Выводы

- Совокупное влияние каждого из компонентов ландшафта на спектральные отражательные свойства, также является диагностическим признаком, но уже не в чистом виде, а в виде интегрального показателя;
- Изучение постоянной изменчивости фиксируемых на снимках спектральных характеристик объектов земной поверхности, позволит разработать новые алгоритмы автоматической классификации снимков с использованием серии разновременных снимков;
- Сведения о ландшафтных связях позволяют диагностировать на многозональных космических снимках ландшафты тундрового типа, с последующим составлением, как ландшафтных карт, так и отраслевых (почвенных, геоботанических, геоморфологических);
- В разных ландшафтах преимущественное значение имеют разные группы индикаторов, в одних наибольшее значение имеет растительность, в других – формы рельефа и его морфометрические параметры и т. д.
- Современные алгоритмы автоматической обработки данных дистанционного зондирования земли, позволяют на основе установленных ландшафтных связей строить интерпретационные карты одного или нескольких изучаемых компонентов ландшафта;

– Метод ландшафтной индикации позволяет использовать не только прямые дешифровочные признаки, априорно известные или выявляемые в процессе дешифрирования многозональных снимков, но и косвенные признаки морфометрических параметров рельефа определяемых по радиолокационным снимкам;

– Всестороннее выяснение взаимосвязей и закономерностей характерных сочетаний параметров компонентов ландшафта в естественных ненарушенных человеком экосистемах даёт возможность интегрированного подхода при картографировании территорий, а это увеличивает точность и полноту содержания создаваемых картографических материалов примерно в 2-3 раза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дейвис Ш.М., Ландгребе Д.А., Филлипс Т.Л. и др. под редакцией Ф. Свейна и Ш. Дейвис. Дистанционное зондирование: количественный подход. Пер. с англ. М.: Недра, 1983. - с. 415.
2. Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. // *Geoderma*, 2002, 107 (1-2), P. 1-32.
3. Алтайский край. Атлас. Том 1, Москва-Барнаул, 1978. - 222 с.

© Н.В. Гонн, В.В. Смирнов, 2007

**КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО
ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ МОНИТОРИНГА
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

Результаты многоцелевого аэрокосмического мониторинга параметров окружающей среды служат базисом для изучения эволюции компонентов природно-хозяйственных систем (ПХС), для разработки проектов освоения территорий и вероятных сценариев их развития, для подготовки управляющих воздействий. Современные средства картографического моделирования, основанные на геоинформационных технологиях, обеспечивают уникальные возможности синтеза баз знаний наук о Земле, получаемых методами сквозных направлений исследования географической оболочки – геофизического, геохимического, палеогеографического, картографического, математического и биогеографического [2]. Создание системы цифровых карт – мощнейших языковых средств объективного отображения состояния природно-хозяйственных систем и всего спектра протекающих в окружающей среде процессов, представляет собой не что иное, как *универсальное геоинформационное картографирование* (универсальное геоинформационное картографирование всегда является «комплексным», обратное – не верно) [3].

На протяжении последнего десятилетия картографо-геодезическая отрасль переживает период активного перехода к цифровым технологиям получения и использования пространственных данных. В Российской Федерации в соответствии с «Концепцией создания и развития инфраструктуры пространственных данных», одобренной Распоряжением Правительства РФ поэтапно формируется иерархическая территориально-распределенная система сбора, обработки, хранения и предоставления цифровой картографической и иной пространственной информации [4]. Это создаёт необходимые предпосылки для осуществления универсального геоинформационного картографирования в интересах мониторинга окружающей среды.

Важнейшей целью создания и развития российской инфраструктуры пространственных данных (РИПД) – обеспечение широкого доступа индивидуальных пользователей, организаций и органов власти к пространственным данным и их эффективное использование. Государственные и муниципальные ресурсы пространственных данных, играют интегрирующую роль для всех видов информации. По мнению экспертов, их универсальность и доступность будут содействовать дальнейшему экономическому развитию Российской Федерации с помощью представления более полной, актуальной и достоверной информации о потенциальных объектах инвестиций. Таким образом, главное назначение РИПД связывается с информационным обеспечением социально-экономического развития и сферой управления.

Безусловно, на пути формирования РИПД помимо комплекса научных задач, необходимо решать проблемы, имеющие политический характер и

относящиеся к производству, интеграции и использованию информационных ресурсов пространственных данных. Требуется разработать многочисленные законодательные и иные нормативные правовые акты, технические регламенты, стандарты, нормативно-технические документы и классификаторы, регулирующие создание и использование базовых пространственных данных и метаданных, а также соответствующее научное, техническое и технологическое обеспечение. Однако РИПД развивается не изолированно от общих мировых тенденций становления глобальной инфраструктуры пространственных данных.

В январе 1998 г. Вице-президент США А. Гор в своей речи в Калифорнийском Центре Науки (г. Лос-Анджелес) провозгласил начало глобального проекта по созданию многофункциональной системы, предназначенной для образовательных и научно-исследовательских целей, которой он дал название Digital Earth – Цифровая Земля [6]. Осуществляющееся продвижение в мире парадигмы Цифровой Земли уже принесло свои первые плоды: создан ряд стандартов и моделей функциональной совместимости, проведены международные научные конференции, сформировалось Международное Общество Цифровой Земли (ISDE). В ряде университетов США создаются цифровые геобиблиотеки, а в мировой Сети в середине 2005 г. начал функционировать «геобраузер» Google Earth (Земля Гугол). По замыслу инициаторов «Цифровая Земля должна явиться средством для навигации и поиска пространственной информации в целях её дальнейшего применения. Цифровая Земля должна обладать пользовательским интерфейсом, обеспечивающим: доступный просмотр трехмерной версии планеты на различных уровнях разрешающей способности, быстро развивающуюся область (universe) объединённой в сеть пространственной информации и механизмы для интеграции и визуализации информации из разнообразных источников» [6]. Прогресс в реализации Цифровой Земли свидетельствует о том, что это превосходная «метафора для организации цифровой пространственной информации». Однако в современном состоянии Цифровой Земли видится отсутствие единения хорошей идеи, её неосуществленных потенций, с огромными перспективами предложенной к реализации инициативы [3, 7].

На первый взгляд может показаться, что идея Цифровой Земли почти полностью воплощена в Земле Гугол. В этом проекте обеспечена доступная для просмотра, трехмерная версия планеты на различных уровнях разрешающей способности. И каждый желающий может на 2D экране обычного компьютера раскрыть изображение, переходя на всё более высокие уровни разрешения, и наблюдать континенты, затем регионы, страны, города, и, наконец, отдельные дома, деревья и иные, естественные и искусственные объекты. Земля Гугол – в значительной степени жизнеспособная платформа для обеспечения данными пользователей. Она представляет собой значительный шаг в направлении решения одной важной проблемы – создания интерфейса Цифровой Земли, но, к сожалению, не более того. То, что можно было бы назвать «харизматической

концепцией Цифровой Земли» – суть прерогатива иного процесса, а именно: процесса интеграции «полного спектра данных о нашей планете и нашей истории», – распределенного комплекса приложений для целей образования и научных исследований.

В связи с этим, возвращаясь к Российской инфраструктуре пространственных данных, можно также видеть, что такие важные, фундаментальные аспекты приложения РИПД, какими, безусловно, являются научно-исследовательская и образовательная сферы, вышеназванной Концепцией не охвачены. Но именно в этом видится ключевой аспект парадигмы Цифровой Земли. И это не случайно. От того, с каким багажом знаний выйдет в жизнь новое поколение людей, во многом зависит будущее развитие природно-хозяйственных систем России и нашей планеты. При этом, в зависимости от того, с применением какой цифровой картографической информации будут решаться научные проблемы развития различных регионов, зависит качество мониторинга окружающей среды, достоверность прогнозов возникновения чрезвычайных ситуаций, эколого-экономических оценок и проектов.

Создание РИПД вкупе с реализацией начатых в нашей стране работ по проектам *Электронной России* открывают перспективу многопланового вхождения России в единую мировую сеть Цифровой Земли, стратегически ориентированную на информационное обеспечение безопасного и сбалансированного проживания населения планеты.

Государственное универсальное геоинформационное картографирование (ГУГК), развиваемое пока как научная инициатива в интересах совершенствования методологического базиса построения РИПД, нацелено на её включение в общий план эволюции мирового информационного процесса. ГУГК не может быть произвольным по своей полноте и направленности. В рамках современных требований ISO оно неизбежно должно стремиться к строгости (однозначности) и системности. В контексте парадигмы Цифровой Земли характеристика полноты, универсальности современного системного комплексного картографирования (картографического моделирования природно-хозяйственных систем средствами геоинформатики) – обретает решающее значение.

К важнейшим концептуальным положениям универсального геоинформационного картографирования, предназначенного для создания в рамках РИПД и Цифровой Земли глобальной информационно-картографической «платформы», адекватной эволюционно изменяющимся требованиям действительности, следует отнести:

- Преемственность в разработке методологических основ и методических средств;
- Системность;
- Универсальность (многовекторность и всеохватность);
- Приоритетность;
- Полимасштабность;

- Единовременность;
- Многомерность (4D – 3D пространства плюс исторический аспект);
- Синергетичность (язык картографического описания моделируемых процессов);
- Актуальность (регулярный мониторинг изменений показателей природно-хозяйственной среды).

Прототипом ГУГК является не имевшая аналогов в мире и впервые осуществлённая ФГУП «Госцентр “Природа”» в 70-90 годах прошлого столетия программа комплексного изучения и картографирования природных ресурсов (КИКПР) страны [1]. В процессе комплексных картографических работ, проводившихся в масштабах 1: 500 000 – 1: 200 000 с использованием космической информации высокого пространственного разрешения, были созданы региональные серии карт, имевшие универсальное значение для различных сфер экономики. В процессе КИКПР заложены основы комплексного картографического кадастра природных ресурсов, экологического картографирования РФ и мониторинга окружающей среды, накоплен практический опыт эффективного межотраслевого взаимодействия при формировании информационно-картографического обеспечения ряда субъектов Российской Федерации, стран Ближнего и Дальнего Зарубежья.

Универсальность геоинформационного картографирования определяет направления (векторы) картографирования в интересах всесторонней и максимально полной характеристики состояния и динамики параметров природно-хозяйственных систем территории.

Реальные пространственно-временные масштабы, на которых природно-хозяйственные системы выступают в качестве целостных географических структур, могут быть различными. На практике пространственный масштабный ряд топографического картографирования жестко определён. В этой связи современная высокоразрешающая космическая информация (КИ) позволяет строить картографические модели на всех масштабных уровнях, начиная с 1: 5000 и мельче. При использовании КИ возможна реализация двух равноправных подходов при картографировании ПХС: от крупных масштабов к мелким, и от мелких к крупным. Вследствие чего при интерактивном дешифрировании КИ объектов окружающей среды реализуется принцип *конвергентности*, иначе – «сходимости», семантических характеристик объектов, обеспечивающий реализацию эвристических механизмов выявления феноменов неисследованной природы и их свойств. Построение карт-моделей во всех требуемых масштабах по тематическим направлениям, обозначенным как приоритетные, обеспечит полимасштабность ГУГК.

Наблюдение из космоса объектов земной поверхности внесло много нового в научные представления о строении геосистем и в методологию науки. Развитие геоинформационных технологий, средств и методов дистанционного зондирования Земли стимулировало дальнейшее совершенствование систем классификации, генерализации информации, объединения и синтеза

географических знаний. Значительная понятийная и терминологическая многосложность, неоднозначность и избыточность, накопившаяся в географической науке к началу 3-го тысячелетия, в силу «отраслевого» принципа её функционирования, превратились в серьёзное препятствие на пути исследования законов эволюции природно-хозяйственной среды и решения практических задач обеспечения безопасной и гармоничной жизнедеятельности населения.

Природно-хозяйственная система представляет собой синергетический и одновременно причинно-следственный феномен. Природно-хозяйственным системам присущи закономерности, исследуемые традиционными научными дисциплинами. При исследовании состояний ПХС по снимкам, получаемым из космоса, мы сталкиваемся с различной структурой спектральных образов, которые формируются отражённой или генерируемой компонентами ПХС энергией. Непосредственному наблюдению в зависимости от масштаба исследования доступны спектральные образы водных объектов, растительности, почв и рыхлых поверхностных отложений, элементы социально-экономической инфраструктуры. Помимо деятельности сознания (логические построения) на продуктивность индикации латентных (ненаблюдаемых) показателей ПХС влияние оказывает зимология спектрально-отражательных характеристик на снимках различной физической природы и масштаба. Каждый исследуемый и картографируемый по космическим снимкам компонент (и его состояние) является равноправным синергетическим индикатором состояния ПХС.

Природно-хозяйственные системы являются самоорганизующимися системами. Попытки применения математических методов для строгого описания разного рода процессов, протекающих в геосистемах, в том числе посредством балансовых уравнений, не создало «прорыва» в наших представлениях о законах развития географических структур разного пространственно-временного ранга. Становится очевидным, что знания о ПХС, единовременно и наиболее полно отражаются с помощью совокупности трех языковых систем: вербальной (географические и геологические описания), геоязыковой (картографические модели) и системы формальных языков (в частности, математические предложения и конструкции). Универсальное геоинформационное картографирование, осуществляемое при соблюдении принципов и положений системности, универсальности, полимасштабности, синергетичности, опирающееся на использование средств аэрокосмического зондирования и современных ГИС-технологий, в состоянии обеспечить упорядочение и разработку представлений о природно-хозяйственных системах регионов нашей планеты и сформировать информационно-картографический базис Цифровой Земли.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карпухин С.С. Концепция осуществления КИКПР СССР на период до 2000 года // Информационный сб., вып. 2-3: Передовой опыт в геодезии и картографии, рекомендуемый

ГУГК для внедрения в топографо-геодезическом и картографическом производстве. – М.: ЦНИИГАиК, 1989, – с. 1-10.

2. Карпухин С.С. Сквозное геоинформационное направление в единой географии в свете идей К.К.Маркова // Горизонты географии. К 100-летию К.К. Маркова. М.: Географический факультет МГУ, 2005. – С. 63-68.

3. Карпухин С.С. Проблемы комплексного аэрокосмического мониторинга природно-хозяйственных систем субъектов РФ // Идеи В.В. Докучаева и современные проблемы развития природы и общества: Материалы Международной научно-практической конференции, г. Смоленск, 18-19 мая 2006 г. – Смоленск: Универсум, 2006. – С. 28-32.

4. «Концепция создания и развития инфраструктуры пространственных данных Российской Федерации», 2006 <http://www.roskart.gov.ru/>

5. Роль и значение международных проектов Digital Earth и Google Earth в формировании глобальной инфраструктуры пространственных данных // Экспресс-информация «Геодезия, топография, картография», зарубежный опыт, Сер.: Дистанционное зондирование Земли для экологии и природопользования, Составитель и отв. редактор С.С. Карпухин, ЦНИИГАиК, 2007. – 30 с.

6. Gore A. The Digital Earth: Understanding our Planet in the 21st Century. 1998, <http://www.digitalearth.gov/VP19980131.html>.

7. Grossner K. Is Google Earth, “Digital Earth?”—Defining a Vision Karl E. Grossner Department of Geography, 3611 Ellison Hall University of California, Santa Barbara, CA 93106, 2006.

8. http://www.ucgis.org/summer2006/studentpapers/grossner_final.pdf.

© С.С. Карпухин, 2007

УДК 681.518

Е.Н. Смоленцева

Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск

У.В. Мартысевич

ГИС-центр СО РАН, Новосибирск

А.Ю. Королюк

Центральный Сибирский ботанический сад СО РАН, Новосибирск

МОНИТОРИНГ КОМПОНЕНТОВ НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ ЧУЙСКОЙ КОТЛОВИНЫ ГОРНОГО АЛТАЯ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Мониторинг наземных экосистем на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗ) является в настоящее время одним из эффективных методов контроля. Сведения о пространственном распределении отдельных компонентов получают в результате их картографирования на различных уровнях географического охвата. Особое место принадлежит методам автоматизированного картографирования с помощью ГИС-технологий.

Нами был проведен анализ взаимосвязи пространственной организации ландшафта и рисунка изображения местности на данных дистанционного зондирования (ДДЗ), полученных различными спутниковыми системами для территории Горного Алтая в межгорной Чуйской котловине. На её территории был выбран эталонный полигон и изучены следующие компоненты наземных экосистем: горные породы различного генезиса и возраста, рельеф, почвенный и растительный покровы.

Были использованы космические снимки различного пространственного разрешения Quick-Bird – 0.61-2.44 м., Landsat ETM+ – 30-80 м, MODIS – 250 -

1000 м. Это дает возможность исследовать природные объекты на трех уровнях генерализации: Quickbird – детальный уровень, LANDSAT – средний уровень, MODIS - региональный уровень генерализации.

Для оценки вклада растительности в спектральные характеристики геологических и почвенных объектов по снимку LANDSAT-ETM+ был рассчитан вегетационный индекс NDVI, характеризующий наличие и состояние растительности. На территории эталонного полигона значения NDVI лежат в интервале -0.4 – 0.0. Это означает, что влияние растительности на спектральные характеристики геолого-геоморфологических и почвенных объектов в пределах полигона минимально и даёт возможность прямого дешифрирования на космических снимках геологических объектов и почвенного покрова.

При использовании космических снимков для исследования геологических и геоморфологических объектов, почв, растительности необходимо учитывать влияние освещенности на спектральные характеристики названных объектов. Так как освещенность поверхности зависит от рельефа, проведено исследование влияния на спектральные характеристики геологических объектов азимутов падения и углов падения склонов. Для этого были использованы цифровая модель рельефа SRTM с разрешением 50 м, геологическая карта, космические снимки Landsat. Выявлены следующие закономерности:

- Существует зависимость яркости пикселей от освещенности склонов;
- Для плохо освещенных склонов заметна разница яркости пикселей на склонах с разной крутизной, наиболее яркими являются пиксели с пологих склонов, пиксели с крутых склонов имеют более низкие значения яркости;
- Для хорошо освещенных склонов влияние крутизны склона на яркость пикселей незначительна.

При помощи средств ГИС выполнено комбинирование векторной геологической карты и двух сеточных карт (карта углов склонов и карта азимутов падения склонов). В результате получена векторная карта, одноименные полигоны которой характеризуются одинаковым геологическим строением, азимутом падения склона и углом падения склона. Накладывая такую карту на космический снимок, легко делать выборки пикселей с нужными параметрами, для оценки спектральных характеристик.

Проведена оценка и коррекция геологической карты масштаба 1:200 000 для полигона Чуйская котловина. Полученная карта использована при оценке спектральных характеристик геологических объектов. Для исследования геологического и геоморфологического строения полигона Чуйская котловина использованы данные полевого наблюдения, космические снимки Landsat, QuickBird и цифровая модель рельефа SRTM с разрешением 50 м.

Были проведены классификации снимка LANDSAT методом ISODATA и методом максимального правдоподобия с использованием четырех обучающих полигонов: четвертичные отложения, аллювий, солончак, аргиллитовые сланцы, вулканогенные породы. В результате классификации выделились 4 класса,

совпадающие с выделами геологической карты. Исключение составляют солончак и аллювиальные отложения, попавшие в один класс.

Далее при сопоставлении результатов классификаций, полевых данных, опираясь на снимок QuickBird и цифровую модель рельефа, были уточнены границы геологической карты 1:200 000 масштаба.

Рассматривались также особенности применения комбинированных карт для исследования почв, растительности и геологического строения на основе космических снимков. Использование классификаций многоспектральных космических снимков для исследования почв и растительности дает хорошие результаты, однако, различия в освещенности на склонах с различными азимутами падения и разной крутизной может приводить к появлению дополнительных классов при классификации. Для выявления и объединения этих дополнительных классов применяется комбинированная карта, в которой одноименные полигоны характеризуются одинаковыми углами падения и азимутами падения склонов (азимут – угол падения). При сопоставлении в рамках ГИС проекта такой карты и результата классификации космического снимка, принимается решение об объединении классов.

Карты «азимут – угол падения» построены для трех уровней генерализации: для детального уровня генерализации – на основе топографической карты масштаба 1: 25 000, для среднего уровня генерализации на основе цифровой модели рельефа SRTM с разрешением 50 м, для регионального уровня генерализации на основе цифровой модели рельефа SRTM с разрешением 250 м. Таким образом, карты «азимут – угол падения» используются для исследования механизма генерализации данных на космических снимках Modis –Landsat –QuickBird. Карта «азимут – угол падения» может быть использована для картирования почв и растительности самостоятельно без результатов классификации, поскольку в условиях разных форм рельефа и различной освещенности могут формироваться, разные почвы и разные растительные сообщества.

Компонентный состав почвенного покрова (ПП) ключевого участка представлен литоземами (карболитоземами) (по классификации 2004 года), каштановыми, бурыми аридными засоленными почвами и солончаками. Широко распространены также биогенно турбированные и навейные разности каштановых почв. Значительную площадь эталонного полигона занимают выходы девонских метаморфических пород.

Учитывая, иерархичность ПП в зависимости от уровня его организации были использованы снимки различного пространственного разрешения. Дешифрирование почвенного покрова проводилось поэтапно.

Для детального изучения ПП были использованы спектрозональные космоснимки Quick-Bird, полученные в 2006 году. Как уже отмечалось, особенностью ресурса Quick-Bird является высокое пространственное разрешение, поэтому на снимке просматриваются элементарные почвенные ареалы площадью до 6 кв. м, которые можно выделить, например, в масштабе 1:5000, а также микрокомбинации (мозаики и ташеты).

Применялись два метода дешифрирования: визуальное дешифрирование с последующей векторизацией в ГИС MAP-Info и автоматическое с использованием программы ENVI и ARC GIS-9,1.

Для визуального дешифрирования изображения ПП была проведена его компьютерная цветовая коррекция с получением более контрастного растра.

Далее проводилось выделение почвенных контуров (гомогенных ареалов и почвенных комбинаций) с векторизацией в среде MAP Info. В результате была получена почвенная карта ключевого участка в масштабе 1:10 000. Использовались 12 основных выделов (классов).

При проведении автоматического дешифрирования использовались методы классификации без обучения и с обучением.

Примером классификации без обучения растрового изображения является метод ISODATA с выделением классов в интервале от 5 до 10. В результате было получено 10 классов, 6 из которых однозначно интерпретируются как почвенные и геологические объекты и один класс водных объектов. К недостаткам метода относится, например, выделение трёх классов в районе облачности. Также в один класс попали почвенные комбинации каштановых и каштановых турбированных почв и почвенные комбинации бурых аридных и засоленных почв.

Классификация с обучением космического снимка Quick-Bird проводилась по методу максимального правдоподобия с выделением 7 обучающих классов. Были выделены следующие классы:

1. Солончаки;
2. Бурые аридные почвы;
3. Водные объекты;
4. Коренные породы;
5. Каштановые турбированные (навеянные и перерытые) почвы;
6. Каштановые почвы;
7. Карболитозёмы.

Постклассификационные преобразования заключались в генерализации изображения различными методами пакета ARC GIS-9,1.

В результате было получено несколько растровых изображений, представляющих собой различные варианты карты-проекта почвенного покрова. Затем они переводились в векторный формат с получением необходимых атрибутивных данных по морфометрии полученных выделов.

Далее проводилось дешифрирование ПП по снимку LANDSAT-ETM+. Для выделения основных классов и обучающих полигонов была использована информация, полученная при классификации снимка Quick-Bird. При этом в качестве нескольких классов выделялись почвенные комбинации – ареалы, состоящие из закономерного сочетания нескольких почв. К ним относятся комплексы, пятнистости, вариации, мозаики и ташеты.

При классификации методом максимального правдоподобия было выделено 8 классов объектов:

1. Пятнистости солончаков соровых и такыровидных;
2. Водные объекты;
3. Мозаики горных пород с карболитоземами, вариации литоземов с каштановыми почвами;
4. Гидроморфные почвы;
5. Ташеты каштановых почв с биотурбированными каштановыми почвами, пятнистости каштановых почв с навейными каштановыми почвами;
6. Каштановые почвы;
7. Комплексы бурых аридных засоленных почв с солончаками;
8. Аллювиальные почвы.

Для изучения пространственно-структурной организации растительного покрова также использовались космические снимки различного разрешения: QuickBird – 2 м, Landsat – 30 м, MODIS – 500 м.

Изображение космических снимков отражает существование нескольких типов пространственных структур (территориальных единиц) растительности. Система территориальных единиц иерархична, на снимках различного разрешения отражаются различные уровни иерархии. Это связано с оптической генерализацией изображения, которое можно соотнести с пространственной генерализацией структуры растительного покрова.

Хорошие результаты были получены при работе со снимками MODIS, что связано со значительными размерами пикселя (500 на 500 метров) и оптической генерализацией петрофитных комплексов, представленных мелкой мозаикой склонов разной крутизны и экспозиции. Результаты автоматического дешифрирования оказались вполне адекватны. Контур на карте отражают реальное расположение зональных и интразональных типов растительности, уверенно распознаются все серийные ряды растительности.

На снимках MODIS структура Чуйской степи выглядит следующим образом. Фоновые позиции занимают относительно гомогенные контура зональных опустыненных и пустынных степей по равнинам и подгорным шлейфам. В них располагаются сопутствующие единицы ранга мезокомбинаций:

1. Обособленные низкогорные массивы, которые представляют петрофитные серии растительных сообществ. Для ряда низкогорных массивов характерно участие фитоценозов псаммофитной серии.

2. Системы подгорных шлейфов низкогорных массивов. Здесь в значительной степени проявляется псаммофитная серия сообществ в сочетании с зональными пустынными степями. По значительной роли пустынных степей данный тип близок к фоновому зональному и может рассматриваться как вариант с ярко выраженным проявлением эоловых процессов аккумуляции.

3. Засоленные равнины, в частности равнина в северной части полигона.

4. Долинная растительность, наиболее крупный контур которой связан с долиной Чуи, где господствует луговая и кустарниковая растительность. Более

сухие варианты сообществ по отложениям различного состава развиты в долинах мелких рек, стекающих с Южно-Чуйского хребта.

Каждая из этих территориальных единиц характеризуется определенным набором растительных сообществ, которые, комбинируясь в пространстве, формируют серию территориальных единиц растительности ранга микро- и мезокомбинаций. Помимо этого в масштабе снимка любого разрешения возможно выделение гомогенных контуров растительности. На снимке QuickBird хорошо выделяются степные участки по плоским межгрядовым участкам и шлейфам. Данные контура осложнены зоогенными и фитогенными структурами небольших размеров и регулярного расположения, которые формируют своеобразные структуры растительности ранга нанокомбинаций. Перспективным методом описания и анализа пространственной структуры видится в проецировании катенной модели (экологический ряд) на реальную топографию. Для этого была разработана схема сукцессионной системы полигона, отражающая существование нескольких серийных рядов растительности.

По снимкам QuickBird был проведен анализ структуры изображения для различных серийных рядов и соответствующим им микро- и мезокомбинациям. Анализ петрофитного ряда показал, что на тестовом участке как каменистые экотопы (с выходами коренных пород) распознано более тысячи контуров, из них лишь 17 контуров по размерам соответствуют или превышают пиксель снимка Landsat. Структурный подход к генерализации растительности заставляет выделить следующую территориальную единицу растительности: сочетание петрофитно-разнотравных группировок на выходах коренных пород и мелкодерновинно-петрофитно-разнотравных каменистых степей на (мелкоземистых) продуктах выветривания в элювиальной позиции.

В настоящее время проводится оценка качества классификации снимков и статистическая обработка векторных карт с целью выбора оптимальной комбинации методов классификации растра и постклассификационных преобразований для получения разномасштабных тематических и комплексных ландшафтных карт Чуйской котловины Горного Алтая.

Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционного проекта СО РАН № 56.

© Е.Н. Смоленцева, У.В. Мартысевич, А.Ю. Королук, 2007

УДК 551.24:504.55.06

А.С. Алексеев, Б.М. Глинский, В.В. Ковалевский, М.С. Хайретдинов
ИВМиМГ СО РАН, Новосибирск

ВИБРАЦИОННЫЕ ГЕОТЕХНОЛОГИИ В XXI ВЕКЕ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Последние 30 лет 20-го века были ознаменованы созданием и внедрением мощных вибраторов в практику сейсмологических исследований. Основной побудительная причина развития этого процесса была связана с фундаментальной задачей изучения внутреннего строения Земли. На основе

вибраторов, созданных в СО РАН, были разработаны новые геотехнологии, которые позволяют избежать ряда ограничительных обстоятельств сейсмологии землетрясений и больших взрывов. Технической основой создания новых геотехнологий явилась разработка ряда мощных низкочастотных управляемых вибраторов. Ставилась задача обеспечить глубинность вибросейсмических просвечиваний, по крайней мере до подошвы земной коры (40-50 км). По теоретическим расчетам для этой цели требовался вибратор с амплитудой силы около 100 тонн в частотном диапазоне $2\div 15$ Гц. В результате поисковых разработок были созданы и экспериментально опробованы несколько разных конструктивных схем вибрационных источников и вибровозбудителей, наиболее эффективными из которых оказались *стационарные электромеханические дебалансные вибраторы ЦВ-40, ЦВ-100, ЦВО-100*, создающие вертикально поляризованную возмущающую силу с амплитудой до 100 тс в диапазоне частот 5-12 Гц с помощью синхронно вращающихся дебалансов [1].

Другая линия построения и развития вибраторов была основана на резонансной схеме излучения с помощью горизонтально колеблющейся инерционной массы до 300 тонн в диапазоне частот 1-3 Гц (горизонтальный сейсмический вибратор ГСВ-100) либо с помощью колеблющегося столба жидкости в вертикальной или горизонтальной плоскости. К числу последних двух относятся гидрорезонансные вибраторы ГРВ-50 (амплитуда силы 50 тс, диапазон частот 1-15 Гц), ГРВ-200 (амплитуда силы 250 тонно-сил, диапазон частот 1-10 Гц) [1].

Наряду с мощными вибрационными источниками были разработаны многоканальные полевые комплексы регистрации и обработки данных (ВИРС, РОСА) с набором оригинальных программ для оперативного анализа сейсмических сигналов и измерения основных параметров сейсмических волновых полей. Для численного моделирования процессов вибрационного зондирования земной коры разработана библиотека программ, позволяющая решать сложные задачи распространения сейсмических колебаний в сложнопостроенных трехмерных средах.

Созданные программно-технические средства явились основой развития ряда вибрационных геотехнологий. Наиболее развитыми из них на сегодня являются:

- Технология исследования глубинного строения земной коры и верхней мантии территории Сибири;
- Технология активного вибросейсмического мониторинга зон подготовки природных и техногенных катастроф с целью повышения достоверности их прогноза. В первую очередь, сюда относятся сейсмо-вулканоопасные зоны;
- Технология инженерно-сейсмических исследований сейсмоустойчивости зданий и сооружений;
- Технология повышения нефтеотдачи выработанных пластов;

– Технология вибросейсмической калибровки сеймотрасс и сеймостанций.

В силу ограниченности размеров статьи остановимся на краткой характеристике лишь последних четырех технологий.

Технология активного вибросейсмического мониторинга (АВСМ) предусматривает наблюдения за состоянием земной коры по изменению характеристик распространения сейсмических волн, возбуждаемых вибрационным источником сейсмических колебаний. Наиболее важная область применения технологии связана с изучением вариаций напряженно-деформированного состояния земной коры, предшествующих землетрясениям и извержениям вулканов. В конечном счете, эта проблема связана с поиском предвестников природных катастроф.

Изучение напряженного состояния земной коры и его изменения во времени – задача, требующая прецизионной точности при экспериментальных работах с мощными вибраторами. Данная технология основывается на регулярном зондировании зон назревающих катастроф сейсмическими полями от вибраторов со строго заданными энергетическими, частотно-временными и фазовыми характеристиками. Периодичность зондирования определяется скоростью протекания геодинамических процессов в рассматриваемых зонах. Динамика последних отображается в характеристиках регистрируемых вибросейсмических полей. Чувствительность используемого вибросейсмического метода зондирования проверялась на естественном тесте, основанном на лунно-солнечных приливах, сопровождающихся упругими деформациями земной коры. Была достигнута точность измерений вариаций скоростей волн на уровне 10^{-5} – 10^{-6} [2]. Оба полученных результата на 2-3 порядка превосходят по точности ранее полученные. Это стало возможным лишь благодаря использованию высокочувствительного вибросейсмического метода. Схематически технология вибрационного мониторинга представлена на рис. 1. В настоящее время технология вибросейсмического мониторинга земной коры применяется для изучения геодинамических процессов с использованием сети регистрирующих цифровых сейсмологических станций в Алтае-Саянской складчатой области и в Байкальской рифтовой зоне.

Вибросейсмический мониторинг по площади нацелен на изучение характеристик поглощения сейсмических волн в земной коре. Экспериментальными работами, основанными на использовании строго повторяющихся сеансов зондирования обнаружены различия в поглощающих свойствах зон глубинных разломов, которые характеризуют их напряженное состояние. Учет поглощающих свойств разломов важен при составлении карт детального сейсмического районирования территории. Результаты этой работы имеют большую важность для изучения геодинамики среды и прогноза землетрясений.

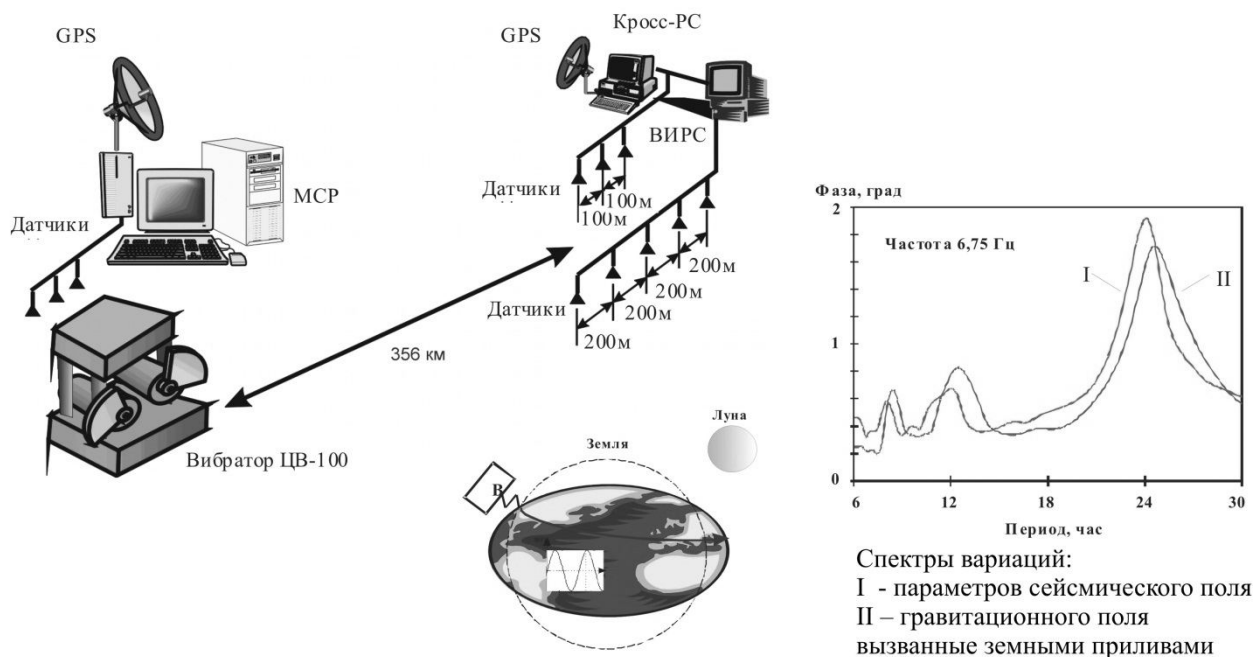


Рис. 1. Экспериментальная оценка относительного изменения скоростей сейсмических волн по результатам измерений земных приливов составляет 10^{-5} – 10^{-6}

Важное направление по проблеме «Вибрационное просвечивание Земли» связано с изучением сложного сейсмического поля в районе живущих вулканов [3,4]. В частности, экспериментально получены данные по вибрационному зондированию действующего грязевого вулкана Шуго, расположенного в Таманской грязевулканической провинции (Краснодарский край). На рис. 2 представлены основные компоненты применяемой технологии: широкополосный вибратор СВ-10/100, аппаратура регистрации и обработки сейсмических сигналов РОСА, объект исследования – вулкан Шуго, результаты обработки сейсмических сигналов до вулкана и за вулканом. Последние представлены во временной области в виде результатов кросскорреляционных сверток (вибрационных сейсмограмм) регистрируемых сейсмических сигналов с опорными свип-сигналами (последние восстанавливаются в пункте приема и повторяют по форме зондирующий сигнал вибратора), а также частотно-временными спектрами вибрационных сейсмограмм. Сложность сейсмического поля – отклика наглядно иллюстрируется обоими видами функций.

Технология инженерно-сейсмических исследований зданий и сооружений. На основе вибрационных технологий создана методика детального инженерно-сейсмологического обследования зданий и сооружений на основе использования вибраторов как источников прецизионных колебаний [5].

Для детальных сейсмологических обследований инженерных сооружений необходимы плотные системы наблюдений с помощью трехкомпонентных сейсмодатчиков с шагом между приборами в единицы метров. Создание аппаратуры с тысячами сейсмических каналов для обследований инженерных сооружений – дорогой и неперспективный путь.

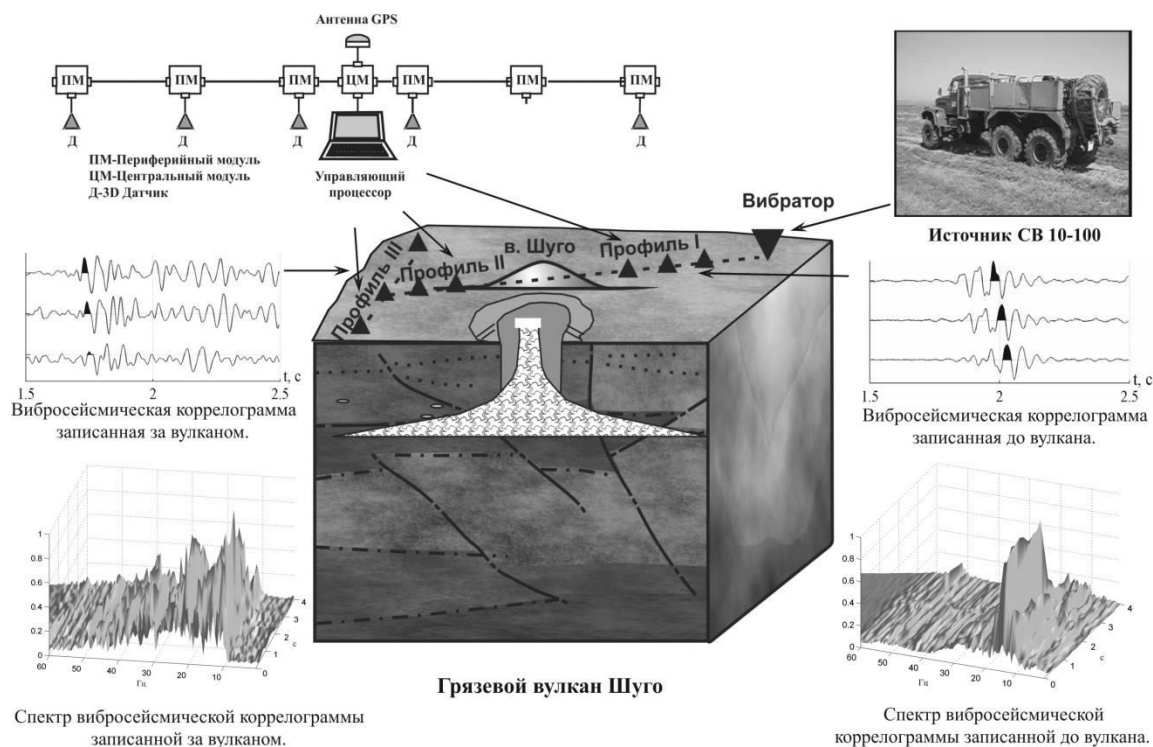


Рис. 2. Схема зондирования грязевого вулкана Шуго

В рамках данной технологии сделана ориентация на измерения с малокаанальной аппаратурой на плотной системе наблюдений с одной или несколькими опорными точками и несколькими движущимися. Последовательная обработка системы наблюдений требует использования одного и того же источника колебаний при каждом цикле измерений. Источниками, не задерживающими процесс измерений, могут быть вибраторы, которые можно включать в любой момент и которые действуют на инженерное сооружение постоянно. Созданы способы обработки, позволяющие строить фильтры по одновременным записям в опорной и перемещающейся точках, что позволяет пересчитывать колебания из опорной точки в подвижную точку. Связав все точки с подвижными фильтрами пересчета колебаний, мы получаем одновременные колебания всех точек системы наблюдений. При изучении моделей, заложенных в основу алгоритмов пересчета, и результатов пересчета доказано, что пересчитываются только волны, а все остальные колебания подавляются алгоритмами обработки. Многоканальные сейсмограммы стоячих волн на плотной системе наблюдений позволяют решать задачи диагностики физического состояния зданий и инженерных сооружений.

Методика детальных обследований инженерных сооружений позволяет обнаруживать и тонко изучать целый набор форм собственных колебаний инженерного сооружения. Так, для Саяно-Шушенской ГЭС обнаружено и изучено 27 форм собственных колебаний. Предшествующие методики позволяли обнаружить не более 6 форм. Существенно повышена точность определения частот собственных форм до тысячной доли Гц. Пространственные искажения амплитуд собственных форм увязываются с особенностями состояния инженерного сооружения и позволяют обнаружить

имеющиеся дефекты. Данная методика применена для различного типа инженерных объектов: здания, плотины ГЭС, мосты.

Разработанная методика обследования зданий при высокой детальности и точности результатов характеризуется большой производительностью (обследование здания за один - три дня, плотины Саяно-Шушенской ГЭС за десять дней) и низкой стоимостью работ. Методика применялась при обследовании зданий в г.г. Новосибирск и Улан-Удэ, при обследовании плотин Саяно-Шушенской и Чиркейской ГЭС, при обследовании автомобильных мостов в г.г. Новосибирск и Тюмень. Полученные результаты имеют как прикладное так и фундаментальное значение. Решены задачи диагностики физического состояния обследованных объектов, а так же получены результаты, важные для физики стоячих волн в инженерных сооружениях, оказавшие влияние на модели.

Вибросейсмическая технология повышения нефтеотдачи пластов. Разработана и экспериментально исследована методика вибросейсмического воздействия на массив горных пород с целью создания научных основ и поиска путей повышения эффективности вибросейсмических технологий, предназначенных для увеличения нефтеотдачи пластов, дегазации угольных толщ и предотвращения горных ударов [6].

Эксперименты в натурных условиях доказали, что в массиве горных пород под влиянием вибросейсмического воздействия удельной мощностью менее 10^{-4} Вт/м² возникают эффекты, большинство из которых наблюдалось ранее только в лабораторных условиях при мощности воздействия на 5÷6 порядков выше.

Экспериментально показано, что вибросейсмическое воздействие ведет к перестройке структуры горных пород, к увеличению их проницаемости, снижению макронеоднородности и усилению сейсмоакустической эмиссии.

Выполнены комплексные исследования влияния вибросейсмического воздействия на жидкую и газовую фазы нефтенасыщенных пород. Изучено влияние вибросейсмического воздействия на увеличение дебита попутного газа, изменение физико-химических свойств и состава нефти и попутного газа, увеличение дебита и снижение обводненности жидкости, отбираемой из скважин.

Впервые многие явления, возникающие при вибросейсмическом воздействии на массив горных пород, исследованы в натурных условиях комплексно, а также во времени и в зависимости от расстояния до эпицентра воздействия.

Полученные результаты положены в основу технологии вибросейсмического воздействия на нефтепродуктивные пласты. В ходе проведения опытно-промышленных работ на Правдинском, Северо-Салымском и Суторминском месторождениях Западной Сибири впервые доказана технико-экономическая эффективность вибросейсмического воздействия с дневной поверхности на нефтепродуктивные пласты в промысловых условиях.

Технология калибровки трасс распространения сейсмических волн и сейсмических станций. Эффективность систем контроля за ядерными испытаниями, землетрясениями зависит от точности определения параметров источников сейсмических событий – времен происхождения, географических координат, глубины, а также их мощности. Точность вычислений влияет на достоверность идентификации событий. Как известно, основная трудность точного определения параметров сейсмического источника связана с существенной горизонтальной и вертикальной неоднородностью коры и верхней мантии Земли, которая вносит большие вариации параметров сейсмических волн в зависимости от расстояния и азимута на источник. Вибрационная технология калибровки направлена на учет указанных неоднородностей на основе калибровочного зондирования сеймотрасс от предполагаемых источников до сеймостанций с помощью мощных вибраторов. Она имеет ряд физических и экологических преимуществ перед методом больших химических калибровочных взрывов, основные из которых были отмечены выше. К настоящему времени выполнен большой объем теоретических экспериментальных работ, доказывающих перспективность вибросейсмического метода калибровки [7].

Перспективы развития вибросейсмических технологий.

Полученные в процессе проведения широкого круга теоретических и экспериментальных исследований сведения о волновых полях от мощных виброисточников на больших расстояниях и глубинные вибросейсмические разрезы являются уникальными и не имеют мировых аналогов. Существующие в мире (и России) маломощные нефтеразведочные вибраторы принципиально не пригодны для выполнения подобных глубинных сейсмических исследований, поскольку обеспечивают максимальную регистрацию лишь в первом десятке километров.

Использование мощных вибрационных источников позволяет снизить затраты на организацию источников возбуждения и открывает широкие возможности проведения глубинных сейсмических исследований в промышленных районах, территориях национальных заповедников (например 100 километровая заповедная зона вокруг оз. Байкал) и др., где невозможно проведение стандартных буровзрывных работ. Примерные расчеты показывают, что экономический эффект за счет использования мощных вибраторов при изучении глубинного строения регионов Сибири в настоящее время составил 2-2.5 млн. рублей; выполнение же одного детального 100 километрового профиля ГСЗ-ОГТ с расстоянием между источниками возбуждения в 1 км и базами зондирования до 150 км позволит сэкономить от 4 до 5 млн. рублей. Для Сибири общая потребность в профилях ГСЗ составляет десятки тысяч погонных километров.

Благодаря высокой разрешающей способности и возможностям промышленного тиражирования вибросейсмического метода круг вибрационных технологий, построенных на его основе, в настоящее время продолжает расширяться и развиваться. В первую очередь сюда входят

технологии: вибросейсмической томографии Земли, предупреждения горных ударов и дегазации в шахтах, вибрационного сейсморайонирования в районах АЭС, ГЭС и др. опасных производств, вибрационной стимуляции процессов извлечения руд и ряд других полезных ископаемых, выявления областей нарушений равновесного состояния среды в проблеме инспекции на месте [7].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками/ А.С. Алексеев и др.- Новосибирск: филиал «Гео» СО РАН, 2004.- 387 с.
2. B.M.Glinskii, V.V.Kovalevskii, M.S.Khairtdinov. Relationship of wave fields from powerful vibrators with atmospheric and geodynamic processes. *Geology and Geophysics*, vol.40, No.3, pp.422–431, 1999.
3. Математическое моделирование и экспериментальные исследования грязевого вулкана Шуго / Б.М. Глинский и др.// *Вулканология и сейсмология* (в печати).
4. Глинский Б.М. О возможности применения вибросейсмических методов для изучения флюидонасыщенных и трещиноватых сред./ Б.М. Глинский, А. Г. Фатьянов, М.С. Хайретдинов. // *Вестн НЯЦ РК*. - 2006. - Вып. 26 (июнь). - С. 155 -160.
5. Детальные инженерно-сейсмологические исследования зданий и сооружений / А.Ф. Еманов и др.// *Методы изучения, строение и мониторинг литосферы: материалы Международной конф.* - Новосибирск, 1998.- С.61-72.
6. Сердюков, С.В. Механизм сейсмического воздействия на нефтепродуктивные пласты / С.В Сердюков, М.В. Курленя // *Геология и геофизика*. – 2007. - № 9. – *принята в печать*.
7. Итоговый отчет по проекту МНТЦ №1067 «Создание технологии калибровки сейсмических станций и сейсмических трасс с использованием мощных сейсмических вибраторов», ИВМ и МГ СО РАН, - Новосибирск, 2001 г. С.264.
8. Алексеев А.С. Активная сейсмометрия с использованием вибрационных источников в проблеме инспекции на местах / Алексеев, А.С.//*Вестник НЯЦ РК*. - 2006. - Вып. 26 (июнь). – С. 142 – 148.

© А.С. Алексеев, Б.М. Глинский, В.В. Ковалевский, М.С. Хайретдинов, 2007

УДК 550.834

Н.И. Геза, И.В. Сапрыкин, В.И. Юшин

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН

МЕТОДИКА ПРЕЦИЗИОННОГО ВИБРОМОНИТОРИНГА ВРЕМЕН ПРОБЕГА В РЕЛАКСИРУЮЩЕЙ СРЕДЕ

Активный вибросейсмический мониторинг (АВСМ) относится к наиболее чувствительным и тонким методам обнаружения и контроля вариаций параметров упругих сред во времени. Обычно в задачу мониторинга входит выявление взаимосвязи этих вариаций с поведением различных геофизических полей или некоторыми известными естественными или искусственными физическими возмущениями. Так, известны применения АВСМ для поиска предвестников землетрясений [1-3], когда длинные календарные ряды вариаций скоростей в сейсмоактивной зоне коррелируются с рядами вариаций других геофизических полей. С проблемой предсказания землетрясений тесно связано применение краткосрочного АВСМ в сопоставлении с упругим земным приливом для калибровки тектонических напряжений [4-7]. Долгосрочный (многолетний) ряд подобных наблюдений [8] / позволил исследовать сезонные вариации волнового поля в условиях Сибири.

Переход на более высокие частоты зондирующего сигнала (в область геоакустики) открыл возможность изучения нелинейных свойств геологических сред и физического моделирования глобального вибромониторинга с использованием управляемых искусственных возмущений. В наших работах [9, 10] было обнаружено, что в процессе интенсивного вибрационного возмущения рыхлой среды ее упругие параметры, ответственные за скорости и поглощение, значительно изменяются. Было также замечено, что после прекращения стороннего возмущения ("накачки") параметры среды, свойственные ее спокойному состоянию, восстанавливаются не сразу, а приходят в норму постепенно, в течение продолжительного времени, другими словами, релаксируют.

Проблема измерения релаксационных вариаций в реальной среде осложнена не только их малыми абсолютными значениями, но и сложностью отделения «локальных» возмущений исследуемой среды от «глобальных» причин, способных воздействовать одновременно на всю систему наблюдений.

Задачей настоящей работы является усовершенствование методики анализа рядов сейсмических виброкоррелограмм мониторинга с целью обеспечения высокой чувствительности АВСМ, необходимой для детального изучения процессов релаксации упругой среды и обнаружения так называемых "медленных движений" [11]. Технические средства и методика натурного эксперимента. На рис. 1 представлена схема полевого эксперимента. Установка состоит из низкочастотного вибратора В, служащего для создания пульсирующей нагрузки на массив находящегося под ним грунта, высокочастотного излучателя И, предназначенного для акустического просвечивания этого массива, и нескольких сейсмических датчиков установленных как во внутренних точках среды, в скважинах, так и на ее поверхности. Вибратор В дебалансного типа (с приводом от электродвигателей с платформой площадью 9 м² и общей массой 35 тонн) способен развивать переменное давление с амплитудой до 35 тонна-сил. Он служит источником возмущающего воздействия - "накачки", и в описываемых экспериментах работал на фиксированной частоте 7 Гц. Акустический излучатель И пьезокерамического типа является источником зондирующего свип-сигнала, просвечивающего массив грунта под платформой вибратора В. Он имеет площадь платформы 0,2 м, резонансную частоту 900 Гц и способен развивать полную мощность до 1 кВА. Диапазон частот зондирующего сигнала в этих экспериментах составлял 160-580 Гц.

Регистрирующей системой служила многоканальная цифровая сейсмостанция ЛАВА (http://lava.ru/LAVA/LAVA_Prezent_FRGM.pdf), способная записывать непрерывные виброграммы практически неограниченной длительности одновременно в двух частотных диапазонах – сейсмологическом (100 Гц квантования) и высокочастотном - от 2 до 24 кГц квантования.

Натурный эксперимент состоял в периодических многократных просвечиваниях подвибраторного массива, несколько из которых в начальной части периода (сессии) наблюдений сопровождалось работой вибратора

"накачки". Помимо виброграмм сейсмических датчиков записывалась виброграмма электромагнитной наводки от цепи силового питания пьезоисточника.

Рис. 1. Схема полевого эксперимента

1. Корреляция с опорным сигналом, представляющим собой аналитическое выражение первой гармоники управляющего сигнала свип-генератора. Синхронизирующим сигналом между воспроизведенной виброграммой и опорным сигналом служил импульс, записываемый в каждом сеансе зондирования на одном из каналов. В результате корреляции восстанавливалась полная импульсная сейсмограмма.

3. Выбор референц-сеанса.

$$\tau_k = \frac{\Phi_k(j2\pi f) - \Phi_0(j2\pi f)}{2\pi f},$$

где k – календарный номер сеанса зондирования, $k=0$ – номер, присвоенный референц-сеансу.

5. Коррекция календарных рядов временных вариаций по календарному ряду времен прихода максимальной фазы электромагнитного импульса.

6. Анализ вариаций разностных времен между различными точками исследуемого массива.

Результаты обработки представлены на рис.2. На Рис. 2а представлена календарная сборка прокоррелированных вибрационных сейсмограмм одного из датчиков с условными номерами сеансов зондирования от 14-го до 47-го. Показаны два анализируемых окна, содержащих волновые импульсы, условно обозначенные как Р и S-волны. Сеансы с номерами 24-27 (выделены цветом) относятся к интервалу времени мощной низкочастотной "накачки".

На рис. 2б показаны временные ряды вариаций "авторазностных" времен пробега (т. е. относительно этого же датчика в референц-сеансе). За референц-сеанс принят 19-й. Поэтому все значения вариаций в этой точке графика на рис. 2б равны нулю.

На рис. 2в показан результат "электромагнитной" коррекции времен пробега в соответствии с п. 5 изложенной выше методики. Как видим, закономерности в области релаксации существенно изменились. Исчезли внезапные выбросы, появился заметный тренд. Наиболее резкое увеличение времен пробега, видимое, кстати, и без тонкой обработки непосредственно на календарной сборке, наблюдается в сопровождении накачки. По окончании накачки времена пробега возвращаются к состоянию покоя не сразу. От 28-го до 34-го сеанса (то есть, на протяжении приблизительно часа) идет устойчивый возвратный тренд, возрастание скоростей. Однако еще через 8 минут, со следующего 35-го сеанса, внезапно вступает обратная закономерность – времена пробега вновь начинают увеличиваться, достигая значений, свойственных "свежевозмущенной" среде. После очередной часовой паузы между сеансами 44 и 45 вновь отмечается возврат к уровню покоя, а после начала просвечиваний (без включения "накачки") третье по счету в данной серии и второе - как будто бы не мотивированное - увеличение времен пробега. Учитывая аналогичное поведение этой кривой и после увеличения мощности излучателя (повышения его рабочего амплитудного напряжения до 750 В в 19 сеансе), мы не можем исключить вариант изменения свойств исследуемой среды самим инструментом измерения. Исследования по оптимизации мощности излучения зондирующих сигналов при сохранении требуемого отношения «сигнал-шум» уже проводятся нами в текущем году и будут дополнительно опубликованы.

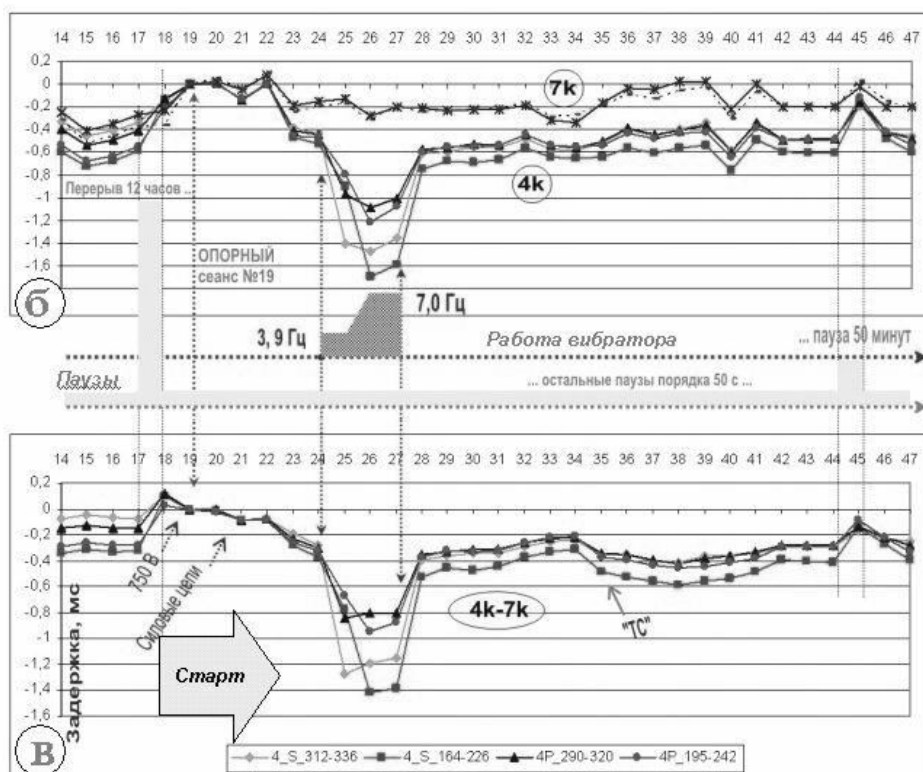
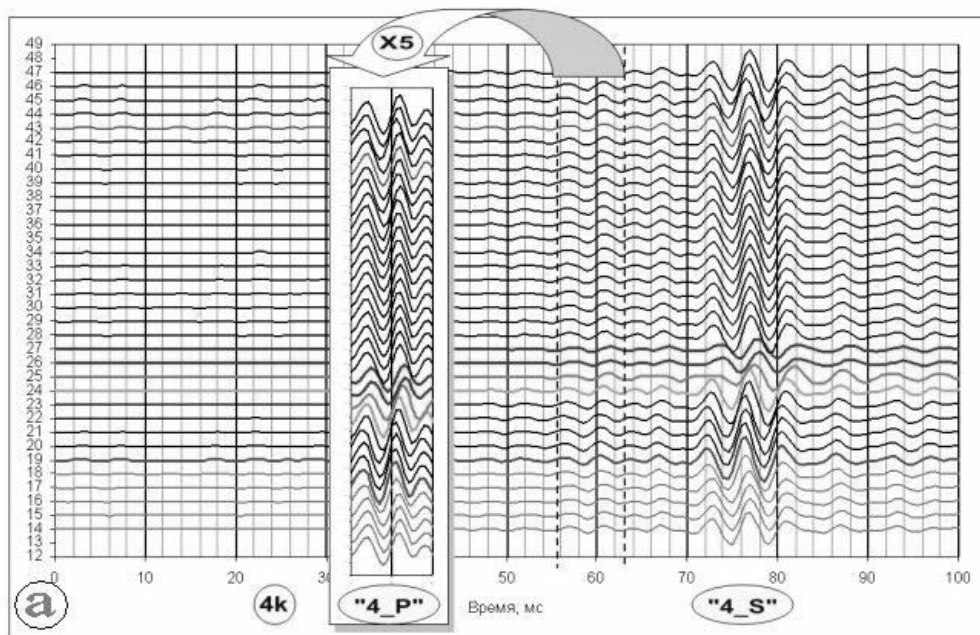


Рис. 2. Результаты эксперимента

На рис. 3 представлены результаты заключительного, 6 этапа, методики – анализ разностных времен пробега волн между датчиками. Вариации разностных времен между парами датчиков, размещенных в различных точках исследуемого массива и на разных удалениях от источника возмущений, могут выявить медленное распространение изменений параметров по упругому полупространству, что и составляет физическую сущность "медленных движений". Так, все графики межканальных задержек с участием 4 канала, находящегося практически «на дне» исследуемого массива, показывают уверенный положительный тренд к исходному уровню «покоя». И в то же время

практически горизонтальная линия разности девиаций между 3 и 2 каналами, на которую не оказали никакого влияния даже существенные суточные изменения параметров среды (сеансы предыдущих суток – 14...17), вызывает надежду на успешное разделение «глобальных» и «локальных» источников «медленных движений».

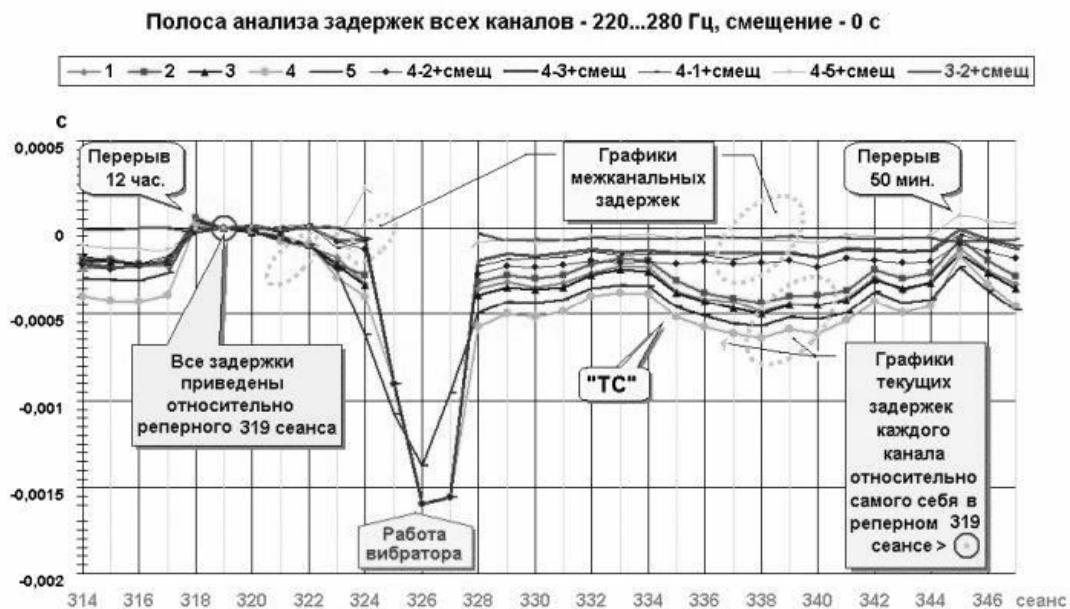


Рис. 3. Анализ разностных времен

Обсуждение

Первой особенностью предлагаемой методики обработки данных активного вибросейсмического мониторинга является использование фазового спектра для измерения времени с учетом поправок «электромагнитного импульса». Вторая особенность – использование разности фаз для выделения относительно малых вариаций времен пробега. При этом разность фаз в формуле (1) не превышает 2 пи, так что не возникает проблемы неопределенности по кратности фазы. Третья особенность – раздельное вычисление задержек волны по разным частотным полосам (на рис. 2в), что дает дополнительную возможность интерпретации результатов экспериментов. Четвертая особенность – использование междатчиковых разностей времен пробега для идентификации типа «медленных движений». Теоретически такая методика позволяет достичь чувствительности мониторинга времен пробега примерно 0,1 интервала дискретизации. В нашем случае (при частоте дискретизации 2 кГц) это составляет 0,05 мс. В эксперименте наблюдались устойчивые тренды с размахом до 0,4 мс, что позволяет отнести их достоверным.

Заключение

Предложен высокочувствительный метод выделения и анализа рядов времен пробега при активном сейсмическом мониторинге (как вибрационном, так и импульсном), позволяющий исследовать такие тонкие эффекты в

геологической среде как релаксация параметров после интенсивного возмущения и изучение медленных движений. Метод экспериментально опробован на натурном объекте с использованием высокочастотного виброакустического просвечивания среды, возмущенной мощными вибровоздействиями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Clymer R.W., McEvilly T.V. Travel-time monitoring with VIBROSEIS. Bull. Seism. Soc. Am. v.71, 6, 1981, 1903-1907.
2. Karageorgi E., Clymer R., McEvilly T.V. Seismological studies at Parkfield. II. Search for temporal variations in wave propagation using Vibroseis. Bull. Seism. Soc. Am., 82, N3, 1992, 1388-1415.
3. Kunitomo T., Kumazawa M. Active monitoring of the earth's structure by theseismic ACROSS. // The Proceedings of 1st International Workshop on ActiveMonitoring in the Solid Earth Geophysics (IWAM04) - Mizunami, Japan, 2004 –p. 218-222/
4. De Fazio T.L., Aki K., Alba J. Solid Earth tide and observed change in the in situ seismic velocity. Journ. Geophys. Res. v.78, 8, 1973, 1319-1322.
5. Yushin V.I., Geza N.I., Velinsky V.V and al. Vibroseismic monitoring at the Baikal region. Jorنال of Earthquake Prediction Reaserch, 3 (1994), 119-134.
6. Экспериментальная оценка тензочувствительности коры в районе Байкала по данным активного вибросейсмического мониторинга и упругого прилива В.И. Юшин и др.// Геол. и геофиз.- 1999, 40, N 3.-С 395-408,
7. Глинский, Б.М. Вибросейсмический мониторинг сейсмоопасных зон. Б.М.Глинский, В.В. Ковалевский, М.С. Хайретдинов // Геология и геофизика – 1999. – Т. 40, № 3. – С. 431-441.
8. Исследование динамических особенностей сезонных изменений волновых полей при вибросейсмическом мониторинге среды. /А.Ф.Еманов и др. // Геология и геофизика. – 1999. – Т. 40, № 3. – С. 474-486.
9. Акустическое исследование нелинейных и реологических явлений в ближней зоне сейсмического вибратора./ Юшин В.И. и др. // "Геология и геофизика", т. 37, N9, 1996, с. 156-165.
10. Геза Н.И. Экспериментальное исследование мгновенных вариаций скорости и затухания сейсмических волн в рыхлой среде in situ, подвергаемой пульсирующей динамической нагрузке/ Н.И. Геза и др. // Геол. и геофиз.- 2001, Т. 42, № 7.- С 1137-1146.
11. Гольдин С.В. Медленные движения - миф или реальность? / С.В. Гольдин и др. // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород: материалы I-й Междунар. школы-семинара, 9-15 сент., 2001. - Красноярск, 2002. - С. 213-220

© Н.И. Геза, И.В. Сапрыкин, В.И. Юшин, 2007

О ПРИРОДЕ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ

Отправным моментом в настоящей работе послужило явное несоответствие химического состава полнокристаллических интрузивных пород и состава эруптивных газов, выделяющихся при вулканических извержениях магм, являющихся эффузивными аналогами соответствующих глубинных пород.

Так, при извержениях магматического материала основного состава (базальтов и их туфов) вулканические газы представлены преимущественно H_2O и CO_2 . Сама по себе базальтовая магма CO_2 не содержит: в габброидах - глубинных аналогах базальтов - углерод, по данным химических анализов [1], практически отсутствует. Не характерен он и для субвулканических горных пород, а в эффузивах диоксид углерода присутствует только в газовых включениях. Оксид и диоксид углерода в заметных количествах содержится лишь в ультраосновных породах.

Откуда же берутся огромные объёмы углекислого газа и водяного пара, характерные для катастрофических извержений магм основного и среднего состава? Почему магма иногда спокойно вытекает на поверхность, а иногда излияниям лавы предшествуют катастрофические выбросы вулканических газов?

Пытаясь прояснить эту проблему, мы проанализировали ряд работ по вулканологии и геохимии магматических пород с позиций возможности существования (и широкого распространения) нетрадиционного источника вулканических газов – термического разложения магматогенного карбоната кальция.

Традиционный механизм газообразования

В качестве источника вулканических газов при эксплозивных извержениях традиционно рассматривается механизм дегазации магмы при падении в ней давления. Предполагается, что газы вначале выделяются в виде газовых пузырей [5], преобразующих магму в двухфазную смесь – динамическую пену [8]. А.И. Малышев придерживается точки зрения М.А. Алидибирова об образовании при дегазации магмы «...фронта волны дробления, который будет двигаться в глубь системы с некоторой конечной скоростью. Скорость распространения волны дробления довольно низка и сопоставима, скорее, с процессом горения, чем с детонацией» [4].

Подобный механизм газоотделения нельзя считать убедительным при рассмотрении катастрофических извержений, когда мощные потоки газа извергаются на высоту десятков километров со скоростью, превышающей скорость звука. Причём речь идёт не о разовых взрывах, а о длительном истечении газовой струи.

Мы предлагаем принципиально иной подход к проблеме газообразования. Существует всего две разновидности магматических горных пород,

содержащих в значительных количествах углерод – карбонатиты и кимберлиты (здесь и далее речь идёт о кимберлитах, слагающих подводящие каналы диатрем). Они, вне сомнения, имеют отношение к вулканизму. На близость происхождения кимберлитовых трубок и обычных классических вулканов указывает также В.С. Трофимов: «...кимберлиты, несомненно, являются вулканами щёлко-ультраосновной магмы с особенностями, свойственными этой магме (отсутствие потоков и др.)» [7].

Ранее нами [6] был рассмотрен механизм формирования кимберлитовых диатрем не при участии растворённых в магме газов, как принято считать [Мархинин, Федотов, Малышев], а под действием значительно больших объёмов углекислого газа, образующегося в результате термического распада содержащегося в магме карбоната кальция. При падении давления из 1 тонны CaCO_3 выделяется 440 кг углекислого газа, занимающего при атмосферном давлении (согласно закону Авогадро) объём 225 кубометров (а из 1 м³ карбонатного расплава, соответственно, 610 м³ газа). Его должно быть вполне достаточно как для поддержания флюидизационного процесса в кимберлитовых трубках, так и для создания эруптивных выбросов. Полученные цифры несопоставимы с объёмами растворённых в магме газов.

Источник карбонатного материала

Источником кимберлитовой магмы принято считать астеносферу – выделенный по сейсмическим данным низкоскоростной слой. По Ч. Хьюдженсу, это «... прерывистая оболочка вокруг Земли, с довольно чёткой нижней границей на глубине 250 км и верхней границей: приблизительно на глубине 60 км под океанической корой и 100-200 км под континентальной. ...Из наблюдений за затуханием скоростей волн сжатия, проходящих через низкоскоростной слой, следует, что последний содержит небольшие количества (около 1 %) интерстиционного расплава. Этот расплав ...должен быть обогащён магнием на глубине, и следовало бы ожидать, что он будет сильно насыщен несовместимыми элементами; расплав мог бы приближаться по составу к кимберлитовому. Возникновение глубоких разрывов в литосфере, возможно, нарушило этот слой в некоторых интервалах и вызвало, таким образом, спорадический выброс кимберлитов с потерей летучих компонентов, не связанный ни с границами плит, ни с мантийными потоками» [9].

Вязкость астеносферы на 2-3 порядка ниже, чем вязкость покрывающих и подстилающих её слоёв мантии. Здесь речь идёт не о локальных очагах кимберлитовой магмы, формирующихся в течение длительного геологического времени, а о крупном, планетарного масштаба, но слабонасыщенном кимберлитовой магмой «резервуаре», для разгрузки которого достаточно лишь наличие масштабных, проявленных в течение короткого времени, тектонических разрывов. В пределах «резервуара» кимберлитовый расплав, являющийся несмешивающейся жидкостью, способен мигрировать к участкам пониженного давления.

При подъёме кимберлитовой колонны к земной поверхности, по мнению Дж. Доусона, возможно отделение жидкой, наиболее насыщенной карбонатом

(и оттого наиболее взрывчатой при сбросе давления) фазы: «...Клемент представил хорошие свидетельства того, что, по крайней мере, часть флюида является обогащённой кальцитом жидкостью, которая отделилась от продвигающегося кверху кимберлита в результате несмесимости» [3]. Возможно, именно этот расплав и заставляет работать вулканы. При его термическом разложении не должно оставаться следов, кроме углекислого газа и распылённого оксида кальция [6].

Альтернативная модель вулкана

Мы считаем, что глубинное строение вулканов, работающих в взрывчатом режиме, не столь радикально, как принято считать, зависит от состава извергаемого материала: вулканы ультраосновных, основных и средних магм должны иметь общие геологические особенности (кислый вулканизм здесь не рассматривается). Все существующие модели вулканов, в том числе кимберлитовых, подразумевают наличие долгоживущих крутопадающих зон разуплотнения, распространяющихся в подкоровое пространство верхней мантии: благодаря ним происходит выплавка мантийного и корового вещества с образованием абиссальных и гипабиссальных очагов.

Имея в виду, что общим свойством подавляющего большинства вулканов является извержение углекислого газа, к этим моделям следует добавить ещё один общий элемент. Анализ характера извержений позволил сформулировать гипотезу: *существенную, если не определяющую роль в взрывчатом вулканическом процессе должны играть два фактора: повторяющиеся раздвиговые тектонические движения, обеспечивающие подъём из астеносферы по образующимся зонам декомпресси расплава, обогащённого карбонатом кальция, и термический распад карбоната кальция при падении давления.*

В зависимости от стадии развития глубинного магматического очага возможны следующие варианты.

А. *Образование кимберлитовых диатрем.* При отсутствии локального глубинного магматического очага в результате первых раздвиговых тектонических подвижек в земной коре создаётся зона декомпрессии, по которой из астеносферы на поверхность поднимается обогащённая карбонатами кальция и магния магма. По пути она пропитывает некоторый объём тектонически ослабленной зоны. Если это первый подъём магмы по данной зоне (область базальтовой магмагенерации и промежуточные очаги не сформированы), к земной поверхности прорвётся кимберлитовая магма и, при падении давления, будет распыляться огромным объёмом выделяющегося углекислого газа. В ходе извержения сформируется жерло кимберлитового вулкана – диатрема, заполненная кимберлитовой брекчией. Концентрация карбоната кальция в кимберлите, заполняющем диатрему, как правило, ниже, чем в кимберлите подводных каналов.

Б. *Механизм катастрофических извержений* представляется следующим (рис. 1). На фоне продолжающихся раздвиговых движений развивается глубинный магматический очаг, в нижней части которого (в астеносфере)

консолидируется обогащённый карбонатами кальция и магния расплав, а выше, в нижних частях земной коры, образуется область генерации базальтовой магмы.

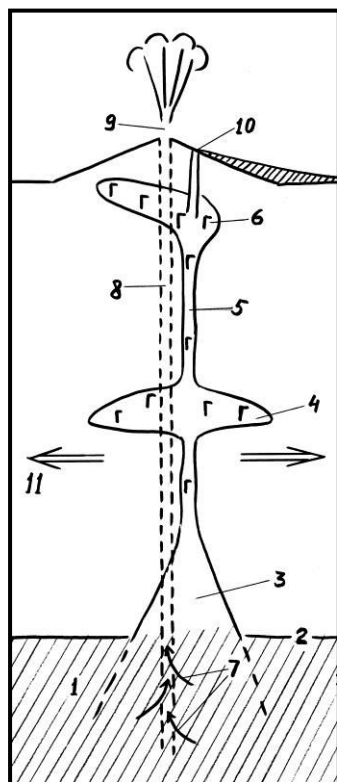


Рис. 1. Предполагаемая схема глубинного строения вулканического аппарата:

1 – астеносфера; 2 - верхняя граница астеносферы; 3 – область генерации базальтовой магмы; 4 – глубинный магматический очаг; 5 – канал, соединяющий глубинный очаг с периферическим; 6 – периферический очаг; 7 – зона аккумуляции карбонатного расплава; 8 – зона раздвиговых движений, являющаяся проводником карбонатного расплава, 9 – эруптивный выброс; 10 – излияние лавы; 11 – направление тектонических движений

Как и в первом случае, при раздвиговых тектонических движениях в коре образуется зона декомпрессии, представленная, как мы полагаем, объёмной зоной трещиноватости и уходящая корнями в астеносферу. Эта зона пересекает также и область магмагенерации, обогащённую базальтовой магмой. Так как карбонатитовая или кимберлитовая магма

должна обладать значительно меньшей вязкостью, чем базальтовая, именно она должна в первую очередь мигрировать в зону декомпрессии. Ввиду высокой температуры вмещающих пород подобная ситуация возможна, но всё-таки гидростатический подъём из астеносферы карбонатсодержащей магмы возможен лишь в моменты кратковременных, резких тектонических подвижек раздвигового характера, иначе магма раскристаллизуется.

Если зона, содержащая карбонатный расплав, претерпевает дополнительное растяжение (раздвиг), давление в ней на значительном вертикальном отрезке, измеряемом километрами или десятками километров, должно резко упасть, причём, благодаря наличию жидкой фазы, во всём объёме зоны, пропитанном карбонатным расплавом, вне зависимости от глубины. Карбонат кальция при этом неизбежно, практически моментально должен разложиться на оксид кальция и углекислый газ. Давления в десятки атмосфер (при большем карбонат не будет распадаться) должно быть достаточно для первого прорыва газов на поверхность. Образуется своеобразный дренаж, охватывающий значительный отрезок магматической колонны: узкий, но глубокий канал, по которому струя газа, разогнанная на протяжении нескольких километров, вырывается на поверхность, захватывая с собой раскалённый материал ослабленной зоны и периферического очага.

Дренаж поддерживает относительно низкое давление в системе. При повышении давления до сотни атмосфер разложение прекращается, при падении давления (вследствие истечения газа) начинается вновь. Образуется саморегулирующаяся система – растянутый во времени взрыв с

многокилометровым участком разгона газовой струи. Процесс способен продолжаться до тех пор, пока не истощится глубинный очаг и вблизи канала, в области относительно низкого давления не закончится карбонат кальция, имеющий температуру выше 900°C.

При достижении каналом области магмагенерации по нему начинается подъём базальтовой магмы. Часть её выходит на поверхность, часть – создаёт глубинные и периферические магматические очаги. Магма перекрывает канал, отток углекислого газа прекращается, давление препятствует разложению карбоната кальция и при отсутствии дополнительных раздвиговых подвижек эруптивная фаза извержения прекращается.

Получается классическая картина вулканического извержения: выбросы пирокластики и излияния лав среднего или основного состава, сопровождающиеся эруптивными выбросами углекислого газа, образовавшегося при распаде карбоната кальция и содержащими, по Е.П. Денисову [2], аномально высокие концентрации элементов, характерных для ультраосновных пород - Ni, Co, Ti, Cr, V.

Полости, по которым извергался углекислый газ, должны уничтожаться последующим подъёмом магмы из промежуточного очага. В абиссальном магматическом очаге начинается медленный процесс магматической дифференциации.

Об андезитовых вулканах. Известно, что андезитовый вулканизм сопровождается значительно более интенсивным выделением вулканических газов. Это может быть связано с тем, что ко времени отделения в составе магматической колонны андезитовой магмы в астеносфере могла произойти консолидация карбонатного расплава. Именно подъём к поверхности большего объёма карбонатного материала может провоцировать более высокую эксплозивность андезитового вулканизма.

Выводы

Пульсационный характер извержений обусловлен режимом проявления долгоживущих разломов. Медленные раздвиговые движения ведут к развитию магматических очагов, претерпевающих в течение длительного геологического времени дифференциацию. Кратковременные интенсивные раздвиговые подвижки ведут к быстрому подъёму карбонатсодержащего вещества верхней мантии, энергия которого способствует выносу на поверхность и в атмосферу материала периферических магматических очагов.

Использование при изучении вулканов геологической информации об алмазоносных объектах поможет создать единую синтетическую модель вулканического процесса.

В том случае, если изложенная модель имеет право на жизнь, особое значение для прогноза крупных извержений должен приобрести высокоточный геодезический контроль проявления *раздвиговых* тектонических движений в вулканических областях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Краткий справочник по геохимии / Войткевич Г.В. и др. - М.: Недра, 1970.

2. Денисов Е.П. Возможный состав верхней мантии по результатам изучения включений ультраосновных пород в щелочных базальтоидах / Е.П. Денисов // Кора и верхняя мантия Земли. 1968.- С. 134-140.
3. Доусон, Дж. Кимберлиты и ксенолиты в них/ Дж.Доусон.- М.: Мир, 1983. С. 46-69.
4. Малышев А.И. Жизнь вулкана/ А.И. Малышев. - Екатеринбург, 1998. С. 136-142.
5. Мархинин Е.К. Вулканы и жизнь./ Е.К. Мархинин М.: Мысль, 1980.- 196 с.
6. Смирнов В.А. К вопросу о происхождении кимберлитов и туффизитов / В.А. Смирнов// Геология и полезные ископаемые Урала. -2002.- С. 34-39.
7. Трофимов, В.С. Геология месторождений природных алмазов/ В.С. Трофимов.- М.: Недра, 1980. С. 22.
8. Большое Трещинное Толбачинское извержение/ С.А. Федотов.- М.: Наука, 1984.
9. Хьюджес Ч. Петрология изверженных пород/ Ч. Хьюджес.- М.: Недра, 1988.

© В.А. Смирнов, 2007

УДК 550.312

Г.П. Арнаутков, Е.Н. Калиш, Ю.Ф. Стусь, М.Г. Смирнов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

МОНИТОРИНГ ВАРИАЦИЙ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ МОДЕРНИЗИРОВАННЫМ БАЛЛИСТИЧЕСКИМ ГРАВИМЕТРОМ

Введение

С появлением высокостабильных источников когерентного излучения (лазеров) баллистический метод измерения абсолютного значения ускорения силы тяжести g стал наиболее точным и перспективным для дальнейшего развития. Абсолютное значение g определяют этим методом по результатам измерения интервалов времени T_i , за которые свободно падающее тело (СПТ) проходит в вакуумированной камере заданные интервалы пути S_i при ($i = 1, \dots, N$). Вычисляемое по результатам измерений интервалов S_i и T_i значение g определяет величину ускорения силы тяжести в точке, находящейся внутри интервала измерений. В схеме этих измерений используется лазерный интерферометр, т. е. мерой пути служит длина волны лазера, стабилизированного по атомному реперу в спектре его излучения. Мерой интервалов времени являются сигналы прецизионного (например, рубидиевого) стандарта частоты.

Применение лазерных интерферометров для измерения интервалов пути свободного падения тела имеет свою специфику: точность измерения длин должна быть на один-два порядка выше, чем у обычных измерителей перемещений, при значительно более высокой частоте (до 10-12 МГц) интерференционного сигнала. Вследствие этого появляются новые источники ошибок, требующие исследования и разработки способов снижения их влияния на точность измерений.

Непосредственное освещение интерферометра стабилизированным лазером с йодной ячейкой поглощения вносит в результат измерений дополнительную погрешность, определяемую шириной спектра излучения, воспроизводимостью и долговременной стабильностью частоты оптического

стандарта. Еще один фактор – ограниченные поперечные размеры пучка лазерного излучения – также может быть источником ошибок определения g . Распространение такого пучка сопровождается дополнительными (по сравнению с интерференцией плоских волн) дифракционными фазовыми сдвигами.

Исходя из требования получения минимальных значений ошибок, обусловленных параметрами используемого излучения при измерении ускорения силы тяжести g , был спроектирован и изготовлен Nd:YAG/I₂ оптический стандарт частоты, предназначенный для использования в баллистическом гравиметре.

Модернизация интерферометра

Принципиальным отличием новой оптической схемы гравиметра ГАБЛ-П от применявшейся ранее является использование одного лазера вместо двух: основного (рабочего) и контрольного лазера с йодной ячейкой внутри резонатора [1].

Оптическая схема интерферометра приведена на рис. 1.

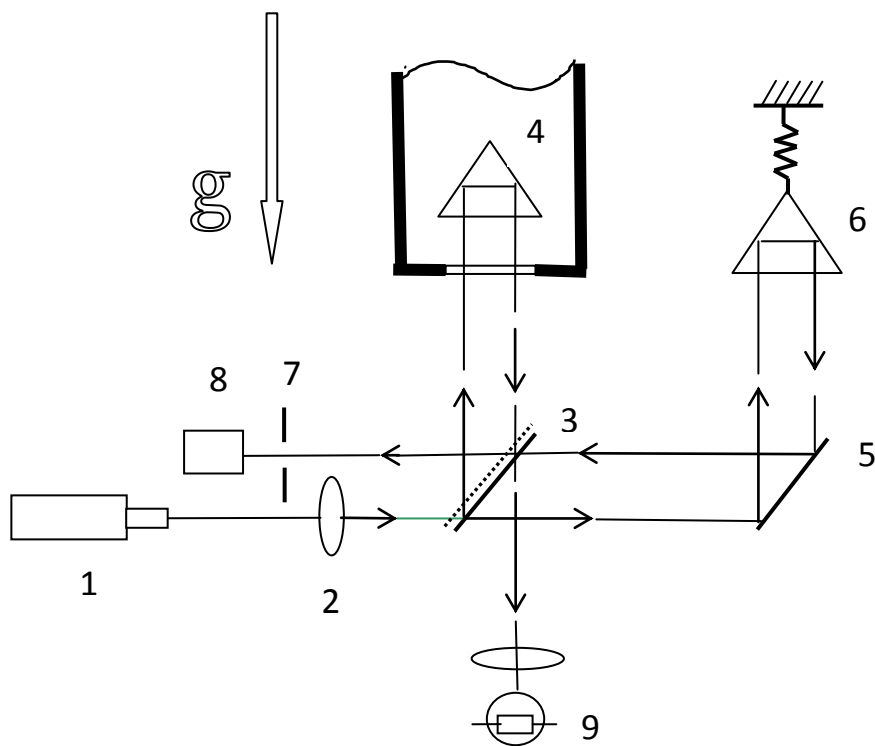


Рис. 1. 1 – лазер со встроенным блоком стабилизации; 2 – коллиматор; 3 – светоделитель; 4 – СПТ; 5 – зеркало; 6 – референтный уголкоый отражатель; 7 – апертурная диафрагма фотоприёмника; 8 – фотоприёмник; 9 – камера

В качестве источника света в интерферометре применен разработанный в Институте лазерной физики СО РАН оптический стандарт частоты ILP I₂/532-1 на базе Nd:YAG/I₂ - лазера с длиной волны излучения $\lambda=532$ нм с внутрирезонаторным удвоением частоты излучения и системы стабилизации по резонансам насыщенного поглощения в молекулярном йоде [2]. Новый оптический стандарт обладает следующими достоинствами:

- Высокой выходной мощностью излучения (более 5 мВт), что позволяет существенно улучшить соотношение сигнал/шум выходного сигнала;
- Отсутствием модуляции выходного излучения, вносящей дополнительную погрешность в определение гравитационного ускорения (в отличие от стабилизированных по йоду гелий-неоновых лазеров).

Основные параметры ILP I₂/532-1 системы:

Выходная мощность во внешнюю оптическую схему	$\geq 5 \text{ мВт}$
Относительная стабильность частоты не хуже	10^{-10} .
Относительная воспроизводимость частоты не хуже	2×10^{-10} .
Частота лазера при стабилизации	
по резонансу а1 R(56), 32-0	$563259651950 \pm 50 \text{ кГц}$
Модовый состав	TEM _{00q}
Поляризация	Линейная

Повышение точности выставления вертикали в оптической системе гравиметра

Несовпадение направления луча в измерительном плече интерферометра с направлением движения отражателя (в нашем случае с вертикалью) на угол φ приводит к косинусной погрешности в измерении перемещения: $\Delta S = S(1 - \cos \varphi)$. Такую же погрешность имеет и значение гравитационного ускорения $\Delta g = g(1 - \cos \varphi) \approx -g \frac{\varphi^2}{2}$.

В предыдущих модификациях гравиметров операция выставления вертикали по жидкому зеркалу сводилась к выравниванию на сетке телескопа пучков по яркости, при этом точность совмещения была $\sim 10''$. Погрешность измерения составляла $\sim 1,2 \cdot 10^{-9}$.

В модернизированном интерферометре используется способ выставления вертикали по контролю смещения следа измерительного луча в плоскости ПЗС - матрицы Web-камеры в процессе падения пробного тела. Получаемое изображение передается в компьютер через USB-порт. Далее, используя соответствующие программы, можно проводить контроль соответствия вертикальности лазерного луча с направлением движения падающего тела.

Проведённые расчёты и эксперименты показали, что при диаметре пучка 240 пикселей и пути падения 0,68 метра смещению на 2 пикселя соответствует изменение положения уголкового отражателя в плоскости X0Y на 26,7 мкм, что соответствует наклону измерительного плеча интерферометра на $3,9 \cdot 10^{-5}$ рад (≈ 8 угловых секунд). При этом относительная погрешность определения g не превышает $8 \cdot 10^{-10}$.

Модернизированный счетно-вычислительный блок гравиметра

Счетно-вычислительный блок обеспечивает измерение абсолютного значения ускорения силы тяжести со среднеквадратической погрешностью, не превышающей $\pm 5 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}^2$ (5 мкГал) при разрешающей способности измерения интервалов времени ≈ 100 пикосекунд и числе отсчетов интервалов пути и времени за один бросок свободно падающего тела – до 2000.

Длительность одного цикла измерений и требуемая циклограмма работы (определяется характеристиками механического блока гравиметра) могут изменяться программным образом в широких пределах. Габаритные размеры блока 504×70×389 мм, масса – 3,5 кг.

Счетно-вычислительный блок интегрирован с блоком управления гравиметром и через USB-порт связан с компьютером типа ноутбук. В измерительно-вычислительной системе лазерного баллистического гравиметра выполнены все необходимые схемы (усилители, счетчики, делители, АЦП, ЦАП и др.) для реализации метода многих отсчетов. Сбор и буферизация результатов измерений из электронно-счетного блока, организация циклограммы управления гравиметром и передача в главный компьютер результатов измерений и показаний датчиков атмосферного давления и температуры осуществляется микроконтроллером. Программное обеспечение (ПО) позволяет в широких пределах менять параметры циклограммы работы баллистического блока, осуществляет статистическую обработку результатов измерений, вычисление и внесение необходимых поправок. Кроме того, ПО позволяет производить просмотр полученных результатов как по единичному броску, так и по любой серии бросков, производить перерасчет результатов при измененных параметрах и уменьшении числа измеренных интервалов как в начале, так и в конце падения уголкового отражателя.

Основной проблемой, в решении которой участвуют авторы статьи, является исследование динамики деформационных процессов в сейсмоактивных регионах Центральной Азии и в очаговых зонах крупных землетрясений (координатор проекта – академик С.В. Гольдин). Решение этой проблемы существенно зависит от экспериментальных данных о современных движениях земной коры в точке наблюдений. Одной из основных компонент этих движений являются вертикальные движения земной поверхности. Нами показано [3], что наиболее точно эту компоненту движения можно определить по результатам высокопрецизионных гравиметрических измерений.

Высокая точность измерений значений Δg гравиметрами типа ГАБЛ позволяет регистрировать изменения высоты пункта наблюдений с погрешностью не более 1 см. Для оценки связи вариаций Δg с изменениями высоты пункта на ΔH нами было принято, что $\Delta g = \gamma \cdot \Delta H$ (γ – вертикальный градиент силы тяжести, нормальное значение которого для Земли равно приблизительно 309 мкГал/м). При $\Delta g = 3$ мкГал и $\gamma = 309$ мкГал/м $\Delta H = \Delta g / \gamma \approx 1$ см. Такая точность измерения ΔH гравиметрическим методом превосходит точность измерения вертикальной составляющей смещений спутниковыми глобальными позиционными системами типа GPS. Совместное использование гравиметрических и GPS наблюдений повышает точность и надежность измерений вертикальных движений земной коры.

В 2006 году измерениями с модернизированным гравиметром ГАБЛ-П заложена основа для мониторинга вариаций Δg в Ханты-мансийском автономном национальном округе (созданы 3 опорных пункта гравиметрической сети) и на о. Сахалин. Впервые проведены измерения на

гравиметрическом пункте Южно-Сахалинска (в здании Института морской геологии и геофизики ДВО РАН), результаты которых показаны на рис. 2.

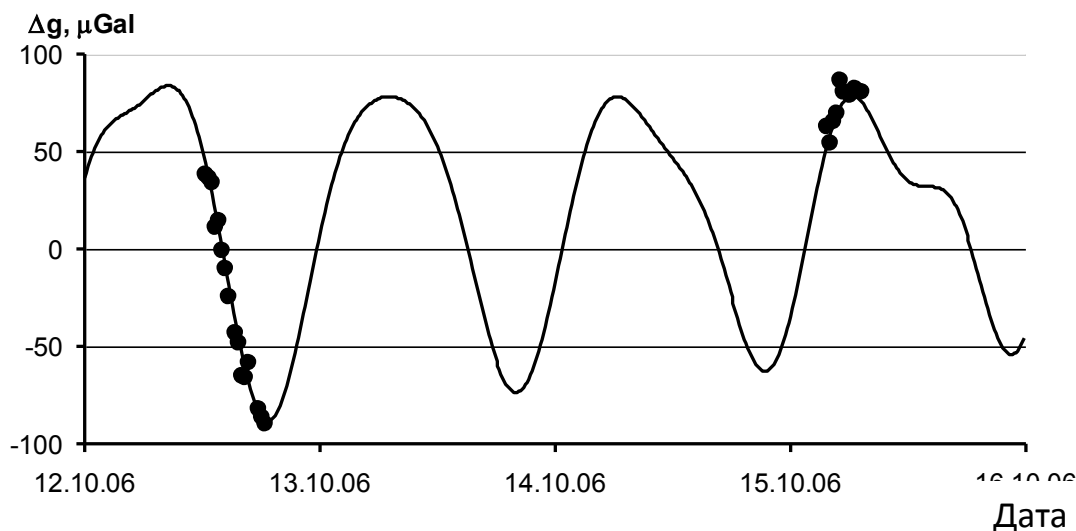


Рис. 2. Результаты гравиметрических измерений в Южно-Сахалинске

Здесь сплошная линия — теоретическое значение приливных изменений ускорения силы тяжести, точками показаны результаты измерения вариаций Δg лазерным гравиметром. За нулевую точку отсчета экспериментальных значений Δg принято средневзвешенное значение g , определенное после вычитания теоретических значений приливных вариаций Δg . Это значение в дальнейших мониторинговых наблюдениях будет исходным при исследованиях неприливных вариаций Δg . Характерной особенностью результатов проведенных измерений является сравнительно большой уровень вибросейсмических помех на данном пункте Южно-Сахалинска.

В 2006 году продолжен также мониторинг гравитационного поля в сейсмоактивных регионах юга Сибири модернизированным гравиметром ГАБЛ-П. Представляют большой интерес результаты измерения вариаций ускорения силы тяжести Δg в геофизической обсерватории Горного Алтая «Кайтанак», которая находится в 230 км от эпицентра Чуйского землетрясения 2003 года. Зарегистрировано уменьшение Δg на этом пункте в 2005 году, затем его возрастание в 2006 году. Причиной зарегистрированных изменений Δg на пункте «Кайтанак» могут быть знакопеременные вертикальные движения земной коры со скоростью до 7 см в год.

В 2006 году зарегистрировано возрастание Δg на пункте «Талая» в Байкальской рифтовой зоне (БРЗ) на 12 ± 3 мкГал по отношению к значению 2005 года, что может быть вызвано опусканием пункта наблюдения на 4 ± 1 см, а изменений наклонов и деформаций, превосходящих погрешность измерений, не обнаружено. При этом установлено, что такие движения определяются характером землетрясения: для землетрясения рифтового типа (главная компонента — растяжение) вертикальная компонента является основной, что и отразилось в изменениях поля силы тяжести. Результаты измерений вариаций

Δg в Горном Алтае и БРЗ уникальны: впервые определены значения этих вариаций до и после землетрясения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Высокопрецизионное измерение ускорения силы тяжести лазерным интерферометрическим способом / Г.П. Арнауты и др. // Приборы.- 2003.- № 6 (36).
2. Применение Nd-YAG/I₂ – лазера в качестве оптического стандарта длины в баллистическом гравиметре / Ю.Ф. Стусь и др.// Сб. материалов междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2006». Т. 4. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника. Новосибирск: СГГА, 2006.
3. Экспериментальное исследование вариаций ускорения силы тяжести абсолютными лазерными гравиметрами / Г.П. Арнауты // Автометрия. - 2004. - Т. 40, № 6.

© Г.П. Арнауты, Е.Н. Калиш, Ю.Ф. Стусь, М.Г. Смирнов, 2007

УДК 550.344

Б.М. Глинский, А.Г. Фатьянов

ИВМиМГ СО РАН, Новосибирск

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ЗОН И ВУЛКАНИЧЕСКИХ ОЧАГОВ НА ОСНОВЕ РАЗНОМАСШТАБНОСТИ ИХ СТРОЕНИЯ

В работе рассматриваются теоретические и экспериментальные исследования сейсмических зон и вулканических очагов грязевых вулканов на основе разномасштабности их строения.

В декартовой системе координат математическая постановка задачи формулируется следующим образом: определить координаты вектора смещения (u_x, u_y, u_z) для анизотропной случайно-неоднородной среды, которые удовлетворяют следующей системе уравнений:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} + F_x f(t), \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} &= \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} + F_y f(t), \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} + F_z f(t).\end{aligned}\tag{1}$$

с начальными условиями и граничными данными

$$u_x = \frac{\partial u_x}{\partial t} = u_y = \frac{\partial u_y}{\partial t} = u_z = \frac{\partial u_z}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0, \quad \sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} \Big|_{z=0} = 0.\tag{2}$$

Здесь напряжения $(\sigma_x, \tau_{xy}$ и т. д.) связаны с деформациями известными соотношениями, в которых анизотропные коэффициенты c_{ij} являются случайными функциями.

При построении математической модели среды в сейсмически опасных зонах вулканических извержений, авторы основываются на современных

представлениях о закономерности процесса поэтапного разрушения пород в очаговой зоне в виде развития разномасштабной системы трещин [1]. Описание такого процесса осуществляется с помощью телеграфного случайного процесса $\xi(z)$ [2] следующим образом. После перехода в спектральную область параметры соответствующих уравнений заменяются случайными функциями. Применительно к практическим приложениям рассматриваются средние значения сейсмического поля $\langle u \rangle$. Затем осуществляется переход в физическую область.

Основные этапы алгоритма расчёта волновых полей в случайно-неоднородных средах для сокращения выкладок иллюстрируются на модели волнового уравнения в цилиндрической системе координат:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 g}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{1}{2\pi} f(t) \cdot \frac{\delta(r)}{r}, \quad u = \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0. \quad (3)$$

Для построения модели разномасштабной неоднородности используется телеграфный случайный процесс $\xi(z)$, каждая реализация которого представляет собой функцию, имеющую некоторое случайное количество скачков на заданном промежутке [2]:

$$\xi(z) = a(-1)^{n(0,z)}, \quad (\xi(0) = a, \xi^2(z) = a^2). \quad (4)$$

Здесь $n(z_1, z_2)$ - случайная последовательность целых чисел, описывающая количество скачков на интервале (z_1, z_2) . При этом $\langle n(z_1, z_2) \rangle = \nu |z_2 - z_1|$, где ν - среднее число точек, приходящихся на единицу расстояния.

После преобразования Фурье-Бесселя волновое уравнение из (3) будет выглядеть следующим образом (несущественные индексы опущены):

$$\frac{d^2 u}{dz^2} = (k^2 - \frac{\omega^2}{c^2}) \cdot u = \nu_p^2 \cdot u. \quad (5)$$

Для рассмотрения разномасштабной среды используем (4) в (5) следующим образом:

$$\frac{d^2 u}{dz^2} = k^2 \cdot u - \frac{\omega^2}{c^2} [1 + \xi(z)] \cdot u \quad (6)$$

При этом решение уравнения (6), как некий функционал от $\xi(z)$, имеет случайный характер. Применительно к практическим приложениям, следуя [2], получим уравнение для среднего значения поля $\langle u \rangle$ из (6):

$$\frac{d^2 \langle u \rangle}{dz^2} = \nu_p^2 \cdot \langle u \rangle + \frac{\omega^3}{c^3} a^2 \int_0^z e^{-\nu(z-\zeta)} \sin(\frac{\omega}{c}(z-\zeta)) \langle u(\zeta) \rangle d\zeta. \quad (7)$$

Интегро-дифференциальное уравнение (7) сведено к дифференциальному уравнению четвёртого порядка (8):

$$\frac{\partial^4 \langle u \rangle}{\partial z^4} + 4\nu \frac{\partial^3 \langle u \rangle}{\partial z^3} + 4\nu^2 \frac{\partial^2 \langle u \rangle}{\partial z^2} + \left\{ \frac{\partial^2}{\partial z^2} + 4\nu \frac{\partial}{\partial z} + 4\nu^2 \right\} \left(\frac{\partial^2 \langle u \rangle}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial r} \right) = \quad (8)$$

$$\frac{2}{c^2} \frac{\partial^4 \langle u \rangle}{\partial z^2 \partial t^2} + 4\nu \frac{\partial^3 \langle u \rangle}{\partial t^2 \partial z} + \frac{(a^4 - 1)}{c^4} \frac{\partial^4 \langle u \rangle}{\partial t^4} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial^2 \langle u \rangle}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial r} \right) + 4\nu^2 \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \langle u \rangle}{\partial t^2}.$$

Решение (8) находится полуаналитическим методом [3].

Показано, что при отсутствии разномасштабности решение (8) совпадает с решением “обычного” волнового уравнения (3).

По данному алгоритму написана программа по расчёту сферических волновых полей в случайно-неоднородных средах в физической области и проведено моделирование разномасштабных явлений.

На рис. 1 приведена волновая картина (P-SV волны) для разномасштабной среды в случае источника типа “центр давления” для однородного полупространства (левый график). Выдача осуществлена на свободной поверхности для различных эпицентральных расстояний. Два других графика на рис. 1 – волновые поля для слагающих разномасштабную неоднородность “обычных” сред.

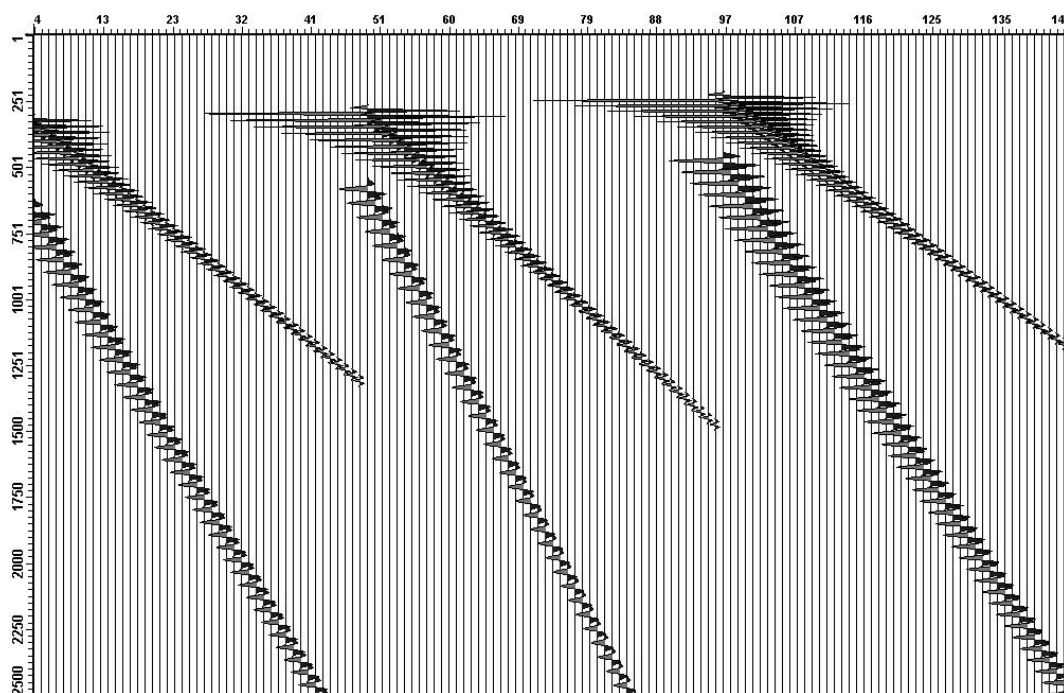


Рис. 1. Волновая картина для упругого разномасштабного полупространства

Аналогично разномасштабной неоднородности, рассматривается модель разномасштабной трещиноватости. Для этого в соответствующей эквивалентной анизотропной среде достаточно заменить анизотропные коэффициенты c_{ij} соответствующими случайными функциями.

Далее, аналогично (8) получаются уравнения для среднего поля в среде с разномасштабной трещиноватостью.

Отметим, что уравнение (7) совпадает с приближением гауссовского дельта коррелированного случайного процесса с экспоненциальной корреляционной функцией и его можно приближённо интерпретировать как уравнение распространения случайных волн в среде с флуктуирующими неоднородностями с конечным радиусом корреляции: $r_0 = 1/2\nu$ [2].

Данный метод переносится и на общий случай модели случайно-неоднородной среды с конечным радиусом корреляции, которая имеет прозрачный физический смысл. Рассмотрим его на примере уравнения в трёхмерной среде со случайным коэффициентом преломления $\xi(r)$ [4]:

$$\Delta u(r) + (k^2 + \xi(r))u(r) = 0, \quad (9)$$

Уравнение для среднего поля (9) получено в [4] с использованием функции Грина (10) для волнового числа k

$$G(\zeta) = -\frac{1}{4\pi|\zeta|} e^{ik|\zeta|}, \quad \zeta = (x, y, z) \quad (10)$$

в виде:

$$\Delta \langle u \rangle + k^2 \langle u \rangle = \int \langle \xi(r)\xi(\rho) \rangle G(r-\rho) \langle u(\rho) \rangle d\rho. \quad (11)$$

Далее будем считать, что случайный процесс $\xi(r)$ имеет характерный масштаб: $r_0 = 1/\gamma$ и его функция корреляции представляется следующим образом: $\langle \xi(r)\xi(\rho) \rangle = \sigma^2 e^{-\gamma|r-\rho|}$.

Уравнение (11) в этом случае примет следующий вид:

$$\Delta \langle u \rangle + k^2 \langle u \rangle = \sigma^2 \int G_1(r-\rho) \langle u(\rho) \rangle d\rho \quad (12)$$

Здесь G_1 функция Грина для волнового числа k_1 . При этом $ik - \gamma = i(k + i\gamma) = i \cdot k_1$. Тогда из (12) с учётом определения функции Грина получим замкнутое уравнение для средних для задачи (9):

$$(\Delta + k_1^2)(\Delta + k^2) \langle u \rangle + \sigma^2 \langle u \rangle = 0. \quad (13)$$

Из вывода уравнения (13) ясно, как получить аналогичные уравнения для произвольных сред и источников (например, с использованием [5]-[7]).

В ИВМиМГ СО РАН развиваются подходы к созданию систем для активного мониторинга магматических структур с контролируемым вибросейсмическим источником, которые позволяют получить новые знания о строении вулканов и о динамике поведения магматических структур живущих вулканов [1], [8].

В 2005 году была проведена комплексная эколого-геофизическая экспедиция Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Кубанского государственного университета Минобразования и науки РФ и Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН по экспериментальному вибросейсмическому зондированию вулкана Шуго.

Отметим, что при вибросейсмическом зондировании тела грязевого вулкана Шуго обнаружено существенное усложнение структуры поля. Вслед за головными волнами наблюдается существенное проявление хаотически распределенных цугов рассеянных волн. Это приводит к увеличению длительности преобладающей части сейсмограмм до 1.5-2.0 секунд (после вулкана Шуго) вместо 0.3 секунд (до Шуго), преобразованию спектра колебаний и т.п.

Данные вибросейсмических зондирований, проведенных на вулкане Шуго, позволили в первом приближении принять модель трехслойной горизонтально слоистой среды с границами, расположенными на глубинах 70 и 702 м. В результате численного моделирования эта модель была уточнена.

Проведённое численное моделирование подтвердило качественную возможность представления сложно построенной среды в районе вулкана Шуго трёхслойной моделью (рис. 2).

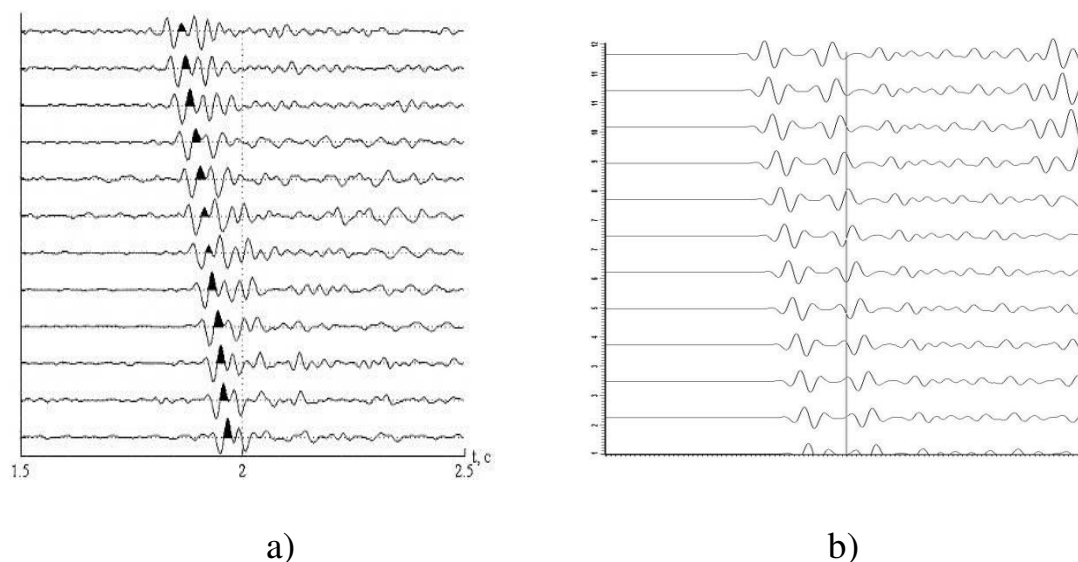


Рис. 2. а) экспериментальные виброграммы; б) теоретические виброграммы

Работа выполнена при поддержке программы РАН № 13, Интеграционных проектов СО РАН № 16, 26.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками / А.С. Алексеев.- Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. – С. 387.
2. Кляцкин В.И. Стохастические уравнения глазами физика / В.И. Кляцкин. – М.: Физматлит, 2001. – 528 с.
3. Фатьянов А.Г. // А.Г.Фатьянов. – Докл. АН СССР. – 1990. – Т. 310, № 2. – С. 323-327.
4. Ван Кампен Н.Г. Стохастические процессы в физике и химии/ Н.Г. Ван Кампен. – М.: Высш. шк., 1990. – 376с.
5. Фатьянов, А.Г., Михайленко, Б.Г. // Докл. АН СССР. – 1988. т. 301, № 4. – С. 1024 – 1027.
6. Фатьянов А.Г. // Докл. АН СССР. 1991. Т. 317, № 6. – С. 1357–1361.
7. Fatyanov A.G. Mathematical Simulation of Wave Fields in Media with Arbitrary Curvilinear Boundaries // Applied Mathematics Letters, v.18, i.11, 2005. – p. 1216–1223.
8. Glinisky B.M. Method and technology for large-scale vibroseismic experiments. // ICT 2000. Collection of papers NSTU. Novosibirsk. 2001. P. 52–56.

© Б.М. Глинский, А.Г. Фатьянов, 2007

ЭФФЕКТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СМЕЖНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ПРОБЛЕМЕ МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

В процессе мониторинга геодинамических процессов в зонах назревающих природных катастроф путем активного просвечивания физическим полем определенной природы часто проявляются сопутствующие поля иной физической природы. В частности, показано, что при вибрационном зондировании Земли с помощью мощных сейсмических вибраторов наряду с сейсмофизическим полем источники порождают акустические, электромагнитные, гидроакустические поля [1]. Возникающие поля могут взаимодействовать друг с другом на значительных удалениях от источника, порождая явление интерференции волн различной физической природы. Этим обусловлено, в частности, взаимодействие сейсмических и акустических колебаний. Механизм возникновения последних обусловлен тем, что в процессе работы вибраторов на инфразвуковых частотах наблюдаются интенсивные синхронные колебания почвы на значительной площади вблизи источника. Такие сейсмические колебания являются вторичным источником, генерирующим акустическое излучение. Применительно к двум граничащим средам – упругому нижнему полупространству и верхнему газообразному – в предположении наличия плоской границы между ними получено соотношение, количественно оценивающее долю энергии акустических волн, излучаемых сейсмическим вибратором. Если принять амплитуду возбуждающей силы источника F , скорости волн в земле и воздухе соответственно (V_P, V_S) , V_A , плотности обоих сред соответственно ρ_1 и ρ_2 , то мощность акустического излучения при $V_P = \sqrt{3}V_S = \sqrt{3}V_A$ может быть оценена соотношением [2]

$$N_a = 3.16 (\rho_2/\rho_1) F^2 \omega^2 / \pi \rho_1 V_P^3 \quad (1)$$

V_P, V_S – скорости продольных и поперечных сейсмических волн соответственно.

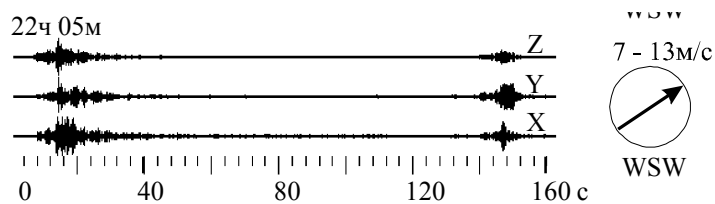
Сравнение мощности (1) с мощностью упругого излучения продольной волны P показывает, что мощность первой составляет около 2% от второй, т.е. от уровня упругого излучения. Возможность распространения акустических колебаний инфразвуковых частот (5-10 Гц) на расстояния в несколько десятков километров была доказана теоретически и подтверждена экспериментально разными исследователями [3,4]. Известно два механизма этого явления – температурная инверсия в слое воздуха у поверхности земли и наличие ветра с возрастающим профилем скорости с высотой [5].

Исследование данной особенности распространения сейсмических колебаний во взаимосвязи с акустическими представляет не только чисто научный интерес, но и имеет большую практическую значимость для решения проблемы мониторинга геодинамических процессов в очаговых зонах. Это обусловлено тем, что акустическая волна регистрируется на тех же датчиках, что и сейсмическая [3]. Причем, как будет доказано ниже результатами

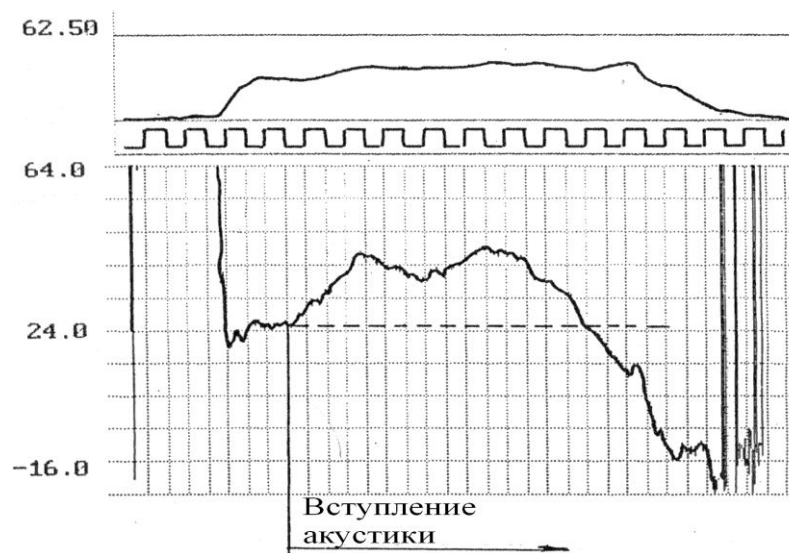
экспериментов, уровни обоих типов волн в отдельных благоприятных условиях распространения могут быть одинаковыми. В отдельных случаях акустическая волна даже может превосходить сейсмическую (рис. 3). С учетом этого возникают условия для интерференции сейсмических и акустических колебаний, приводящей к сильно выраженным флуктуациям по амплитуде и фазе полезного сейсмического сигнала. Очевидно, что эффект интерференции, прежде всего, будет проявляться по отношению к протяженным гармоническим колебаниям, поскольку их нельзя разделить во времени подобно широкополосным свип-сигналам. Дополнительным условием интерференции является превышение длительностей обоих типов зондирующих сигналов над разницей между временами пробега обоих типов волн. Интерференция, в конечном счете, отразится на точности измерения указанных параметров сейсмического поля, определяющей чувствительность метода мониторинга среды с применением вибросейсмических гармонических колебаний.

Сопоставление результатов обработки на приемном конце широкополосных свип-сигналов и гармонических сигналов представлено на рис. 1. На рис. 1а приведены результаты обработки сейсмического и акустического сигналов, излученных вибратором типа ЦВ-100 в полосе частот 6,25-9,57 Гц. Расстояние «вибратор-приемник» составило 50 км. Представленные на рисунке результаты регистрации в виде двух коротких импульсов представляют собой взаимокорреляционную свертку двух сигналов-опорного, являющегося копией излученного сигнала, и исходного сигнала, зарегистрированного с помощью сейсмоприемников. Результаты свертки располагаются на временной оси соответственно на 7,8 с и 145 с. Первый импульс соответствует сейсмическому отклику среды, второй - акустическому.

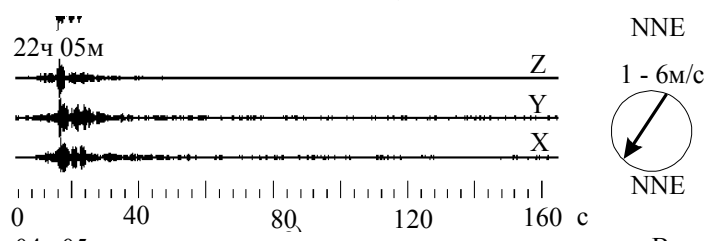
Случай, когда акустическая волна на сейсмодатчиках не регистрируется в связи с меняющимися метеоусловиями (ветер дует навстречу фронту распространения акустической волны), отражен на рис. 1с. Соответствующие направления и сила ветра приведены с правой стороны обоих рисунков.



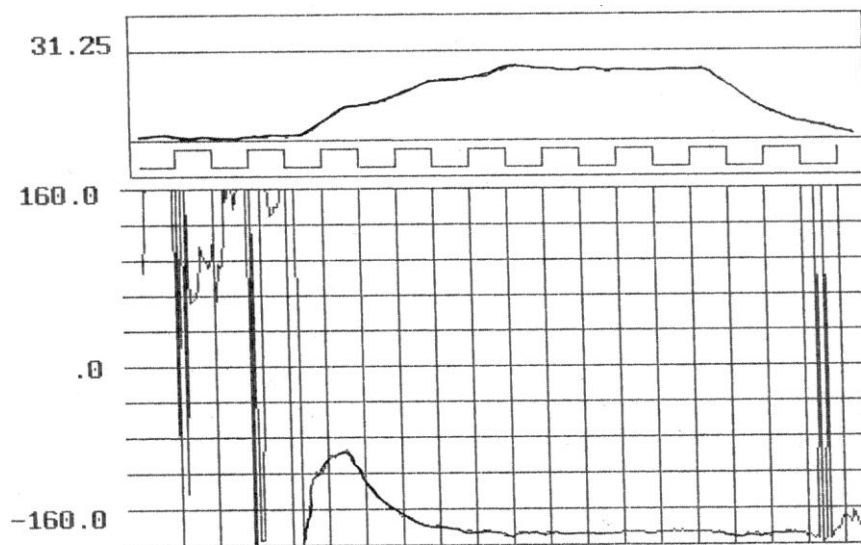
а)



б)



с)



д)

Рис. 1

По отношению к гармоническим режимам зондирования результаты измерения параметров сигналов, соответствующих условиям распространения волн на рис. 1а и рис. 1с, представлены на рис. 1б и 1д соответственно. Отсюда вытекает, что первый случай - наличия акустической волны - характеризуется интерференцией обоих типов сигналов - сейсмического и акустического. При этом естественно предположить, что характер интерференционной картины меняется во времени в зависимости от метеоусловий, прежде всего от

направления и силы ветра. Такая зависимость подтверждается результатами измерений амплитуды и фазы интерференционного сигнала в гармоническом режиме излучения на частоте 6.75 Гц, представленными на рис. 1б. Здесь в верхней части рисунка представлен результат измерения амплитуды слабого гармонического сигнала на фоне многократно превышающих микросейсм, в нижней части - поведение фазы сигнала φ . Измерение параметров осуществляется на основе применения квадратурного алгоритма обработки [6]. Флуктуации оценок обоих параметров во времени свидетельствуют об их неустойчивости, обусловленной нестабильностью самого акустического канала и, прежде всего, акустической скорости.

В подтверждение этого на рис. 2 представлены результаты измерений времен распространения акустических волн в разных экспериментах с учетом направления и силы ветра в период проведения экспериментов. Как следует из рисунка, на расстоянии «источник-приемник» 50 км флуктуации времен распространения наблюдаются в пределах 143- 156 сек, т.е. около 8%. Сравнительно небольшие временные флуктуации могут приводить к существенным изменениям фазы сигнала. Действительно, флуктуации акустической скорости по отношению к сейсмической приводят к возникновению доплеровского сдвига частоты, описываемого в виде

$$f_d = f_0 \Delta V_a / V_c,$$

где ΔV_a – флуктуации акустической скорости относительно сейсмической скорости V_c , f_0 – частота зондирующих колебаний. Сдвигу f_d будет соответствовать сдвиг по фазе $\Delta\varphi = 2\pi f_d \cdot t = 2\pi f_0 t \Delta V_a / V_c$. Небольшие изменения скорости во времени могут приводить к значительным колебаниям фазы гармонических колебаний, что и наблюдается на рис.1б. Очевидно, что вариации оценок фазы колебания в рассматриваемом случае могут служить в определенных условиях мерой неустойчивости параметров атмосферы на трассе распространения волн.

Следует отметить, что вариации амплитуд акустической волны в значительно большей степени связаны с изменением метеоусловий, чем вариации времен прихода. Наблюдается изменение амплитуд в 3-5 раз при схожих метеоусловиях, а иногда и полное исчезновение волны при изменении метеоусловий.

В случае, когда акустическая волна отсутствует в связи с меняющимися метеоусловиями, на выходе среды с постоянными параметрами, каковой является Земля, имеют место устойчивые оценки параметров сейсмического поля $\{A, \varphi\}$ в установившемся режиме колебаний (рис. 1д). Такая же картина на рис. 1б наблюдается на участке между временами прихода сейсмических и акустических колебаний.

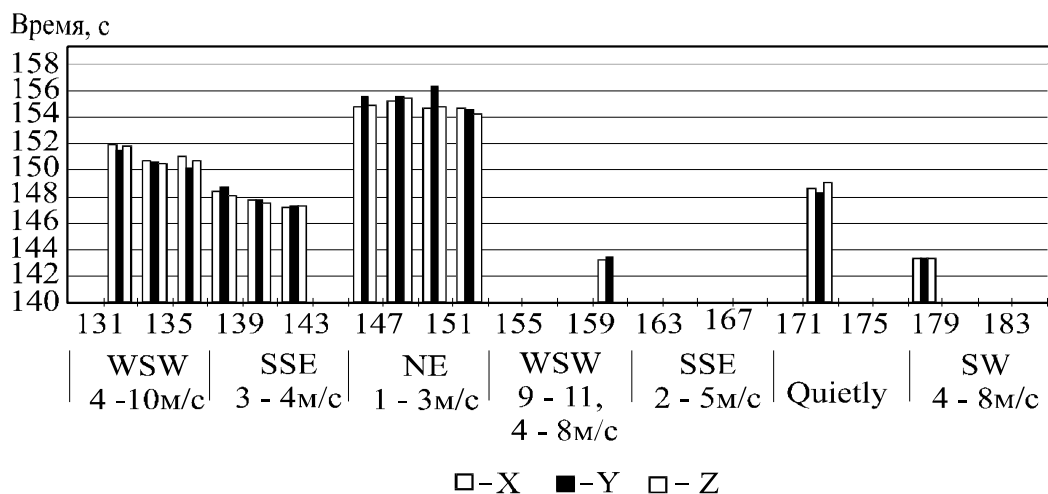


Рис. 2

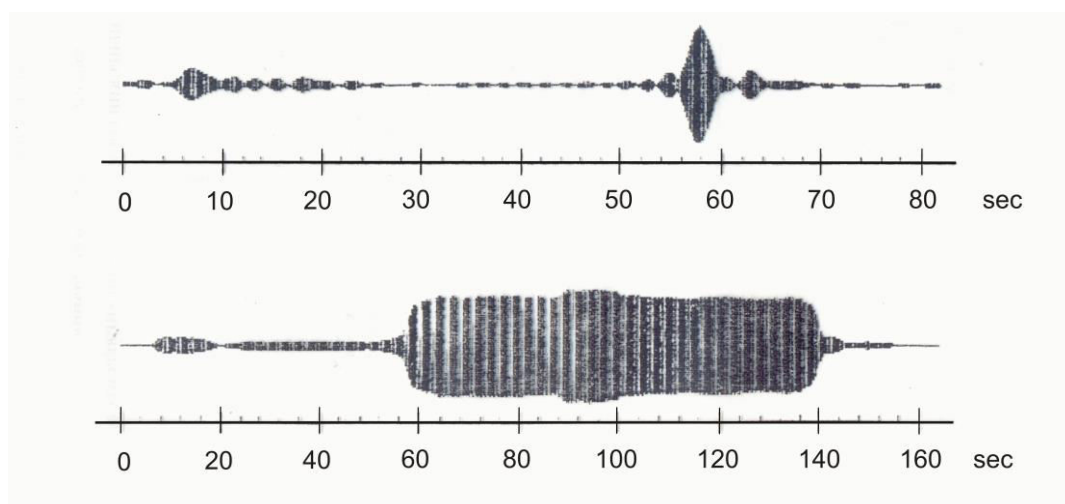


Рис. 3. Отклики сред «земля-атмосфера» на зондирующие широкополосный и гармонический сигналы

Отсюда следует вывод, что для получения устойчивых оценок параметров $\{A, \varphi\}$ измерения следует производить на данном участке по нескольким коротким сеансам зондирования с целью уменьшения дисперсии получаемых оценок. Для примера на рис.3 представлен отклик граничащих сред - земля-атмосфера - в ответ на зондирующий широкополосный (вверху) и гармонический (внизу) сигналы на удалении 20 км от источника. Первый сигнал занимал полосу частот 5.5–8.5 Гц, частота второго составляла 6.4 Гц. При этом сейсмический отклик на второй из сигналов (гармонический) лежит в интервале 3-50 сек, далее следует превышающий его по уровню акустический отклик. В данном случае оценивание параметров сейсмического отклика возможно на отрезке времени 47 сек.

Заключение

Рассмотрено взаимодействие сейсмических и акустических волновых полей, порождаемых сейсмическим вибратором. Показано, что следствием этого взаимодействия являются процессы интерференции сейсмических и акустических сигналов, приводящие к существенным вариациям полей

амплитуд и фаз сейсмических колебаний в пространстве. Такие вариации обуславливают большие погрешности оцениваемых параметров, используемых в качестве информативных в проблеме активного сейсмического мониторинга зон зарождающихся природных катастроф (землетрясений, вулканов и др.). Выработаны рекомендации по исключению подобных погрешностей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. B.M. Glinsky, M.S. Khairtdinov, V.V. Kovalevsky. Nonlinear Wave Effects in the Powerful Seismic Vibrators Zones. Nonlinear Acoustics at the Beginning of the 21st Century. MSU, Moscow, 2002, v.1, pp. 327–330.
2. Заславский Ю.М. К оценке мощности инфразвука, побочно излучаемого в атмосферу при вибрационном просвечивании Земли / Ю.М. Заславский // Физика Земли. – 1982. – № 9. – С. 86-89.
3. B.M. Glinskii, V.V. Kovalevskii, M.S. Khairtdinov. Relationship of wave fields from powerful vibrators with atmospheric and geodynamic processes. Geology and Geophysics, vol.40, No.3, pp. 422–431, 1999.
4. Генерация и распространение инфразвука в атмосфере при работе мощных сейсмодвижителей / В.Т. Гуляев и др. // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. – 2001. – Т. 37, № 3. – С. 303–312.
5. Исаакович М.А. Общая акустика / М.А.Исаакович. М.: «Наука», 1973.
6. Хайретдинов М.С. Методы распределенной обработки вибросейсмических сигналов / М.С. Хайретдинов. Материалы Международной научно-технической конф. «Информационные системы и технологии» НГТУ, Новосибирск, 2000. – Т. 3. – С. 607–612.

© М.С. Хайретдинов, 2007

УДК 551.24:504.55.06

Г.Ф. Седухина

ИВМиМГ, Новосибирск

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ЭФФЕКТЫ НЕЛИНЕЙНОСТИ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЛНОВОГО ПОЛЯ

Вибрационное зондирование Земли сопровождается проявлением двух типов нелинейных процессов – излучения [1] и распространения [2].

Учёт обоих процессов будет способствовать повышению чувствительности вибросейсмического метода выявления и контроля аномальных зон в однородной среде. Такие зоны возникают в районах зарождения природных катастроф – землетрясений извержений вулканов и др. Как было показано в [3], параметры нелинейности сейсмического волнового поля чувствительны к аномалиям типа трещинообразования, дилатансии. В связи с этим оценивание указанных параметров на этапах излучения и распространения сейсмических колебаний является необходимым для успешного решения последующих задач.

В данной работе приводятся результаты анализа данных по вибросейсмическому зондированию Земли с помощью вибратора ЦВ-100 на удалениях источник-приёмник до 355 км.

Результаты анализа соответствуют широкополосным свип-сигналам, а также гармоническим. Параметры нелинейности волнового поля оцениваются в

виде отношений амплитуд вибрационных сейсмограмм вторых и первых гармоник.

В качестве примера на рис. 1 приведены вибрационные сейсмограммы, полученные вблизи источника (на удалении 0,3 км) в результате свёртки зарегистрированных сигналов с опорными сигналами на основных частотах зондирования – $5,5 \div 8,5$ Гц (рис. 1а) и на гармониках в полосе 11-17 Гц (рис. 1б). Значения максимумов сейсмограмм представлены над каждой из них. Здесь уже указаны типы компонент. Горизонтальная компонента X здесь и на всех последующих сейсмограммах ориентирована на вибратор. Отношения максимумов амплитуд вторых и основных гармоник колебаний занесены в табл. 1. Им соответствует строка дальности 0,3 км.

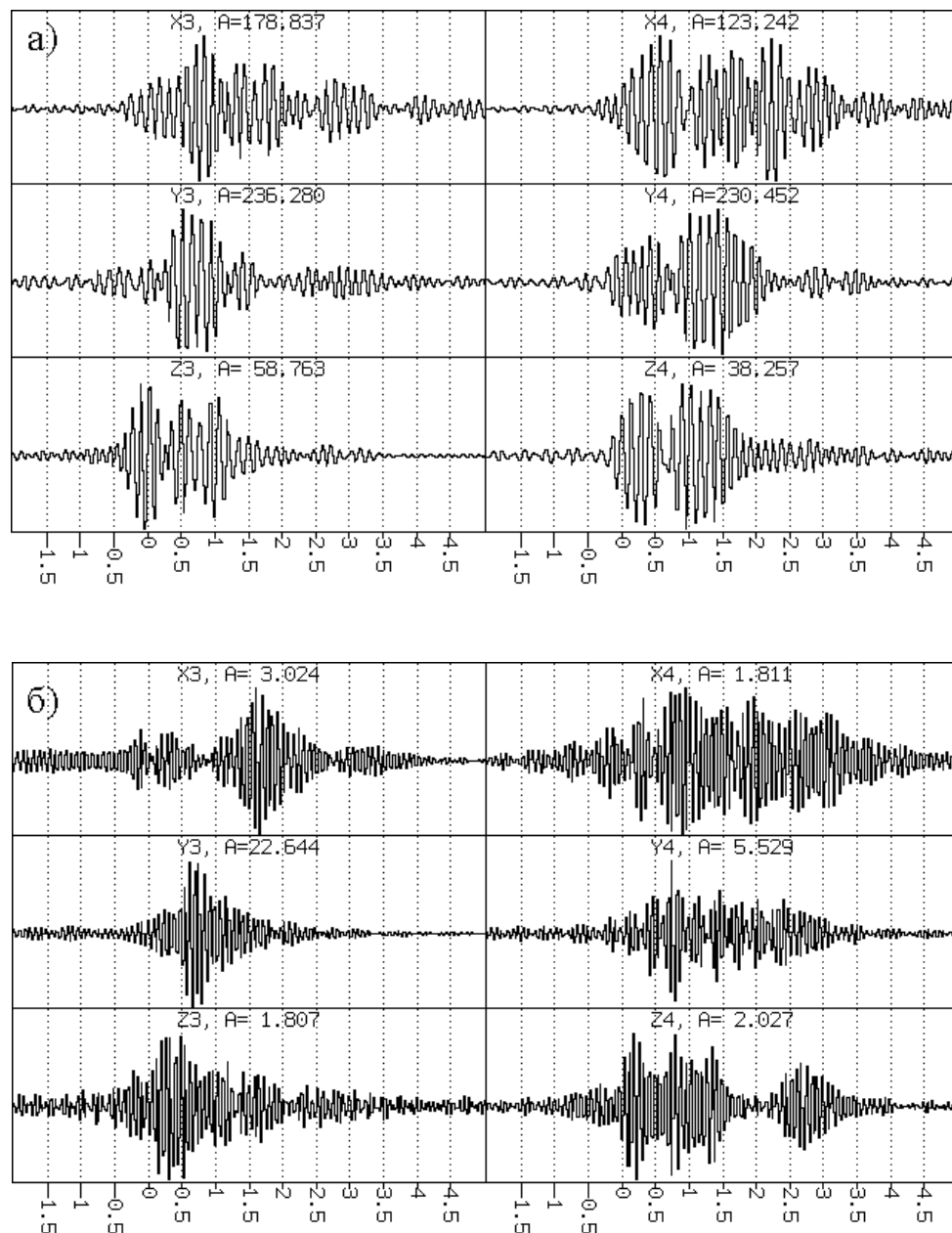


Рис. 1

Таблица 1

Тип вибратора	Расстояние (км)	Частота (Гц)	k_n		
			X	Y	Z
ЦВ-100	0,05	6,0	0,07	0,02	0,35
		6,5	0,04	0,15	0,08
		7,0	0,01	0,15	0,03
		7,5	0,01	0,04	0,03
	355	6,3	0,5	0,25	0,38
		7,0	0,9	0,38	0,27
	0,3	5,5÷8,5	0,016	0,05	0,03
	20	5,5÷8,5	0,15	0,1	0,03
	50	5,5÷8,5	0,15	0,03	0,18
ЦВ-40	35	8,5	0,25	0,11	0,06

Выше расположены значения коэффициентов нелинейности формы колебаний, соответствующих дальностям 0,05 км (т.е. непосредственно в зоне вибратора ЦВ-100) и 355 км, а также набору частот зондирования в пределах 6,0 ÷ 7,5 Гц. Соответствующие гистограммы значений параметра нелинейности k_n , отнесённые к обеим дальностям, представлены на рис. 2а, б. Соответствие столбцов компонентам указано в верхнем правом углу рис. 2а. На рис. 2б представлены значения k_n как функция отношений амплитуд вторых и основных гармоник на частотах зондирования 6,3 и 7,0 Гц. Соответствие столбцов частотам также показано в правом верхнем углу.

Аналогичные гистограммы по отношению к компонентам Y, Z представлены на рис. 3а, б соответственно. Сопоставление гистограмм и результатов табл. 1 позволяет сделать следующие выводы:

- С увеличением длины пробега колебаний параметры нелинейности волнового поля существенно возрастают. В гармоническом режиме зондирования на резонансной частоте (около 7 Гц) искажения k_n могут возрасти с 10% в зоне источника до 90% в дальней зоне;

- Наиболее чувствительны к эффекту нелинейности колебания, регистрируемые по горизонтальной компоненте, ориентированной в направлении «источник-приёмник»;

- Увеличение эффекта нелинейности волнового поля с расстоянием наиболее выражено в гармоническом режиме зондирования в сравнении с широкополосным режимом. В первом случае наблюдается значительное увеличение k_n – с 10%-ного значения вблизи до 90% в дальней зоне (на удалении 355 км). В тоже время, хотя и менее значимый эффект наблюдается и для широкополосного режима зондирования – от (3 ÷ 5)% вблизи источника до (15÷18)% в дальней зоне (табл. 1). Объяснение этого явления представляется очевидным: гармонический режим колебаний является устойчивым. Здесь имеет место значительная раскачка источника и нарушение условия непрерывности его связи со средой, особенно вблизи резонанса. Это, в свою очередь, порождает высшие гармоники [1].

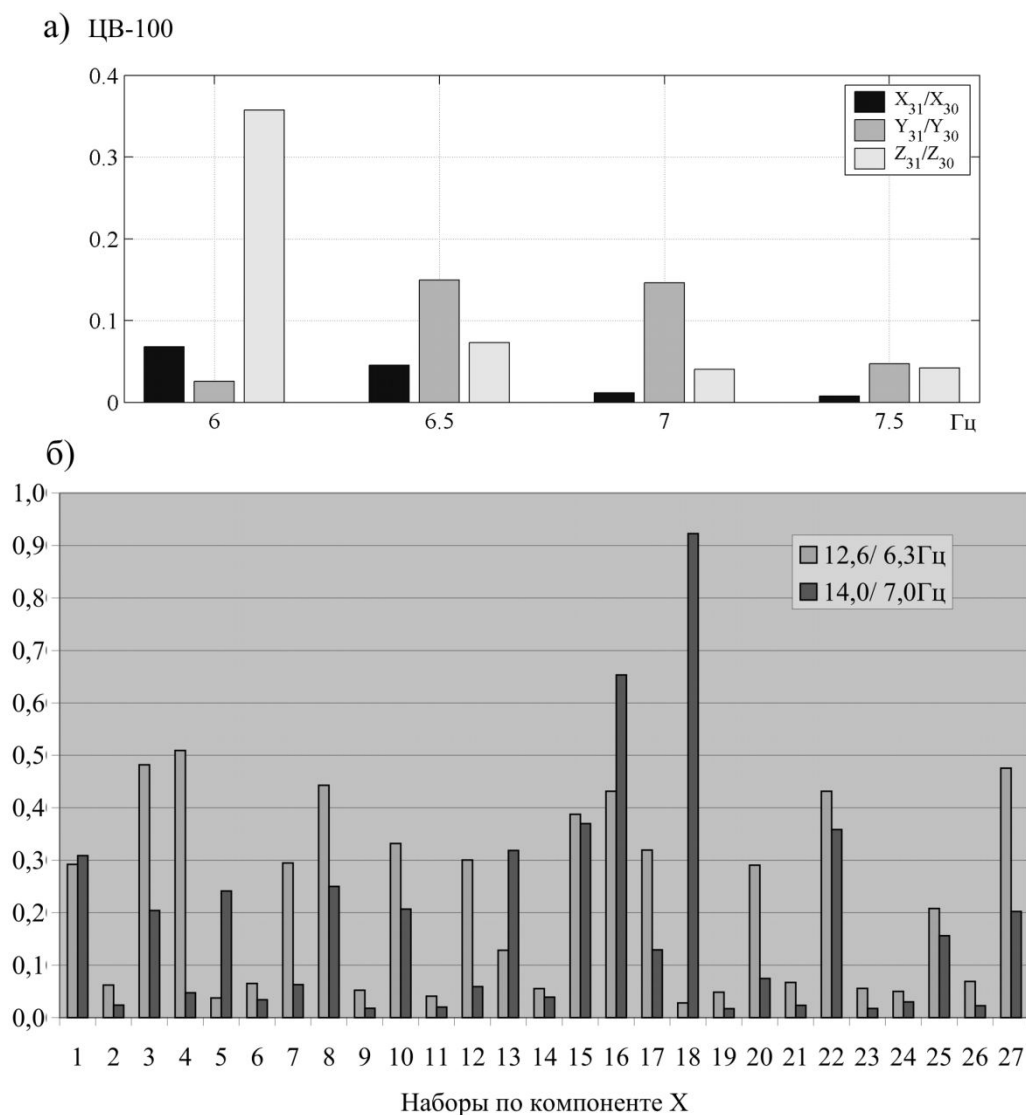


Рис. 2. Соотношение амплитуд первой и второй гармоник:

а) в зоне источника; б) на удалении 355 км по компоненте X

Представляется важным вывод о более высокой чувствительности горизонтальной компоненты пространственного сейсмического поля к «накоплению» нелинейных эффектов в процессе распространения сейсмических колебаний в направлении активного зондирования среды. Этот вывод может оказаться полезным для технологии проведения активного вибросейсмического мониторинга очаговых зон. При этом наиболее важная роль, по-видимому, будет оставаться за поперечными волнами.

Значимые оценки коэффициента нелинейности получены по отношению к вибратору ЦВ-40. Как видно из табл. 1 на расстоянии 30 км от источника значения коэффициента нелинейности достигают 25%.

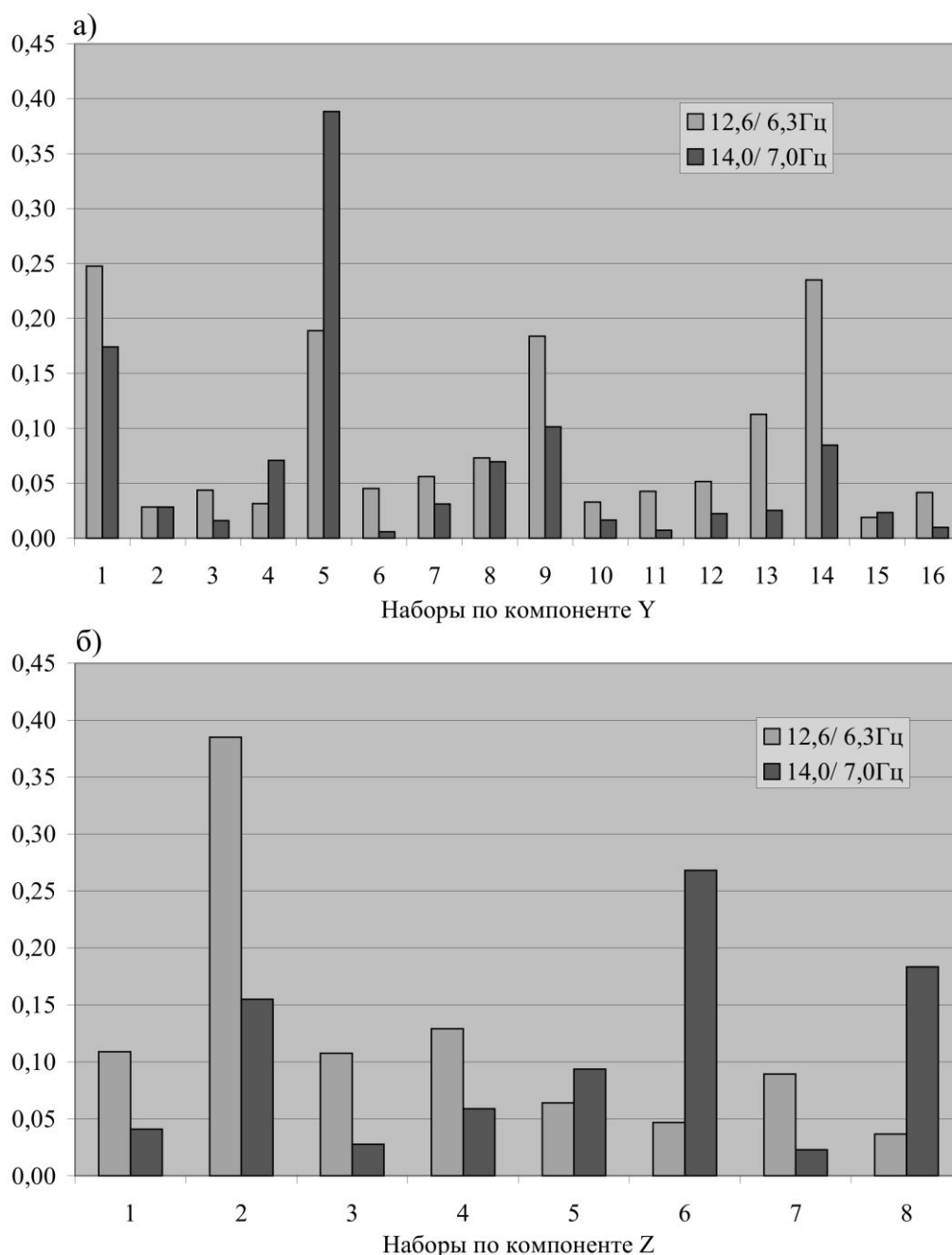


Рис. 3. Соотношение амплитуд первой и второй гармоник на удалении 355 км по компонентам Y, Z

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. B.M. Glinsky, M.S. Khairtdinov, V.V. Kovalevsky. Nonlinear wave in the Powerful Seismic Vibrators Zones. // Nonlinear Acoustics at the Beginning of the 21st Century edited by O.V. Rudenko and O.A. Sapozhnikov (Faculty of Physics, MSU, Moscow, 2002) vol.1, pp 327-330.
2. Khairtdinov M.S. The nonlinear wave effects in vibroseismic // Bull. Nov. Comp. Center, Math. Model. In Geoph.– 2003.– Iss.8. – PP 59-69.

© Г.Ф. Седухина, 2007

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН В НЕЛИНЕЙНО-УПРУГИХ ТРЕЩИНОВАТЫХ СРЕДАХ

В работе [1] выдвинута и обоснована идея использования параметров нелинейности волнового поля в качестве одного из прогностических параметров, характеризующих степень дилатансии в зонах зарождения и развития процессов подготовки природных катастроф – землетрясений, извержений вулканов и др.

С целью оценивания количественных характеристик связи между характеристиками трещиноватости среды и параметрами нелинейности волнового поля исследована соответствующая математическая модель [2] и проведено сопоставление полученных численных оценок с характеристиками нелинейности волнового поля, измеренными в экспериментах.

В качестве модели среды принято однородное и изотропное тело с модулями упругости K_1 , μ_1 и плотностью ρ_1 , в котором равномерно рассеяны и хаотически ориентированны пустоты сфероидальной формы. Форма пустот определяется параметром α , равному отношению длины оси вращения сфероида к длине его второй оси. Распределение относительного объема пустот по параметру формы между его минимальным и максимальным $\alpha_{\min}$ и максимальным $\alpha_{\max}$ значениями описывается функцией $\varphi(\alpha)$.

Моделируемая среда находится под воздействием статического давления p_0 и динамического p давления, создаваемого распространяющейся в ней упругой волной.

Предполагается, что длина наиболее высокочастотной упругой волны, распространяющейся в моделируемой среде, значительно превышает линейные размеры наибольших пустот. Для случая распространения в моделируемой среде плоских монохроматических упругих волн вдоль оси ОХ при наличии только продольных движений в среде ($u_x \neq 0, u_y = u_z = 0$) уравнение распространения имеет вид:

$$\rho_0 \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} - M_0 \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} = B \frac{\partial u_x}{\partial x} \cdot \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} \quad (1)$$

При граничном условии $u_x(0, t) = U_x \sin \omega t$ решение уравнения во втором приближении примет вид [2]:

$$u_x = U_x \sin \omega \left(t \mp \frac{x}{c_p} \right) - \left(\frac{U_x}{2} \right)^2 \frac{B}{M_0} k_p^2 x \cos 2(\omega t \mp k_p x), \quad (2)$$

$$\text{где } k_p = \omega / c_p, \quad B = -3\varphi_{om} \frac{k_0}{p_0} \left(a \frac{k_0^2}{k_1} + \frac{4}{3} b \frac{\mu_0^2}{\mu_1} \right) f(\alpha_0), \quad M_0 = k_0 + \frac{4}{3} \mu_0.$$

Получены соотношения для эффективных модулей упругости среды со сфероидальными пустотами:

$$K_{(1)} \approx K_0 \left[1 - \varphi_{om} a \frac{K_0^2}{p_0 K_1} f(\alpha_0) u_{ll} \right], \mu_{(1)} \approx \mu_0 \left[1 - \varphi_{om} b \frac{K_0 \mu_0}{p_0 \mu_1} f(\alpha_0) u_{ll} \right], \quad (3)$$

где $K_0 \approx K_1 (1 + \varphi_{om} a F)^{-1}$, $\mu_0 \approx \mu_1 (1 + \varphi_{om} b F)^{-1}$,

$$a = \frac{4(1 - \nu_1^2)}{3\pi(1 - 2\nu_1)}, \quad b = \frac{8(1 - \nu_1) \cdot (5 - \nu_1)}{15\pi(2 - \nu_1)}, \quad f(\alpha_0) = \frac{\varphi(\alpha)}{\varphi_{om}}, \quad \varphi_{om} = \int_0^{\alpha_{max}} \varphi(\alpha) d\alpha -$$

начальное значение трещинной пористости среды; $F = \int_{\alpha_0}^{\alpha_{max}} f(\alpha) / \alpha d\alpha$;

ν_1 – коэффициент Пуассона; K_0 – эффективный модуль всестороннего сжатия невозмущенной микротрещиноватой среды; u_{ll} – сумма диагональных компонентов тензора динамической деформации.

Из выражения (2) следует, что в трещиноватой среде появляются гармоники удвоенной частоты, уровень которых определяется коэффициентом B , зависящим от характера трещиноватой среды, числом Маха $M = U_x \omega / c_p$ и длиной пути пробега волны x . В последнем случае уровень второй гармоники возрастает с увеличением расстояния от источника x . Это явление было отмечено ещё ранее как накапливающаяся нелинейность в нелинейно-упругой среде. С учетом (2) коэффициент нелинейности формы монохроматической волны, определяемой соотношением амплитуды второй гармоники к основной составит:

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{1}{8} \frac{U_x B k_p^2 x}{M_0} \quad (4)$$

Данное выражение является дальнейшим расширением аналогичного соотношения, полученного для случая распространения сейсмических колебаний в однородных средах с диссипацией энергии и дисперсией волн [3].

Уравнение (4) связывает параметры нелинейности волнового поля в очаговой зоне с характером трещиноватости среды, определяемой параметром B , зависящим от размеров трещин и плотности их распределения, плотностей и модулей упругости среды. С учетом такой зависимости и имея в виду современное представление о развитии очага землетрясения в виде процесса развития системы трещин представляется, что динамические параметры нелинейности волнового поля могут быть успешно использованы в качестве одного из прогностических количественных параметров, характеризующих процесс развития очага [1].

В соответствии с уравнением (4) был проведен анализ зависимости нелинейности волнового от характеристик трещиноватости среды, амплитуды колебательной скорости частиц среды U_x , расстояния x . В качестве среды был выбран водонасыщенный трещиноватый гранит со следующими параметрами упругости: модуль Юнга $E = 2.216 \cdot 10^9$ Па, коэффициент Пуассона $\nu = 0.44296$, статическое давление $p_0 = 10^3$ Па, частота $= 10$ Гц, скорость распространения продольной волны в граните $C_p = 2500$ м/с. Были выбраны три области изменения геометрических параметров трещин (в метрах):

1. $d_{\min}=[0.001,0.01]$; $d_{\max}=0.2$; $d_{\text{верт}}=0.01$;
2. $d_{\min}=[0.012,0.05]$; $d_{\max}=0.2$; $d_{\text{верт}}=0.01$;
3. $d_{\min}=[0.052,0.015]$; $d_{\max}=0.2$; $d_{\text{верт}}=0.01$;

Здесь $d_{\min}$, $d_{\max}$ – минимальный и максимальный размеры трещин по горизонтали, $d_{\text{верт}}$ – размеры трещин по вертикали. Плотность распределения трещин в объеме описывается равномерной функцией распределения.

Для выбранных параметров на рис. 1 приведены зависимости коэффициента нелинейности формы монохроматической волны от соотношения осей эллипсоида, описывающую элементарную трещину. Графики построены для пути пробега $x = 10$ км.

На рис. 2 приведены графики зависимости коэффициента нелинейности формы монохроматической волны от пути пробега волны x (в метрах) во флюидонасыщенном граните с $c_p=2500$ м/с, $c_s=800$ м/с и с равномерным распределением трещин в среде. Графики соответствуют разным геометрическим размерам трещин, приведенным в подрисуночном тексте.

Из анализа рис. 1, 2 следует, что коэффициент нелинейности возрастает

– С ростом размеров трещин и с ростом амплитуды колебательной скорости U_x . При $U_x=2.7 \cdot 10^{-8}$ u_2/u_1 меняется в пределах от 0.05 и до 0.17; при $U_x=70 \cdot 10^{-8}$ – в пределах от 0.2 до 0.45 на 10-ти километровом пути пробега колебаний (рис. 1).

– С увеличением пути пробега волны. Из графиков на рис 2 следует, что в трещиноватой среде в зависимости от геометрических размеров трещин рост его может происходить в пределах от 0 до 0.7 на длине пробега $x=100$ км.

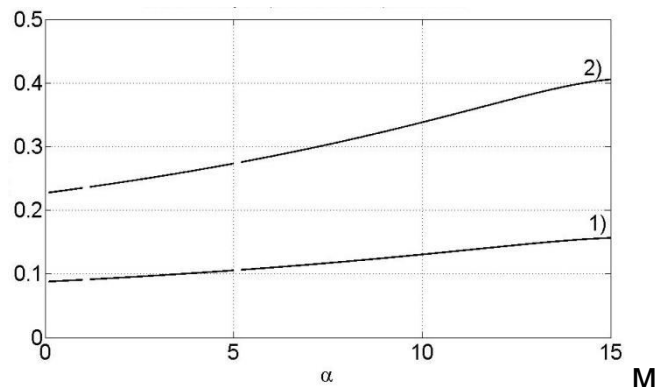


Рис. 1. Путь пробега волны $x = 10$ км, колебательная скорость.

- 1) $U_x = 2.7 \cdot 10^{-8}$ м/с; 2) $U_x = 70 \cdot 10^{-8}$ м/с

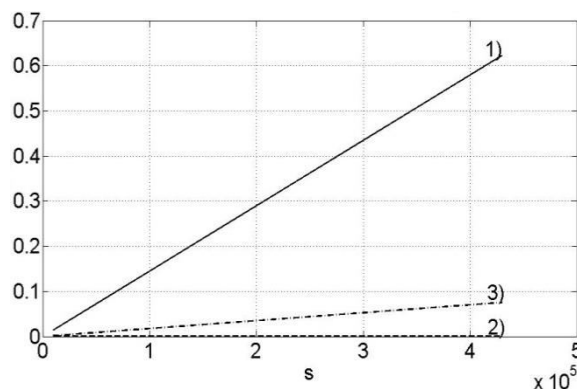


Рис. 2

$$\alpha_{\min}=0.0067, \alpha_{\max}=0.067; \alpha_{\min}=0.06, \alpha_{\max}=0.5; \alpha_{\min}=0.48, \alpha_{\max}=0.8$$

Другое соотношение, описывающее «накопление» нелинейного эффекта в средах с диссипацией и поглощением, определяется зависимостью амплитуды второй гармоники от расстояния, описываемой соотношением [3]:

$$a_2 = \frac{K_c r \omega^2 a_1^2}{8c_{p,s}^2} \quad (5)$$

Здесь r – длина пробега волны, K_c – коэффициент нелинейности среды, определяемый выражением $K_c \approx \rho v (\partial v / \partial p) \approx (\partial v / v) \partial \theta$, в котором ρ – плотность, $\Delta \theta$ – изменение объемной деформации, Δp – изменение давления, a_1 – амплитуда первой гармоники, $c_{p,s}$ – скорость продольной или поперечной волн. Значение этого коэффициента, оцененное рядом авторов, составляет около $K_c \approx 10^3$. В качестве иллюстрации, на рис. 3а, 3б представлено семейство графиков, которые демонстрируют «накопление» нелинейного эффекта в зависимости от расстояния в диапазоне дальностей «источник-приемник» 0.3÷355 км. Рассматриваются случаи продольных и поперечных волн в среде.

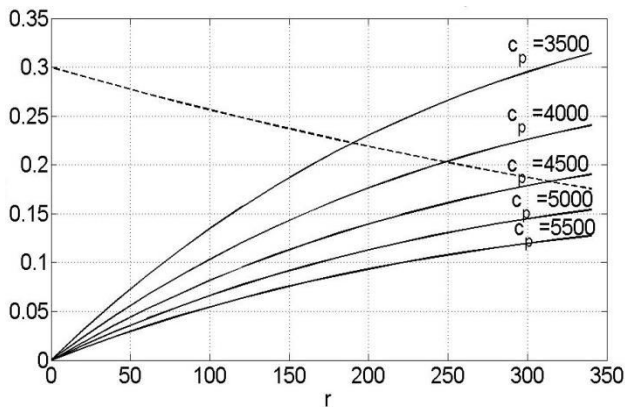
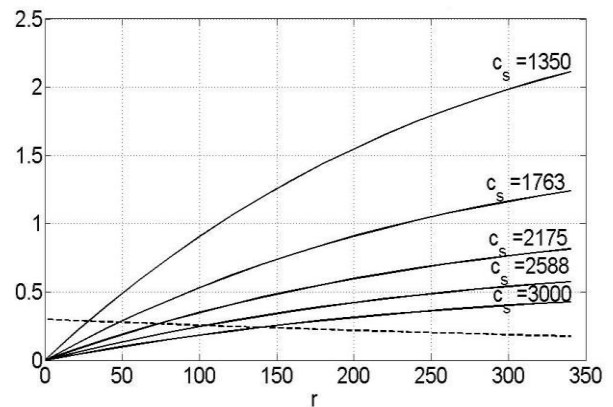
а) Скорости продольных волн c_p ;б) Скорости поперечных волн c_s .

Рис. 3. Зависимость коэффициента нелинейных искажений от расстояния при различных сейсмических скоростях

На параметры нелинейности волнового поля в дальней зоне оказывает влияние эффект нелинейности излучения самим вибратором [5]. При этом уменьшение первоначальных соотношений вторых и основных гармоник $-a_{02}/a_{01}$, наблюдаемое в зоне источника, в зависимости от расстояния уменьшается по закону:

$$\frac{a_{f2}(r)}{a_{f1}(r)} = \frac{a_{02}}{a_{01}} \exp[-(\alpha_2 - \alpha_1)(r - r_0)], \quad (6)$$

где a_{01} , a_{02} – амплитуды обоих колебаний вблизи источника на границе сферы радиуса r_0 ; a_{f1} , a_{f2} – амплитуды основной и второй гармоник на удалении

r от границы сферы радиуса r_0 ; $\alpha_{1,2} \approx 2.5 \cdot 10^{-4} f_{1,2} (1/\text{км})$ – коэффициенты поглощения по отношению к колебаниям частот f_1, f_2 . На рис. 3а, 3б изображены пунктиром экспоненциальные графики соотношений вторых и основных гармоник в зависимости от расстояния в соответствии с уравнением (6), которые монотонно убывают в пределах $0.3 \div 0.18$ в зависимости от расстояния ($0.3 \div 355$ км). Радиус сферы $r_0 = 0.3$ км; основная частота зондирования монохроматического сигнала $f_1 = 6.3$ Гц, его вторая гармоника $f_2 = 12.6$ Гц.

«Накопление» нелинейного эффекта в средах с неоднородностями было обнаружено в ряде экспериментов по вибрационному зондированию Земли на дальностях «источник-приемник» в сотни км [1]. В качестве примера на рис. 4а, б приведены амплитудные спектры основной и второй гармоник, полученные на дальности регистрации 355 км. Соотношение между амплитудами гармоник составляет 0.48. В тоже время, согласно графикам 3а, б, соотношение соответствующих гармоник, обусловленное источником колебаний, должно составлять около 0.18. Следовательно, повышение этого значения в точке 355 км можно отнести за счет влияния нелинейности среды.

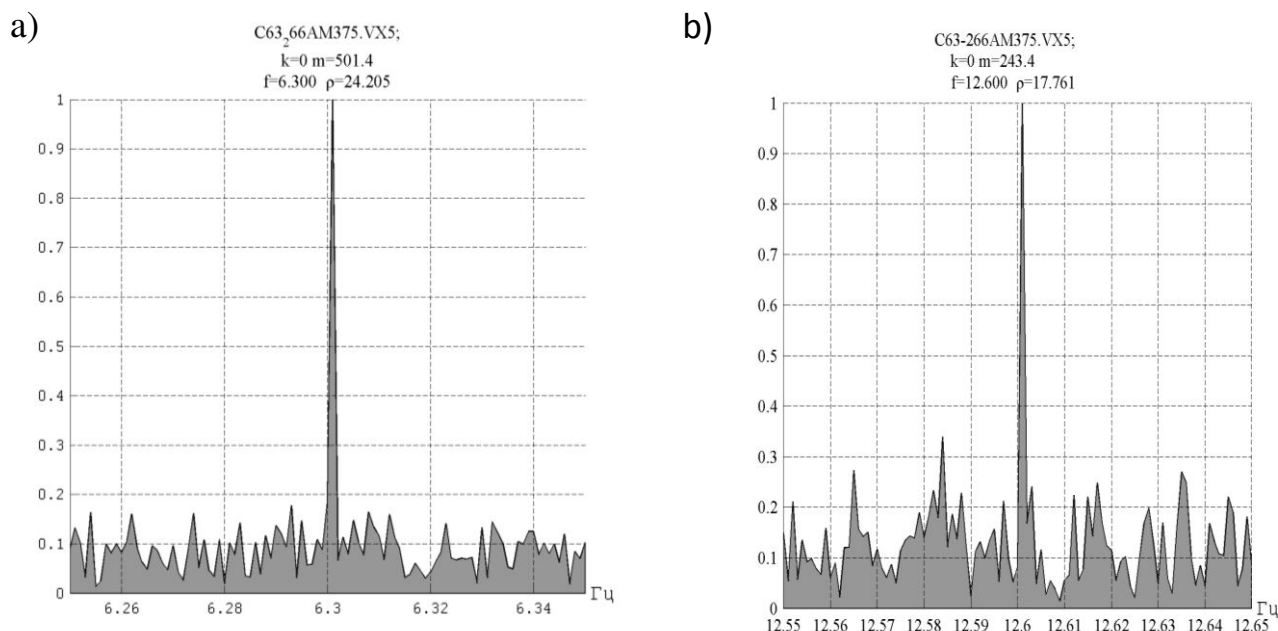


Рис. 4. Спектрограммы первых и вторых гармоник на расстоянии 355 км

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Khairtdinov M.S. The nonlinear wave effects in vibroseismic // Bull. Nov. Comp. Center, Math. Model. In Geoph. – 2003. – Iss.8. – PP. 59–69.
2. Вербицкий Т.З. Особенности распространения упругих волн в нелинейно-упругих пористых средах. / Вербицкий, Т.З. // Проблемы нелинейной сейсмологии. – 1987. – С. 94–103.
3. Зарембо Л.К. Введение в нелинейную акустику / Л.К. Зарембо, В.А. Красильников М.: Наука, 1966.
4. Николаев А.В. Развитие нетрадиционных методов в геофизике / А.В. Николаев // Сб. науч. тр.: физические основы сейсмического метода. – С. 7.
5. B.M. Glinsky, M.S. Khairtdinov, V.V. Kovalevsky. Nonlinear wave in the Powerful Seismic Vibrators Zones. // Nonlinear Acoustics at the Beginning of the 21st Century. (Faculty of Physics, MSU, Moscow, 2002) vol.1, pp. 327–330.

УДК 530.4

С.А. Ефимов

ИВМиМГ СО РАН, Новосибирск

ФОРМИРОВАНИЕ ФУНКЦИИ ЯДРА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ФИЛЬТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЗАПИСЕЙ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, ФОРМИРУЕМЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ КАРЬЕРНЫМИ ВЗРЫВАМИ

Вопрос использования энергии промышленных взрывов в качестве зондирующих сигналов для проведения исследовательских геофизических работ, связанных с изучением литосферы земли, привлекает внимание геофизиков на протяжении многих лет. Технология проведения геофизических работ включает в себя процедуру построения сейсмограмм. В естественном виде (непосредственная регистрация колебаний поверхности земли) качество сейсмограмм не всегда приводит к удовлетворительным результатам. Поэтому используется согласованный или оптимальный приемник, осуществляющий дополнительную обработку данных регистрации по следующему алгоритму:

$$q(t) = \int_0^t s(\tau) \cdot R(t - \tau) \cdot d\tau; \quad (1)$$

где $s(t)$ – сигнал на входе приемника; $R(t)$ – ядро преобразования; $q(t)$ – сигнал на выходе приемника.

В работе [1] показано, что при использовании согласованного или оптимального приемника для выделения зондирующего сигнала из шума можно получить отношение наибольшего значения сигнальной функции приемника к среднеквадратическому значению выходного шума равное:

$$q_{s.max}(\tau_0) / \sqrt{D_n} = \sqrt{2E/N}; \quad (2)$$

где E – энергия сигнала; N – спектральная плотность шума.

При этом ядро преобразования для оптимального фильтра должно удовлетворять условию [1]:

$$R(t - \tau) = s_0(t - \tau). \quad (3)$$

где $s_0(t)$ – функция зондирующего сигнала, формируемого распределенным карьерным взрывом в однородной среде.

Распределенный карьерный взрыв как физическое явление представляет собой сложный процесс формирования сейсмической волны. По аналогии с атомным взрывом пространство формирования ударной и сейсмической волны разделяется на две области: области нелинейных и линейных деформаций. Для получения сейсмограммы от карьерного взрыва в дальней зоне по формуле (1) необходимо иметь ядро преобразования $R(t)$. Построение математической модели этого ядра является задачей нетривиальной. Известен подход формирования ядра преобразования, основанный на построении математической модели ядра. При этом параметры модели определяются на основе сейсмической записи в ближней зоне [2]. Однако более конструктивным подходом для решения этой задачи, по мнению автора, является

экспериментальное измерение сейсмического сигнала в ближней волновой зоне с дальнейшим использованием этого сигнала в качестве функции ядра преобразования. Такой подход повышения качества сейсмограмм использован норвежскими сейсмологами при обработке данных станций на территории Норвегии, входящих в Международную систему мониторинга [2]. В данной работе показаны результаты обработки экспериментальных данных от распределенного карьерного взрыва с использованием вышеуказанного подхода.

Сейсмические записи получены на профиле Бачатский угольный разрез Кемеровской области – полигон Быстровка Новосибирской области. В ближней зоне карьерного взрыва для сейсмической регистрации использована аппаратура «РОССА» с тремя трехкомпонентными датчиками типа СК-1П. В данной работе представлены результаты обработки с использованием сигнала Z компоненты с одного датчика. В дальней зоне карьерного взрыва для сейсмической регистрации использована аппаратура «ВИРС-К» с пятью трехкомпонентными датчиками типа СК-1П. В данной работе представлены результаты обработки с использованием сигналов Z компоненты пяти датчиков. Эксперимент проведен при следующих условиях. Время регистрации – 10 августа 2001 г. Взрыв формируется из 220 скважин по 180 кг взрывчатого вещества в каждой скважине. Одновременно взрываются 10 скважин. Время между взрывами – 25-30 мс. Значение общего времени взрыва находится в диапазоне 550 – 660 мс. Среда взрыва – угольный блок.

На рис. 1 представлена запись Z компоненты карьерного распределенного взрыва в волновой зоне в районе Бачатского угольного разреза Кемеровской области. Эта функция использована в качестве ядра преобразования $R(t)$ для формирования сейсмограмм по формуле (1) для точки регистрации в дальней зоне.

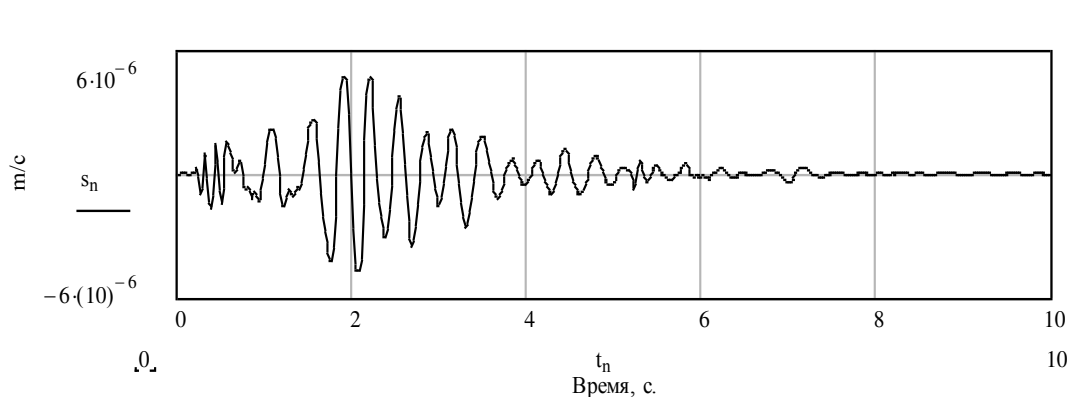


Рис. 1. Сейсмический сигнал от карьерного взрыва в волновой зоне, Z компонента

На рис. 2 показана спектральная характеристика сигнала по рис. 1.

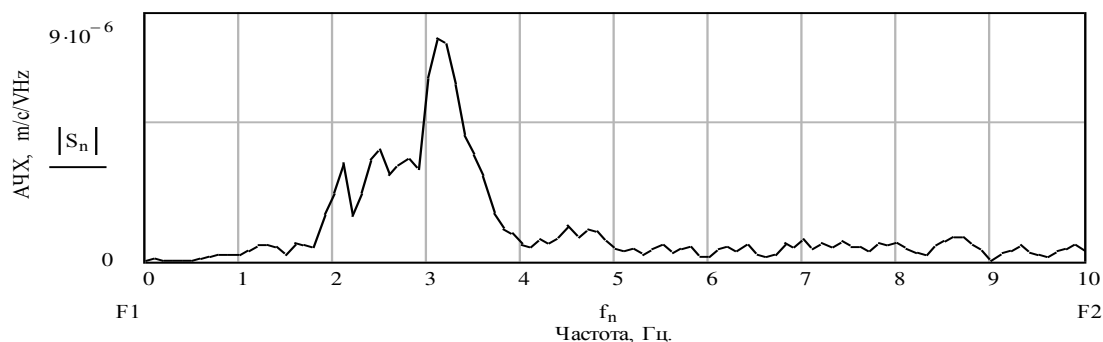


Рис. 2. Спектральная характеристика сейсмического сигнала от карьерного взрыва в волновой зоне, Z компонента

На рис. 3 представлена запись Z компоненты пяти датчиков карьерного распределенного взрыва в дальней зоне на полигоне Быстровка Новосибирской области. Первые пять графиков рис. 3 представляют собой записи сигналов с пяти датчиков Z компонента. Шестой график на рис. 3 представляет собой сумму пяти вышеприведенных сигналов.

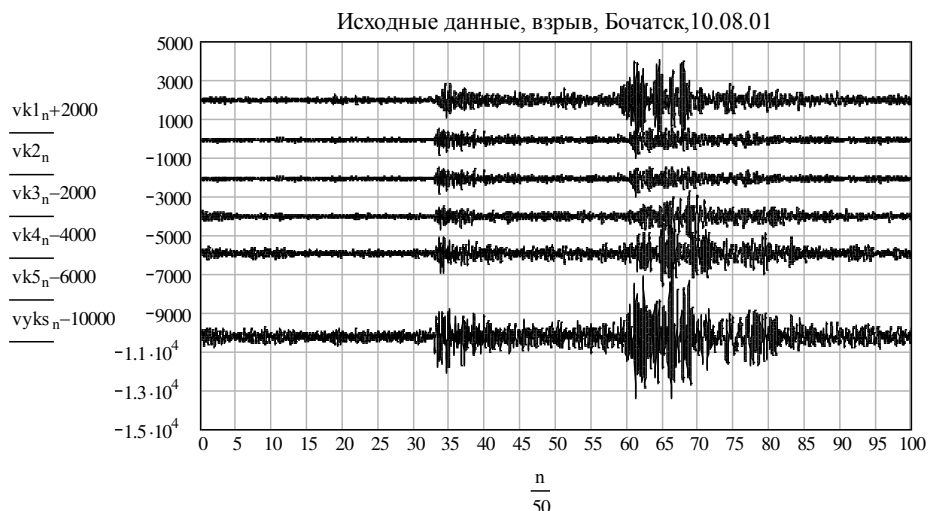


Рис. 3. Сейсмический сигнал от карьерного взрыва в дальней зоне, пять датчиков, Z компонента

На рис. 4 представлены сейсмограммы для точки регистрации на полигоне Быстровка Новосибирской области, полученные процедурой свертки сигналов регистрации (запись Z компоненты пяти датчиков) карьерного распределенного взрыва в дальней зоне с сигналом регистрации этого взрыва в ближней зоне. Первый график рис. 4 представляют собой запись сигнала с первого датчика Z компонента, и повторяет собой первый график рис. 3. Остальные графики на рис. 4 представляет результат обработки по формуле (1), где в качестве ядра преобразования использован сигнал регистрации в ближней зоне.

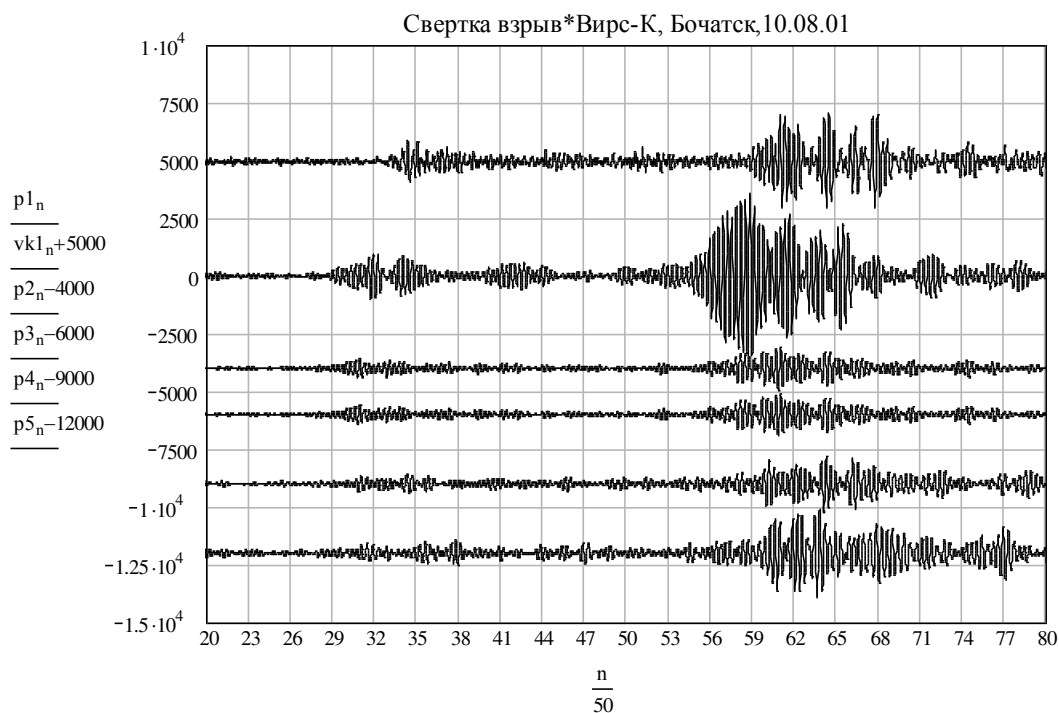


Рис. 4. Сейсмограммы от карьерного взрыва в дальней зоне, полученные с использованием ядра преобразования в соответствии рис. 1, пять датчиков, Z компонента

Сравнение сейсмограмм, полученных непосредственно регистрацией карьерного взрыва в дальней зоне, с сейсмограммами на основе преобразования по формуле (1) с использованием ядра преобразования по рис. 1, показывает существенное улучшение качества сейсмограмм. Использование дополнительной корреляционной обработки по формуле (1) теоретически обуславливает два фактора повышения качества сейсмограммы. Первый фактор связан с увеличением отношения сигнал – шум за счет фильтрующего свойства корреляционной обработки. Второй фактор связан с повышением контрастности импульсов, характеризующих времена вступлений сейсмических волн, за счет свойства корреляционной обработки «сжимать» растянутые во времени сигналы до коротких импульсов. Протяженность таких импульсов определяется шириной спектра ядра преобразования. В данном случае ширина спектра определяется характеристикой сигнала в ближней зоне и будет соответствовать спектральной характеристике сигнала на рис. 2.

Рассмотренный алгоритм обработки позволяет формировать функцию ядра преобразования на основе экспериментальных данных. Эту функцию можно использовать для вычисления сейсмограммы в дальней зоне для распределенного и сосредоточенного взрывов. Представленный подход для формирования функции ядра преобразования позволяет эффективнее использовать районы промышленных взрывов для проведения исследовательских геофизических работ, связанных с изучением литосферы земли.

Автор выражает благодарность участникам семинаров лаборатории геофизической информатики ИВМ и МГ СО РАН, в атмосфере которых формировалась постановка решаемой задачи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов / В.И. Тихонов – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.
2. Ефимов С.А. Математическое моделирование функции ядра преобразования оптимального фильтра с использованием алгоритма фазовой манипуляции для обработки сейсмических сигналов, формируемых распределенными карьерными взрывами / С.А. Ефимов // Современные проблемы радиоэлектроники: Сб. науч. Тр. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004.
3. Рингдал Ф. Усовершенствованная обработка данных от сейсмических групп в NORSTAR: последние достижения и планы на будущее / Ф. Рингдал, Т. Кверна, С. Гиббсон // Вестник НЯЦ РК, Периодический науч.- техн. Журнал национального ядерного центра Республики Казахстан. – вып. 2 (26). – июнь 2006.
4. Трахтман А.М. Введение в обобщенную спектральную теорию сигналов / А.М. Трахтман. – М.: Изд-во «Советское радио», 1972. – 352 с.
5. Сильвия М.Т. Обратная фильтрация геофизических временных рядов при разведке на нефть и газ. Пер. с англ. / М.Т. Сильвия, Э.А. Робинсон. – М.: Недра, 1983. – 447 с.

© С.А. Ефимов, 2007

УДК 528.4

А.П. Григорюк, Л.П. Брагинская
ИВМиМГ СО РАН, Новосибирск

УПРАВЛЕНИЕ ДАННЫМИ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Эффективное решение задач, для которых предназначены результаты вибросейсмического мониторинга с использованием мощных управляемых источников, возможно лишь при правильном рациональном управлении полученными данными [1]. Нами была разработана информационно-вычислительная система (ИВС), позволившая предоставить исследователям широкие возможности поиска и просмотра экспериментальных данных в диалоговом режиме как локально, так и через Интернет, доступа к данным и метаданным экспериментов в соответствии с правами и условиями доступа, возможности on-line анализа данных в соответствии с классическими и оригинальными алгоритмами. Возможна загрузка выбранных файлов сейсмотрасс на компьютер пользователя для проведения углубленного анализа.

С помощью формы, доступной в Интернет по адресу <http://org.sccc.ru/db> (рис. 1), пользователи могут формировать запросы к базе данных по следующим параметрам:

- Дата и время сеанса регистрации (интервал значений);
- Код эксперимента, номер сеанса, номер регистратора, номер датчика, компонента датчика (данная информация, включая географическую карту с

обозначенными на ней источниками и регистраторами, имеется в кратком описании каждого эксперимента, доступном через меню «Эксперименты»);

- Тип источника и параметры сейсмического сигнала (интервал значений);

- Географические координаты регистратора, расстояние и азимут источник – регистратор (диапазон значений).

Рис. 1. Форма для поиска данных

В результате выполнения запроса пользователю выдается список найденных файлов сейсмограмм и форма для выбора необходимых процедур анализа, которые будут применены к найденным данным (рис. 2). Метаданные, соответствующие каждой из найденных сейсмограмм, могут быть получены через меню «Эксперименты».

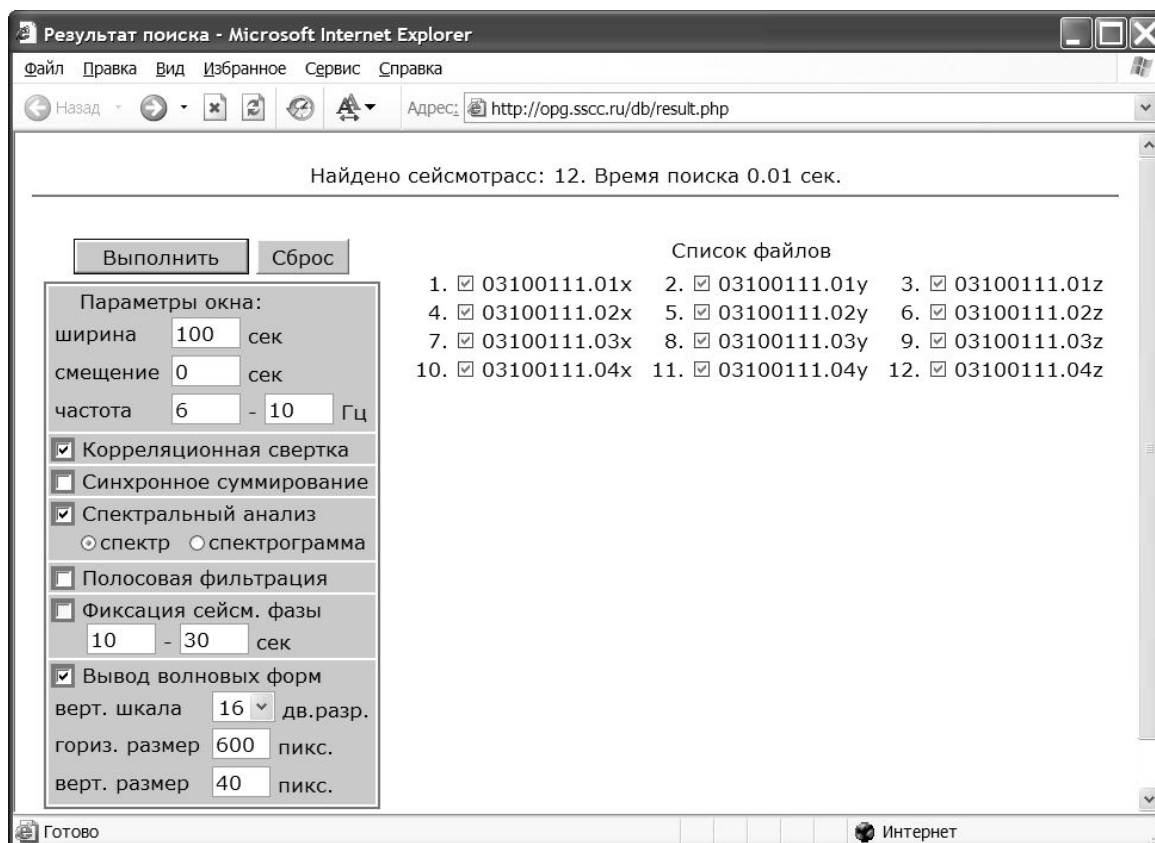


Рис. 2. Результат поиска

В настоящее время доступны следующие виды анализа:

- Корреляционный анализ;
- Линейная частотная фильтрация;
- Синхронное суммирование сейсмотрасс;
- Спектральный анализ;
- Спектрально-временной анализ (построение спектрограмм);
- Фиксация сейсмических фаз в заданном интервале времени.

Для фиксации сейсмических фаз использован оригинальный алгоритм, разработанный в ИВМиМГ СО РАН, представляющий собой разновидность последовательного алгоритма кумулятивных сумм (АКС) [2]. Результаты анализа в графической форме выводятся в веб-браузер пользователя (рис. 3).

ИВС реализована в рамках архитектуры клиент-сервер с использованием только свободно распространяемого программного обеспечения: веб-сервер Apache, СУБД MySQL, интерпретатор PHP, компилятор gcc, библиотека обработки сигналов Intel IPP. Важным преимуществом системы является использование на стороне клиента только стандартного веб-браузера без установки дополнительного программного обеспечения.

В систему также планируется интегрировать ГИС-функции, обеспечивающие по результатам исполнения запросов автоматическое построение карт района проведения работ с условным обозначением источников и регистраторов сейсмических волн.

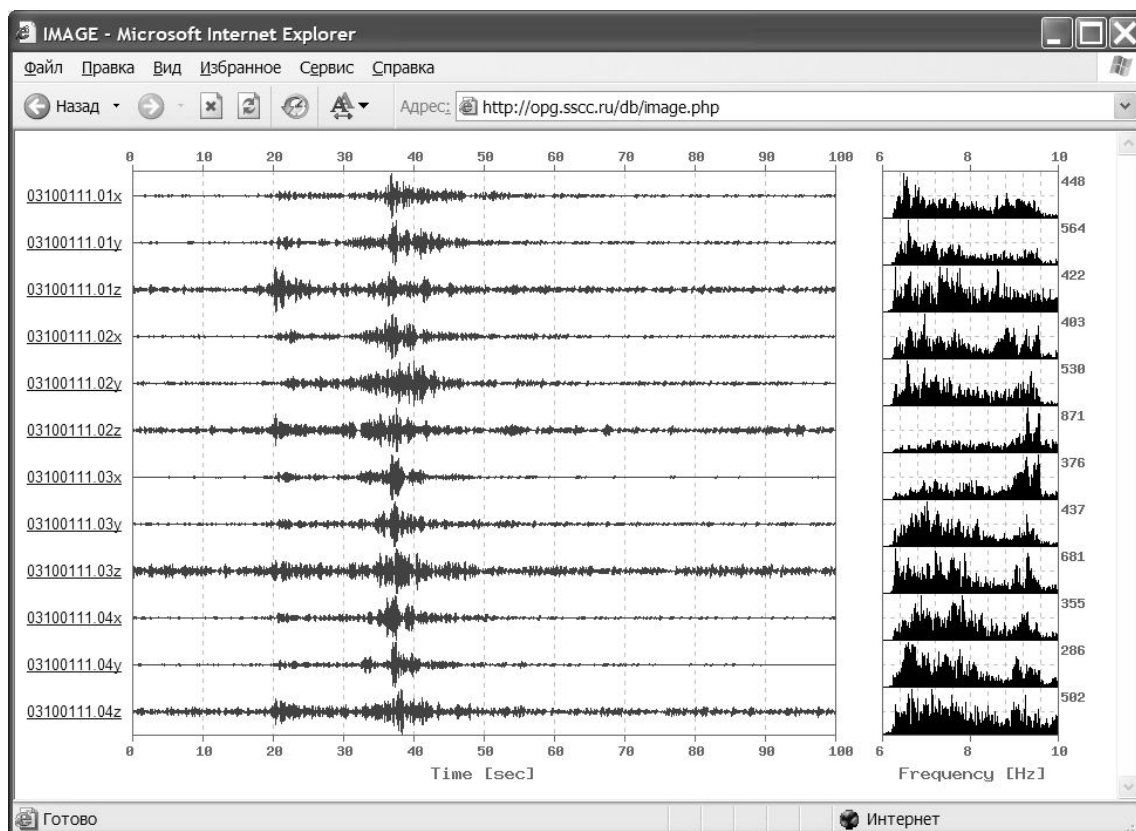


Рис. 3. Результаты on-line анализа

Следует отметить возможность создания аналогичной системы для управления данными экспериментов в различных области науки и технологии. В процессе любого эксперимента осуществляется воздействие на исследуемый объект и изучается отклик. Поэтому для разработки схемы базы данных, являющейся центральным элементом системы, необходимо выделить общий для данной области класс объектов с набором свойств, методов и параметров воздействия и отклика.

Работа проводится при поддержке гранта РФФИ № 05-07-90081.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками: монография / А.С. Алексеев и др. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2004. – 350 с.
2. B.M. Glinsky, M.S. Khairtdinov, O.K. Omelchenko, Y.I. Rodionov. On a new automatized technology for seismic source location. // NCC Bulletin. Series Math. Model. In Geoph. - Novosibirsk: NCC Publisher, 2003. – Iss.8 – P. 35–42.
3. Andreev P.R., Grigoryuk A.P., Shorokhov M.N. Systems for reception and recording of vibroseismic signals. // Bulletin of the Novosibirsk Computing Center. Ser.: Mathematical Modeling in Geophysics. Iss. 7, 2002. – P. 1–12.
4. Григорюк А.П. Информационно-вычислительная система «Вибросейсмическое просвечивание Земли» / А.П. Григорюк, Л.П. Брагинская // АКТИВНЫЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ЛИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ: Материалы 2-го междунар. симпоз. 12-16 сент. 2005 г. Академгородок.- Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. – 472 с.

© А.П. Григорюк, Л.П. Брагинская, 2007

ПОТОЧНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ И РАСПОЗНАВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН В ШУМАХ

Введение. Проблема локации разного типа сейсмических источников – землетрясений, ядерных и промышленных взрывов является одной из ключевых в современной сейсмологии. В ее основе лежит решение обратной задачи восстановления параметров (географических координат, глубины, мощности, времени в очаге) источника по данным регистрации сейсмических сигналов с помощью сети сейсмических станций либо сейсмической группы. При этом проблема понижения погрешности локации является одной из основных. Трудность ее решения обусловлена присутствием техногенных шумов и иных событий, которые являются фоновыми по отношению к полезному событию.

При решении задачи локации сейсмических источников можно выделить ряд основных этапов [1]:

- Выделение и измерение времен вступления сейсмических волн Р и S;
- Идентификация источника;
- Определение параметров очага;
- Отображение координат источника на цифровой карте.

Имея в виду влияние фоновых событий и сейсмических шумов, существует большая потребность в автоматизированной технологии решения задач на обозначенных этапах. Такая технология призвана в помощь человеку – оператору, чтобы снять с него множество рутинных операций обработки данных в условиях непрерывного мониторинга событий. В данном докладе рассматриваются алгоритмы, предназначенные для решения первых двух этапов задачи.

Выбор алгоритма решения задачи. Первоочередной этап на пути создания технологии автоматизированной локации сейсмических источников состоит в разработке алгоритма для поточного обнаружения моментов вступлений сейсмических волн. При этом важным требованием к алгоритму является малая трудоёмкость для обеспечения возможности обработки в режиме реального времени.

Для обнаружения сейсмических волн в процессе непрерывного мониторинга и измерения времен вступления волн Р и S используется алгоритм, основанный на методе нелинейной многоканальной обработки [2]. Данный метод обработки лежит в основе работы мультипликативной антенны. Согласно данному алгоритму, решающая функция вычисляется как:

$$F(t) = \max_{\tau} \left(\prod_{i=0}^{N-1} S_i(t + i\tau) \right) \quad (1)$$

где $S_i(t)$ – значение сигнала с i -го сейсμοприёмника в момент времени t , N – количество сейсμοприёмников, τ – временной сдвиг по направлению линии годографа.

Погрешность определения времени вступления волны методом мультипликативной обработки, по сравнению с традиционным методом синхронного суммирования, в N раз меньше, что обусловлено более высокой контрастностью вступления волны.

Пример обработки реальной многочасовой сейсмической записи для определения моментов вступлений сейсмических волн от удаленного взрыва (в данном случае удаление составляло 287 км) приведён на рис. 1.

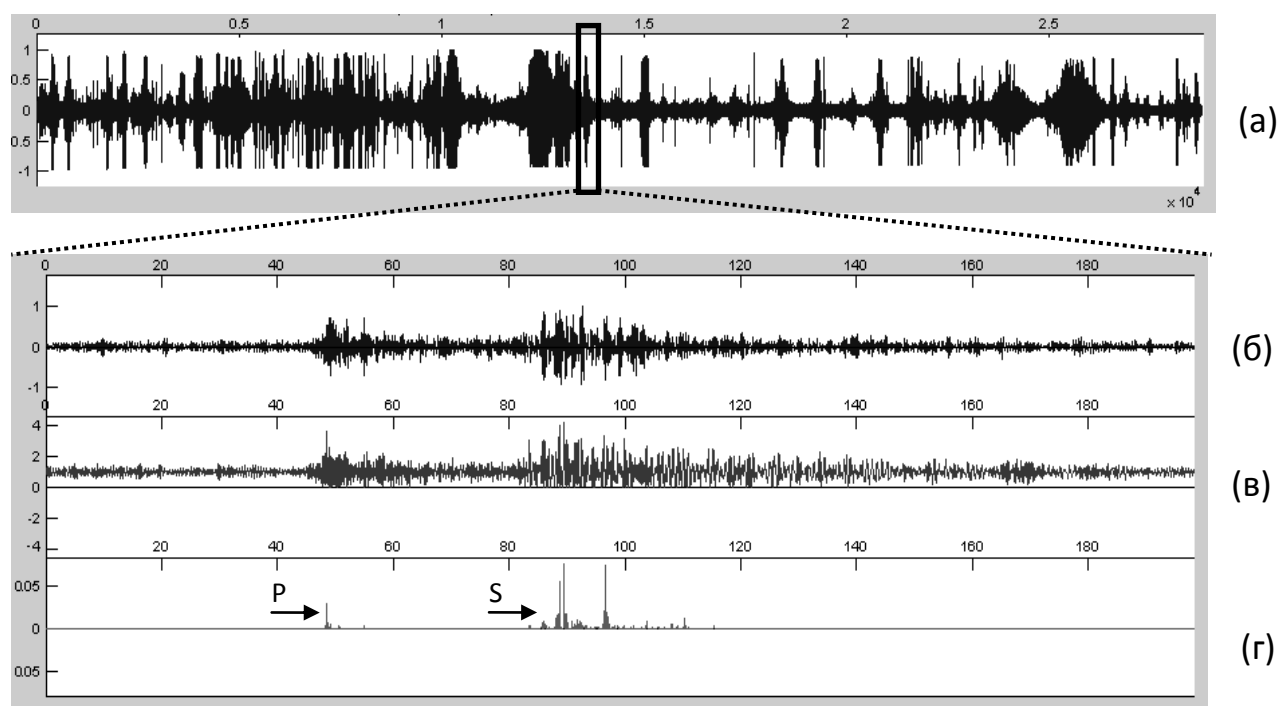


Рис. 1. Результат обработки реальной многочасовой сейсмической записи:

- (а) – исходная сейсмограмма; (б) – фрагмент исходной сейсмограммы, содержащий волну; (в) – результат выделения волны методом синхронного сложения; (г) – тоже с помощью нелинейной обработки

Данная длительная запись от начала до конца подверглась обработке двумя методами (мультипликативным методом и методом синхронного суммирования). В результате обработки времена вступлений продольных волн Р и поперечных S соответствуют максимумам обеих функций. На рис. 1б в увеличенном масштабе приведен фрагмент записи, содержащий взрывную сейсмограмму. На рис. 1в приведен результат ее выделения с помощью метода синхронного суммирования, на рис. 1г – тот же результат, но полученный с помощью мультипликативной обработки. На рис. 1 видно, что мультипликативная функция является по форме намного более острой и, соответственно, позволяет более точно оценивать времена вступлений волн. К тому же такая функция в ряде случаев оказывается более помехоустойчивой,

что иллюстрируется результатами обработки данных экспериментов (рис. 1в, г), а также результатами моделирования [2].

Таким образом, подвергая мультипликативной обработке в поточном режиме данные о сейсмической активности по нескольким каналам, можно получить очень ценный параметр, используемый в дальнейших фазах распознавания. Этот параметр – момент вступления сейсмической волны.

Набор информативных признаков для системы распознавания. Из-за присутствия интенсивного нестационарного фонового шума, имеющего импульсную природу, в процессе мультипликативной обработки могут возникать ложные всплески активности. Во избежание интерпретации шумовых всплесков как полезного сигнала, дальнейшей фазой обработки является процесс идентификации источника сейсмических сигналов, результатом которой будет отнесение сигнала к одному из двух классов: промышленный взрыв или шум (идентификация землетрясений является дальнейшей задачей). Построение системы распознавания сейсмических сигналов подразумевает выбор системы информативных признаков, на основе которой будет производиться классификация. В результате изучения особенностей сейсмических записей взрывов, была выбрана следующая система признаков:

- Задержка между временами вступления Р- и S-волн. Известно, что разность времён вступления продольных и поперечных волн, распространяющихся в упругой среде, есть функция расстояния от источника волн до точки регистрации. Задав необходимый временной интервал, можно настроиться на обнаружение событий интересующего диапазона расстояний.

- Отношение амплитуд волн S и P. По отношению к пространственным компонентам волнового поля (X,Y,Z компоненты), соотношения амплитуд Р- и S-волн имеют различные значения. Диаграмма распределения значений признака для взрывов и шумов приведена на рис. 2.

- Диапазон частот волн Р и S. По результатам анализа, диапазон частот Р-волн лежит выше, чем для S-волн.

- По отношению к промышленным взрывам соотношение соответствующих частот составляет 1.5-2 раза. Стоит отметить, что в случае интенсивных шумов, спектр Р-волны, как правило, оценить не удаётся и соответственно использование данного признака возможно лишь на слабо зашумлённых сейсмограммах.

Данная система признаков была обоснована и выбрана на основе анализа набора сейсмических записей промышленных взрывов, проведённых на открытых угольных разрезах Кемеровской области. Разрезы располагались в диапазоне расстояний 130–334 км по отношению к пунктам регистрации. Всего было проанализировано около 20 записей взрывов.

Алгоритм обнаружения сейсмических сигналов. На основе собранной статистики параметров волн была построена система обнаружения сигналов промышленных взрывов. Алгоритм функционирования системы является ступенчатым, состоящим из 2 этапов (рис. 3).

Этап 1. Поданная на вход системы многоканальная сейсмическая запись подвергается мультипликативной обработке. В случае наличия в записи сейсмических событий, результат многоканальной обработки – решающая функция (1), будет содержать контрастные всплески в местах прихода волн (см. рис. 1г). Данные скачки можно обнаружить при помощи порогового метода. В нашем случае порог вычислялся исходя из вероятности превышения значения шума 99,99%, с предварительной оценкой распределения шума перед каждым сеансом обработки. Таким образом, косвенно реализовывался отбор сигналов по первому признаку – углу наклона годографа. Поиск значений мультипликативной функции, превышающих порог и соответствующих волнам Р и S, осуществлялся в соответствии с учетом априорного диапазона разностей времён вступлений, в результате чего производился отбор по второму признаку – разности времён вступлений Р и S волн.

Этап 2. Дальнейшим этапом алгоритма обнаружения сигналов является процесс классификации посредством решающей функции, призванной исключить реагирование системы на ложные шумовые импульсы. Классификация осуществлялась в две ступени: сначала на основе признака отношения амплитуд, затем, в случае положительного результата, на основе признака отношения спектров волн Р и S.

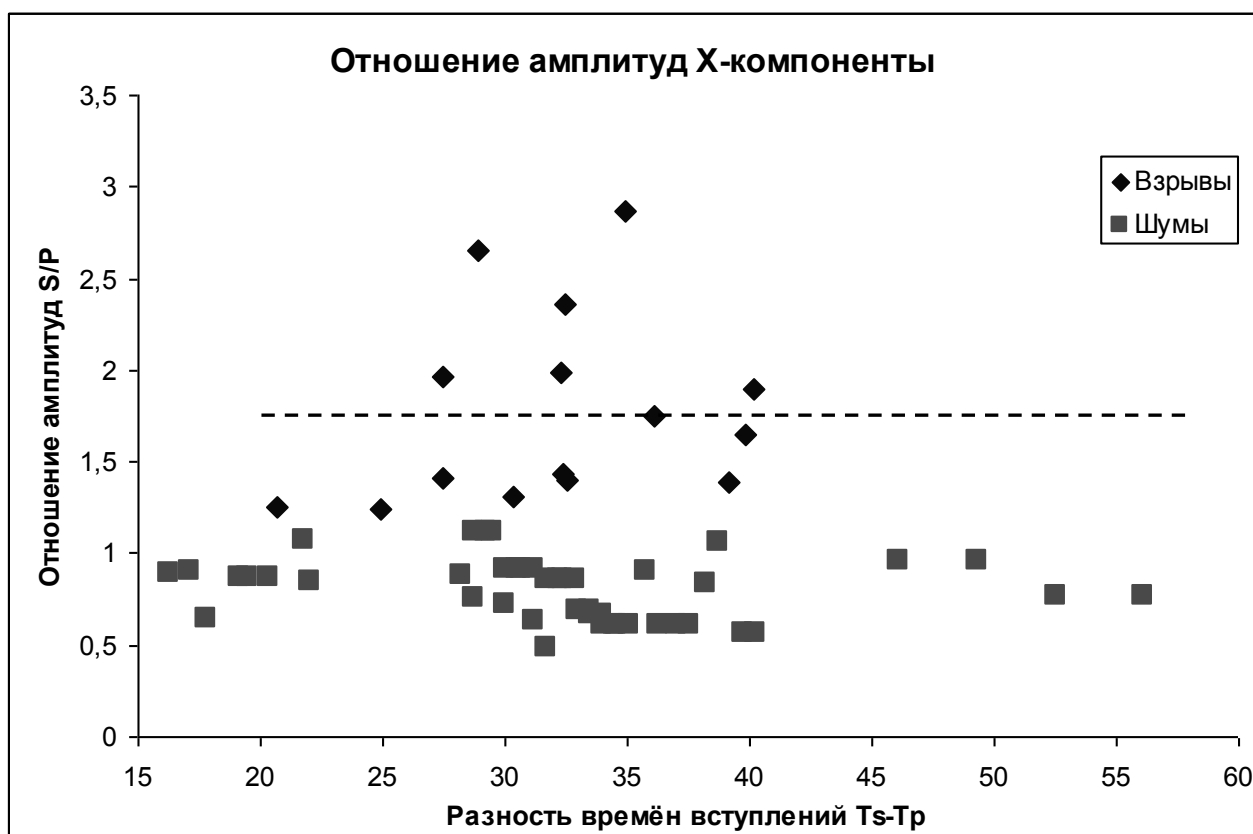


Рис. 2. Диаграмма распределения значений признака «отношение амплитуд Р и S волн» для взрывов и шумов. Пунктирная линия изображает границу между классами

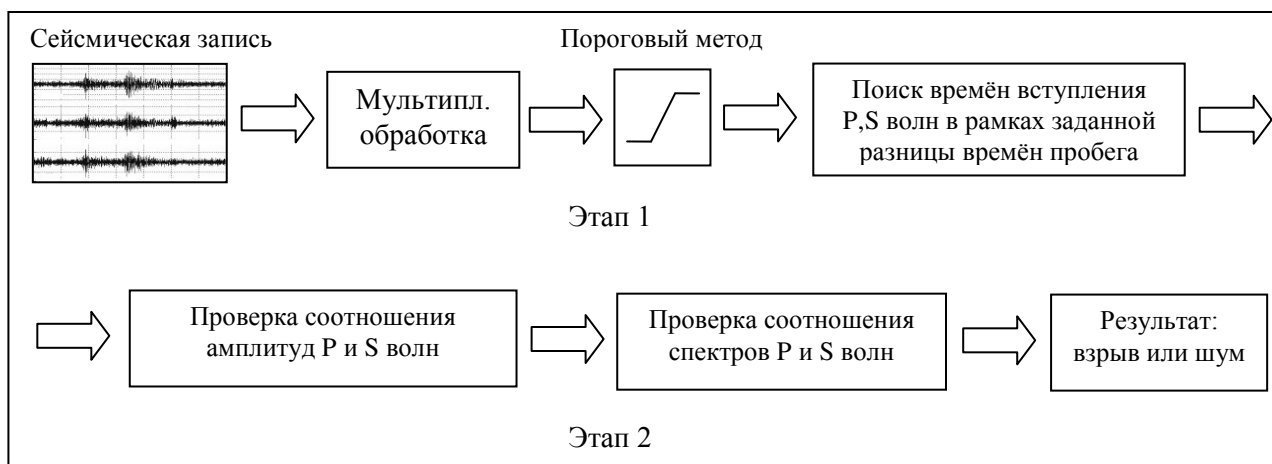


Рис. 3. Структура алгоритма обнаружения и распознавания сейсмических сигналов

Разработанная система обнаружения и распознавания сейсмических сигналов (на данный момент – промышленных взрывов) была опробована на наборе записей промышленных взрывов, проведённых на открытых угольных разрезах Кемеровской области, в диапазоне расстояний 130-334 км. В итоге, каждый из 20 тестовых взрывов был обнаружен. В случае сильно зашумлённых записей замечена редкая реакция системы на шумовые всплески. Оценку точности определения параметров волн и вероятность корректного распознавания событий предстоит еще провести.

В дальнейших этапах задачи локации сейсмических источников, после обнаружения полезного события, предстоит решать задачи определения параметров очага (географических координат, глубины, мощности) с дальнейшим отображением на электронной картографической системе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. M.S. Khairtdinov, O.K. Omelchenko, G.F. Sedukhina, G.M. Voskoboynikova. Numerical algorithms and results of experiments to determine the parameters of the borehole bottom and medium. Bull. Nov. Comp. Center, Math. Model. In Geoph., 10 (2005), 33-41.
2. Хайретдинов М.С. Нелинейный метод выделения и измерения параметров сейсмических волн / М.С. Хайретдинов, С.А. Авроров // Сб. материалов междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2006» Т.3. Мониторинг окружающей среды, геоэкология, дистанционные методы зондирования Земли фотограмметрия. Ч.2. - Новосибирск: СГГА, 2006. – С. 8-13.
3. M.S. Khairtdinov. Increasing of sensitivity of active vibroseismic monitoring method with allowance for wave field nonlinearity // Bull. Nov. Comp. Center, Math. Model. In Geoph., 10 (2005), 19-34.

© М.С. Хайретдинов, С.А. Авроров, 2007

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ И СТРОЕНИЯ ВУЛКАНОВ

Геодинамика земной коры привлекает внимание геофизиков как частное явление общей эволюции структуры Земли. Поскольку сейсмически активные точки земной коры представляют собой фактор разрушения инфраструктуры жизнеобеспечения этноса прилегающих территорий, то очевидна актуальность исследований и разработки новых методов контроля и прогноза эволюции структуры земной коры. В настоящее время геофизики и сейсмологи всего мира ищут новые подходы к исследованию эволюции геологической структуры планеты Земля. В этом направлении представляет особый интерес активный метод вибросейсмического зондирования (ВЗ), позволяющий получить «фотографию» земной коры в виде виброграммы. Этот метод основан на применении искусственного источника волн, формирующего функционально определенный зондирующий сигнал (ЗС). Современные искусственные источники (вибраторы) способны формировать достаточное по энергии сейсмическое поле на расстоянии более 2000 км. В данной работе исследованы особенности корреляционной обработки вибросейсмических данных и показана возможность повышения эффективности вибросейсмического эксперимента путем вариации параметров источника сигнала без изменения энергетических характеристик.

Основные аспекты технологии ВЗ земной коры базируются на представлении о земной поверхности в виде динамической модели, основанной на свертке [1]. Модель, основанная на свертке, представлена на рис.1:

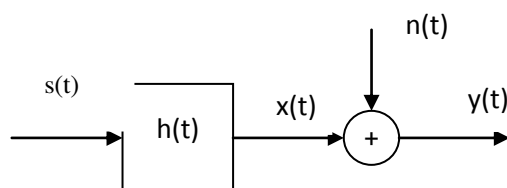


Рис. 1. Модель, основанная на свертке. Элементы модели: волновое воздействие (зондирующий сигнал) $s(t)$, импульсная характеристика среды $h(t)$, реакция среды $x(t)$, помехи $n(t)$, сумматор (+), сейсмограмма $y(t)$

Для этой модели справедливо выражение для сейсмограммы:

$$y(t) = \sum_{i=0}^{\infty} a_i \cdot s_i(t - \tau_i) + n(t), \quad E = \int_0^{T_s} y^2(t) dt. \quad (1)$$

где a_i – амплитудный весовой множитель; $s_i(t)$ – ЗС источника; $n(t)$ – аддитивная помеха; τ_i – временная задержка; E – энергия сигнала; T_s – время регистрации.

При импульсном источнике, формирующем достаточно широкополосный ЗС, модель по рис. 1 является достаточной для интерпретации сейсмограмм $y(t)$. Однако технология ВЗ использует для формирования виброграмм ЗС следующего вида:

$$s(t) = A(t) \cdot \Phi(t - T_0) \cos\{\omega_0 \cdot t + \psi(t)\}, \quad (2)$$

где $A(t)$ – огибающая зондирующего сигнала; ω_0 – начальная частота зондирующего сигнала; $\Phi(t)$ – функция Хевисайда; α – скорость изменения частоты зондирующего сигнала; T_0 – время излучения зондирующего сигнала; $\psi(t) = (\alpha/2) \cdot t^2$; $t = 0 \dots T_0$.

В реальных сейсмических экспериментах ЗС по формуле (2) имеет достаточно большую длительность (20-60 минут). Сейсмограмма $y(t)$ будет представлять собой в соответствии с выражением (1) сумму отраженных волн, определяемых структурой неоднородностей исследуемого пространства земной поверхности. Поскольку величины временных задержек τ_n значительно меньше времени излучения зондирующего сигнала T_0 , то в полученной сейсмограмме не выделены признаки моментов вступления τ_n регистрируемых сейсмических волн. Традиционный способ выделения времени вступления связан с использованием корреляционного или согласованного фильтра [2]. В этом случае модель, основанная на свертке, приобретает функциональный дополнительный элемент – корреляционный фильтр.

Для формирования вибросейсмической сейсмограммы $q(t)$ используется преобразование:

$$q(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau) \cdot y(t - \tau) d\tau; \quad (3)$$

Процедура свертки между $x(t)$ и $s(t)$ формирует момент времени прихода волн в виде максимума автокорреляционной функций (АФ) ЗС. Для сигнала $s(t)$ АФ имеет вид:

$$W(t - \tau_i) = \frac{T_0}{2} \cdot \frac{\sin(\frac{\Delta\omega \cdot (t - \tau_i)}{2})}{\frac{\Delta\omega \cdot (t - \tau_i)}{2}} \cdot \cos(\omega_0 \cdot (t - \tau_i)); \quad \Delta\omega = \alpha \cdot T_0; \quad (4)$$

где T_0 – длительность зондирующего сигнала; $\Delta\omega$ – девиация частоты; ω_0 – начальная частота зондирующего сигнала; $\Delta\omega = \alpha \cdot T_0$.

Вибрационная сейсмограмма $g(t)$ представляет собой сумму АФ излученного сигнала:

$$g(t) = \sum_i a_i \cdot W(t - \tau_i) + n^*(t) \quad (5)$$

где a_i – амплитуды волн; τ_i – времена прихода; $n^*(t)$ – измерительный шум.

Экспериментальные записи ЗС в точке регистрации имеют следующие особенности. Как показывает выражение (1), эти записи представляют собой сумму ЗС источника. При этом все сигналы перекрываются во времени, т.е.

являются частично когерентными. После корреляционной обработки на вибрационных сейсмограммах момент времени прихода волн соответствует максимумам отдельных автокорреляционных функций (4). Функция (4) является симметричной относительно времени вступления τ_i , а ширина главного лепестка этой функции, зависит от девиации частоты $\Delta\omega$ и будет равна $2 \cdot \pi / \alpha \cdot T_0$. Наличие симметричных и убывающих по амплитуде лепестков функции (4) относительно времени вступления τ_i приводит к искажению амплитуды a_i других волн. Рассмотрим взаимное влияние вибросейсмических волн на виброграмме на примере модели вибросейсмического эксперимента для двух волн при следующих параметрах:

$T_0 = 3,0$ с.; $T_s = 10,0$ с. (время записи в точке регистрации); $a_i = 1$;

$\tau_1 = 3,0$ с.; $\tau_2 = 4,2$ с.; $n^*(t) = 0$; $\alpha = 6,283$; $\omega_0 = 11\pi$.

Для одиночной вибросейсмической волны с $\tau_1 = 3,0$ с. вид виброграммы представлен на рис. 2. Максимальная амплитуда импульса автокорреляции будет равна 3,3541.

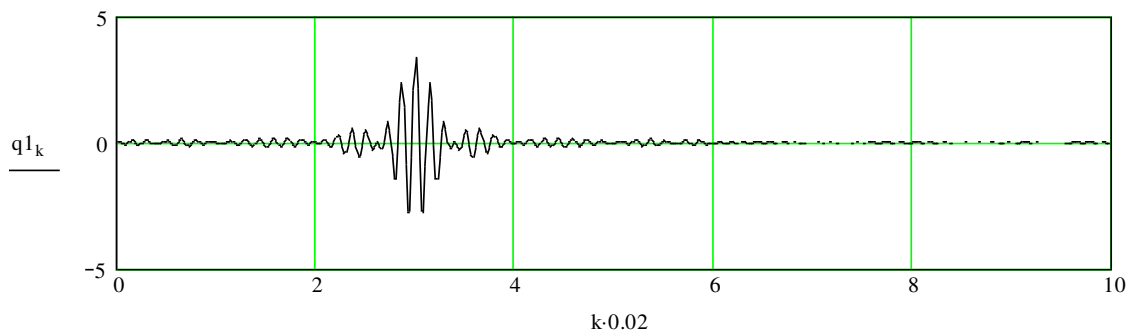


Рис. 2. Виброграмма для одиночной вибросейсмической волны с $\tau_1 = 3,0$ с

На рис. 3 представлен процесс формирования виброграммы $q(t)$ для двух волн. Максимальная амплитуда импульсов автокорреляции будет равна 3,2541. Взаимное влияние двух автокорреляционных импульсов приводит к небольшому уменьшению амплитуды импульсов.

Далее рассмотрим взаимное влияние вибросейсмических волн на виброграмме для двух более близких волн: $\tau_1 = 2,44$ с.; $\tau_2 = 3,0$ с;

Для одиночной вибросейсмической волны с $\tau_1 = 2,44$ с. вид виброграммы представлен на рис. 4. Максимальная амплитуда импульса автокорреляции не изменится и будет равна 3,3541.

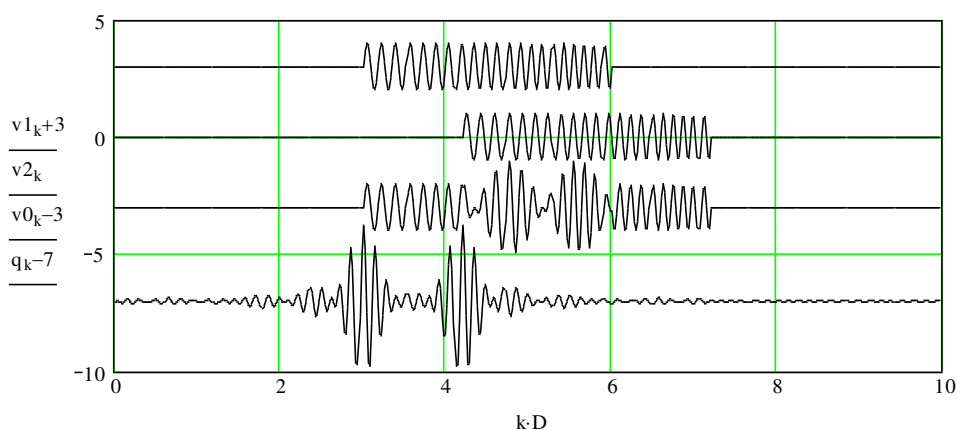


Рис. 3. Виброграмма для двух вибросейсмических волн с $\tau_1 = 3,0$ с, $\tau_2 = 4,2$ с

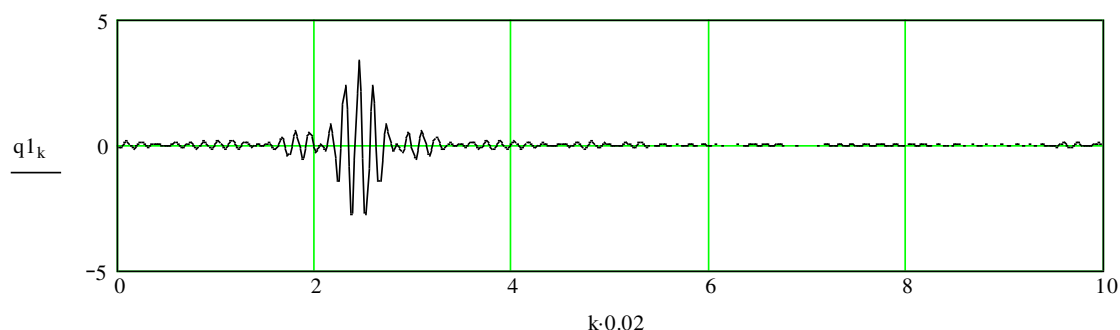


Рис. 4. Виброграмма для одиночной вибросейсмической волны с $\tau_1 = 2,44$ с

На рис. 5 представлен вид виброграммы для двух волн. Максимальная амплитуда импульсов автокорреляции будет равна 2,8542. Взаимное влияние двух автокорреляционных импульсов приводит к уже значительному уменьшению амплитуды импульсов.

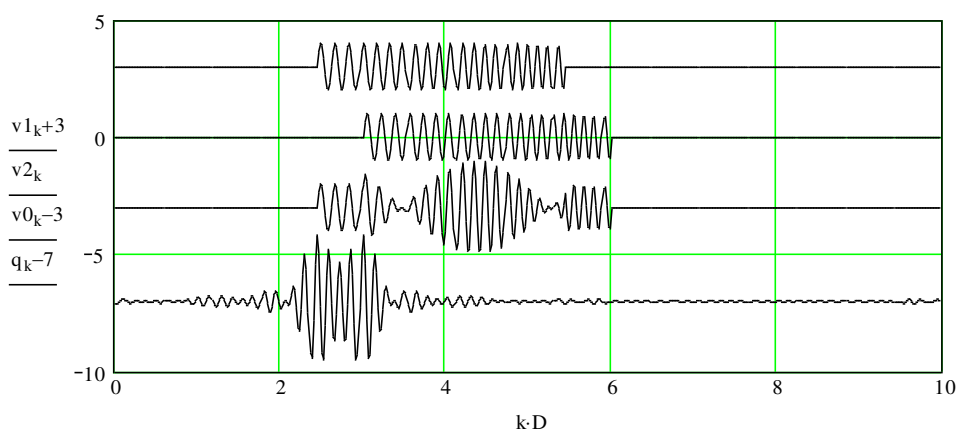


Рис. 5. Виброграмма для двух вибросейсмических волн с $\tau_1 = 2,44$ с, $\tau_2 = 3,0$ с

Очевидно, что чем больше амплитуда этого импульса, тем выше качество сейсмограммы при определенном уровне шума $n^*(t)$. Рассмотрим влияние

неэнергетических (не изменяющих энергию сигнала) параметров ЗС на качество виброграммы, в частности параметра α . Для этого отметим следующее обстоятельство, связанное с качеством виброграммы, и вытекающее из анализа выражений (1) и (3). Максимальные значения АФ на виброграмме связаны с общей энергией вибросейсмического сигнала в точке регистрации: сумма максимальных значений АФ с точностью до постоянного множителя равны общей энергии вибросейсмических волн в точке регистрации. Поэтому влияние качества виброграммы зависит от величины общей энергии вибросейсмического сигнала в точке регистрации. Рассмотрим влияние параметра α ЗС на общую энергию вибросейсмических волн на примере модели ВЗ для трех волн при следующих параметрах:

$$T_0 = 20,0 \text{ с.}; T_s = 100,0 \text{ с.}; a_i = 1;$$

$$\tau_1 = 0 \text{ с.}; \tau_2 = 0,2 \text{ с.}; \tau_3 = 0,22 \text{ с.}; n^*(t) = 0; \alpha = 0,075r; r = 1 \dots 100; \omega_0 = 2\pi.$$

График зависимости энергии сигнала $y(t)$ в точке регистрации от параметра α зондирующего сигнала приведен на рис. 6.

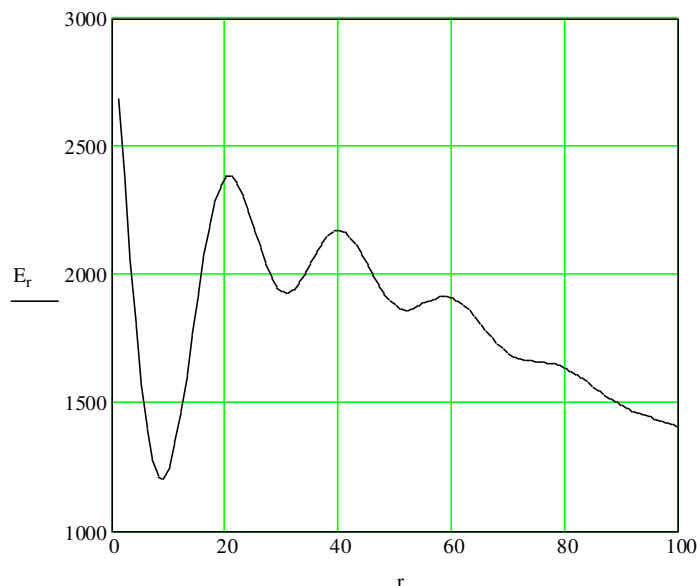


Рис. 6. График зависимости энергии сигнала $y(t)$ в точке регистрации от параметра α зондирующего сигнала

Вид графика рис. 6 показывает наличие локальных максимумов и указывает, что наиболее подходящим параметром зондирующего сигнала можно определить диапазон значений $\alpha = \{1,5 \dots 4,5\}$. Также следует отметить, что изменение параметра α зондирующего сигнала на участке $r = 10 \dots 20$ в два раза изменяет энергию сигнала в 1,96 раз. Кроме этого вывода необходимо отметить, что функция на рис.6 является монотонной. Это замечательное качество можно использовать практически при планировании и проведении вибросейсмических экспериментов. Если очередной вибросейсмический эксперимент проведен при определенном параметре α зондирующего сигнала и получена виброграмма определенного качества, то изменение параметре α неизменно приведет к

изменению качества виброграммы – качество либо улучшится, либо станет хуже. В этом случае представляется конструктивным подход планирования вибросейсмического эксперимента, в котором предполагается манипуляция параметром зондирующего сигнала с целью нахождения локального максимума кривой рис. 6.

Автор выражает благодарность участникам семинаров лаборатории геофизической информатики ИВМиМГ СО РАН, в атмосфере которых формировалась постановка решаемой задачи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сильвиа М.Т. Обратная фильтрация геофизических временных рядов при разведке на нефть и газ / Сильвиа, М.Т., Робинсон Э.А. пер. с англ. – М.: Недра, 1983. – 447 с.
2. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов / В.И. Тихонов. - М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.

© С.А. Ефимов, 2007

УДК 550.24

В.Ю. Тимофеев, Д.Г. Ардюков, Р.Г. Седусов, Е.В. Бойко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск

СОВРЕМЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ АЛТАЕ-САЯНСКОГО РЕГИОНА ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Современное деформирование земной коры Алтае-Саянской зоны в особенности южной части Горного Алтая в последнее десятилетие определялось процессами перед, в момент и после Чуйского землетрясения (27.09.2003, $M = 7.5$). Исследование скоростей и деформаций земной коры методами космической геодезии на сети из 18-20 пунктов позволило разделить этапы подготовки землетрясения (2000-2003), эпохи косейсмических (2003-2004) и постсейсмических смещений (2004-2005-2006). В поле скоростей Горного Алтая перед землетрясением выделяются два кластера: СЗ смещений (1-3 мм/год) и СВ смещений (4-12 мм/год). СВ смещения юго-восточной части Горного Алтая согласуются с ориентацией скоростей в западной части Монголии и Китая. Анализ величины скорости на С по профилю с юга Азии (Лхаса) на север (Новосибирск) выявил дефицит скорости (5-8 мм в год) в области будущего Чуйского землетрясения, что позволяет оценить возможное смещение в очаге (2-3 м). В зоне будущего землетрясения получены максимальные величины скоростей деформаций (до минус шестой) и максимальные деформации растяжения и изгиба. Поле смещений в эпоху 2003-2004 гг. в большей степени определяется подвижками в момент основного события и серии афтершоков. По горизонтальным скоростям получено правостороннее смещение вдоль нодальной плоскости при этом вертикальные смещения на порядок меньше горизонтальных. В зависимости от расстояния до плоскости горизонтальные смещения менялись от 0.35 м (в 15 км) до 0.02 м (в 90 км) (рис. 1).

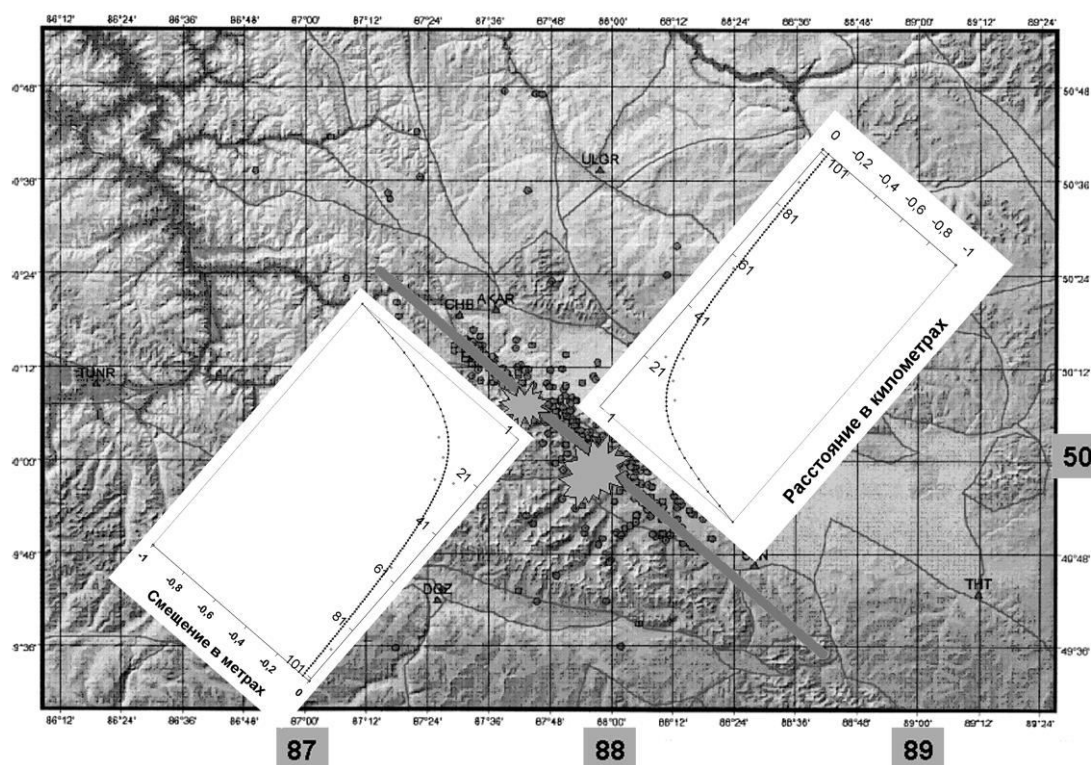


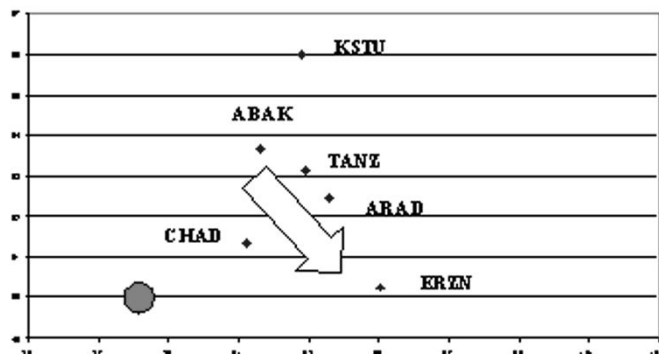
Рис. 1. Правосторонний сдвиг в зоне Чуйского землетрясения по 2D модели, красная линия – нодальная плоскость (130°N), звездочками показано положение эпицентров землетрясений 27.09.2003 и 01.10.2003, зелеными точками показаны афтершоки

Используя 2-D упругую модель по результатам станций в центре зоны (KURA и CHAG) получены оценки глубины (16 км) и смещения по разрыву (2 м). По нашим расчетам глубина убывает к краям нодальной плоскости, а длина разрыва составила 140 км. Экспериментальное определение величины косейсмической деформации показывает, что зона деформаций (уровня минус шестой и более) простирается на 100 км от эпицентра. Сдвиговая деформация в центре зоны сменяется на области сжатия и растяжения по краям нодальной плоскости. Для оценки вертикальных смещений использована 3-D модель ограниченного разрыва, получено, например, для пункта UKOK (плато Укок к ЮЗ от эпицентра) из эксперимента 28 мм, а по модели 25 мм. Полученные оценки косейсмических смещений хорошо согласуются с данными сейсмологов и геоморфологов. Оценка пространственного распределения косейсмических смещений в Алтае-Саянском регионе проводилась на сети из 5 пунктов (Тува, Восточные Саяны) в эпоху (2000-2001-2002-2004 гг.) иркутскими учеными и на сети из 3 пунктов (Западные Саяны) в эпоху (2003-2004-2005-2006 гг.) нашей группой. Результаты обработки данных приведены на рис. 2 и 3.

Косейсмические смещение пунктов дальней зоны (250-450 км)

по пересчету данных GPS съемки Института земной коры СО РАН (Лухнев А., Санжеев и др., 2005). Эпохи 2000-2001-2002-2004 гг.. Данные пересчитаны относительно пункта Абакан, расположенного на равнине.

Смещение правостороннее, т.е. на юго-восток, эпицентр землетрясения показан красной точкой.



Пункт	Широта	Долгота	Скорость на С	Скорость на В
KSTU Красноярск	55.993	92.794	-2.84 ± 0.24	-0.21 ± 0.36
АВАК Абакан	53.669	91.590	0.00	0.00
TANZ перевал	53.135	92.916	-2.18 ± 0.62	$+0.17 \pm 0.94$
ARAD Ардан	52.443	93.570	-1.04 ± 0.27	$+0.76 \pm 0.43$
CHAD Чадан	51.334	91.198	-1.58 ± 0.29	$+1.33 \pm 0.50$
ERZN Эрзин	50.250	95.023	-0.73 ± 0.29	$+0.48 \pm 0.45$
Среднее по 4-м	51.79	93.18	-1.38	+0.69

Рис. 2. Косейсмические смещения Тувы и Саян пересчитанные относительно пункта Абакан, расположенного в равнинной части изучаемой территории

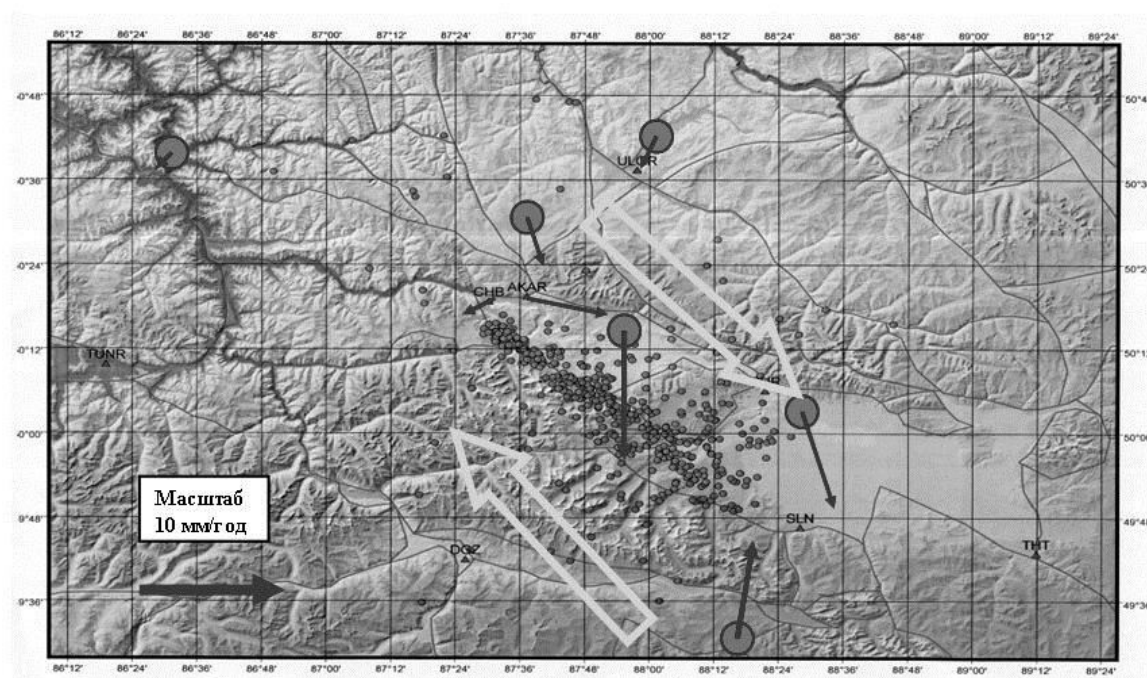


Рис. 3. Постсейсмические смещения эпохи 2004-2005 гг. смещения в зоне Чуйского землетрясения. Характер смещений сохраняется – правосторонний сдвиг, величина смещений падает в 50 раз

Величина косейсмической подвижки на расстояниях 300-400 км от эпицентра составляет 1-2 мм. В зоне Западно-Саянского разлома выделяется правостороннее горизонтальное смещение в 1-3 мм в год. В годы после землетрясения проведены 3 съемки по геодинамической сети Алтая (рис. 4).

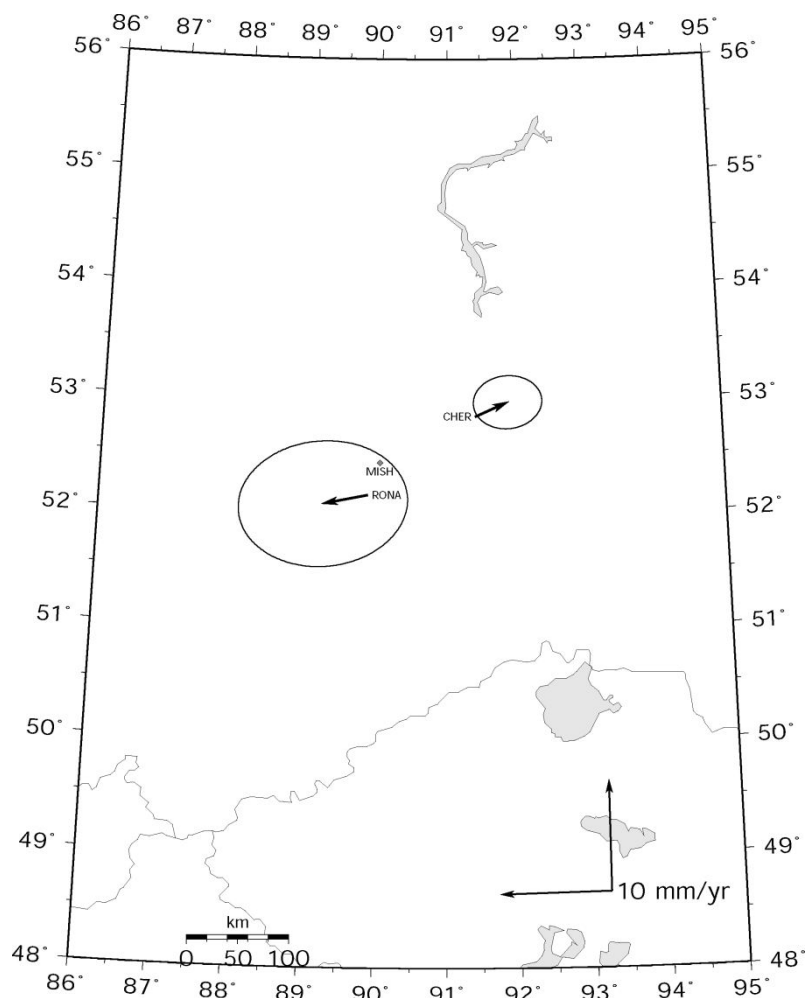
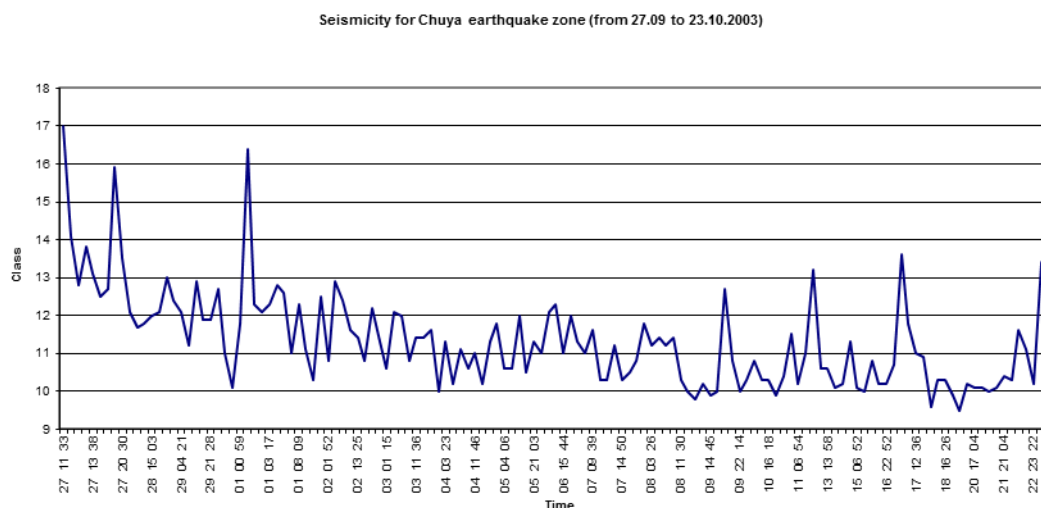


Рис. 4. Смещение пунктов в зоне Западной Саянского разлома в период 2003-2004-2005-2006 гг. Правосторонний сдвиг по разлому

В этот период постсейсмических смещений скорости упали в 50 раз (до 3-8 мм/год) при этом сохранилось ориентация смещений (правосторонний сдвиг). Выбор модели постсейсмических смещений можно осуществить через несколько лет, когда картина горизонтальных смещений вернется к конфигурации, наблюдавшейся до землетрясения. Анализ сейсмологических данных показывает, что активность в эпицентральной зоне в последние три года сохраняется, постепенно затухая (рис. 5). График осредненной сейсмичности отражает смещение активности на восток зоны.

a)



b)

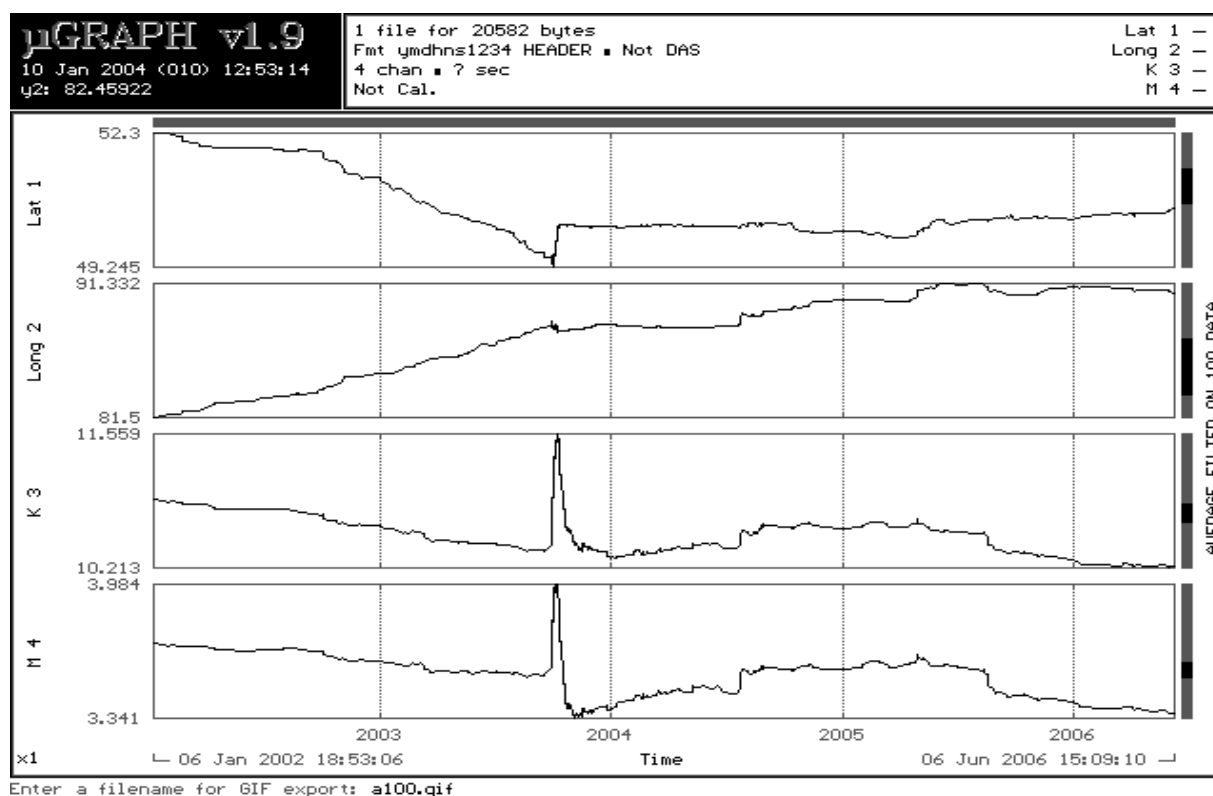


Рис. 5. а) Землетрясения в эпицентральной зоне. 27/09/2003 – 23/10/2003 ($M > 3$, Класс > 10); б) Сглаженные данные (по 100 событий, $M > 3$) для Алтае-Саянского региона за период 06/01/2002-06/06/2006. Сверху вниз – широта, долгота, магнитуда и класс. Пиковая аномалия – период Чуйского землетрясения и его главных афтершоков.

Работа выполнена при поддержке Интеграционных грантов СО РАН № 27, 87, 116 и Программы Пр.РАН 16.3.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гольдин, С.В. Поля смещений земной поверхности в зоне Чуйского землетрясения, Горный Алтай / С.В. Гольдин, В.Ю. Тимофеев, Д.Г. Ардюков // Доклады Акад. Наук, 2005, Т. 405. – № 6. – С. 804–809.

2. Тимофеев, В.Ю. Поля и модели смещений земной поверхности Горного Алтая / В.Ю. Тимофеев и др. // Геология и геофизика. – 2006. – № 8. – С. 923–937.
3. Тимофеев, В.Ю. Мониторинг современных движений земной коры в зоне Чуйского землетрясения GPS методом / В.Ю. Тимофеев, Д.Г. Ардюков // ГЕО-Сибирь-2006. Т.3. Мониторинг окружающей среды, геоэкология, дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия. Ч.2: сб. материалов междунар. науч. конгресса, 24-28 апр. 2006 г. – Новосибирск: СГГА, 2006. – С. 65–72.
4. Лухнев, А.В. Современные тектонические деформации центральной Азии по данным измерений методом GPS-геодезии за 1994-2004 гг. / А.В. Лухнев // Современная геодинамика и опасные природные процессы в центральной Азии. – Вып. 2. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2005. – С. 28–38.

© В.Ю. Тимофеев, Д.Г. Ардюков, Р.Г. Седусов, Е.В. Бойко, 2007

УДК 550.24

В.Ю. Тимофеев, Д.Г. Ардюков

ИНГГ СО РАН, Новосибирск

Е.И. Грибанова

ГС СО РАН, Новосибирск

ВАРИАЦИИ НАКЛОНОВ И ДЕФОРМАЦИЙ В БРЗ

Наклоны и деформации земной коры изучаются различными геодезическими и геофизическими методами [1]. Для изучения современных тектонических деформаций, их связи с сейсмичностью Байкальского региона (БРЗ) непрерывные измерения проводятся с 1985 года в подземной галерее сейсмостанции Талая [2]. Известно, что наклонометры как индикаторы современных движений земной коры применяются в различных регионах мира для мониторинга современных деформаций, вызванных как техногенными воздействиями, так и естественными – землетрясениями и вулканами. В районе Байкальского рифта пункт наблюдений наклонов и деформаций (штольня Талая) находится на границе юго-западной части БРЗ и Сибирской платформы. Границей является глубинный разлом, пересекающий литосферу (мощность земной коры 45 км). Общая протяженность разломов по северной границе – более тысячи километров. В районе станции латеральные неоднородности коры и верхней мантии согласно расчетам порождают девиаторные напряжения в 35-40 МПа, т. е. близкие к максимальным для БРЗ [3]. Вдоль разлома к северу от станции осуществляется левостороннее смещение крипового типа. Согласно геологическим данным и тектоническим моделям средняя величина смещения на восток блоков земной коры юго-западной части БРЗ 2 мм в год. Современные вертикальные и горизонтальные смещения в БРЗ достигают максимальных значений в зонах глубинных разломов (до 10 мм в год). Физическое моделирование процесса растяжения литосферы с учетом особенностей БРЗ показывает наличие зоны растяжения в центре, флаговых субширотных сдвиговых областей и компоненты север-юг для юго-западной части БРЗ [4]. Двадцать лет наблюдений на станции Талая позволяют проанализировать связь изменений наклона и вариации сейсмичности БРЗ.

Измерения наклонов в штольне сейсмостанции выполняются с помощью комплекта (С-Ю и В-З) кварцевых наклономеров (системы Д.Г. Гриднева) с цифровой записью. Чувствительность приборов (до 0.1 мсек. дуги) позволяет исследовать наклоны в приливном диапазоне, а также долговременный ход. При построении многолетних графиков хода наклона использовались значения скорости за месяц, которые определялись на начальную дату каждого месяца, приливные вариации в этом случае исключались. Наиболее наглядно изменение наклона во времени отражает векторная диаграмма. Она строится в координатах С-Ю и В-З, по приращениям за месяц, начало каждого года отмечено отдельно. Векторная диаграмма (рис. 1) показывает замыкание кривой за время около 18-20 лет (1985-2005 гг.). Амплитуда максимальных вариаций по обоим составляющим от 8 до 10 сек. дуги. Годовая скорость наклона изменялась от 0.01 до 3 сек. дуги. Поведение наклонов для компонент север-юг и восток-запад различно, периоды вариаций наклона от 1-3 лет до 20 лет. По направлению север-юг отмечается инверсия в 1989 году.

Рис. 1. Векторная диаграмма хода наклона с марта 1985 года по декабрь 2005 года. Горизонтальная ось: запад – восток, вертикальная ось: север-юг. Приведены направления на эпицентры землетрясений и отметки – начало года

для $100 \text{ км} < L < 200 \text{ км}$. На временном интервале наклономерных наблюдений рассмотрим сейсмическую активность в блоке земной коры в районе с. Талая. Для 50-километровой зоны вокруг станции выделяются несколько этапов. Первый, до 1990 года, характеризуется слабыми землетрясениями $M=3.5\div 4.0$ (1÷2 события в год) и заканчивается эпохой сильных землетрясений 1989-1991 годов, второй – их отсутствием до середины 1995 г. Третий период начинается в 1995 году. Он характерен двумя землетрясениями на западе и востоке от станции. На кривой хода наклонов выделяется реакция на сильные землетрясения в регионе. Инверсия в ходе наклона в азимуте север-юг произошла в 1989 году, а инверсия в азимуте восток-запад в 1995 и 1999 годах.

В целом, изменения наклонов во времени имеют сложный характер и коррелируют с сейсмической активностью, как локальной (до 50 км), так и региональной (до 200 км). По различным компонентам наклона зарегистрированы смены знака движений в периоды сильных землетрясений ($M \geq 5.5$). В период отсутствия землетрясений (1990-1995 гг.) изменения описываются кривой затухания деформаций в виде: $e = e_0 \cdot \exp(-t/T)$. Т.е. деформирование земной коры в этот период имеет характер жестковязкого течения по реологической модели Кельвина-Фойхта при значении эффективной вязкости порядка $\eta_s = 2 \times 10^{18} \text{ Па} \cdot \text{с}$. Подобное поведение горных пород можно объяснить существованием зон вертикальной трещиноватости вдоль разломной зоны и локальной аномалией - интрузией (с наличием слюды в штольне). Переменная часть тектонических напряжений по вариациям наклонов земной поверхности оценивается величиной порядка 2 МПа. Размер приразломной зоны деформации горных пород для наклонов имеет порядок первых километров. Полученные оценки для наклономерных измерений согласуются с данными нивелировок, определением силы тяжести и деформаций. Резкие изменения в ходе вектора наклона коррелируют со временем возникновения сильных землетрясений ($M \geq 5$) во 200 км-ой зоне вокруг станции наблюдений. Также на рис. 1 отмечены моменты возникновения слабых землетрясений в 50 км-ой зоне вокруг станции.

С моментами возникновения землетрясений коррелируют следующие особенности векторной диаграммы: изменение месячной скорости хода наклонов, повороты направления хода вектора, образования «петель» на векторной диаграмме хода наклонов. Многолетние вариации деформации. Обратимся к результатам деформографических измерений в штольне станции Талая. Измерение линейных деформаций на плоскости в трех и более азимутах позволяет получить значения деформации в главных осях. Измерение деформаций по трем и более направлениям начаты в штольне Талая с 1989 года с помощью кварцевых штанговых приливных деформографов, а с 1995 года дополнены наблюдениями с помощью лазерных систем. Положение главных осей и их изменение во времени по отдельным годам и за все годы измерений по нарастающей от начальной эпохи (конец 1989 года) представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Ежегодные изменения величины и направления главных деформаций (Талая)

Год	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Сжатие (1), $s_1 \cdot 10^6$	6.9	11.9	1.1	5.5	1.3	2.3	2.6	0.3	2.0	1.0	1.1	1.8	0.5	0.7	0.9	1.3
Раст. (2), $s_2 \cdot 10^6$	-5.8	-6.7	-4.0	-3.2	-2.1	-0.9	1.0	-2.1	-0.1	-0.4	-2.0	0.4	-1.1	0.1	-0.9	0.1
Верт. деф., $s_3 \cdot 10^6$	-0.4	-1.8	1.0	0.7	0.3	-0.5	-1.2	0.6	-0.6	-0.5	0.4	-0.7	0.2	-0.3	0.0	-0.5
Ориентация оси (2)	44.9	127.0	24.2	136.9	137.9	139.6	186.5	111.5	12.5	34.0	110.3	-46.3	-45.6	-84.3	-74.7	57.0
Объем. деф., $\theta \cdot 10^6$	0.7	3.5	-2.0	1.5	-0.6	1.0	2.4	-1.2	1.3	0.4	-0.6	1.5	-0.4	0.5	+0.0	1.0
Сдвиг. дефор., $\gamma \cdot 10^6$	12.7	18.6	5.1	8.7	3.4	3.2	1.6	2.4	2.1	1.4	3.1	1.4	1.6	0.6	1.8	1.2
Напряж. 1, σ_1 , МПа	0.29	-0.20	0.03	0.25	0.04	0.11	0.15	-0.01	0.11	0.05	0.03	0.15	0.02	0.03	0.03	0.07
Напряж. 2, σ_2 , МПа	-0.22	0.55	-0.2	-0.10	-0.10	-0.02	0.08	-0.11	0.02	-0.01	-0.09	0.05	-0.05	0.01	-0.03	0.02
Сдвиг. напряж., τ	0.26	-0.37	0.10	0.17	0.07	0.06	0.03	0.05	0.04	0.03	0.06	0.05	0.03	0.01	0.03	0.02

Таблица 2. Значения деформаций по определениям на ст. Талая. Начальная эпоха – конец 1989 года

Год	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Сжатие (1), $\varepsilon_1 \cdot 10^6$	6.9	6.7	2.7	7.8	9.0	11.3	12.8	12.9	13.3	12.5	13.0	14.8	15.3	15.7	15.4	16.0
Расшир.(2), $\varepsilon_2 \cdot 10^6$	-5.8	-0.4	0.6	-2.1	-4.3	-5.1	-3.0	-4.8	-3.3	-2.2	-3.2	-2.8	-3.9	-3.5	-3.1	-2.2
Верт. деф., $\varepsilon_3 \cdot 10^6$	-0.4	-2.1	-1.1	-1.8	-1.5	-2.1	-3.2	-2.7	-3.3	-3.5	-3.2	-4.0	-3.8	-4.1	-4.1	-4.6
Ориент. (ε_1) оси (1) в градусах	-45.1	22.5	18.5	41.8	43.4	42.2	45.1	46.6	50.9	49.8	48.5	48.1	47.8	48.7	51.3	50.4
Ориент. (ε_2) оси (2) в градусах	44.9	112.5	108.5	131.8	133.4	132.2	135.1	136.6	140.9	139.8	138.5	138.1	137.8	138.7	141.3	140.4
Объем. деф., $\theta \cdot 10^6$	0.7	4.2	2.2	3.7	3.1	4.1	6.5	5.4	6.6	6.9	6.4	8.0	7.6	8.1	8.2	9.2
Сдвиг. деф., $\gamma \cdot 10^6$	12.7	-7.1	-2.1	-10.0	-13.3	-16.4	-15.8	-17.7	-16.6	-14.7	-16.2	-17.6	-19.2	-19.2	-16.5	-18.2

Наиболее значимое изменение в положении осей деформации (смена знака – инверсия осей) отмечено в период Бусингольского землетрясения, произошедшего в 400 км к западу от станции наблюдений – 27.12.1991, $M = 6.5 \div 7.0$. Это изменение отражает смену знака смещений в системе разломов юго-западного фланга БРЗ. Обратившись к табл. 2, следует отметить, что инверсия осей главных деформаций произошла только в эпоху землетрясения 27.12.1991. Эпоха перед этим событием примечательна также максимальными годовыми значениями сдвиговой деформации. Эпохи землетрясений магнитудой 5.5-6.0 выделяются слабыми (несколько градусов) вариациями оси сжатия и сдвиговой деформации. Значимые изменения отмечены также в ходе объемной деформации. Полученный график изменений с конца 1989 года по конец 2005 года приведен на рис. 2.

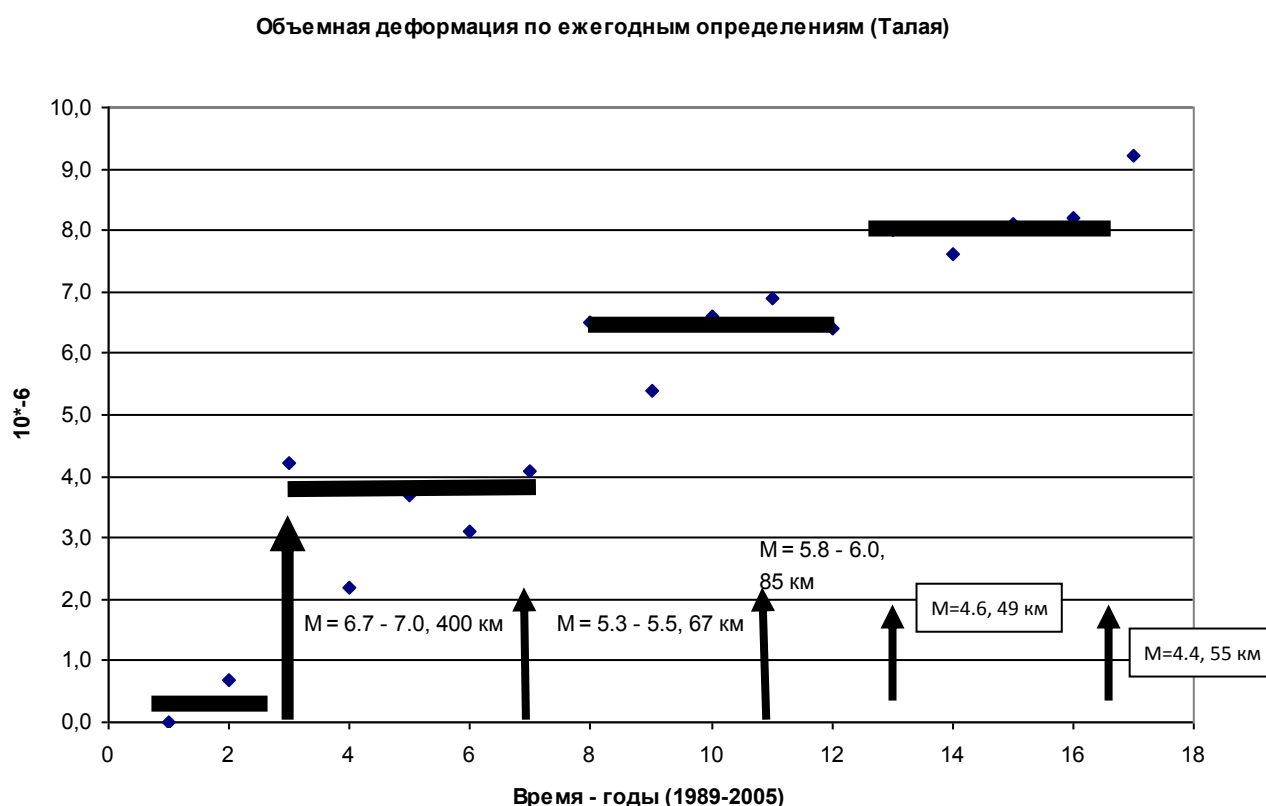


Рис. 2. Вариации объемной деформации по ежегодным определениям, осреднения по эпохам (1989-1990, 1991-1995, 1996-2000, 2001-2005), показаны моменты сильных землетрясений в юго-западной части БРЗ

График получен на основе информации снятой со штанговых деформографов при тестировании результатов данными по лазерным деформографам. Как видим, на графике прослеживается накопление объемной деформации со временем. С другой стороны на графике можно выделить периоды квазипостоянного поведения (объемной деформации, отмечены горизонтальными линиями) и скачкообразного изменения в эпохи

сильных землетрясений региона (на графике показаны моменты землетрясений, магнитуда по Рихтеру и расстояние до эпицентра в километрах). С другой стороны можно рассматривать последнюю эпоху 2000-2005 гг. как период постепенного накопления (увеличения) объёмной деформации (рис. 2). В этом случае, возможно, происходит постепенная подготовка к сильному землетрясению вблизи станции, т.к. скорость накопления деформации не превышает значения 10-6/год и период до разрушения материала (10-3/год или 10-4/год) – до столетия.

В целом, следует сказать, что сильные землетрясения региона проявляются в долговременном ходе деформации в приразломной зоне: в объёмной деформации, вариациях ориентации главных осей деформации и в изменениях величины сдвиговой деформации. Аномалии в параметрах деформации выделены для событий магнитуды 7 на расстоянии до 400 км от эпицентра, для событий магнитудой 5.5÷6.0 на расстоянии 50-75 км от эпицентров.

Работа выполнена при поддержке Интеграционных грантов СО РАН № 27, 87, 116 и Программы Пр.РАН 16.3.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стейси Ф. Физика Земли / Ф. Стейси. – М.: Мир, 1972. – 342 с.
2. Тимофеев В.Ю. Исследование наклонов и деформаций земной поверхности в БРЗ / В.Ю. Тимофеев и др. // Геология и геофизика. – 1994. – № 3. – С. 119–129.
3. Кабан А., Юнга И., 2000. Напряжения земной коры Байкальского рифта / ДАН, 371. – № 4. – С. 526–530.
4. Chemenda A., Deverchere J., Calais E. 2002. Three-dimensional laboratory modelling of rifting: application to the Baikal Rift, Russia // Tectonophysics. 356, 253-273.

© В.Ю. Тимофеев, Д.Г. Ардюков, Е.И. Грибанова, 2007

АНАЛИЗ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ТИХОГО ОКЕАНА

Тихий океан является источником климатической изменчивости, влияющей на атмосферные процессы не только на региональных, но и на глобальных масштабах. Наиболее сильным сигналом является явление Эль-Ниньо-южные осцилляции, представляющее межгодовую изменчивость в тропиках. В то же время, в средних широтах существуют вариации порядка десятилетий, так называемые Тихоокеанские десятилетние осцилляции (ТДО), захватывающие Тихий океан и Северную Америку [1-3]. Эти колебания могут быть выявлены на основе статистического анализа аномалий температуры поверхности океана (ТПО). Для этого используются данные реанализа NCEP/NCAR. Область для анализа поверхностной температуры ограничена сферической трапецией [112.5 E, 70.5 W, 29.5 S, 60.5 N]. Для выделения сигнала в тропиках можно пользоваться классическим EOF анализом. Однако, для выделения сигнала в субтропиках этот подход является недостаточно эффективным, поскольку сильный сигнал в тропиках не позволяет выявить сигнал в средних широтах. Поэтому для определения десятилетних колебаний в средних широтах был использован кластерный метод. Кластеры (классы) организуются как регионы достаточно хорошо скоррелированные внутри себя, в пространстве или во времени [4].

1. Кластерный анализ

Кластерный анализ - метод группировки экспериментальных данных в классы (кластеры). Можно проводить классификацию двумя способами: по пространственным состояниям, и в пространстве временных состояний. Перед использованием метода, исходные поля нормируются на стандартное отклонение.

1.1. Классификация по пространственным состояниям

Задача метода состоит в разбиении множества карт ТПО, состоящего из n временных рядов длиной m $F(t, x_i)$ на некоторое число $k \ll n$ подмножеств (классов) таких, чтобы каждая из реализаций $F(t, x_i)$ попала бы в один из классов с номером p ($p=1, \dots, k$). Все классы должны состоять из наиболее хорошо коррелирующих реализаций. При этом каждому классу ставится некоторая образцовая кривая $Z_p(t)$ – центр класса, представляющая свой класс, так чтобы любая реализация из данного класса должна коррелировать со своим центром лучше, чем с любым другим. Тогда точки исходной области объединятся в k областей, каждая из которых будет состоять из n_i точек ($n_1 + n_2 + \dots + n_k = n$), а каждый центр будет представлять временную изменчивость ТПО в своем классе.

Алгоритм классификации строится рекурсивно по k . Задача выбора числа классов – это максимально точное описание исследуемого поля с помощью минимального числа образцов. При малом числе классов в каждый класс могут попасть и те временные ряды (и их число может быть велико), которые будут слабо коррелировать со своими центрами. С другой стороны, последовательно увеличивая число классов, описывается все более тонкая пространственная структура полей, однако появляется пестрота в общей картине, которая будет затруднять общий анализ.

1.2. Классификация в пространстве временных состояний

Если представить нашу информацию об аномалиях изменчивости ТПО в виде m пространственных карт отнесенных к моментам времени $t=1, \dots, m$, т.е. поменять местами временную и пространственную переменные t и x и теперь классифицировать массив $F(t_i, x)$, то с математической точки зрения задача не изменится. В этом случае множество, состоящее из m карт $F(t_i, x)$ пространственного распределения ТПО, разбивается на некоторое число k классов состоящих из наиболее “похожих” карт, и для каждого класса с номером p ($p=1, \dots, k$) находится образцовая карта $Z_p(x)$, т.е. карта, достаточно точно описывающая пространственное распределение ТПО в моменты времени p .

2. Кластерный анализ температуры поверхности океана

Для изучения межгодовой изменчивости ТПО рассмотрим среднемесячные поля аномалий поверхностной температуры Тихого океана, заключенной в области $[122.5E^\circ, 70.5W^\circ, -29.5S^\circ, 60.5N^\circ]$, за период с января 1948 г. по август 2003 г. Эти поля представляются в виде матрицы размерности $n \times m$, где $n(11569)$ и $m(668)$ - количество исходных данных по времени и пространству, соответственно. Имеющуюся информацию при помощи метода кластерного анализа будем классифицировать по пространственным и временным состояниям.

На рис. 1 приведена карта – результат разбиения поля аномалий ТПО по пространственной классификации на 10 классов (нумерация класса не несет определенного физического смысла). Можно видеть, что классы распределены по всей исследуемой области Тихого океана. Белые поля означают отброшенные зоны с низкой корреляцией. На рис. 2, 3 представлены временные изменения для центров классов 7 и 8, относящихся к тропикам и средним широтам соответственно. На исходной кривой, на рис. 2 отчетливо выделяются события Эль-Ниньо 1976, 1982, 1986 и 1987 годов. В классе 8, находящемся в зоне продолжения Курошио, высокочастотные межгодовые колебания связаны со смещением субполярного фронта. В тоже время, во временном распределении в обоих случаях отчетливо выделяются гармоники с периодами 5 лет и 12-15 лет. Для выделения этих гармоник к исходным распределениям был применен оконный Фурье-фильтр с периодами 1-5 лет, 12-15 лет и 15-18

лет. Наиболее интересным представляется изменения в средних широтах. На рис.3 можно увидеть результаты фильтрации с указанными периодами. Видно, что существует квази-пятилетние колебания, совпадающие по периоду с квази-пятилетними колебаниями в тропической зоне класса 7. В то же время, явно выделяются вариации ТПО с периодами 10-12 лет, которые можно ассоциировать с проявлением ТДО.

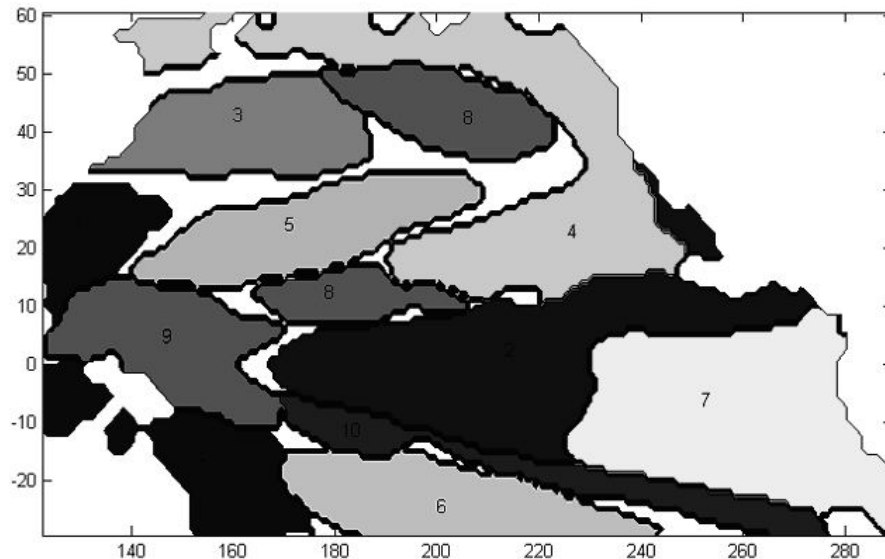


Рис. 1. Картина 10-ти полученных классов

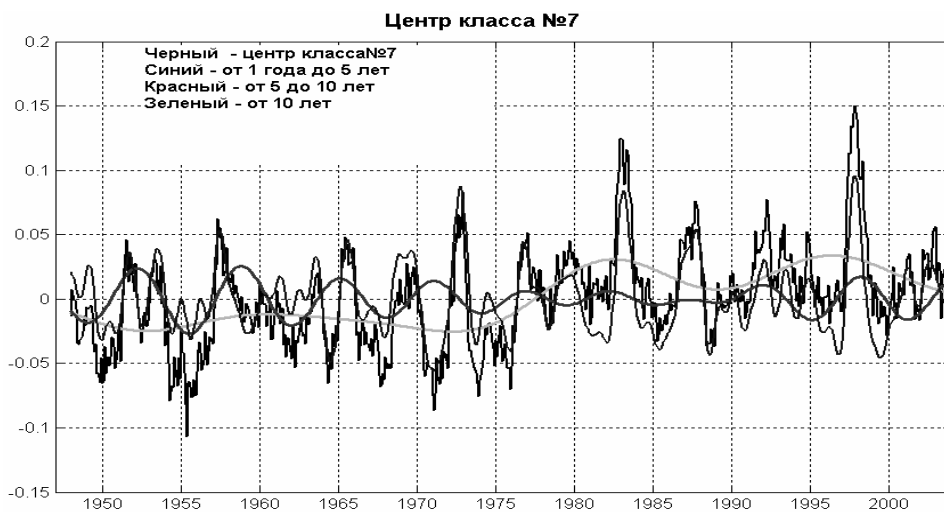


Рис. 2. Временное изменение для центра класса 7

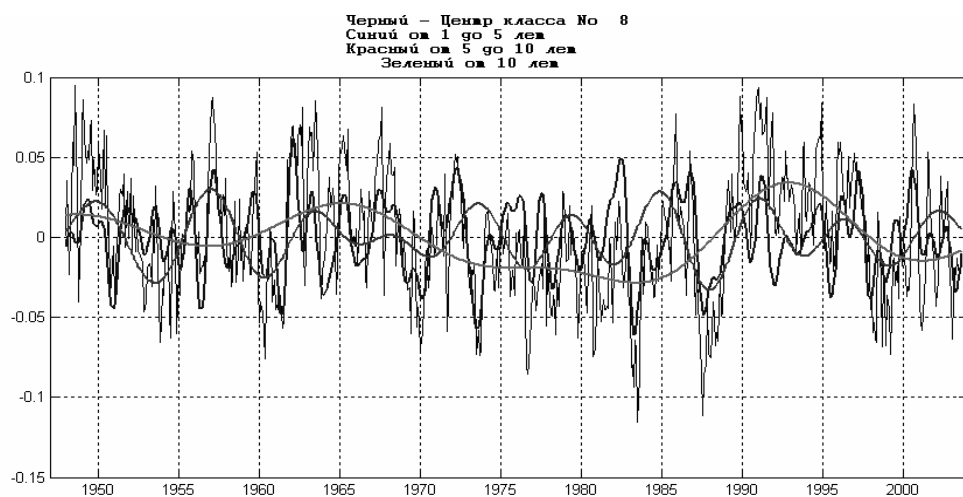
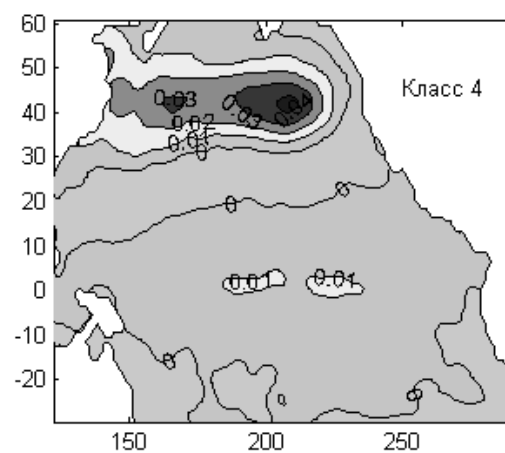
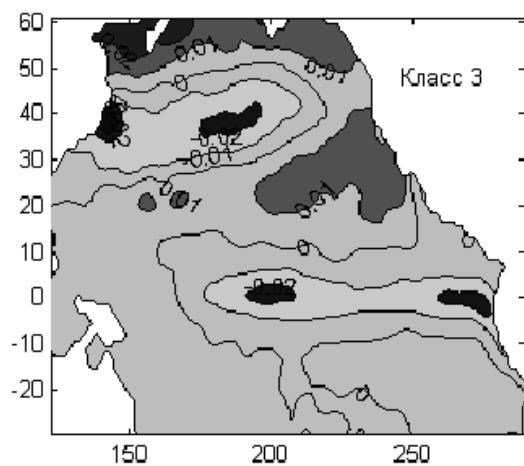
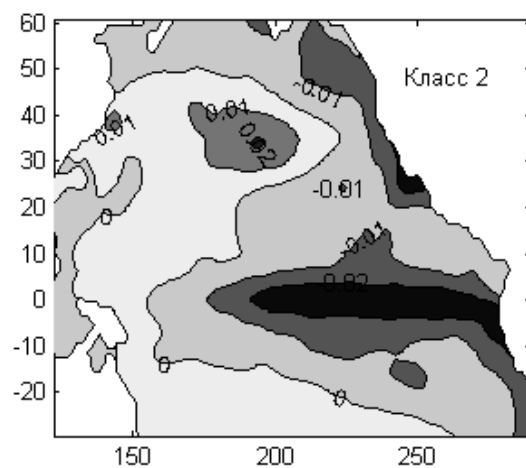
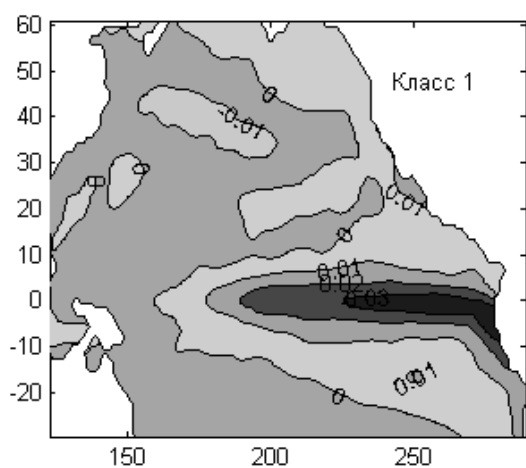


Рис. 3. Временное изменение для центра класса 8

На рис. 4 представлены картины для шести классов временной классификации.



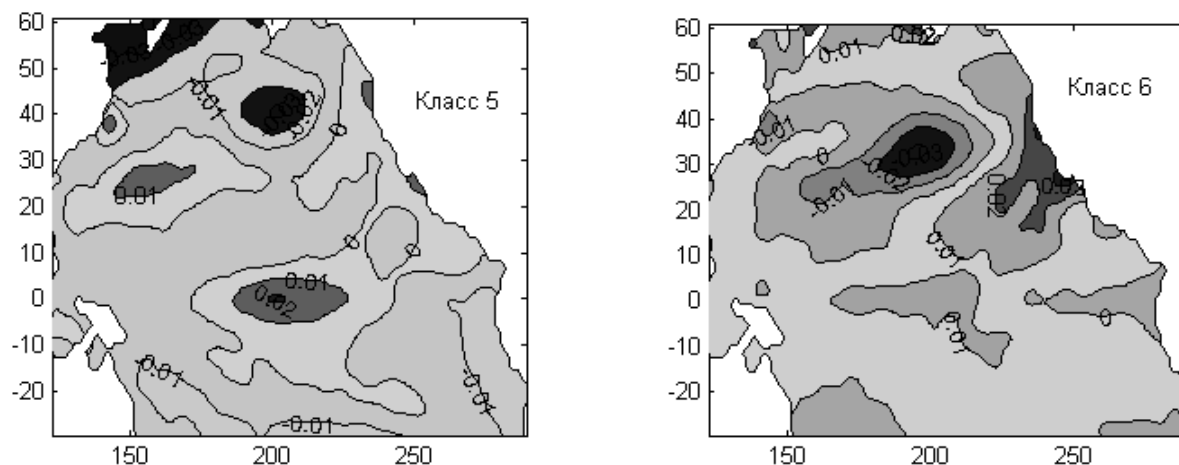


Рис. 4. Шесть классов временной классификации

Первые два класса соответствуют возникновению в топиках явлений Эль-Ниньо и Ля-Нинья соответственно. Наиболее интересными представляются остальные четыре класса, которые описывают колебания в субтропической и субполярной зонах Тихого океана. Так, третий и четвертый классы дают картину возникновения положительных и отрицательных аномалий в зоне субполярного фронта и продолжения Куро-Охотского. При этом отрицательные аномалии коррелируют с аномалиями в тропиках. Пятый класс описывает зону положительной аномалии в восточной части субполярной зоны. Шестой класс дает возникновение отрицательных аномалий в центральной части субтропической зоны. Можно предположить, что последние два класса имеют отношение к квази-десятилетним колебаниям, связанным с ТДО. Таким образом, использование кластерного анализа ТПО Тихого океана позволило выделить климатические вариации не только в тропической зоне с наиболее сильным сигналом, но и в средних широтах с циклом порядка десятилетий.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 05-05-54990, проекта РАН 17.3, проекта ОМН 1.3.9.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. F. Biondi, A. Gershunov, D.R. Cayan. North Pacific Decadal Climate variability since 1961. Letters, 2001, No1, pp.5-10.
2. Z. Gedalof, N.J. Mantua. A multi-century perspective of variability in the Pacific Decadal Oscillation: new insights from tree rings and the coral. Geoph. Res. Letters, 2002, vol. 29, No 24, pp. 57-1-4.
3. N.J. Mantua. Pacific-Decadal Oscillation (PDO). Encyclopedia of Global Environmental Change. Ed. T. Munn, 2002, pp.1-3.
4. V.V. Efimov, A.V. Prusov, M.V. Shokurov. Classification of the interannual anomalies of the temperature of the World Ocean Surface. Okeanologia, 1995, v. 35, No 4, pp. 505-513.

© В.И. Кузин, А.С. Лобанов, 2007

**ДИНАМИКО-ВЕРОЯТНОСТНЫЙ МЕТОД ЧЕТЫРЕХМЕРНОГО АНАЛИЗА И
ВАРИАЦИОННОГО УСВОЕНИЯ ПОЛЕЙ МЕТЕОЭЛЕМЕНТОВ²**

Рассматривается климатический ансамбль возможных реализаций соответствующих многомерных гидрометеорологических полей для выбранного интервала времени и заданного региона в виде [1-3, 6]

$$\{\vec{\xi}_{(n)}^i, i=1, 2, \dots\}, \quad (1)$$

где $\vec{\xi}_{(n)}^i = (\vec{U}^i(\vec{X}_j, t_k), T^i(\vec{X}_j, t_k), H^i(\vec{X}_j, t_k), \dots)^T$ – вектор реализаций полей скорости, температуры, геопотенциала и т. д. в пространственно-временных точках $(\vec{X}_j, t_k)$ рассматриваемой сеточной области размерности n .

Для численного построения ансамбля (1) используется совместное стохастическое и динамическое моделирование на основе объединения на принципе вариационного усвоения информации [1].

Этот подход позволяет совместить особенности детерминированных численных моделей динамики атмосферы и вероятностных моделей. Численная модель гидротермодинамики при этом служит пространственно-временным согласующим интерполянтom для восполнения и согласования пространственно-временных реализаций в некотором оптимальном смысле и позволяет получать те климатические характеристики, которые в исходную вероятностную модель не заложены и даже не могут быть достоверно получены по самой вероятностной модели. Кроме того, этот подход позволяет также получать соответствующие ансамбли статистически независимых климатических реализаций для отдельно выбранного региона и короткого периода времени. Существенной особенностью данного подхода является то, что в рамках единой модели используются данные реальных измерений, статистическое моделирование и численная модель гидротермодинамики атмосферы. При этом основным связующим элементом является вариационное усвоение информации гидродинамической моделью. В нашем случае используется вариационное усвоение на всем рассматриваемом временном интервале в пределах предсказуемости численной модели.

Суть этого подхода заключается в следующем. По доступной статистически значимой реальной климатической информации, заданной в виде соответствующих статистических характеристик (распределений, норм, дисперсий, корреляционных связей и т. д.), методами статистического моделирования строится ансамбль реализаций климатических случайных полей гидрометеоэлементов (1) с заданной статистической структурой [1-3, 9].

В данной работе предлагается один из методов статистического моделирования гидрометеорологических полей, основанный на спектральном разложении соответствующей корреляционной матрицы, рассчитанной по реальным данным [3].

Таким образом, пусть R – многомерная корреляционная матрица. представим ее спектральное разложение в виде

² Работа выполнена при поддержке РФФИ 05-05-98000-р_объ_a

$$R = W \Lambda W^T, \quad (2)$$

где W – матрица собственных векторов корреляционной матрицы R ;
 Λ – диагональная матрица соответствующих собственных значений.

Заметим, что представление (2) является ни чем иным, как разложением ее по так называемым главным факторам, а задача (2) является соответствующей задачей определения главных факторов. В нашем случае дальнейший шаг заключается в определении квадратного корня матрицы R в виде $R^{\frac{1}{2}} = W \Lambda^{\frac{1}{2}} W^T$, где $\Lambda^{\frac{1}{2}}$ – диагональная матрица, на диагонали которой стоят квадратные корни соответствующих собственных значений матрицы Λ , а индекс T определяет операцию транспонирования.

Тогда один из методов статистического моделирования можем определить в виде

$$\vec{\xi}_{(n)}^{(i)} = D_{\xi} R^{\frac{1}{2}} \vec{\psi}^{(i)}(x_j, y_j, p_j, t_j)^T + \vec{\bar{\xi}}(x_j, y_j, p_j, t_j), \quad (i=1, 2, \dots), \quad (3)$$

где $\vec{\psi}^{(i)}(x_j, y_j, p_j, t_j)^T$, $(i=1, 2, \dots)$ – Гауссовский случайный вектор с единичной дисперсией и нулевым средним, D_{ξ} – диагональная матрица дисперсий, $\vec{\bar{\xi}}(x_j, y_j, p_j, t_j)$ – вектор средних моделируемой случайной величины $\vec{\xi}_{(n)}^{(i)}$. Нетрудно видеть, что корреляционная матрица случайного вектора $\vec{\xi}_{(n)}^{(i)}$ в точности совпадает с матрицей R .

Дальнейшим шагом для построения климатического ансамбля реализаций является применение вариационного усвоения. С этой целью для каждой реализации из этого ансамбля (3) решается задача вариационного усвоения с помощью математической модели гидротермодинамики атмосферы, в результате чего получается ансамбль новых реализаций,

$$\{\tilde{\xi}_{(n)}^i, i=1, 2, \dots\} \quad (4)$$

отличающихся от исходных с точностью решения задачи усвоения и удовлетворяющих свойствам, присущим математической модели.

Подробное описание совместной динамико-вероятностной модели и некоторые ее характеристики даны в работе [1]. Для решения этой задачи используется итерационный метод градиентного спуска, основанный на методе Лагранжа и решении соответствующих прямых и сопряженных задач. В численных расчетах ансамбль (3) был представлен только реализациями поля температуры. Однако, ансамбль (4) содержит уже все поля метеозадающих элементов в соответствии с использованной моделью [1]. В этом смысле модель является не только пространственно-временным интерполянт, но и позволяет воспроизводить недостающие поля метеозадающих элементов. Анализ статистической структуры ансамбля (3) показывает, что этот ансамбль может быть использован в качестве климатического для дальнейшего использования при решении прикладных задач и, в том числе, для задачи распространения примеси в атмосфере и исследования процессов выбросов в атмосфере. Например,

рассчитанный локальный климатический ансамбль (4) включающий в себя 2000 реализацию, оказался вполне информативным для получения соответствующих статистически значимых оценок [1-3].

Одним из практических применений ансамбля (4) является метод четырехмерного анализа полей метеозленентов, заданных в нерегулярных пространственно-временных точках [6]. Этот метод основан на представлении искомым полей метеозленентов в регулярных пространственно-временных точках в виде соответствующего конечного отрезка ряда фурье разложения этих полей по ортогональным функциям базиса главных факторов корреляционной матрицы ансамбля (4). При этом коэффициенты разложения соответствующего ряда Фурье определяются методом наименьших квадратов по данным измерения в нерегулярной сети станций. Достаточно подробное описание этого алгоритма приведено в работе [5-6]. Мы остановимся лишь на одном из существенных моментов при построении соответствующих корреляционных матриц как для исходного стохастического моделирования (2), так и для расчета многомерных базисных функций главных факторов ансамбля (4). Поскольку реализации ансамблей (1) и (4) содержат в своем представлении различные размерные компоненты (температура, давление, скорость ветра и т. д.), то, естественно, необходимым предварительным этапом является их обезразмерование и взаимное согласование по характерной величине. В противном случае может оказаться, что второстепенные компоненты в реализациях (например, влажность) будут определяющими, что неминуемо отразится на информативности соответствующих базисных функций главных факторов. Поскольку при расчете корреляций и минимизации функционала качества в задаче вариационного усвоения используются квадратичные зависимости, то, естественно, использовать для нормировки и согласования компонентов реализаций те же коэффициенты, что и задаче вариационного усвоения с помощью численной модели гидротермодинамики атмосферы [1], а именно, согласующие коэффициенты в соответствующем интеграле полной энергии системы. Конечно, интеграл полной энергии системы не всегда удастся представить в виде суммы квадратичных слагаемых, что зависит от используемой модели динамики атмосферы. Поэтому в этом случае необходимо использовать некоторое приближенное представление интеграла полной энергии, в котором свойства квадратичности имели бы место. В нашем случае для используемой модели динамики атмосферы интеграл полной энергии представим в виде

$$E(t) = \iint_G \left(\frac{1}{2} u^2 + v^2 + \frac{g}{(g_a - g)\bar{T}} T^2 \frac{\partial}{\partial \sigma} G + \iint_{G_s} \frac{P_s}{R\bar{T}_s} H_s^2 dG_s \right) \quad (5)$$

где g_a – сухоадиабатический градиент температуры; g – градиент температуры стандартной атмосферы $\bar{T} = \bar{T}(p)$; T – отклонение температуры от ее стандартного значения $\bar{T}$; R – газовая постоянная; $G = [0, X] \times [0, Y] \times [p_s, 0] = G_s \times [p_s, 0]$ – область решения задачи; $p_s, \bar{T}_s, H_s$ –

приземное давление, температура стандартной атмосферы и отклонение геопотенциала от стандартного значения на уровне земли соответственно; g – ускорение свободного падения.

Таким образом, исходя из формулы (5), нормировочные множители для компонентов u, v, T и H_s реализаций в ансамбле (4) следует выбрать равными

$$\alpha_u = 1, \alpha_v = 1, \alpha_T = \sqrt{\frac{g}{(\gamma_a - \gamma)\bar{T}}}, \alpha_H = \sqrt{\frac{p_s}{RT_s}} \quad (6)$$

соответственно, которые характеризуют взаимное соотношение величин этих компонентов.

Для расчета корреляционной матрицы и базисных функций главных факторов используется специальный алгоритм, учитывающий достаточно большую размерность векторов реализаций в ансамбле (4). Подробное описание этого алгоритма приведено в работах [4,6].

Численные эксперименты с использованием данной методики для задачи четырехмерного анализа полей метеоэлементов, приведенные в работе [6] (см. рис. 1), показывают его высокую эффективность. Поскольку базисные функции главных факторов имеют не только регулярную пространственную структуру, но и заданы в регулярных временных точках, то этот метод может быть использован для быстрого усвоения данных измерений полей метеоэлементов, о чем также свидетельствуют приведенные результаты работы [6].

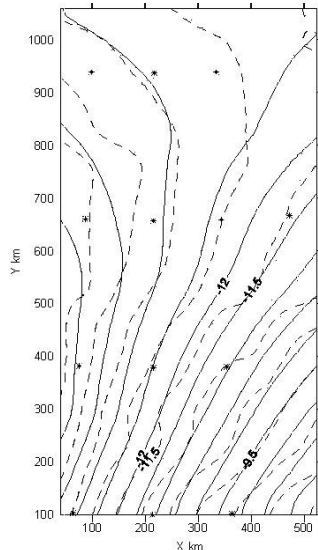


Рис. 1. Изолинии поля температуры на уровне 500 мб в момент времени $t = 0$, полученного после вариационного усвоения (сплошные линии) данных, заданных в точках, обозначенных символом * и изолинии поля температуры, полученного в результате четырехмерного анализа (пунктирные линии) по главным факторам

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. V.A. Ogorodnikov and A.V. Protasov, Dynamic probabilistic model of atmospheric processes and variational methods of data assimilation. Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling (1997), 12, No. 5, 461–479.
2. V.A. Ogorodnikov and A.V. Protasov, Variational method of data assimilation in the dynamic probabilistic modelling of climatic fields in the atmosphere. Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling (2000), 15, No. 5, 435–454.

3. Протасов, А.В. Динамико-вероятностное моделирование климатических полей метеозлементов в локальной области на основе данных реанализа / А.В. Протасов // Тр. Междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2006», т. 3, ч. 2. – Новосибирск: Изд-во СГГА, 2006. – С. 112–118.
4. Пененко В.В. Построение естественных ортогональных базисов для представления полей метеозлементов / В.В. Пененко, А.В. Протасов // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1978. – Т. 14. – № 12.
5. Протасов А.В. Использование естественных ортогональных базисов для восстановления полей метеорологических элементов по данным измерений на редкой сети станций / А.В. Протасов, В.В. Чекурова // Метеорология и гидрология. – 1983. – № 1. – С. 105–109.
6. Протасов А.В. Динамико-вероятностный метод четырехмерного анализа полей метеозлементов / А.В. Протасов. Тезисы доклада на XIII Рабочая группа «Аэрозоли Сибири». – Томск, 2005.

© А.В. Протасов, 2007

РЕАКЦИЯ ТЕРМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ НА ВАРИАЦИИ ОБЛАЧНОСТИ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ГЕЛИОФИЗИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТЬЮ

В настоящее время большое внимание уделяется природе атмосферной циркуляции, а также ее изменчивости, обусловленной различными физическими механизмами. В работе [1] описан один из возможных механизмов, влияющий на природные процессы. Основная идея данного механизма состоит в учете влияния солнечной активности на тропосферные характеристики атмосферы. Внешние факторы, связанные с солнечными космическими лучами сопровождаются магнитосферными возмущениями, способными управлять потоком энергии, уходящей от Земли в космос. Другими словами, усиление гелиофизической активности (потоки солнечных космических лучей, возмущения солнечного ветра и межпланетного поля, геомагнитные бури и суббури) приводит к увеличению разности электрического потенциала ионосфера-Земля, способствуя тем самым перераспределению по высоте в тропосфере заряженных ядер конденсации, роль которых играют отрицательно заряженные аэрозоли. Поднятие таких аэрозолей на большую высоту создает условия для увеличения концентрации ядер, и, следовательно, дополнительные предпосылки для конденсации водяного пара (если его содержание достаточно высокое) и образования облачности. Роль облачности такова, что с одной стороны она влияет на радиационные потоки в атмосфере, вызывая изменение притоков тепла в облачном слое, с другой стороны приводит к изменению радиационного баланса на поверхности Земли. Наиболее ярко эти изменения будут проявляться в высокоширотных областях, где в зимнее время отсутствует поток коротковолновой радиации, приходящий от Солнца к поверхности Земли, и единственным фактором влияния на ядра конденсации будет выше описанный механизм. Представленная работа направлена на изучение влияния облачности, которая бы образовывалась за счет описанного механизма. Поскольку данный механизм сложен для реализации, то была сделана попытка с помощью численного моделирования заменить указанный механизм путем введения дополнительной облачности. В виду этого работа носит методический характер.

Для исследования описанного механизма использована одномерная радиационная модель [2, 3]. С ее помощью проведены расчеты длинноволновых потоков радиации и притоков тепла в атмосфере с учетом облачности, балл которой меняется в зависимости от ситуации. Согласно [2] радиационные процессы моделируются так, что выделяются наиболее вероятные из них, воздействующие на атмосферные длинноволновые потоки и притоки тепла. К таким процессам относятся аэрозольно-облачные эффекты поглощения и эффекты рассеяния аэрозолями, облаками и газами (H_2O , CO_2 , O_3), т.е. те, при которых излучающая среда рассматривается как "серая". Поглощение газами рассматривается как возмущение, наложенное на вычисленные радиационные

потоки, обусловленные процессами рассеяния и поглощения облаками и аэрозолями. Длинноволновые потоки, пронизывающие атмосферу, вычисляются с помощью стандартной процедуры двух потоковой аппроксимации для каждого рассматриваемого слоя атмосферы с привлечением метода, учитывающего эффекты рассеяния и поглощения от всех других слоев. Одномерная радиационная модель включает в себя 3 длинноволновых интервалов, по вертикали атмосфера разбивается на 15 уровней, между которыми может располагаться облачность. Входными параметрами являются вертикальное распределение температуры, удельной влажности, озона, углекислого газа и фонового аэрозоля. Одномерная радиационная модель включена в климатическую модель в качестве радиационного блока.

Для проведения численных экспериментов по одномерной радиационной модели входные параметры задавались из модели климата, разработанной в ИВМиМГ СО РАН [3-4]. В процессе моделирования климата получено состояние атмосферы на 22 декабря модельного года. Вертикальные профили входных параметров брались для пункта, соответствующего Диксону (географические координаты: 80°E , 73°N). Дата и географическое местоположение пункта выбраны из соображений, изложенных во введении, а, именно, учесть влияние только длинноволнового излучения атмосферы и Земли.

Известно, что эффективный длинноволновый поток радиации складывается из восходящего и нисходящего длинноволновых потоков радиации $F_{net} = F^{up} + F^{down}$ (рис. 1). При этом, изменение температуры (скорость радиационного выхолаживания) будет определяться разностью эффективных потоков на верхней и нижней границах слоя $\Delta T \sim \frac{1}{\rho c_p} \frac{F_{z+1} - F_z}{\Delta z}$.

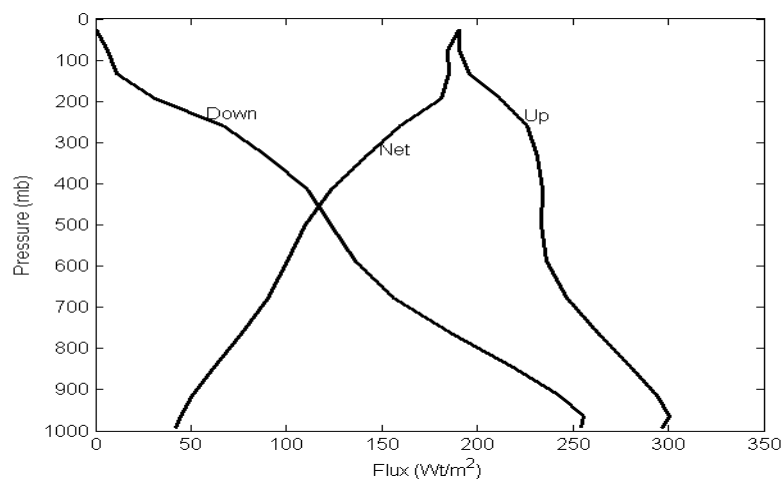


Рис.1. Потоки длинноволновой радиации в высоких широтах в зимний период (Down – нисходящие потоки длинноволновой радиации; Up – восходящие потоки длинноволновой радиации; Net=Up-Down – эффективный поток длинноволнового излучения)

Ниже приведено описание серии экспериментов (цифры соответствуют номеру эксперимента), приближенных к реальности.

1. Эксперимент, в котором эффективные потоки и соответствующие им скорости радиационного выхолаживания рассчитываются исходя из текущего состояния (так называемый контрольный эксперимент, относительно которого проводились сравнения других экспериментов).

2. Эксперимент, в котором балл облачности на всех уровнях модели задавался равным нулю при неизменных остальных характеристиках эксперимента 1.

5. Эксперимент, в котором эффективные потоки и суточные изменения температуры рассчитывались с удвоенным баллом облачности относительно эксперимента 1. Цель данного эксперимента продемонстрировать возможность существования механизма изменения температурного режима при увеличении облачности за счет перераспределения аэрозольных частиц. Увеличение облачности в два раза оказалось возможным, поскольку в контрольном эксперименте 1 балл облачности по уровням не превышает значения равного 0.4. Данный эксперимент дает основание предположить, что при изменении условий облакообразования вполне возможно увеличение балла облачности в два раза.

7. Эксперимент, в котором все характеристики, в том числе и балл облачности на уровнях выбираются как в эксперименте 1, кроме уровня, соответствующего 500 мб поверхности, где балл облачности равен 1. Этот эксперимент интересен тем, что позволяет на методическом уровне оценить возможное влияние дополнительной облачности на перераспределение тепловых характеристик.

Эксперименты 3, 4, 6 и 8, описание которых здесь опущено, носят исключительно методический характер и свидетельствуют лишь о правомочности использования применяемой в расчетах радиационной модели. Кривые, описывающие данные эксперименты, показывают на откровенно нереальные в природе распределения рассматриваемых характеристик. Вторым экспериментом с завышенным потоком излучения связан с отсутствием облачности, как таковой. На рис. 2. представлены рассчитанные в соответствии с описанием экспериментов эффективные потоки длинноволнового излучения. Если исходить из цели изучения возможного влияния космического излучения на изменение электрического потенциала и перераспределение аэрозольных частиц и, как следствие, изменение облачного покрова, при этом, оставаясь в рамках разумного, то наибольший интерес представляет сравнение результатов первого и пятого экспериментов. Седьмой эксперимент также не лишен смысла, т. к. в реалиях максимальная облачность действительно сосредоточена на уровне ~ 500 мб. В подтверждение сказанного, на рис. 3. приведены вертикальные изменения скорости радиационного выхолаживания, обусловленные эффективными длинноволновыми потоками в соответствии с экспериментами 1, 2, 5 и 7. Как и следовало ожидать, увеличение балла облачности в слоях приводит к их резкому выхолаживанию за счет отражения

облаками нисходящей и восходящей длинноволновой радиации. В свою очередь длинноволновая радиация, отраженная облаками, выступает в роли дополнительной радиации вне облаков, что приводит к уменьшению радиационного выхолаживания над и под облаками. Достаточно сложные нелинейные процессы. Еще раз отметим, что все эксперименты проводились исходя из реального распределения температуры, влажности, а балл облачности, варьировался в соответствии с тем, как было указано выше. В данных экспериментах не учитываются процессы испарения, конденсации, выпадения осадков, взаимодействия с подстилающей поверхностью и пр., то необходимо было проверить данную гипотезу в полном объеме в рамках климатической модели ИВМиМГ.

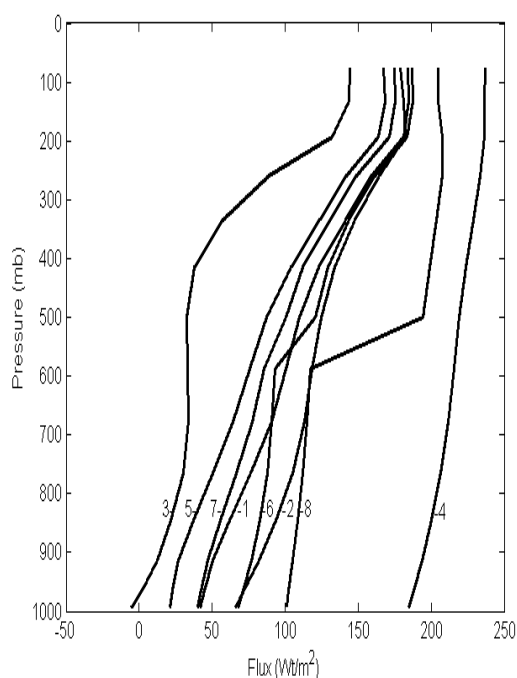


Рис. 2. Эффективные потоки длинноволнового излучения, рассчитанные в соответствии с указанными в работе экспериментами (цифры обозначают номер эксперимента)

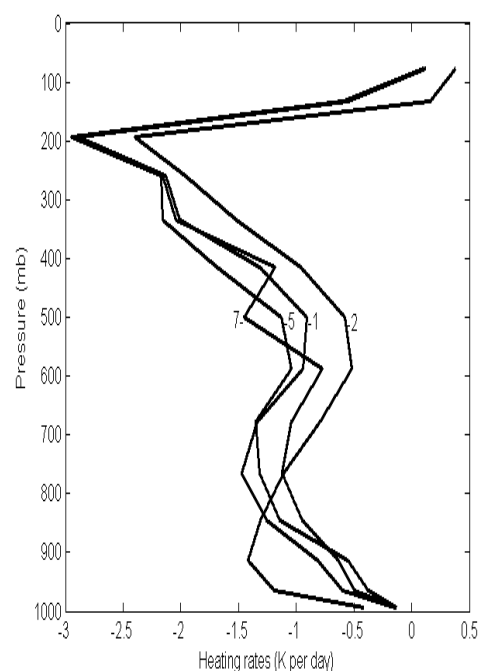


Рис. 3. Изменение скорости радиационного выхолаживания по вертикали в соответствии с рассматриваемыми экспериментами (цифры обозначают номер эксперимента)

С помощью модели общей циркуляции атмосферы рассчитано несколько вариантов. Расчеты проводились с некоторого установившегося (квазиравновесного) состояния, а именно с 22 декабря. Полученные на эту дату атмосферные характеристики служили фоном для проведения первого (контрольного) расчета, с которым сравнивались методические расчеты с измененным баллом облачности. Счет для всех вариантов проводился на несколько модельных суток. Второй расчет заключался в том, что на протяжении первых модельных суток балл облачности над сушей севернее 68

градуса северной широты увеличивался в два раза по сравнению с исходным баллом. Далее балл облачности моделировался согласно формулам, заложенным в модель общей циркуляции атмосферы. Данный расчет позволил учесть влияние механизма перераспределения аэрозолей и образование дополнительной облачности.

На рис. 4 для примера представлены поля разностей температур между аномальным вторым и контрольным первым расчетами на уровне 1000 мб поверхности для Сибирского региона. Следует отметить, что на уровне 1000 мб температура еще помнит некоторое время возникшую положительную аномалию, в то время как на уровне 500 мб аномалии как таковой вообще не возникает. При этом справедливости ради следует отметить, что происходит некоторая перестройка циркуляции атмосферы, что совершенно естественно при внесении конечных возмущений. Однако под большим сомнением остается факт, что это может отразиться на осредненных результатах долгопериодного интегрирования. Достаточно отметить, что при интегрировании на несколько последующих месяцев разница в среднемесячных значениях моделируемых характеристик не превышает естественную изменчивость.

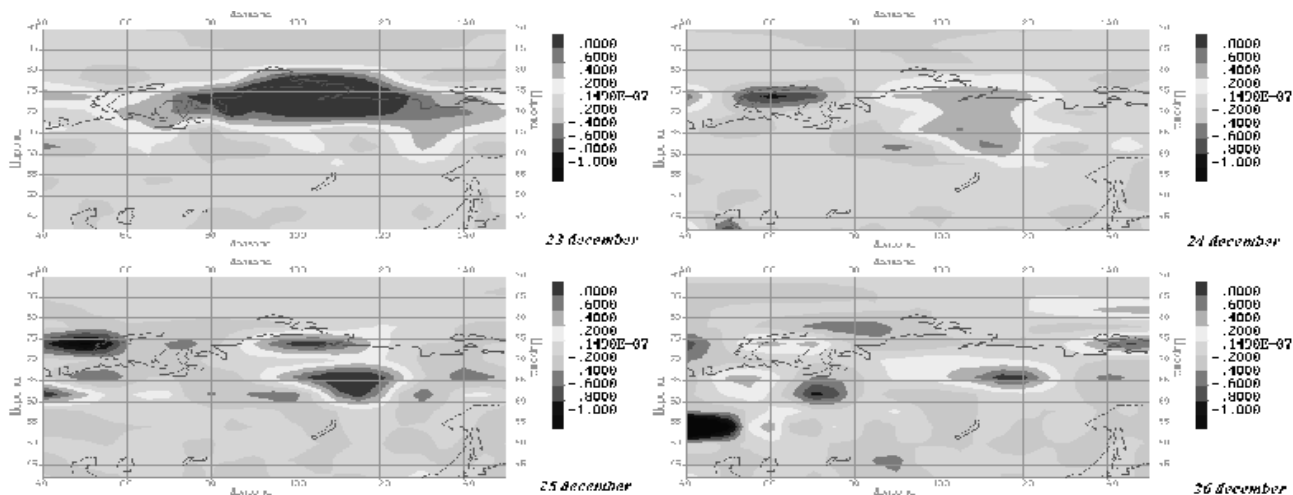


Рис. 4. Последовательное изменение температуры на уровне 1000 мб (разница между экспериментами 2 и 1)

На основании проведенных численных экспериментов показано, что механизм, основанный на гипотезе дополнительного формирования облачности за счет солнечной активности, влияет на атмосферные характеристики в тропосфере высоких широт. По меньшей мере, если действительно такой механизм существует, то это скажется на текущем термическом режиме атмосферы (погоде), что повлечет за собой перестройку всей динамики. С учетом того, что теплосодержание земной климатической системы за последние десятилетия заметно возросло [6], можно сделать вывод, что наблюдаемые изменения земной климатической системы обусловлены уменьшением потока энергии, излучаемого земной системой в космос. Но, как отмечено в [1], за последние 40-50 лет наблюдались лишь квазипериодические вариации солнечной постоянной, а значимый тренд отсутствовал. Следовательно, говорить о воздействии солнечной активности на изменение климата преждевременно. Речь может идти лишь о

внутренней изменчивости, обусловленной указанным фактором (вариации солнечной активности). Для подтверждения значимости влияния рассмотренного механизма на изменение текущего состояния атмосферы необходимо проведение дальнейших исследований основанных на реальных данных. В случае повышения солнечной активности необходим анализ сопровождающей явление синоптической ситуации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И., Рубцова О.А. Модель воздействия солнечной активности на климатические характеристики тропосферы Земли // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т.18. №12. С. 1042-1050.
2. Geleyn J.-F., Hollingsworth A. An economical analytical method for the computation of the interaction between scattering and line absorption of radiation contributions to atmospheric physics // Beitr. Phys. Atmosph. 1979. V. 52. N 1. P. 1-16.
3. Курбаткин Г.П., Курбацкая Л.И. Исследование чувствительности радиационных притоков тепла к учету облачности Новосибирск, 1986. (Препр. АН СССР. Сиб. отд-ние. ВЦ. № 686).
4. Fomenko A.A., Krupchatnikov V.N. A finite-difference model of atmospheric dynamics with conservation laws // Bull. Nov. Comp. Center, Num. Model. in Atmosph., etc. V. 1. 1993. P. 17-31.
5. Fomenko A.A., Krupchatnikov V.N., Yantzen A.G. A finite-difference model of atmosphere (ECSib) for climatic investigations // Bull. Nov. Comp. Center, Num. Model. in Atmosph., etc. V. 4. 1996. P. 11-19.
6. Зайцева Н.А., Шляхов В.И. Длинноволновая радиация в атмосфере Антарктиды // Исследование климата Антарктиды. Л.: Гидрометеиздат, 1980. С. 27-33.

© А.А. Фоменко, Л.И. Курбацкая, 2007

УДК 551.511.42.001

В.Ф. Рапута

ИВМ и МГ СО РАН, Новосибирск

Б.С. Смоляков

ИНХ СО РАН, Новосибирск

АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ИОННОГО СОСТАВА СНЕГА В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ НЕФТЕГАЗОВОГО ФАКЕЛА

Введение

При добыче и переработке нефти и газа возникают некондиционные газоконденсатные смеси, для дожигания которых используют факельные установки. В атмосферу при этом поступают различные экотоксиканты, включая соединения серы и азота. Для математического описания процессов их распространения в атмосфере и миграции в объектах окружающей среды могут быть использованы различные подходы. В методах, основанных на прямом моделировании переноса и диффузии загрязняющих примесей, как правило, предполагается решение осредненных по времени уравнений движения и массообмена, либо использование эмпирических соотношений [1–3]. При этом необходимо предварительно задать текущие поля скорости ветра и

коэффициентов турбулентной диффузии в приземном слое атмосферы, эффективную высоту выброса и интенсивность эмиссии вредных веществ, а также учесть процессы физико-химической трансформации примесей в атмосфере. На практике вышеперечисленные условия, как правило, трудновыполнимы, что приводит к необходимости привлечения разнообразной дополнительной информации, включая, например, измерения концентраций в ограниченном числе точек наблюдения. При этом возникают определенные противоречия с исходной прямой задачей, которые могут быть сняты с использованием компромиссов в рамках постановки обратных задач переноса примеси в атмосфере [4] и применения математического аппарата планирования эксперимента [5, 6].

Для изучения процессов длительного загрязнения весьма перспективным является использование снежного покрова в качестве естественного планшета накопителя. При образовании снежного покрова из-за процессов сухого и влажного выпадения примесей концентрация загрязняющих веществ в снеге оказывается на 2 – 3 порядка выше, чем в атмосферном воздухе. Поэтому измерения их содержания могут производиться более простыми методами с высокой степенью надежности [7, 8]. Загрязнение снежного покрова нитратами и сульфатами, образующимися в нефтегазовых факелах, представляет особый интерес в связи с тем, что эти компоненты могут быть причиной “кислотных выпадений” [9].

1. *Методика отбора и анализа снеговых проб.* В конце зимнего сезона возле одной из факельных установок севера Западной Сибири были проведены маршрутные снегомерные наблюдения. В 30 километрах от района отбора проб снега находится метеостанция. Согласно данным этой станции, средняя продолжительность снежного покрова в данной местности составляет более 7 месяцев. Он появляется преимущественно в начале октября, а начинает разрушаться в середине мая. В зимнее время преобладают ветра южного и юго-западного направлений.

Местность в районе факела довольно ровная, покрыта невысокими деревьями. Глубина снега в точках отбора достигала одного метра. Высота факельной трубы равна 30 метрам. Температура выбрасываемой газоаэрозольной смеси около 700° С, что приводит к существенному дополнительному увеличению высоты выброса, особенно при слабом ветре. При размещении точек пробоотбора учитывалось взаимное положение промплощадки и факельной установки, система подъездных путей, информативность точек измерения.

В табл. 1 содержатся основные сведения о проведенных измерениях и данные химического анализа. Площадь пробоотбора составляла 0.05 м².

Таблица 1. Данные снегосъемки и химического анализа

Номер пункта отбора	Расстояние, м	Вес пробы, кг	Удельное содержание, мг/л	
			SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
1	200	12	0.43	1.4
2	420	11	0.57	1.77

3	600	7	0.61	1.53
4	650	7	0.34	0.54
5	800	8	0.49	1.04
6	870	7.5	0.57	0.89

После отбора проб снег растапливали и в снеготалой воде определяли концентрацию нитратов и сульфатов методом ионной хроматографии (сорбент ХИКС-1, карбонат-бикарбонатный элюент, кондуктометрическое детектирование). Предел обнаружения нитратов составлял 0.1, сульфатов – 0.2 мг/кг.

2. Восстановление аэрозольного загрязнения снега по данным наблюдений.

Интерпретацию данных измерений ионного состава проведем с помощью регрессионной зависимости [4]:

$$q(r, \varphi, \vec{\theta}) = q_0 + \theta_1 \cdot p(\varphi) \cdot r^{\theta_2} \cdot e^{-\frac{2r_{\max}}{r}}, \quad (1)$$

где $q(r, \varphi, \vec{\theta})$ – удельное содержание примеси в снеге; r, φ – полярные координаты, начало которых совпадает с положением источника; $\vec{\theta} = (\theta_1, \theta_2)$ – вектор оцениваемых параметров; q_0 – фоновое содержание в снеге исследуемого компонента (SO_4^{2-} или NO_3^-); $p(\varphi)$ – среднезимняя вероятность противоположного φ направления ветра; $r_{\max}$ – расстояние от источника, на котором достигается максимальная приземная концентрация для невесомой примеси. Значение $r_{\max}$ определяется параметрами выброса: высотой, диаметром трубы, температурой и скоростью истечения газоаэрозольной смеси, среднезимней скоростью ветра [2]. В данном случае $r_{\max}$ составляет около 400 метров. Зависимость (1) получена с использованием аналитических решений полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии в приземном слое атмосферы для оседающей примеси. Параметр θ_1 пропорционален мощности эмиссии, скорости оседания аэрозольных частиц, климатических характеристик ветра и турбулентного обмена в приземном слое атмосферы. Величина θ_2 имеет вид

$$\theta_2 = -2 - \frac{w}{k(n+1)}, \quad \theta_2 \leq -2, \quad (2)$$

где w – скорость седиментации частиц аэрозоля; k – коэффициент вертикальной турбулентной диффузии на высоте 1 м; n – показатель степени в аппроксимации вертикального профиля горизонтальной компоненты скорости ветра степенным законом. Случай $\theta_2 = -2$ соответствует невесомой примеси.

Оценка вектора неизвестных параметров $\vec{\theta}$ может быть получена по данным измерений удельного содержания примеси в снеге не менее чем в двух определенных точках местности. Например, методом наименьших квадратов. Выбор оптимальной пары точек наблюдений производился в соответствии с рекомендациями работы [5].

Соотношение (1) позволяет провести также оценку M суммарного содержания аэрозольной примеси в снежном покрове по формуле

$$M = \int_0^{2\pi} \int_0^R \lambda(r, \varphi) \cdot q\left(r, \varphi, \vec{\theta}\right) r dr d\varphi, \quad (3)$$

где $\lambda(r, \varphi)$ – влагозапас в точке (r, φ) ; R – расстояние, до которого проявляется существенное влияние аэрозольного источника.

Данные табл. 1 позволяют провести оценки вектора параметров $\vec{\theta}$ для SO_4^{2-} и NO_3^- . Соотношение (2) может быть использовано для определения относительных эффективных скоростей оседания при изучении различных аэрозольных примесей. Результаты восстановления нормированного на повторяемость ветра удельного содержания этих веществ приведены на рис. 1.

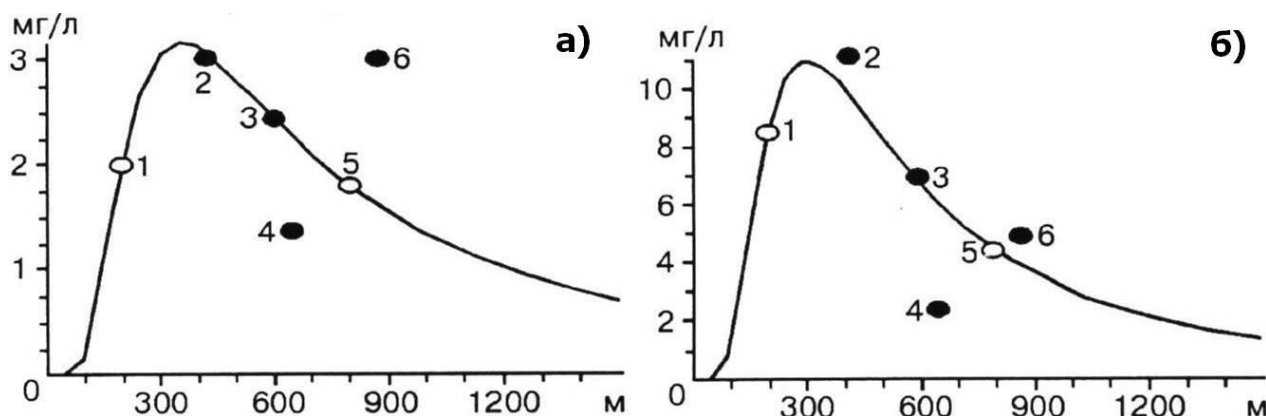


Рис. 1. Удельное содержание SO_4^{2-} (а) и NO_3^- (б) в снеговом покрове, нормированное на среднезимнюю повторяемость направлений ветра. Кривая – расчёт, 1-6 – опорные и контрольные точки наблюдения

Точки 1 и 5 использовались для определения параметров регрессии (1) и обозначены светлыми кружочками. Темные кружочки являются контрольными и характеризуют вполне удовлетворительную степень соответствия расчета наблюдениям. Большая часть контрольных точек находится вблизи от расчетных кривых, что указывает на тесную связь отложений в снеге сульфатов и нитратов с выбросами нефтегазового факела.

В табл. 2 приведены оценки параметров θ_1 и θ_2 с учетом небольших поправок на фоновое содержание сульфатов и нитратов. Согласно (2), оценки θ_2 указывают на сравнительно невысокую скорость аэрозольных выпадений SO_4^{2-} и NO_3^- . Следует отметить при этом, что скорость седиментации аэрозолей, содержащих SO_4^{2-} , приблизительно в два раза ниже, чем для NO_3^- .

Таблица 2. Оценки параметров регрессии (1) и суммарного содержания в снеге сульфатов и нитратов

Анион	Фон, мг/кг	θ_1	θ_2	Суммарное содержание, кг
SO_4^{2-}	0.15	3.35	-2.27	310
NO_3^-	0.2	6.8	-2.63	570

На рис. 2 представлены изолинии удельного содержания NO_3^- в окрестности факела. Эта картина получена с использованием среднезимней розы ветров, данных таблицы 2 и регрессионной зависимости (1). Анализ рис. 2 показывает существование зоны повышенной концентрации к северу от факела, что связано с наиболее высокой повторяемостью ветров южного направления.

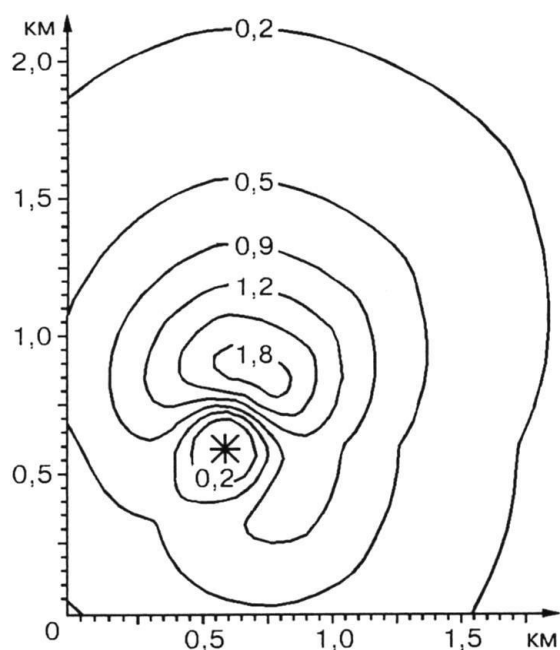


Рис. 2. Поле удельного содержания NO_3^- (мг/кг) в снегу в окрестности факела. Звёздочкой помечено положение источника

Анализ рис. 2 показывает существование зоны повышенной концентрации к северу от факела, что связано с наиболее высокой повторяемостью ветров южного направления.

Определяя с помощью табл. 1 среднюю величину влагозапаса и интегрируя соотношение (3), приходим к оценкам суммарного содержания SO_4^{2-} и NO_3^- в окрестностях газонефтяного факела, представленным в последнем столбце табл. 2.

Закключение

Применение методов анализа и планирования маршрутных наблюдений за содержанием примесей в снежном покрове в окрестности газового факела позволило восстановить картину загрязнения местности сульфатами и нитратами, провести контроль точности восстановления, оценить суммарные выбросы SO_4^{2-} и NO_3^- за зимний сезон. Численный анализ данных мониторинга загрязнения снегового покрова показывает существование достаточно простых закономерностей формирования полей длительного загрязнения местности. Процедура агрегирования неизвестных параметров существенно повышает эффективность решения обратных задач переноса примесей.

Используемый подход является достаточно экономичным, поскольку допускает на основе двух-трёх точек наблюдения определять с высокой точностью уровни загрязнения снега. В дальнейших исследованиях техногенной нагрузки на окружающую среду в зимний период представляется

перспективным проведение регулярного мониторинга закисления снежного покрова выбросами отдельных источников и промышленных площадок.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН, проект 16.11; РФФИ-ОБЬ, грант 05-05-98006.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей. / Под редакцией Ф.Т.М. Ньистада и Х. Ван Допа. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 351 с.
2. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы / М.Е. Берлянд. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 448 с.
3. Учет дисперсионных параметров атмосферы при выбросе площадок для атомных электростанций // Руководство по безопасности АЭС. Международное агентство по атомной энергии. – Вена, 1980. – 139 с.
4. Рапута В.Ф. Реконструкция выпадений бенз(а)пирена в окрестностях Новосибирского электродного завода / В.Ф. Рапута, А.П. Садовский, С.Е. Олькин // Метеорология и гидрология, 1997. – № 2. – С. 33–41.
5. Федоров, В.В. Теория оптимального эксперимента / В.В. Федоров. – М.: Наука, 1971. – 312 с.
6. Крылова А.И. Планирование и анализ подфакельных наблюдений примеси в атмосфере / А.И. Крылова. – Метеорология и гидрология. – 1993. – № 5. – С. 5–13.
7. Василенко В.Н. Мониторинг загрязнения снежного покрова / В.Н. Василенко, И.М. Назаров, Ш.Д. Фридман. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 182 с.
8. Бояркина А.П. Аэрозоли в природных планшетах Сибири / А.П. Бояркина. – Томск: Изд-во Томского Ун-та, 1993. – 158 с.
9. Кислотные дожди / Ю.А. Израэль и др. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 269 с.

© В.Ф. Рапута, Б.С. Смоляков, 2007

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ РУСЛОВОЙ И ПОЙМЕННОЙ АККУМУЛЯЦИИ СТОКА ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ВОЛНЫ ПАВОДКА

Паводковые течения в долинах рек с меандрирующим руслом весьма характерны для условий Западно-Сибирской равнины. Сложная динамическая структура таких течений обусловлена различными свойствами ложа основного русла и затапливаемой поймы, покрытой растительностью. Вследствие высокой шероховатости и неоднородности рельефа течение в пойменной части оказывает тормозящее действие на поток в основном русле, что приводит к деформации кривой гидрографа стока. По мере прохождения волны весеннего половодья аккумулированные в пойме массы воды постепенно возвращаются в основное русло и осуществляют дополнительное питание реки. Большое влияние на эти процессы, несомненно, оказывает подземная аккумуляция вод. Таким образом, пойма выполняет демпфирующую роль, смягчая пиковые расходы в периоды половодья и пополняя русловый поток во время спада паводка.

Для описания течений в водоемах в зависимости от физических условий, масштабов явления и наличия натурной информации используют модели с разной степенью детализации, в том числе 1- и 2-мерные модели [1]. Речные русла сибирских рек имеют большую протяженность по длине. Поэтому при описании волны паводка или продольного профиля свободной поверхности на больших дистанциях целесообразно использовать одномерную модель, ориентированную вдоль динамической оси потока.

Предлагаемая математическая модель основана на одномерных уравнениях Сен-Венана, которые описывают движение воды в наклонных руслах. Вывод рабочей системы уравнений движения воды в русле с поймами основан на двумерных уравнениях мелкой воды:

$$\begin{aligned}\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu u}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} &= -gh \frac{\partial (h + \delta)}{\partial x} + \tau^{(x)} - \lambda_u |\vec{u}| u, \\ \frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hv v}{\partial y} &= -gh \frac{\partial (h + \delta)}{\partial y} + \tau^{(y)} - \lambda_u |\vec{u}| v, \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} &= R_a - I,\end{aligned}\tag{1}$$

где h – глубина потока, u, v – компоненты вектора горизонтальной скорости, $\tau^{(x)}, \tau^{(y)}$ – напряжения ветра по направлениям x, y , λ_u – коэффициент гидравлического трения, $|\vec{u}|$ – модуль скорости течения, R_a – интенсивность источников (осадки), I – инфильтрационный сток и испарение.

Конструирование уравнений одномерной модели проведем путем осреднения в плоскости y , нормальной к основному потоку, который ориентируем по оси x . В поперечном сечении (рис. 1) выделим основное русло (область 0) с площадью сечения ω_0 и пойменные части по обоим берегам (области 1, 2), ограниченные террасами со стороны суши. Внутренние границы

раздела областей условно определим вертикалями (рис. 1). Зададимся априорной структурой потока, полагая все искомые переменные кусочно-линейными функциями y . Относительно профиля поперечного расхода P будем предполагать, что его экстремумы достигаются на кромках русла с линейным убыванием модуля до нуля к линиям уреза воды на пойме. Это предположение естественно для прямолинейной линии дна, однако можно полагать его непротиворечивым и для произвольной геометрии ложа. Считается, что внутренняя точка обращения в нуль поперечного расхода y_0 находится в пределах русла или на его кромках. Случай однонаправленных расходов P_1, P_2 соответствует перетеканию воды из левой поймы через русло в правую (или наоборот) и рассматривается особо.

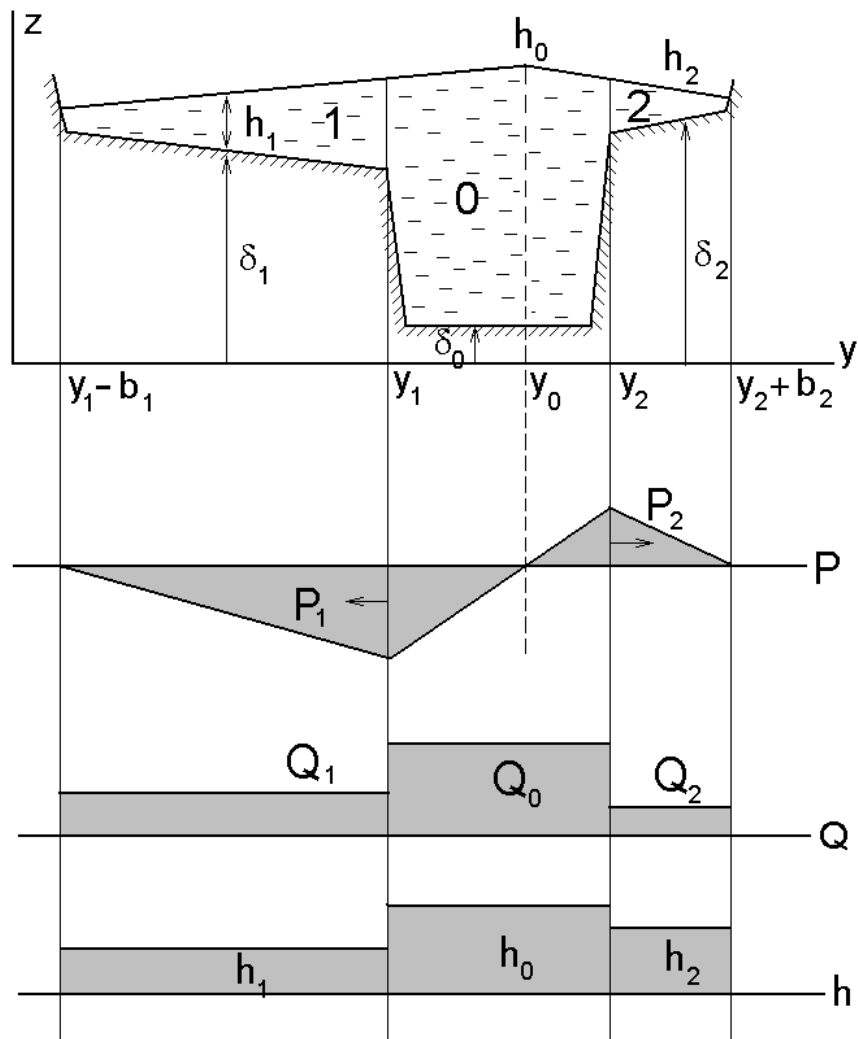


Рис. 1. Схематизация поперечного сечения:

0 – основное русло, 1,2 – поймы и исходные предположения о поперечном распределении переменных

Обозначим $\delta_0, \delta_1, \delta_2$ – отметки дна русла и пойм, отсчитываемые от некоторого горизонтального уровня $z=0$, h_0, h_1, h_2 – глубины потока в областях 0,1,2. Уравнения движения по направлению x получим интегрированием первого уравнения движения в (1) по y в областях 0,1,2

$$\begin{aligned}
\frac{\partial Q_0}{\partial t} + \frac{\partial u_0 Q_0}{\partial x} + u_0(P_2 - P_1) &= -g \omega_0 \cdot \frac{\partial (h_0 + \delta_0)}{\partial x} - r_0 |\bar{u}_0| u_0 + \tau_0^{(x)}, \\
\frac{\partial Q_1}{\partial t} + \frac{\partial u_1 Q_1}{\partial x} + u_0 P_1 &= -g \omega_1 \cdot \frac{\partial (h_1 + \delta_1)}{\partial x} - r_1 |\bar{u}_1| u_1 - \alpha_1 (u_0 - u_1) + \tau_1^{(x)}, \\
\frac{\partial Q_2}{\partial t} + \frac{\partial u_2 Q_2}{\partial x} - u_0 P_2 &= -g \omega_2 \cdot \frac{\partial (h_2 + \delta_2)}{\partial x} - r_2 |\bar{u}_2| u_2 - \alpha_2 (u_2 - u_0) + \tau_2^{(x)},
\end{aligned} \tag{2}$$

где $Q_i = \omega_i u_i$, $i=0,1,2$; $P_i = h_i v_i$, α_i , r_i – коэффициенты трения. Заметим, что в уравнениях (2) после интегрирования появились слагаемые, описывающие изменение продольного компонента импульса в русловой части за счет поперечной дивергенции. В правых частях уравнений на пойме фигурируют компенсационные слагаемые с α_i , пропорциональные разности продольных скоростей русла и пойм, которые можно интерпретировать как трение на жидкой границе.

Соотношения для расчета компонентов P_1 , P_2 получим интегрированием второго уравнения движения в (1) в диапазонах постоянства знака поперечного импульса, т.е. при $y_1 - b_1 \leq y \leq y_0$ и $y_0 \leq y \leq y_2 + b_2$, где b_i – ширина поймы с номером i , y_0 – точка перехода через нуль потока P (рис.1)

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial t} (b_1 + b_{01}) P_1 + \frac{\partial}{\partial x} (b_1 u_1 + b_{01} u_0) P_1 &= \\
= -2g \frac{\omega_0 + \omega_{01}}{b_0 + b_{01}} \cdot (h_0 + \delta_0 - h_1 - \delta_1) - s_1 |\bar{u}_1| v_1 + \tau_1^{(y)},
\end{aligned} \tag{3}$$

где $b_{01} = y_0 - y_1$, $b_{02} = y_2 - y_0$ – составляющие ширины русла, $b_0 = b_{01} + b_{02}$, s_1 , s_2 – коэффициенты сопротивления в направлении y . Уравнение для P_2 выводится аналогично.

Проинтегрируем теперь уравнение баланса массы в (1) в областях 0,1,2:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \omega_0}{\partial t} + \frac{\partial Q_0}{\partial x} &= P_1 - P_2 - I_0, \quad \frac{\partial \omega_1}{\partial t} + \frac{\partial Q_1}{\partial x} = P_1^{(s)} - P_1 - I_1, \\
\frac{\partial \omega_2}{\partial t} + \frac{\partial Q_2}{\partial x} &= P_2^{(s)} + P_2 - I_2,
\end{aligned} \tag{4}$$

где $P_1^{(s)}$, $P_2^{(s)}$ – боковые притоки воды к поймам в результате поверхностного стока.

Уравнения (2)-(4) образуют замкнутую систему для определения 8 величин Q_0 , Q_1 , Q_2 , P_1 , P_2 , h_0 , h_1 , h_2 .

Методы решения уравнений движения воды в русле с поймой основаны на дискретизации уравнений (2)-(4) в сеточной области. Используются неравномерные вдоль русла сетки, а применяемые неявные методы обеспечивают устойчивость метода при долгопериодном интегрировании [2]. Пространственная аппроксимация дифференциальных операторов основана на современных представлениях о монотонных схемах и схемах с невозрастанием полной вариации (Total Variation Diminishing).

Зададим морфометрические функциональные зависимости, связывающие ширину водного зеркала и живое сечение с глубиной потока. С этой целью рассмотрим русло в виде прямоугольного канала длиной 150 км и шириной 500

м, глубину потока примем равной 4.5 м. Эти параметры близки к характеристикам течения р. Обь в районе Новосибирска в весенний предпаводочный период. В средней части области зададим пойменные понижения в обеих сторон русла, имеющие размеры в полупоперечнике до 2 км при повышении уровня до 9 м. Рис. 2 показывает положение уреза воды на пойме при различных положениях уровня воды. Введенные представления позволяют задать необходимые функциональные зависимости и провести тестовые расчеты по изучению регулирующей роли пойм.

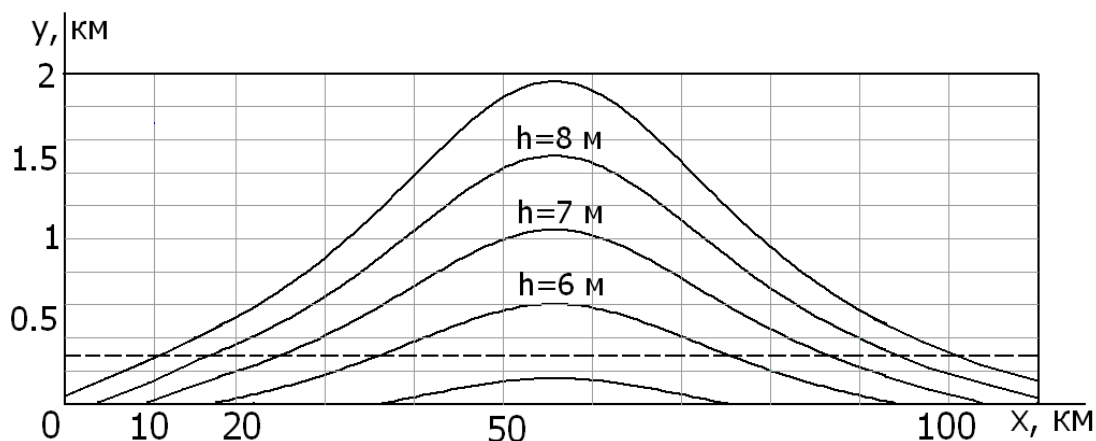


Рис.2. Контурсы затопления поймы в плане при различных уровнях наполнения.
Пунктир показывает полуширину основного русла.

Моделировалось продвижение паводковой волны в течение 60 суток, начиная с 15 апреля. Исходные данные примерно отражают паводок 1995 г., когда в течение 15 дней расход в реке увеличивался до значения $5000 \text{ км}^3/\text{с}$, а затем постепенно убывал. Изменение модельного расхода со временем на входном створе показывает кривая 1 на рис. 3. Кривая 2 отражает расчетный расход на выходном створе (150 км ниже по течению) в численном эксперименте без учета влияния пойм, т.е. при схематизации русла в виде канала с вертикальными стенками. Разница между кривыми отражает время продвижения волны паводка по руслу от входного створа к замыкающему и составляет около 40 часов в начальный период, монотонно уменьшаясь к концу периода.

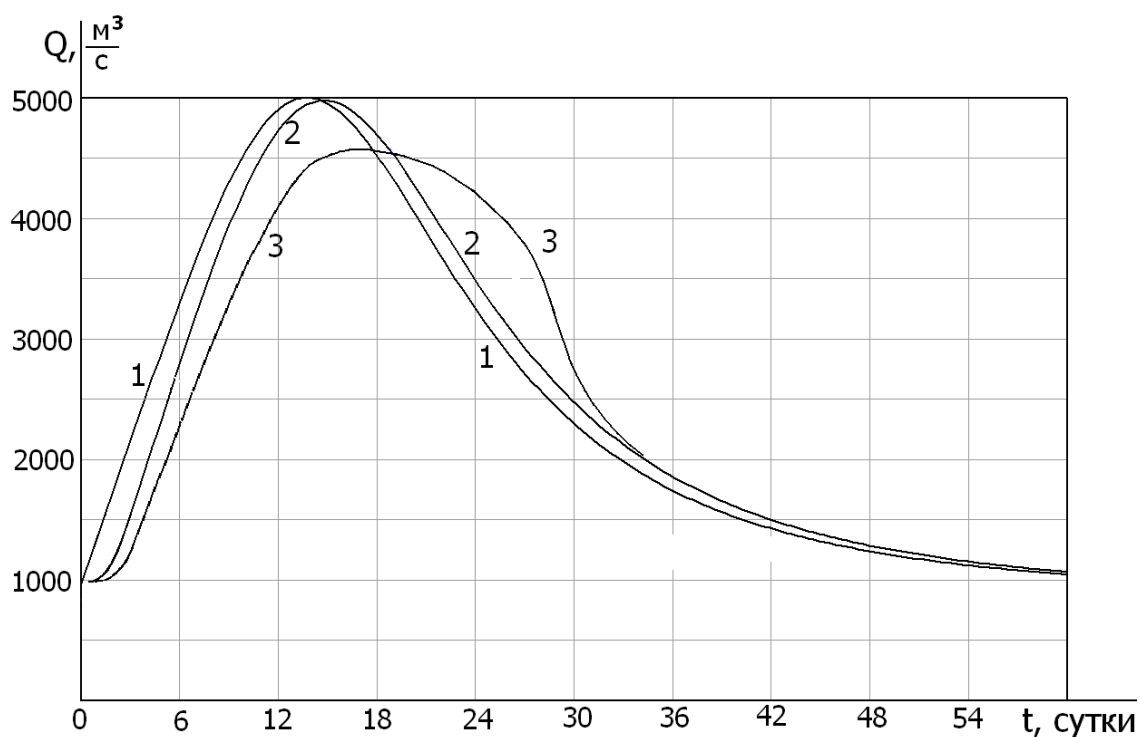


Рис.3. Гидрограф весеннего паводка и роль поймы в регулировании стока. Кривые 1, 2 показывают расходы на входном и выходном створах, кривая 3 – расход на выходном створе при учете поймы.

Кривая 3 показывает гидрограф паводка в эксперименте с учетом пойм. Подходя к участку пойменных понижений, вода начинает переливаться в боковые емкости, что приводит к торможению русловой волны и ослаблению ее интенсивности. Характер заполнения пойм сильно зависит от шероховатости ложа и в целом приводит к отставанию максимума в выходном створе примерно на 2 суток в данном эксперименте.

Таким образом, сформулированная численная модель для описания совместного движения воды в русле и поймах позволяет получать количественные характеристики течений в руслах больших пространственных масштабов. Численные эксперименты показывают способность модели правильно воспроизводить качественную сторону взаимодействия русла и пойм.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 05-05-98012-p_ob.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шлычков, В.А. Математическая модель динамики водотоков в областях со сложной геометрией / В.А. Шлычков / Материалы конф. "Фундаментальные проблемы изучения и использования воды и водных ресурсов". – Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2005. - С. 248-250.
2. Shlychikov, V.A. Numerical research currents channel with the help of flat plain model. Bulletin of the Novosibirsk Computing Center. ICM MG Publisher. Novosibirsk, 2005. Issue 10. P.15-19.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НАД НЕОДНОРОДНОЙ МЕСТНОСТЬЮ

В условиях термически и орографически неоднородной местности данных наблюдений за атмосферой для оценки метеорологических условий бывает недостаточно. В связи с этим возрастает роль интерпретационных методов, одним из которых может служить гидродинамическое моделирование метеорологических процессов. Достоинством применения гидродинамического моделирования является комплексность в описании метеоусловий, как в приземном, так и в пограничном слое атмосферы (ПС), а также возможность расчета различных сценариев формирования и развития метеорологического режима исследуемого района. Процессы в ПС успешно моделируются с помощью пространственных гидродинамических моделей, которые описывают широкий спектр атмосферных движений [1,2]. По классификации, предложенной в [3], мезомасштаб охватывает движения с масштабом 2-2000 км, с подразделениями на мезо - α (200-2000 км), мезо - β (20-200 км) и мезо - γ (2-20 км). К атмосферным движениям мезо - β масштаба относят морские - береговые бризы и горно-долинные циркуляции. Численные модели, описывающие такие процессы, имеют широкую сферу применения и используются в прогнозе погоды, изучении микроклимата городов и промышленных зон, при климатологической оценке местности со сложной орографией. В данной работе представлена численная модель ПС, ориентированная на воспроизведение атмосферных процессов мезо - β масштаба и приводятся результаты моделирования ветровой циркуляции вдоль южного побережья Карибского моря.

Введем левостороннюю криволинейную систему координат, в которой оси x и y совпадают с поверхностью Земли и направлены на восток и север, соответственно, а ось z - вертикально вверх. Тогда связь между вертикальными координатами в криволинейной декартовой (индекс " ∂ ") системах координат выражается соотношением: $z = z_{\partial} - \alpha(x_{\partial}, y_{\partial})$, где $\alpha(x_{\partial}, y_{\partial})$ - функция, описывающая рельеф Земли, сглаженный так, чтобы характерные горизонтальные размеры орографических неоднородностей были не менее удвоенного шага сетки, а наклоны $\alpha_x = \frac{\partial \alpha}{\partial x_{\partial}} \ll 1$ и $\alpha_y = \frac{\partial \alpha}{\partial y_{\partial}} \ll 1$. В силу этого требования горизонтальные координаты в двух системах практически совпадают, ($x \approx x_{\partial}$,) и, следовательно, составляющие скорости u и v , а вертикальная составляющая определяется соотношением: $w = w_{\partial} - \alpha_x u - \alpha_y v$. Область решения задачи разбивается на два подслоя: постоянных потоков, толщиной h порядка нескольких десятков метров и вышележащий, ограниченный высотой H порядка 2-3 км.

В качестве исходных примем следующую систему уравнений [4, 5]:

$$\frac{du}{dt} = -\frac{\partial \pi}{\partial x} + f v + \alpha_x \lambda \vartheta + \mu \Delta u + \frac{\partial}{\partial z} K_u \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \gamma_u \right), \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{\partial \pi}{\partial y} - f u + \alpha_y \lambda \vartheta + \mu \Delta v + \frac{\partial}{\partial z} K_v \left(\frac{\partial v}{\partial z} - \gamma_v \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial z} = \lambda \vartheta, \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{d\vartheta}{dt} = -S(w + \alpha_x u + \alpha_y v) + \mu \Delta \vartheta + \frac{\partial}{\partial z} K_T \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial z} + S - \gamma_T \right) + \frac{\mathfrak{Z}}{c_p} \delta, \quad (5)$$

$$\frac{dq}{dt} = \mu \Delta v + \frac{\partial}{\partial z} K_q \left(\frac{\partial q}{\partial z} - \gamma_q \right) - \delta, \quad (6)$$

$$\text{где } \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \quad \frac{d\varphi}{dt} = \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial u \varphi}{\partial x} + \frac{\partial v \varphi}{\partial y} + \frac{\partial w \varphi}{\partial z}, \quad \varphi = (u, v, \vartheta, q);$$

t – время; u, v, w – составляющие скорости ветра вдоль осей x, y и z соответственно; ϑ – отклонение виртуальной потенциальной температуры от значения в стандартной атмосфере θ_{ST} ; $\pi = RT_{ST} \frac{P'}{P_{ST}}$ – аналог отклонения давления от давления стандартной атмосферы P_{ST} ; R – газовая постоянная; S – вертикальный градиент потенциальной температуры в стандартной атмосфере; q – массовая доля водяного пара; K_u, K_T, K_q – вертикальные коэффициенты турбулентности для количества движения, тепла и влажности; μ – горизонтальный коэффициент турбулентности, полагаемый одинаковым для всех субстанций; $\lambda = \frac{g}{\theta_{ST}}$ – параметр плавучести; g – ускорение силы тяжести; f – параметр Кориолиса; δ – количество сконденсированной влаги; $\mathfrak{Z}$ – скрытая теплота конденсации (испарения); c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении; γ_i ($i=u, v, T, q$) – противогradienty по Дердорфу [6], определение которых может осуществляться согласно [7]. Для расчета вертикальных коэффициентов турбулентного обмена привлекается уравнение баланса кинетической энергии турбулентности [8].

Область решения определим в виде прямоугольного параллелепипеда с неровной нижней границей, отражающей неоднородность рельефа подстилающей поверхности

$$0 \leq x \leq L_x, \quad 0 \leq y \leq L_y, \quad \delta \leq z \leq H,$$

где L_x, L_y – размеры области по горизонтали, функция $z = \delta(x, y)$ задает рельеф, H – положение верхней границы.

На боковых границах области заданы следующие условия:

$$\frac{\partial u}{\partial n} = \frac{\partial v}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial \vartheta}{\partial n} = 0. \quad (7)$$

На верхней границе поставим условия вида

$$\pi = \pi_n, \quad K_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0, \quad (\varphi = \{u, v, \vartheta\}), \quad \text{при } z = H \quad (8)$$

У подстилающей поверхности введен слой постоянных потоков, на верхней границе которого ($z=h$) для системы (1)-(6) краевые условия имеют вид:

при $z = h$

$$K_u \frac{\partial u}{\partial z} = C_u^2 U_h u_h, \quad K_v \frac{\partial v}{\partial z} = C_v^2 U_h v_h, \quad K_T \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial z} + S \right) = C_u C_T U_h (\theta_0 - \theta_h) \quad (9)$$

$$K_q \frac{\partial q}{\partial z} = C_u C_q U_h (q_0 - q_h), \quad w_h = 0, \quad (11)$$

где $U = (u^2 + v^2)^{1/2}$ – модуль скорости ветра; $\theta = \theta_{ST} + \vartheta$ – полная потенциальная температура; C_u, C_T, C_q – интегральные коэффициенты переноса импульса и тепла;

$$C_i = \left(\alpha_0 \frac{\kappa}{f_i} \right), \quad \alpha_0 = \frac{K_i}{K_{ui}}, \quad i = u, T \quad (12)$$

где α_0 – отношение коэффициентов турбулентного обмена для нейтральной стратификации, κ – постоянная Кармана, f_u, f_T, f_q – универсальные функции профилей для скорости ветра и температуры в слое от 0 до h . Для вычисления параметров в слое постоянных потоков и температуры на подстилающей поверхности используются методики из [9-11].

Для решения системы уравнений слоя $z \geq h$ (1) – (6) с условиями (7) – (11) использован метод расщепления по физическим процессам [12,13].

С помощью предложенной модели была проведена серия численных экспериментов по моделированию мезомасштабных циркуляций атмосферы в районе южного побережья Карибского моря. Область счета состояла из $20 \times 20 \times 10$ узлов. Шаг по горизонтали принимался постоянным и равным 20 км, $h=50$, $H=2500$ метров. Сетка по вертикали: 50, 150, 300, 500, 700, 1000, 1400, 1800, 2100, 2500 метров. В первой серии расчетов исследовалась атмосферная циркуляция, обусловленная контрастом температур суша-море без учета рельефа. На рис.1а показано поле скорости ветра на побережье. Поле поверхностной температуры было практически однородным и повторяло очертания береговой линии. Из рисунка видно, что, рассчитанное поле скоростей демонстрирует хорошо выраженный морской бриз, окаймляющий побережье полосой шириной около 40-60 км. Максимальные скорости достигают 2 м/с. Другой особенностью приведенного распределения ветра является существование на расстоянии 60-80 км вглубь суши достаточно обширной зоны сходимости слабых ветров. Этой зоне соответствовали зоны наиболее прогретого воздуха, пониженного давления и восходящих движений.

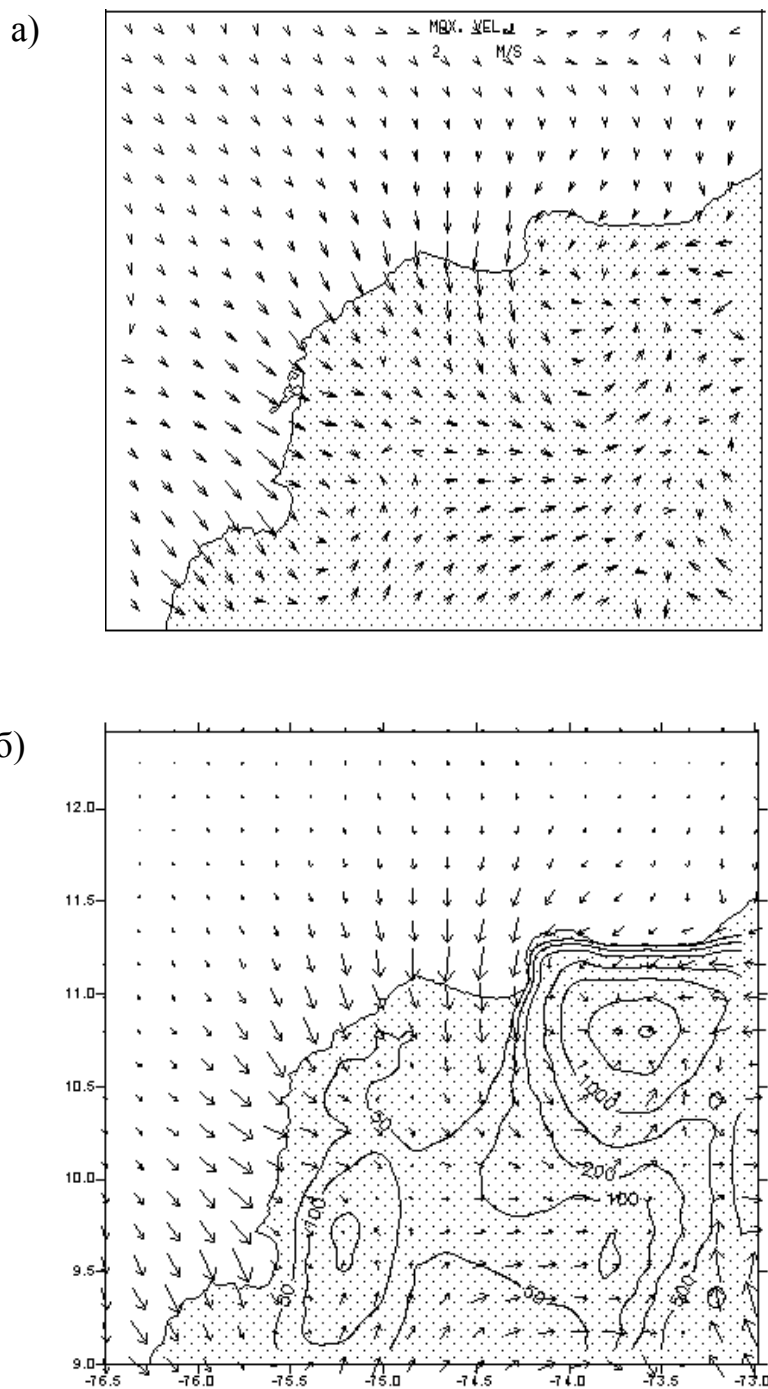


Рис. 1. Поле ветра в приповерхностном слое ($z=h$), а) влияние бриза; б) совместное действие бризовых и склоновых эффектов

На рис. 1б приведено распределение ветров в приземном слое для побережья с учетом рельефа. Сопоставление направлений движения воздушных течений с ориентировкой береговой линии и хребтов показывает их, в целом, удовлетворительное совпадение и достаточно сложную картину распределения ветровых потоков. Вдоль береговой линии сохраняется, в сравнении с рис. 1а, пояс бризовых ветров горизонтальной протяженностью около 100 км с меняющейся глубиной проникновения вглубь суши в зависимости от форм рельефа. Имеет место заметные серпантинные вращательные изменения

направлений ветра по мере возрастания высот. Над выступающими особенностями орографии формируются зоны сходимости потоков. Горные массивы создают условия для сложной картины взаимодействия склоновых и бризовых ветров. Из рисунка видно, что последние могут обтекать массивы гор со стороны юго-западного и северного склонов. В результате воздушные массы морского происхождения могут оказаться на достаточном удалении от моря. При этом могут формироваться зоны сходимости бризов, огибающих горные массивы с разных сторон.

Проведенные расчеты показали способность модели воспроизводить атмосферную циркуляцию, связанную с постоянно действующими термическими контрастами суша - море. Применение модели может быть полезным для получения общей мезомасштабной обстановки районов, где необходимо оценить особенности мезоклимата.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pielke R.A. Mesoscale meteorological modeling. 2nd Edition, Academic Press, San Diego, CA, 2002. – 676 pp.
2. Пененко В.В. Модели и методы для задач охраны окружающей среды/ В.В. Пененко, А.Е. Алоян – Новосибирск: Наука, 1985. – 256 с.
3. Orlansky I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes //Bull. Amer. Meteorol. Soc.- 1975.- Vol. 56. – P.527–530.
4. Леженин А.А. Пространственная модель прогноза погоды в нижней тропосфере / А.А. Леженин, Л.С. Сперанский // Труды ЗапСибНИИ, 1984. – Вып. 63. – С. 53–62.
5. Kazakov A.L., Lezhenin A.A., Speransky L.S. Resultados Preliminares del Estudio de la Capa Limite Mesometeorologica de la Atmosfera en la Costa Norte Colombiana aplicando un Modelo Numerico. // BOLETIN CIENTIFICO CIOH – 1996. – No. 17, p.17–26.
6. 6. Deardorff J. W. Theoretical expression for the counter gradient vertical heat flux. // J. Geophys Res. 1972, J. Geophys. Res. 1972, vol. 77, N 30, p. 5900–5904
7. Лыкосов, В.Н. К-теория турбулентного планетарного пограничного слоя атмосферы и обобщенная гипотеза Буссинеска / В.Н. Лыкосов. – М.: ОВМ, 1988. – Препринт № 210. – 32 с.
8. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей / под ред. Ф.Т.М. Ньистада и Х. Ван Допа. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 351 с.
9. Казаков А.Л. О параметризации приземного слоя атмосферы и деятельного слоя почвы/ А.Л. Казаков, Г.Л. Лазриев // Изв. АН СССР, ФАО, 1978. – Т. 14, № 3. – С. 257–263.
10. Казаков, А.Л. Схема параметризации слоя постоянных потоков при неустойчивой стратификации для использования в численных моделях пограничного слоя / А.Л. Казаков // Метеорология, климатология и гидрология. – 1999. – Вып.36. – С. 83–100.
11. Казаков, А.Л. Метод определения температуры подстилающей поверхности в моделях пограничного слоя атмосферы / А.Л. Казаков, А.А. Леженин // Метеорология, климатология и гидрология. 1998. – Вып. 35. – С. 158–174.
12. Марчук, Г.И. Численное решение задач динамики атмосферы и океана / Г.И. Марчук. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 304 с.
13. Сперанский, Л.С. О применении метода расщепления в моделях пограничного слоя атмосферы / Л.С. Сперанский, А.А. Леженин // Труды ЗапСибНИИ. 1985. – Вып. 75. – С. 71–78.

© А.А. Леженин, 2007

МЕТАНГИДРАТЫ КАК ВОЗМОЖНЫЙ ИСТОЧНИК МЕТАНА В ОКЕАНЕ

Природные газовые гидраты – это такой компонент геосферы, который может серьезно влиять на климат и экологическую ситуацию за счет неконтролируемых выбросов и утечек большого количества метана в атмосферу [5]. По различным оценкам [1] возможный выход метана в атмосферу из залежей газогидратов с учетом их термодинамического равновесия составляет 5-200 млн. т/год. В океанах и морях газогидраты обычно встречаются на глубинах от 300-400м до 1000 -1200 м и более. Они насыщают верхний слой донных осадков, содержатся в поровом пространстве в виде прослоек, линз, в рассеянном состоянии и составляют 10-20% от общего объема осадков [6].

В работе представлена модель переноса метана от источников, обусловленных процессами разложения поддонных метангидратов с учетом скорости разложения гидрата. Кратко опишем структуру разработанной модели. На первом этапе определяется начальное термохалинное состояние океана, поле тепла в донном осадочном слое и распределение растворенного метана в океанских водах.

– Климатическое состояние океана было получено из трехмерной линеаризованной модели динамики Мирового океана, включающей сезонную изменчивость, с учетом реальной топографии дна и Арктического бассейна. Задача решалась в полигональной области Мирового океана на пятиградусной сетке с 24 вертикальными уровнями до достижения квазистационарного состояния через время порядка нескольких тысяч лет, [10].

– Далее, для каждой точки широтно-долготной сетки было рассчитано климатическое поле тепла в донном осадочном слое толщиной 1000 м. Океанская модель дополняется одномерной термической моделью донного осадочного слоя.

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} k_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \quad (1)$$

$$z = H(\lambda, \theta): T_s = T_{s,b}; \quad z = H(\lambda, \theta) + d: k_s \frac{\partial T_s}{\partial z} = Q_t; \quad t = 0: T_s = T_{s,cl}(z),$$

где $k_s = 10^{-2}$ см²/с – коэффициент теплопроводности осадочного слоя;

Q_t – геотермический поток тепла; $T_{s,cl}$ – решение стационарного уравнения (1) с климатической температурой $T_{s,b} = T(\lambda, \theta, H)$. В качестве граничных условий

на верхней границе осадочного слоя, совпадающей с дном океана, задана температура придонной воды, которая получена из модели динамики океана, на нижней границе осадочного слоя задан геотермический поток тепла.

– Распределение растворенного метана получено из трехмерной модели динамики Мирового океана, дополненной адвективно-диффузионным уравнением переноса метана, [3, 4].

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{u}{a \sin \theta} \frac{\partial C}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial C}{\partial \theta} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \kappa \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\mu}{a^2} \Delta C \quad (2)$$

На поверхности океана: $C = C^*(\theta) = (1 + \cos(\theta)) \cdot 50 \text{ ppb}$.

На дне океана: $\kappa \frac{\partial C}{\partial z} = 0$, на боковой поверхности: $\frac{\partial C}{\partial n} = 0$.

Заданные на поверхности значения концентраций метана изменяются зонально от 50 ppb в южных высокоширотных областях океана до 100 ppb в северных высокоширотных областях. Заданные граничные условия на дне и материковом склоне соответствуют случаю отсутствия процессов разложения метангидратов.

На втором этапе моделируется процесс дестабилизации газогидратов метана. Предполагается, что метангидраты существуют в осадочном слое на дне и материковом склоне всюду, где выполняются термобарические условия их существования. Как только потепление от поверхности океана достигает глубины залегания метангидрата и увеличивает их температуру на определенную величину - допуск, начинается дестабилизация метангидратов. При этом задается концентрация метана в 100 раз превосходящая среднее фоновое значение $C_0 = 5 \cdot 10^{-5}$ мл/л, либо учитывается скорость разложения гидрата с учетом изменения температуры в осадочном слое океана. В дальнейшем исследуется перенос растворенного метана океаническими течениями в акватории Мирового океана от разлагающихся поддонных метангидратов и рассчитывается поток метана в атмосферу.

Данные о палеоклимате говорят о том, что климатические изменения носят периодический характер. Потепления сменяются похолоданиями, и периоды этих колебаний изменяются от десятков до тысяч лет, [2]. В работе моделируется реакция Мирового океана на изменчивость температуры поверхностных вод векового масштаба. Сезонно изменяющаяся поверхностная температура океана в каждой точке широтно-долготной сетки, за исключением областей покрытых льдом, повышается на 0.03 градуса ежегодно в течение 50 лет, а затем также на 0.03 градуса понижается до первоначальных значений в течение 50 лет.

Поток метана через поверхность океана вычисляем по следующей формуле: $F = a^2 q \iint_{\Omega} \left[\kappa \frac{\partial C}{\partial z} \right]_{z=0} d\Omega$, где $q = 0.7169 \cdot 10^{-3}$ - удельный вес метана.

Определяем поток метана в $\text{Tg} = 10^{12}$ г. При этом предполагается, что весь метан растворяется в морской воде, и пузырьки метана непосредственно атмосферы не достигают.

Данные о распределении океанских метангидратов показывают, что их выход на поверхность океанского дна хотя и существует, но достаточно редок,

прямое бурение показывает, что, как правило, метангидраты залегают в осадочном слое на поддонных глубинах порядка сотен метров. Поэтому, для разложения метангидратов необходимо проникновение потепления не только до дна, но еще и в осадочный слой, что требует большего времени по сравнению со случаем метангидратов, контактирующих непосредственно с водой.

Время до начала дестабилизации в экспериментах с погребенными гидратами увеличилось до 76 лет, при глубине залегания метангидратов 100 – 300м в осадочном слое океанского дна, [3]. При этом поток метана в атмосферу составил 1 - 9 Тг/год, в зависимости от сценария численного эксперимента, рис. 1 (Гидрат1). Проведенные сценарные эксперименты показали, что для оценки масштаба дестабилизации метангидратов важным является модельный параметр глубина залегания гидрата.

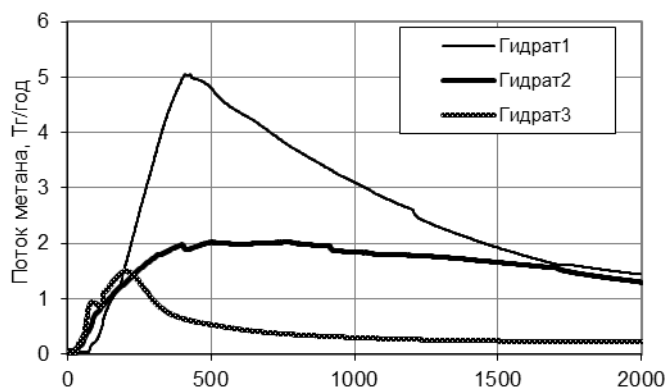


Рис. 1. Поток метана в атмосферу при потеплении 1.5° за 50 лет, полученный в численных экспериментах. Гидрат1 – глубина залегания гидратов 100-300 м в осадочном слое океана, Гидрат2 - учет распределения газогидратов, Гидрат3 – учет скорости разложения гидрата

В [4] моделируется пространственное распределение газогидратов метана и глубина их залегания в осадочном слое океана с учетом геотермического градиента и пористости осадочного слоя океанского дна. Предполагается, что метангидраты существуют в осадочном слое всюду, где выполняются термобарические условия их существования, которые рассчитываются по формуле $T_{stab}^{-1} = 3.79 \times 10^{-3} - 2.83 \times 10^{-4} \lg p_{stab}$, где T_{stab} и p_{stab} температура и давление стабильности газогидратов. Кривая равновесных условий гидратообразования метана накладывается на линию естественного распределения температур и давлений в исследуемой области. По точкам пересечения этих двух линий определяются верхняя и нижняя границы зоны стабильности газогидрата.

Температурный градиент в осадках задается различным для 22 регионов океана, от $30^{\circ}\text{C}/\text{км}$ до $87^{\circ}\text{C}/\text{км}$. Мы принимаем простое уменьшение пористости с поддонной глубиной по экспоненте, полученное из эмпирических данных. Гидратонасыщенность отложений, т.е. процент порового пространства, занятого газогидратами, была принята равной 50% порового пространства непосредственно у подошвы зоны стабильности и плавно уменьшающейся до нуля в направлении

морского дна, [7]. В результате получено распределение глубины залегания метангидратов от 20 до 320 м в осадочном слое под океанским дном [4].

В численном эксперименте дестабилизация начинается уже через 10 лет от начала потепления поверхностных вод океана. Источники "включились" на площади не более 6% дна океана и обеспечили максимальный поток метана 2 Тг/год через 500 лет модельного времени, рис. 1 (Гидрат 2).

В описанных экспериментах источники метана задавались косвенным образом в виде увеличения концентрации растворенного метана в 100 раз в результате таяния метангидрата без учета скорости диссоциации гидрата.

В [9] авторы, показали, что процесс диссоциации газовых гидратов целесообразно рассматривать по аналогии с процессом зародышеобразования пузырьков в жидкостях при закипании. В результате экспериментальных исследований было установлено, что при постоянной температуре и давлении в системе разложение гидрата происходит с неизменной скоростью. В [9] получена следующая зависимость для определения скорости диссоциации газогидратов (моль/час): $r = 6,46 \cdot 10^{-4} A \cdot (\Delta T)^{2,05}$, где A – общая площадь диссоциирующего гидрата, см².

Далее источник метана в модели задается с учетом скорости разложения метангидрата. Это означает, что условие на дне для уравнения переноса метана (2)

при разложении метангидратов будет иметь вид: $z = H(\lambda, \theta): \quad \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{q_{CH_4}}{V_0},$

где $q_{CH_4} = r \cdot \frac{M}{\rho_{CH_4} \cdot 3600}$, мл/сек; V_0 – объем сеточной ячейки, $M=16$ г – молярная

масса, $\rho_{CH_4} = 0,717 \cdot 10^{-3}$ г/см³. При этом A берется в виде $A = A_0 \cdot P \cdot H_p$, где P пористость, H_p часть порового пространства занятая газогидратами в долях, A_0 – площадь сеточной ячейки.

Процесс образования газогидрата происходит с выделением тепла, а его разложение происходит с поглощением тепла. Учитывается этот процесс в уравнении переноса тепла в осадочном слое (1), в соответствии с [8].

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} k_s \frac{\partial T_s}{\partial z} - \frac{L_d}{\rho c_p} \cdot q_{CH_4}$$

где $L_d = 4.5 \cdot 10^6$ Дж/кг – теплота диссоциации гидрата, $\rho c_p = 2.1 \cdot 10^6$ Дж/(м³·С°) – эффективная объемная теплоемкость гидрата метана, [9].

Максимальный поток метана составил 1.5 Тг/год через 200 лет модельного времени. При этом последующие 300 лет происходит уменьшение потока метана до первоначальных значений, рис. 1 (Гидрат3). Мощность источника теперь зависит от изменения температуры и различна для всех модельных точек. Это привело к увеличению концентрации метана в зонах, подверженных более сильному проникновению теплового сигнала до дна океана. Как и ранее,

наиболее подвержены процессу разложения в результате потепления метангидраты Северной Атлантики и Арктического шельфа, рис. 2.

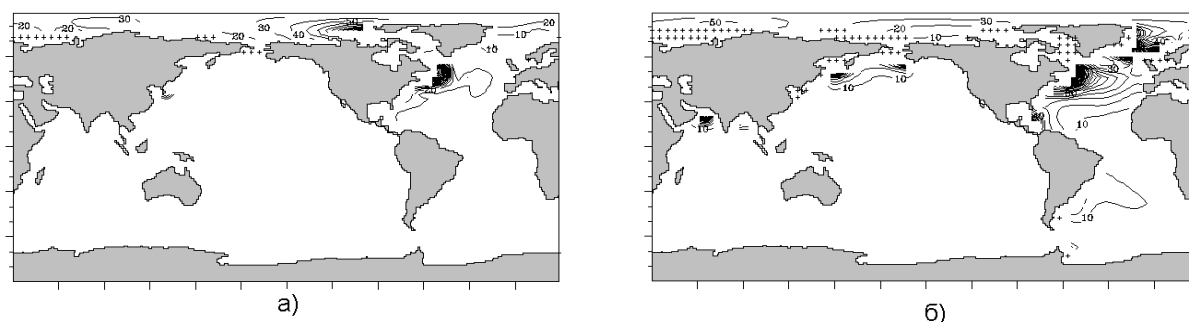


Рис. 2. Изолинии растворенного метана через 100 лет после начала климатических изменений в эксперименте «Гидрат3»:

а) - на глубине 250м; б) - на глубине 900м

Таким образом, модель дает разумные значения потока метана в атмосферу в результате дестабилизации метангидратов, которые лежат в пределах, имеющих в литературе оценок [5, 7, 8].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Адушкин В.В. Соотношение антропогенной и природной составляющей в потоке газов в атмосферу / В.В. Адушкин, С.П. Соловьев, С.Б. Турунтаев // Глобальные изменения природной среды. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. – С. 249-265.
2. Котляков В.М. Четыре климатических цикла по данным ледяного керна из глубокой скважины «Восток» в Антарктиде / В.М. Котляков // Изв.РАН. Сер. Геогр. – 2000. - №1. – С.7-19.
3. Щербаков А.В., Малахова В.В. Математическое моделирование потока метана в атмосферу в результате разложения метангидратов Мирового океана / А.В. Щербаков, В.В. Малахова // Оптика атмосферы и океана. – 2005. – Т. 18, № 5-6. – С.485-489.
4. Щербаков А.В. Моделирование пространственного распределения метангидратов Мирового океана и потока метана в атмосферу / А.В. Щербаков, В.В. Малахова // Оптика атмосферы и океана. – 2006. – Т.19, №6.- С. 530-535.
5. Kvenvolden K.A. Potential effects of gas hydrate on human welfare// Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. – 1999. – No. 96. - P. 3420–3426.
6. Ginsburg G.D., Kvenvolden K.A., Soloviev V.A. Worldwide distribution of subaquatic gas hydrtates // Geo-Marine Letters. – 1993. - V.13. - P.32-40
7. Gornitz V., Fung I. Potential distribution of methane hydrates in the world's oceans // Global Biogeochem. Cycles. – 1994. - Vol. 8. – P.335-347.
8. Harvey L.D.D., Huang Z. Evaluation of the potential impact of methane clathrate destabilization on future global warming // J. Geophys. Res. - 1995. – V. 100(D2). - P.2905-2926.
9. Kamath V. A., Holder G. D., Angert P. F. Three phase interfacial heat transfer during the dissociation of propane hydrates// Chemical Engineering Science. -1984 -Vol. 39, No. 10. – P.1435-1442.
10. Scherbakov A.V., Malakhova V.V. On the deep water formation in the World Ocean model// Bull.NCC. Ser. Num. Model. Atmosph. - Ocean and Environment Studies. - 2000. - Iss. 6. - P. 73-78.

© В.В. Малахова, А.В. Щербаков, 2007

ЦИРКУЛЯЦИЯ ВОЗДУШНЫХ МАСС НАД ЗОНОЙ МАССОВЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ В ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

Влияние погоды на лесные пожары не вызывает сомнений. В жаркие и засушливые годы вероятность природных пожаров сильно возрастает. Важнейший показатель пирологического режима, межпожарный интервал, сократился на треть в 20-м столетии по сравнению с 19-м; имеются предположения на взаимосвязь этого феномена с климатическими трендами. Обратное влияние пожаров на атмосферную циркуляцию менее очевидно. Обзор работ, в которых исследовалось такое влияние, дан в [1]. Воздействие лесных пожаров на атмосферные процессы осуществляется за счет явного и скрытого тепла, выделяемых при горении лесных горючих материалов и при конденсации водяного пара. Эти процессы происходят непосредственно над зоной пожара. Существенное влияние на формирование облачности и осадков оказывает дымовой аэрозоль, который покрывает территорию в сотни раз большую, чем площадь горения. Дымовые частицы являются ядрами конденсации водяного пара, коагуляции и кристаллизации водяных капель [2].

Теоретическое изучение влияния дымового аэрозоля на процессы облако- и осадкообразования проводилось в работах [3, 4]. Настоящая работа является продолжением этих исследований в аспекте изучения физических механизмов, обуславливающих прямое и обратное влияние пожаров на синоптические процессы в средней тропосфере.

Лесной пожар задаем в виде источника тепла, влаги и примесей в ограниченной области, расположенной на верхней границе слоя постоянных потоков [3, 4].

Движение воздушных масс, водяного пара, облачных капель и капель дождя описываются в рамках модели глубокой конвекции с учетом процессов облако- и осадкообразования [3, 4].

Результаты численных экспериментов показывают, что потоки тепла и пара, генерируемые в зоне горения, образуют пересыщенную смесь, а наличие ядер конденсации обуславливает формирование кучевых облаков. В некоторых случаях пожары сопровождаются образованием облаков, локализованных над тепловыми источниками. Влияние метеорологических условий изучалось с помощью задания разных значений начального поля влажности.

Результаты расчетов представлены на рис. 1а, б. Темным цветом изображена зона распространения примеси через 2 часа развития процесса. В случае «сухой» атмосферы аэрозольное облако достигает высоты 1700 м и не выходит за пределы экмановского пограничного слоя (рис. 1, а). На рис. 1, б светлой заливкой изображено облако (область, внутри которой $q_c > 0$). В атмосфере с высокой влажностью $f = 90\%$ образуется конвективное облако, а

конвективная колонка вместе с аэрозольным облаком увеличивается на 1100 м (рис. 1, б).

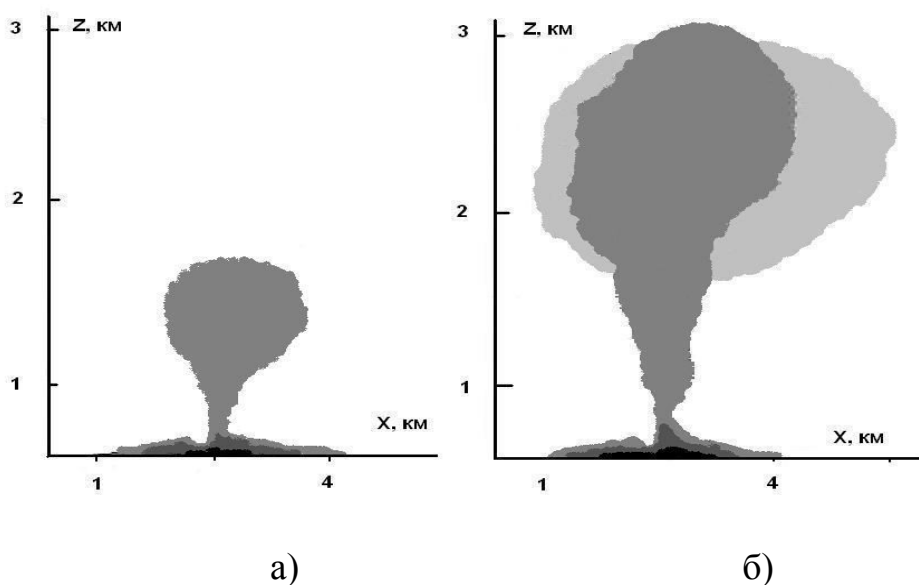


Рис. 1. Область распространения дымового аэрозоля при образовании облаков в условиях устойчивой стратификации а) – при $f=30\%$, б) – при $f=90\%$

Результаты численного моделирования подтверждаются данными наблюдений, которые показывают, что в антициклональных условиях ($f=30\%$) образуется перемешанный слой и при пожарах дымовой аэрозоль не выходит за верхнюю границу этого слоя. Пожар в условиях, когда влажность относительно велика (в нашем случае $f=90\%$), приводит к образованию конвективных облаков над зоной пожара, и они достигают высоты 2-3 км.

Сопоставительный анализ экспериментов показывает, что при достаточно высокой фоновой влажности роль пожара проявляется главным образом в формировании конвективной струи с мощными вертикальными токами, которые обуславливают транспорт влажного воздуха выше уровня конденсации и стимулируют образование облачной воды.

Массовые лесные пожары охватывают территорию порядка 10^4 - 10^5 км², а площадь, покрываемая дымовыми шлейфами, оценивается как 10^6 - 10^8 км² [5]. Применение мезомасштабной модели на территориях таких размеров неправомерно, поэтому далее ограничимся анализом взаимодействия погодных процессов и пожаров на качественном уровне, опираясь на материалы космических снимков [1, 5] и натурных данных.

Летом, для антициклональных условий типичен хорошо развитый слой перемешивания в дневное время. В случае возникновения лесных пожаров аэрозоль в дымовом шлейфе равномерно распределяется по всей высоте этого слоя, что показывает рис. 2, а.

При развитой конвективной облачности над зоной пожара слой перемешивания не образуется. Если дымовой аэрозоль попадает в облачный

слой, то создаются условия для проникновения примеси вплоть до тропопаузы (рис. 2, б). Такая ситуация часто реализуется при массовых лесных пожарах.

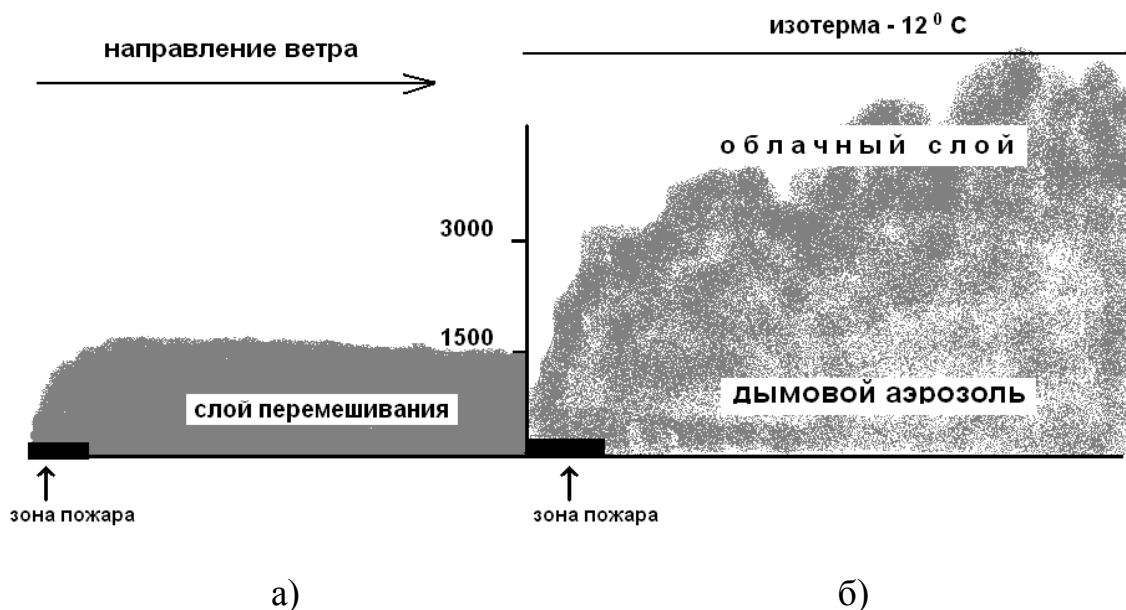


Рис. 2. Схема пространственного распределения дымового аэрозоля для различных синоптических условий: а) – антициклонических; б) – циклонических

Влияние дымового аэрозоля на процессы осадкообразования изучалось в работе [5]. Моделировалось дождевое изолированное конвективное облако с верхней границей, расположенной выше изотермы -12°C . Рассматривались два случая:

1. Облако не содержало дымового аэрозоля;
2. Дымовой аэрозоль достигал верхней границы облака.

Численные расчеты показали, что увеличение концентрации дымового аэрозоля в вершине облака приводило к уменьшению общего количества выпадаемых осадков. Физическое объяснение этого феномена заключается в следующем.

Если вершина дождевого облака расположена выше уровня изотермы -12°C , то она состоит из водяного пара, водяных капель, ледяных кристаллов, снега и ледяной крупы [6]. Попадание достаточного количества дымового аэрозоля в верхние слои стимулирует быструю кристаллизацию водяных капель. Облака с «ледяной вершиной» дают более слабые осадки, чем те облака, вершины которых состоят из смеси ледяных кристаллов, снега и дождевых капель [6, 7].

Действительно, данные наблюдений показывают, что в средних широтах в летний период основная масса осадков приходится на ливневые облака с вертикальными размерами от 5 до 10 км. Верхняя часть таких облаков оказывается сильно переохлажденной. Самолетные наблюдения и экспериментальные данные [6, 7] указывают на то, что ледяные кристаллы обнаруживаются на высотах, где температура воздуха ниже -12°C . Эти

кристаллы образуются из пара и водяных капелек при наличии достаточного количества твердых частиц аэрозоля радиусом больше 1,0 мкм, которые служат ядрами кристаллизации. В итоге это приводит к замедлению процессов осадкообразования [5].

Данные лабораторных экспериментов, проведенных в термобарокамере, [8] показывают, что достаточно около 100 частиц крупнодисперсного аэрозоля на 1 м³ воздуха для того, чтобы обеспечить кристаллизацию большей части капельной фракции при температуре воздуха менее –12⁰ С. При массовых лесных пожарах выделяется огромное количество аэрозоля, незначительной части которого достаточно для того, чтобы повлиять на процессы осадкообразования на большой территории.

Анализ космического мониторинга, сделанного над зонами массовых лесных пожаров 2002 г. (Республика Саха), 2005 г. (Ханты-Мансийский АО), 2006 г. (Приангарье), показывает, что непосредственно над зоной пожаров облачность отсутствует. Это косвенно подтверждает, что крупнодисперсный аэрозоль подавляет процессы облако - и осадкообразования. Кроме того, под влиянием инсоляции и тепла, выделяемого при пиролизе, происходит перестройка циркуляций воздушных масс над зоной пожара и в ее окрестностях. На снимках видно как, циклон огибает территорию пожаров. Анализ большого количества спутниковых снимков массовых лесных пожаров показывает, что данная ситуация весьма характерна для циклонических условий.

Предложим гипотезу для объяснения данной ситуации. Под влиянием крупнодисперсного дымового аэрозоля мощность облаков на обширных территориях уменьшается, а процессы осадкообразования выше изотермы – 12⁰С прекращаются. В результате часть тропосферы, расположенная над этой изотермой, охлаждается, и температура ее становится ниже, чем у окружающего облачного пространства, где воздействие аэрозоля отсутствовало. Холодные тяжелые массы воздуха опускаются, подавляя конвекцию в нижних слоях. Вследствие этого уменьшается интенсивность процессов осадкообразования, что приводит к дальнейшему охлаждению облачного слоя и усилению нисходящего потока. Этот процесс продолжается до тех пор, пока облачный слой над зоной задымления не исчезнет.

В условиях ясной погоды возникает перемешанный слой. Все тепло и дымовой аэрозоль, выделяемые при пожарах, теперь не проникают выше этого слоя. Если этот процесс происходит на больших территориях, то возникает циркуляция, при которой холодный воздух опускается в верхней и нижней части тропосферы и растекается в перемешанном слое. Под действием силы Кориолиса возникает типичная антициклональная циркуляция, при которой ветер в этой области меняет свое направление, что подтверждает анализ снимков космического зондирования над зоной наиболее мощных массовых пожаров. Ледяные частицы, образовавшиеся в результате кристаллизации в большом количестве облаков, формируют перистые ледяные облака, которые расположены с подветренной стороны от лесных пожаров (рис. 4).

Заметим, что похожий механизм реализуется при искусственных воздействиях на дождевые и градовые облака. Различие заключается в том, что роль фактора кристаллизации играет не крупнодисперсный аэрозоль, а специальный реагент.

Таким образом, активный вертикальный теплоперенос, генерируемый в зоне массовых лесных пожаров, может заметно повлиять на атмосферную циркуляцию зонального (синоптического) масштаба. При этом активную роль играют частицы дымового аэрозоля, выбрасываемого в зоне горения, которые способствуют кристаллизации облачной воды и блокируют процессы осадкообразования. Возникающие нисходящие токи на больших территориях подавляют конвективный обмен и могут привести к смене типа тропосферной циркуляции. В результате возникает механизм положительной обратной связи, приводящей к увеличению длительности массовых пожаров в условиях Сибирских регионов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Amber J. Soja, W. Randy Cofer, Herman H. Shugart, Anatoly I. Sukhinin, Paul W. Stackhouse Jr., Douglas J. McRae, and Susan G. Conard. Estimating fire emissions and disparities in boreal Siberia (1998 through 2002), JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 109, D14S06, doi: 10.1029/2004JD004570, 2004.
2. Ramanathan V., P. J. Crutzen, J. T. Kiehl, and D. Rosenfeld (2001), Aerosols, climate, and the hydrological cycle, Science, 294(5549), 8.
3. Шлычков В.А., Мальбахов В.М. Расчет высоты подъема дымового аэрозоля, вовлекаемого в облачные системы в зоне лесного пожара / В.А. Шлычков, В.М. Мальбахов, // Оптика атмосферы и океана, Тематический выпуск «Аэрозоли Сибири». – Томск, 2004., Т 17, №5-6. - С. 453-456.
4. Шлычков В.А. Влияние атмосферной конвекции на вертикальный перенос аридных аэрозолей / В.А. Шлычков, П.Ю. Пушистов, В.М. Мальбахов, // Оптика атмосферы и океана – 2001. – Т 14, № 6-7. - С. 578-582.
5. Дубровская О.А. Оценка влияния крупных дымовых частиц на процессы осадкообразования / О.А. Дубровская, В.С. Козлов, В.М. Мальбахов, // Оптика атмосферы и океана – 2005. – Т. 18, № 5-6. - С. 430-435.
6. Мейсон Б. Дж. Физика облаков / Б. Дж. Мейсон. - Л.: Гидрометеорологическое изд., 1961. – 541 с.
7. Сулаквелидзе, Г.К. Ливневые осадки и град / Г.К. Сулаквелидзе. - Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1963. – 412 с.
8. Изменение микроструктуры древесных дымов в малогабаритной аэрозольной камере под воздействием различных факторов / Р.П. Рахимов и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2003. - №4. - С.337-346.

© О.А. Дубровская, В.М. Мальбахов, 2007

МАРКОВСКОЕ СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ СУТОЧНЫХ СУММ ЖИДКИХ ОСАДКОВ

1. Стохастические процессы достаточно давно используются при моделировании временных рядов сумм осадков, причем как непрерывные, так и дискретные. К первым относятся непосредственно марковские процессы и процессы, траектории которых моделируются методами Монте-Карло. Работ, использующих дискретные модели, заметно больше. Одним из наиболее часто встречающихся методов в литературе является метод приближения данной траектории кривой какого-нибудь известного распределения, в частности, в роли последних выступают Γ -распределение, распределение Пуассона и другие. Непосредственно дискретные марковские модели (с различным уровнем связности и числом состояний) рассматривались в работах [1] (два состояния, простая цепь), [2] (семь состояний, простая цепь), [3] (два состояния, сложность цепи варьируется в зависимости от рассматриваемой местности). Во всех этих работах марковская модель используется только для расчета простейших характеристик, а дальнейшее исследование серийной структуры идет за счет различных предположений (например, в работе [2] предполагается, что количество осадков за сезон распределено равномерно или экспоненциально). В докладе исследование серийной структуры рассматриваемой последовательности опирается на результаты работ [4] и [5].

2. Используется банк данных 15-летних (1969 – 1983 гг.) наблюдений за суточным слоем осадков в теплое время года (май – октябрь) на всех осадкомерных пунктах равнинной части Новосибирской области (западнее г. Новосибирска). Пунктов с достоверной информацией и без пропусков отдельных лет оказалось 47; их список приведен в статье [6].

По данным наблюдений временные ряды суточных сумм жидких осадков выглядят как чередование серий "сухих" суток, суток со следами осадков (наблюдателями эти события кодируются цифрами 0.00) и серий дождливых суток, когда суточный слой осадков превышает 0.1 мм. Ряду таких наблюдений будем сопоставлять индикаторную последовательность, состоящую из нулей и единиц. Случай дождливых суток будет соответствовать единице (1), остальные случаи полагаем нулевыми (0). Таким образом, для каждого месяца получается 47×15 последовательностей нулей и единиц длины n , где n — длина месяца (30 или 31), то есть для каждого из шести месяцев образуется трехмерный массив $\xi_i^{(j)}(k)$ (i — номер станции, $i = 1, \dots, 47$; j — номер года от 1969 до 1983, $j = 1, \dots, 15$; k — номер суток, $k = 1, \dots, n$).

3. В качестве модели возьмем простую (односвязную) однородную двоичную цепь Маркова $\xi(k)$, $k \geq 0$ с множеством значений $S = \{1, 0\}$, начальным вектором A и переходной матрицей Q :

$$A = (a, 1 - a), Q = \begin{pmatrix} q_{11} & q_{10} \\ q_{01} & q_{00} \end{pmatrix},$$

где

$$a = \Pr\{\zeta(0) = 1\}, 1 - a = \Pr\{\zeta(0) = 0\}, q_{\alpha\beta} = \Pr\{\zeta(k+1) = \beta \mid \zeta(k) = \alpha\}, k \geq 0.$$

С помощью критерия χ^2 рассмотрено, насколько хорошо односвязная цепь описывает данный процесс. В табл. 1 приведены номера станций, показания которых не адекватны выбранной модели при уровне значимости критерия $\delta = 0.02$.

Таблица 1

Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
—	—	—	45	10, 21	10, 16, 19, 40

Из таблицы видно, что рассматриваемая модель достаточно хорошо описывает реальный процесс с мая по июль, для августа и сентября приближение можно считать удовлетворительным, для октября — плохим. В последнем случае необходимо увеличивать связность цепи для получения приемлемых результатов [3].

4. Моделировать начальные и переходные вероятности ввиду сильной неоднородности количества осадков необходимо независимо для каждого месяца. Переходные вероятности q_{ij} ($i, j = 0, 1$) будем моделировать следующим образом. Найдем число всевозможных переходов 11, 10, 01, 00 по каждой из станций за каждый год. Например, за месяц май в 1969 году на первой станции было зафиксировано 4 перехода из 1 в 1, 9 переходов 10, 9 переходов 01 и 8 переходов 00. Среднее число переходов $i \rightarrow j$ по всем станциям и годам в течение одного месяца обозначим m_{ij} . Тогда оценка q'_{ij} вероятности q_{ij} будет иметь вид:

$$q'_{ij} = m_{ij} / (m_{i0} + m_{i1}) \quad (i, j = 0, 1).$$

Например, для мая $m_{11} = 4.224$, $m_{10} = 5.070$, откуда $q'_{11} = 0.455$.

Данные оценки являются, очевидно, несмещенными и сильно состоятельными, так как к ним применим усиленный закон больших чисел.

Для подсчета начальных вероятностей необходимо число всех единиц, отмеченных первого числа месяца на всех станциях и по всем годам, поделить на общее число наблюдений. Таким образом, оценка имеет вид:

$$a' = \sum_{i,j} \xi_{(i)}^{(j)}(1) / (47 * 15).$$

Вышеперечисленные оценки по всем месяцам вместе со вспомогательными обозначениями приведены в табл. 2 (всюду далее полученные оценки отождествляются с теоретическими вероятностями).

Таблица 2

	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
$q_{11} = q'_{11}$	0.455	0.470	0.491	0.483	0.495	0.604
$q_{00} = q'_{00}$	0.747	0.781	0.744	0.728	0.786	0.711
$a = a'$	0.220	0.281	0.332	0.428	0.403	0.416
$d = p + q - 1$	0.202	0.251	0.235	0.212	0.281	0.316
$b = (1 - q) / (1 - d)$	0.317	0.293	0.335	0.344	0.297	0.422

5. Рассмотрим функционалы $x(n)$ и $y(n)$, определенные на нашей марковской цепи и равные соответственно числу единиц и числу серий из единиц на отрезке от 0 до n . Выясним, как ведут себя теоретические и эмпирические средние для них. Формулы для теоретических математических ожиданий берем в [5], подставляя в них данные из табл. 2. Эмпирические средние ищутся стандартными методами. Полученные данные отражены в табл. 3.

Таблица 3

	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
$Ex(n)$	9.68	8.74	10.34	10.78	9.03	12.98
$\overline{Ex(n)}$	9.7	8.76	10.38	10.78	9.07	13.07
$Ey(n)$	5.46	4.8	5.48	5.75	4.75	5.51
$\overline{Ey(n)}$	5.44	4.78	5.45	5.74	4.73	5.43

Как видно, разница между теоретическими и эмпирическими средними не превышает четырех сотых (если не брать во внимание октябрь), что косвенно свидетельствует о достаточной адекватности модели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Stern R.D. Computing a Probability Distribution for the Start of the Rains a Markov Chain Model for Precipitation // J. Appl. Meteorol., 1982. – 21, №3. – P. 420–423.
2. Haan C., Allan D., Street I.A. Markov Chain Model of Daily Rainfall // Water Resour. Res., 1976. – 12, №3. – P. 443–449.
3. Chin E.H. Modeling Daily Precipitation Occurrence Process With Markov Chain // Water Resour. Res., 1977. – 13, №6. – P. 949–956.
4. Савельев Л.Я. Накрывающие серии в двоичных марковских последовательностях / Л.Я. Савельев, С.В. Балакин, Б.В. Хромов // Дискретная математика, 2003. – Т. 15, вып. 1. – С. 50–76.
5. Савельев Л.Я. Совместное распределение числа единиц и числа 1-серий в двоичной марковской последовательности / Л.Я. Савельев, С.В. Балакин // Дискретная математика, 2004. – Т. 16, вып. 3. – С. 43–62.
6. Дробышев А.Д. Статистическая структура временных рядов суточных сумм жидких осадков в равнинной части Новосибирской области / А.Д. Дробышев // Труды ЗапСибНИИ Госкомгидромета, 1989. – Вып. 86. – С. 44–74.

© С.В. Балакин, 2007

ДИНАМИКА СТРАТОСФЕРНОГО ПОЛЯРНОГО ВИХРЯ В ЦИРКУЛЯЦИИ ВНЕТРОПИЧЕСКОЙ ТРОПОСФЕРЫ

Аннотация

С помощью спектральной модели общей циркуляции исследуется влияние динамики стратосферного полярного вихря на циркуляцию внетропической тропосферы. Известно, что такая реакция тесно связана с кольцеобразной вихревой модой, генерируемой моделью (Thompson, Wallace 1998, 2000; Thompson and Solomon 2002).

При этом вертикальный поток вихревой активности из тропосферы уменьшается, а меридиональный поток волновой активности от высоких к низким широтам увеличивается.

Таким образом, когда происходит выхолаживание стратосферы (усиление полярного вихря), волновое сопротивление в стратосфере уменьшается. Сигнал резкого охлаждения в стратосфере распространяется вниз на масштабах времени, оценки которых получены в теории взаимодействия стратосферы и тропосферы.

Введение. Динамика взаимодействия тропосферы и стратосферы.

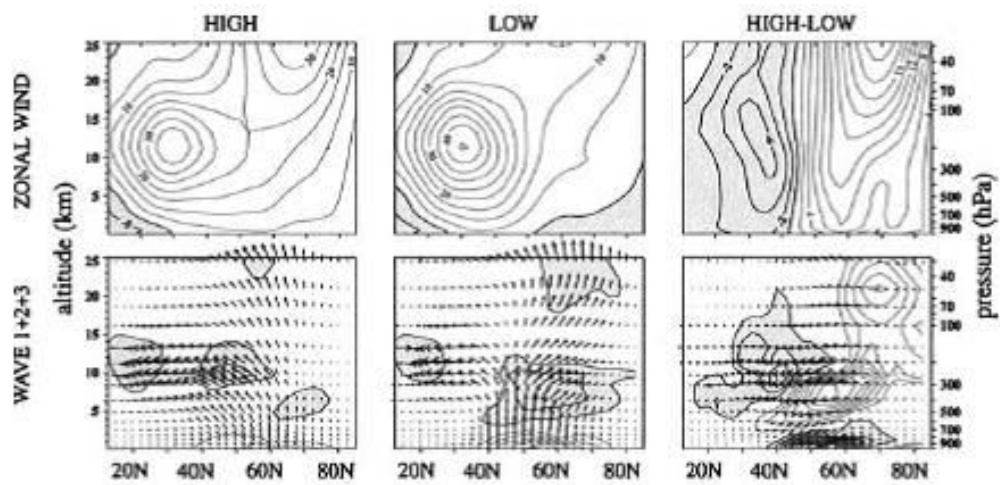
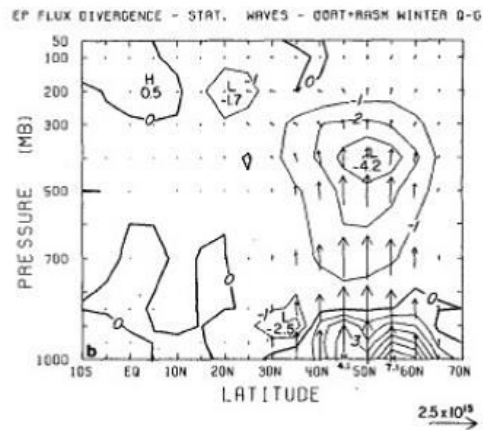
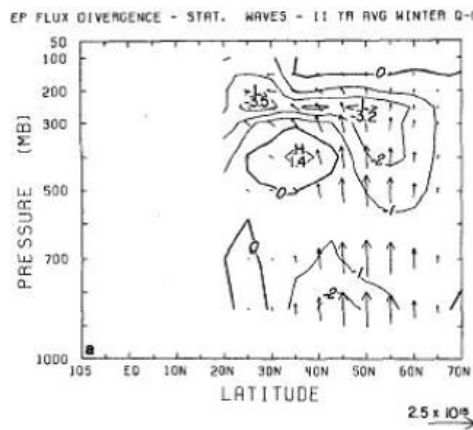
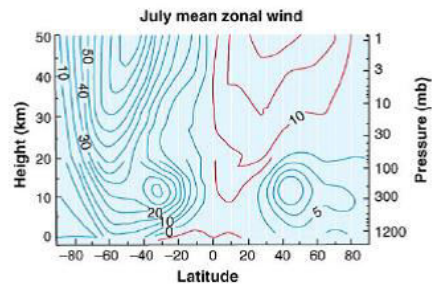
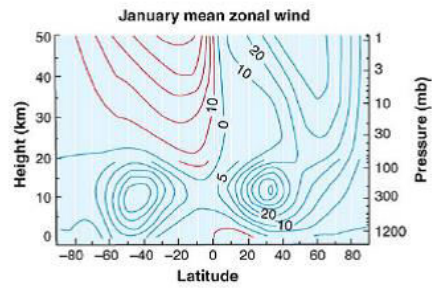
Стратосферный озон: Изменения в стратосферном озоне приводят к изменениям UV радиации, а также меняется приток озона в тропосфере, что может иметь значительное влияние на концентрацию озона у поверхности.

Радиационный баланс тропосферы:

Нижняя стратосфера играет важную роль в радиационном балансе тропосферы и вариации парниковых газов (озон, водяной пар) в нижней стратосфере оказывает прямое влияние на температуру поверхности.

Погода и климат: В то время как в прогнозе погоды и моделировании климата стратосфере уделяется меньше внимания, чем тропосфере, существуют доказательства влияния стратосферы на тропосферу, например заметное влияние на погоду и климат оказывает стратосферный аэрозоль, вызванный вулканической деятельностью, что может означать важную роль стратосферы в определении будущего климата в тропосфере при увеличении CO₂ и других парниковых газов.

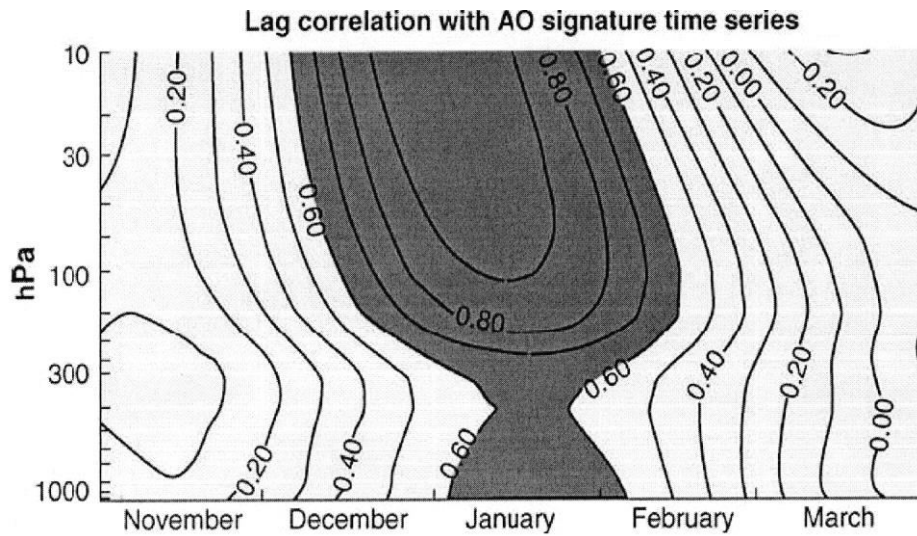
Вариации приходящей солнечной радиации: Вертикальное взаимодействие стратосферы и тропосферы, возможно, даст нам понимание механизма влияния вариации приходящей солнечной радиации на погоду и климат в тропосфере.



Композитные структуры в поле ветра, соответствующие высокому и низкому индексу NAM; поток Элиассена – Пальма, который указывает

направление распространение волн и перенос зонального момента, и его дивергенция.

(Hartmann et al. 2000.)



Корреляция между временными рядами на каждом уровне измерений NAM с данными на 10 hPa. Это может быть интерпретировано как распространение фазы сверху вниз

Уравнения динамики атмосферы

В качестве прогностических переменных берутся вертикальная компонента абсолютного вихря $\zeta = \xi + f$ и горизонтальная дивергенция D .

Уравнение для вихря

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{1}{1 - \mu^2} \frac{\partial}{\partial \lambda} F_v - \frac{\partial}{\partial \mu} F_u - \frac{\xi}{\tau_f} - k(-1)^n \nabla^{2n} \xi, \quad (1)$$

Уравнение для дивергенции

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \frac{1}{1 - \mu^2} \frac{\partial}{\partial \lambda} F_u + \frac{\partial}{\partial \mu} F_v - \nabla^2 \left(\frac{U^2 + V^2}{2(1 - \mu^2)} + \Phi + T_R \ln p_s \right) - \frac{D}{\tau_f} - k(-1)^n \nabla^{2n} D \quad (2)$$

Уравнение термодинамики

$$\begin{aligned} \frac{\partial T'}{\partial t} = & -\frac{1}{1 - \mu^2} \frac{\partial}{\partial \lambda} (uT') - \frac{\partial}{\partial \mu} (vT') + D \cdot T' - \dot{\sigma} \frac{\partial T}{\partial \sigma} + \kappa \frac{T\omega}{p} \\ & + \frac{T_R - T}{\tau_R} - k(-1)^n \nabla^{2n} T' \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \ln p_s}{\partial t} = -\frac{U}{1 - \mu^2} \frac{\partial \ln p_s}{\partial \lambda} - V \frac{\partial \ln p_s}{\partial \mu} - D - \frac{\partial \dot{\sigma}}{\partial \sigma} \quad (4)$$

Уравнение квазистатики

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \ln \sigma} = -T \quad (5)$$

Вертикальная скорость (в терминах $\omega = \frac{dp}{dt}$) находится из уравнения

$$\frac{\omega}{p} = \vec{V} \cdot \nabla \ln p_s - \frac{1}{\sigma} \int_0^\sigma (D + \vec{V} \cdot \nabla \ln p_s) d\sigma \quad (6)$$

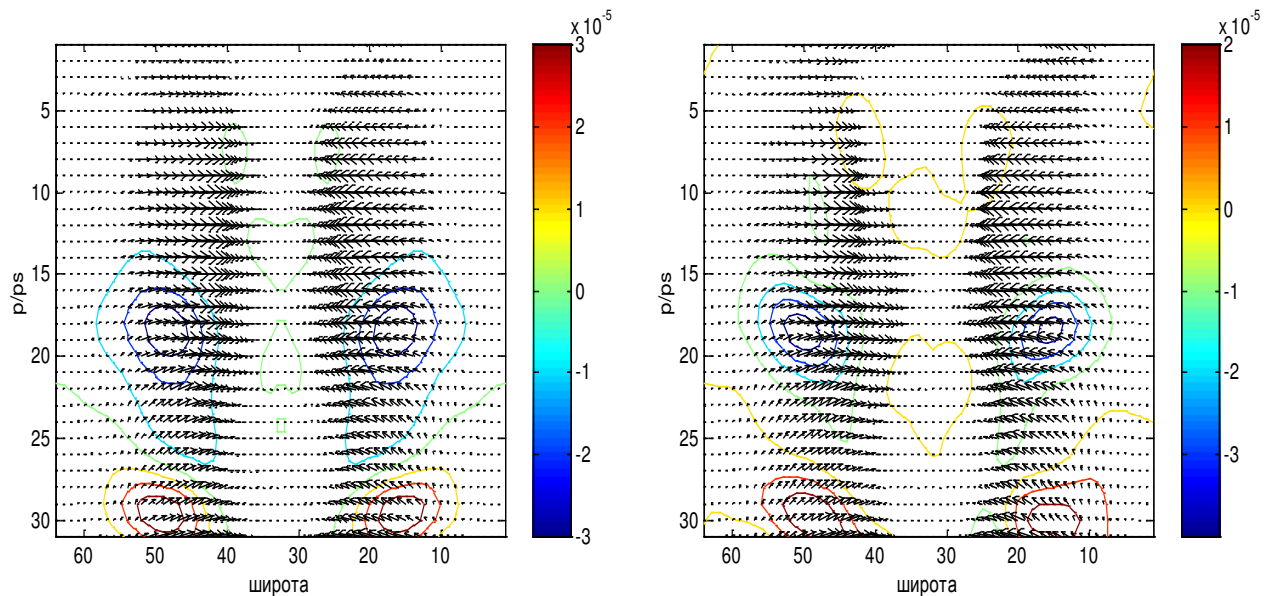
Распределение фоновой температуры в стратосфере зависело от широты следующим образом:

$$T_R^2(\sigma, \varphi) = (1 - \omega(\varphi))T_0 + \omega(\varphi)T_1(\sigma)$$

$$\omega = \sqrt{1 - \sin \varphi},$$

$$T_1(\sigma) = T_0 + \Gamma H \ln(\sigma / \sigma_T)$$

$$T_0 \approx 210K$$



Возможные механизмы:

1. Один из возможных механизмов заключается в нелокальности обратного оператора PV. Любое изменение в PV в нижней стратосфере окажет мгновенное влияние на изменение ветра и температуры в тропосфере.

2. Волновой форсинг локализованный в нижней стратосфере будет, через индуцированную меридиональную циркуляцию, вызовет усиление циркуляции в тропосфере.

3. Влияние распространяющиеся вверх волны Россби сопровождается с эффектом влияния изменений кольцеобразных вихревых структур на стратосферу.

Заключение

Ключевой динамической проблемой в моделировании климата стратосферы является прогноз изменения волнового форсинга G .

Результаты численного моделирования с моделями общей циркуляции показывают, что увеличение концентрации CO_2 приводит к усилению распространения планетарных волн в стратосферу и следовательно к усилению средней меридиональной циркуляции.

При достаточно сильном выхолаживании зимней полярной стратосферы тропосферное струйное течение смещается к северу и значительно усиливается у поверхности, это сопровождается некоторым падением давления в высоких широтах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bermejo R., Staniforth, A. The conversion of semi-lagrangian advection schemes to quasi-monotone schemes / Mon. Wea. Rev., 1992, V 120, pp. 2622–2631.
2. Крупчатников В.Н., Курбаткин Г.П. Моделирование крупномасштабной динамики атмосферы. Численные методы / Новосибирск, ВЦ СО АН СССР, 1990.
3. Крупномасштабные динамические процессы в атмосфере / под редакцией Б. Хоскинса, Р. Пирса / Москва, «Мир», 1988.
4. Крупчатников В.Н., Фоменко А.А. Полулагранжева полуневязная схема переноса в климатической модели ECSib / Новосибирск, ИВМиМГ СО РАН, 1997.
5. Метод контурной динамики в океанологических исследованиях / под редакцией Козлова В.Ф. / Владивосток, ДВО АН СССР, 1990
6. Квасов Б.И. Изометрическая интерполяция сплайнами / Новосибирск, НГУ, 1998.

© В.Н. Крупчатников, И.В. Боровко, 2007

СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СУТОЧНОГО ЦИКЛА МАССОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ СУБМИКРОННОЙ ФРАКЦИИ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ В ПРИГОРОДНОЙ ЗОНЕ НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ

Приводятся результаты экспериментальных исследований временной изменчивости массовой концентрации субмикронной фракции атмосферного аэрозоля (АА) в пригородной зоне г. Новосибирска (стационар ОГГМИ СО РАН, п. Ключи, 9 км. от Академгородка) в зимний, весенний, летний и осенний сезоны 2004-2006 г. Измерения проводились непрерывно в течение одного месяца в каждый сезон. Субмикронная фракция представляет собой частицы размера от 0,2 до 1 мкм, определённая диапазоном чувствительности измерительного прибора. В качестве последнего использовался автоматизированный нефелометр ФАН-А производства Загорского оптико-механического завода [1]. Для каждого периода наблюдений приведены данные о среднечасовых значениях концентрации и среднеквадратичном отклонении этой величины. Также представлены данные о среднечасовой суточной изменчивости со среднеквадратичными отклонениями. Средние значения концентрации (мкг/м^3) по годам и сезонам представлены в таблице. Среднеквадратичные отклонения этих величин составили около 10%.

	Зима	Весна	Лето	Осень
2004	15,7	19,7	4,7	7,1
2005	22,0	16,5	7,8	10,8
2006	19,2	27,6	10,5	8,6

В суточном цикле отчётливо проявляются утренние и вечерние максимумы концентрации, также характерно одинаковое поведение кривых для каждого сезона (рис. 1). Эти же закономерности прослеживаются в суточных циклах среднеквадратичных отклонений среднечасовых концентраций. Поведение кривых в суточных циклах определённо связано с солнечным излучением и конвективными потоками атмосферы. Характерное утреннее увеличение концентрации совпадает по времени с восходом солнца, т.е. солнечное излучение приводит к возникновению фотохимических реакций, за счёт чего газовые частицы начинают укрупняться и коагулировать. Дневной провал связан с прогревом земной поверхности, вследствие чего начинается активное перемешивание воздушной массы по высоте, увеличивается высота атмосферного слоя, уменьшается концентрация. Очень хорошо проявляются названные причины в весеннее время, когда солнечного времени больше, а температура меняется в широком диапазоне.

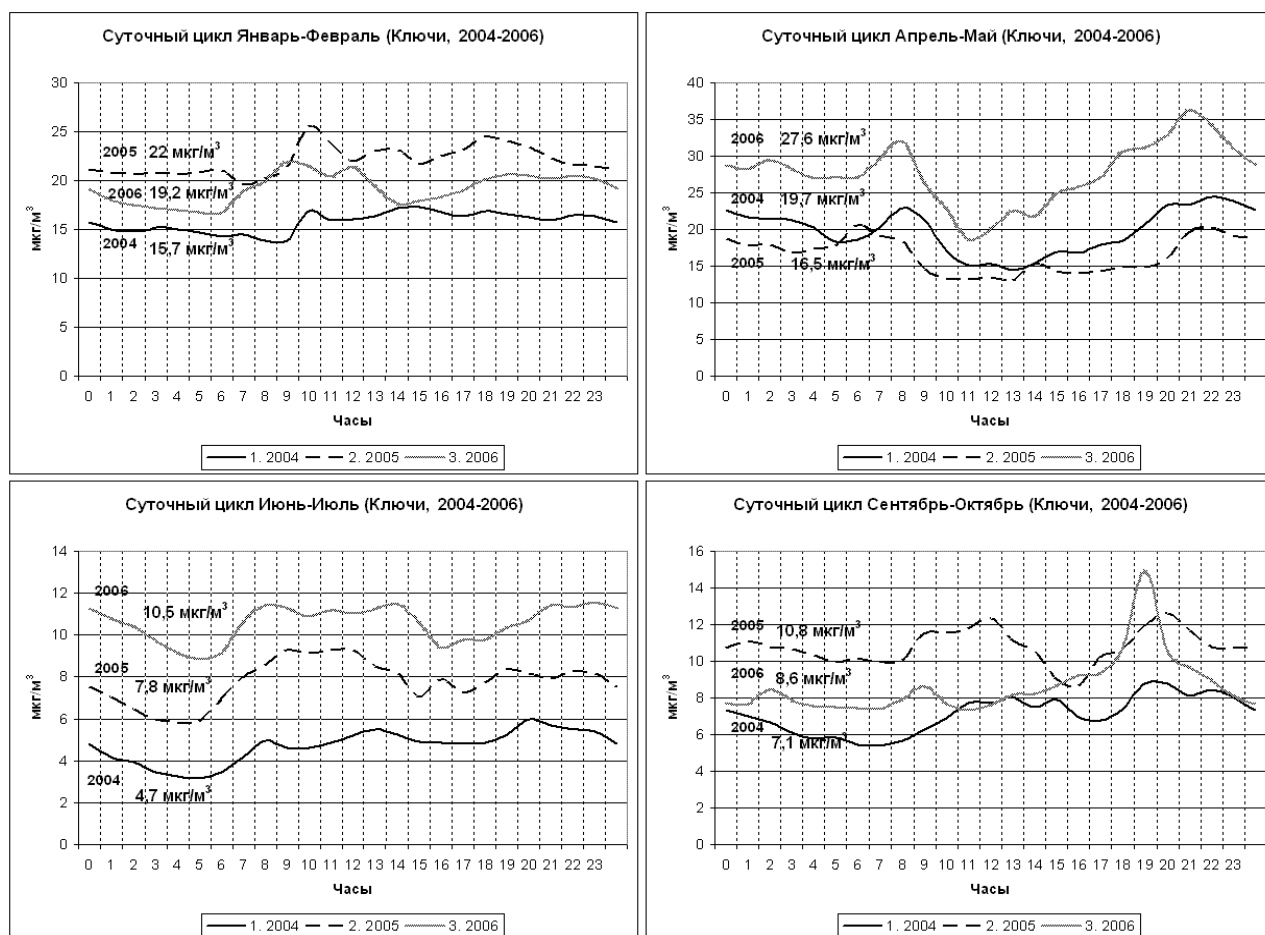


Рис. 1. Кривые суточного цикла, сгруппированные по сезонам

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Автоматизация нефелометрических измерений массовой концентрации субмикронных атмосферных аэрозолей / М.А Бизин, П.К Куценогий, К.П. Куценогий, В.И. Макаров // Оптика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 20, № 3. – С. 291-296.

© М.А. Бизин, К.П. Куценогий, В.И. Макаров, П.К. Куценогий, 2007

УДК 574

О.А. Беленко, К.П. Куценогий

СГГА, ИХКГ, Новосибирск

ОЦЕНКА ФОРМЫ ЧАСТИЦ И ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ГРУБОДИСПЕРСНОЙ ФРАКЦИИ АТМОСФЕРНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ

Атмосферные аэрозоли играют решающую роль во многих атмосферных процессах и оказывают существенное влияние на состояние атмосферы и климат. Кроме того, атмосферные загрязнения как наиболее динамичные представляют собой непосредственную угрозу здоровью человека и окружающей среде. Поэтому особый интерес представляет изучение процессов их распространения.

Свойства атмосферных аэрозолей определяются химическим составом, размером, формой аэрозольных частиц и их концентрацией. Многие

атмосферные явления (туманы, осадки, различные типы облаков, дымы от лесных пожаров и промышленных предприятий), в которых визуально обнаруживается присутствие частиц, дают представление о многообразии их форм и физико-химических свойств. Широкий диапазон концентраций атмосферных частиц и их размеров придает особую значимость задаче определения основных микрофизических свойств атмосферного аэрозоля, к которым относят счетную и массовую концентрации и дисперсный состав. Определение счетной концентрации не представляет принципиальных затруднений, что касается дисперсного состава, то этот вопрос более сложный и требует дополнительных исследований. В случае однородных по составу изоморфных частиц дисперсный состав характеризуется так называемой функцией распределения частиц по размерам (например, логарифмически нормальной), при неоднородном составе или разной форме частиц понятие распределения частиц по размерам становится неоднозначным.

Необходимо отметить, что счетная концентрация атмосферных аэрозолей представлена субмикронной фракцией, а массовая концентрация, в силу того, что масса частицы зависит от размера, как куб ее диаметра, в основном связана с грубодисперсной фракцией, которая характеризуется сложной и крайне разнообразной формой частиц.

Поэтому сведения о дисперсном составе грубодисперсной фракции атмосферных аэрозолей неточны и во многих случаях носят полуколичественный характер. При этом свойства атмосферных аэрозолей, особенно оптические и химические, существенно зависят от формы частиц.

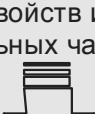
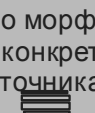
Традиционно свойства аэрозольных частиц изучают, измеряя отдельные характеристики непосредственно под микроскопом либо визуально сопоставляя микроскопические изображения. Достоверно выявить таким способом морфологические свойства частиц, имеющих неправильную геометрическую форму, практически невозможно. Эта задача может быть решена на основе анализа изображений частиц в цифровом виде с применением современных компьютерных средств.

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований предложен метод оценки формы частиц и дисперсного состава грубодисперсной составляющей атмосферных аэрозолей [1]. Сущность метода заключается в классификации морфологических свойств частиц, которые, в свою очередь, определяются в результате компьютерного анализа изображений аэрозольных частиц, полученных под микроскопом. Основные процессы предложенного метода приведены в табл. 1.

Для тестирования предложенного метода обрабатывались частицы плексигласа, имеющие правильную сферическую форму. Результаты показали, что вычисленные эквивалентные диаметры по площадям и периметрам близки друг другу (различие не более 0,05 %). Кроме того, сравнение вычисленных размеров частиц плексигласа с их истинными показало, что относительная ошибка определения размера не превышает 3 %. Это означает, что характерный размер частиц плексигласа достаточно точно определяется с использованием

предложенного метода. Также подтверждено, что статистические ряды, сформированные из характеристик частиц, достаточно хорошо описываются логарифмически нормальным распределением, на это указывают коэффициенты корреляции $r_s = 0,95$ для площадей и $r_p = 0,97$ для периметров. Все это свидетельствует о достаточно высокой точности вычислений, следовательно, разработанный метод пригоден для оценки формы частиц и дисперсного состава грубодисперсной фракции аэрозолей.

Таблица 1

Основные процессы	Метод реализации	Программные средства
Отбор аэрозольных проб 	Ротационный импактор открытого типа	
Выполнение микросъемки 	Съемка в проходящем свете на оптическом или цифровом микроскопе	Программное обеспечение цифрового микроскопа
Определение морфологических свойств индивидуальных частиц 	Методика определения характеристик частиц несферической формы на основе компьютерного анализа микроизображений	MapInfo Professional Matlab Photomodeler Golden Software Surfer
Формирование базы данных по морфологии частиц конкретного источника 	Импорт таблиц с атрибутивными данными и систематизация характеристик частиц Определение эквивалентных диаметров	Microsoft Office Excel Statistica
Оценка формы частиц и дисперсного состава	Классификация свойств частиц на основе статистического анализа	Microsoft Office Excel Statistica

С применением предложенного метода были обработаны частицы грубодисперсной фракции атмосферных аэрозолей от разных источников. В качестве примера приведем результаты обработки одной из проб частиц морского аэрозоля, которые были получены в процессе комплексных научных исследований в рамках проекта LOIRA на биологической станции Картеш. Всего проанализировано 172 микроизображения проб частиц, на которых выделено около 4 000 частиц.

Итоговые результаты анализа одной из проб, на которой выделено 225 частиц, приведены в табл. 2. В частности определены медианные значения площадей, периметров и эквивалентных диаметров (S_{50} , P_{50} и d_{i50}) и средние

квадратичные отклонения логарифмов последовательностей значений площадей, периметров и эквивалентных диаметров (σ_{gs} , σ_{gp} и σ_{gdi}). Спектры размеров каждой группы частиц описывались логарифмически нормальным распределением, для которого вычислены параметры.

Таблица 2

Площадь, мкм ²		Периметр, мкм		d_1 , мкм		d_2 , мкм	
S_{50}	σ_{gs}	P_{50}	σ_{gp}	$d_{1\ 50}$	σ_{gd1}	$d_{2\ 50}$	σ_{gd2}
65	5,9	35	2,6	9,9	2,5	10	2,6

Анализ данных, приведенных в табл. 2, показывает, что эквивалентные размеры d_1 и d_2 близки друг к другу. Однако при определении эквивалентных диаметров по измеренным площадям диапазон значений стандартного отклонения (σ_{gdl}) отличается от аналогичной величины по периметрам частиц (σ_{gd2}), что указывает на неизоморфность частиц разных размеров. Поэтому для идентификации формы и размера частиц находилось отношение эквивалентных диаметров ($\Delta = d_1/d_2$). Необходимо отметить, что полученные эквивалентные диаметры d_1 и d_2 в случае сферической частицы должны быть одинаковы, а их отношение ($\Delta = d_1/d_2$) равно 1. Следовательно, Δ – отношение эквивалентных диаметров характеризует отклонение формы частицы от сферической и используется для классификации формы несферических частиц.

Среднеквадратические отклонения для величин d_1 и d_2 достаточно большие (порядка 2,5), но для отношений эквивалентных диаметров (Δ) их значения намного меньше ($\sigma_{g\Delta} = 1,2$). Это говорит о схожести форм частиц, на что указывают также близкие значения среднегеометрических величин и их среднеквадратических отклонений для эквивалентных диаметров, хотя диапазон размеров частиц достаточно велик (от 10 до 230 мкм). Поэтому вся совокупность 225 характеристик была разбита на 6 размерных фракций, для каждой из которых рассчитаны значения $d_{i\ 50}$ и σ_g . Эти результаты приведены в табл. 3. Для всех фракций, исключая первую, параметр Δ близок к 1, следовательно, форма этих частиц близка к сферической.

Таблица 3

№ фракции	$\Delta_{min} / \Delta_{max}$	n_i	Δ_{50}	$\sigma_{g\Delta}$
1	0,22/0,76	39	0,6	1,35
2	0,76/0,83	37	0,8	1,03
3	0,83/0,88	37	0,8	1,02
4	0,88/0,90	37	0,9	1,01
5	0,91/0,93	37	0,9	1,01
6	0,93/0,98	38	0,9	1,01

Для частиц первой фракции $\sigma_{g\Delta}$ больше значений аналогичных величин других фракций, кроме того, значение Δ_{50} для первой фракции заметно меньше

единицы. Это может свидетельствовать о том, что частицы имеют вытянутую форму.

В процессе экспериментальных работ были исследованы свойства частиц грубодисперсной фракции атмосферных аэрозолей различного происхождения [1, 2, 3]. Типы обрабатываемых частиц и количество проб приведены в табл. 4.

Таблица 4

Типы аэрозольных частиц	Место отбора	Количество		
		проб	изображений	частиц
Частицы золы и угольного порошка	г. Новосибирск, Институт теплофизики СО РАН	3	15	1 600
Морской аэрозоль	Белое море, биологическая станция Картеш	38	172	4 000
Частицы, образованные при пожаре	Красноярский край	10	20	2 300
Частицы золы и угольного порошка	г. Барнаул, ТЭЦ-2	4	17	1 900

Результаты исследования проб грубодисперсной составляющей атмосферных аэрозолей, полученных от различных источников, показали, что спектр распределения значений периметров и площадей частиц хорошо аппроксимируется логарифмически нормальным законом. Определены параметры этих распределений для компонентов грубодисперсной фракции на примере атмосферных аэрозолей от разных источников и в разных регионах: Арктическом бассейне России, Новосибирской области, Красноярском крае;

Совокупность сведений, полученных с использованием предложенного метода, позволила выявить реальные свойства грубодисперсной фракции атмосферных аэрозолей, что необходимо для тестирования существующих и разрабатываемых математических моделей распространения аэрозолей в реальной атмосфере.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Беленко О.А. Исследование свойств грубодисперсной фракции атмосферных аэрозолей с применением цифровых изображений: автореф. дис... канд. техн. наук по специальности 25.00.36. / О.А. Беленко. – Новосибирск, 2006. – 29 с.
2. Беленко О.А. Новые методические подходы к изучению частиц грубодисперсной фракции атмосферных аэрозолей [Текст] / О.А. Беленко, К.П. Куценогий, Л.К. Трубина // Вестн. СГГА. – 2005. Вып. 10. – С. 30 – 34.
3. Беленко О.А. Влияние размеров и формы частиц на свойства атмосферных аэрозолей [Текст] / О.А. Беленко // Гео-Сибирь-2006. Т.3. Мониторинг окружающей среды, геоэкология, дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия. Ч. 1: сб. материалов междунар. науч. конгр. «Гео-Сибирь-2006». – Новосибирск: СГГА, 2006. – С. 163 – 167.

© О.А. Беленко, К.П. Куценогий, 2007

К ВОПРОСУ О СРЕДСТВАХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЦЕНТРОВ

Пылемеры – приборы для определения концентрации или дисперсного состава, т. е. распределения по размерам (в интервале от 0,3 до нескольких десятков мкм), взвешенных в атмосферном воздухе или промышленных газах твердых частиц (пыли, дыма) аэрозолей.

Концентрацию пыли можно измерять без отбора пробы запыленного газа и с ее отбором. В последнем случае необходимо, как правило, получать осадок пыли; для ряда приборов наличие такого осадка не требуется.

Массовые пылемеры – ручные либо автоматические приборы периодического или непрерывного действия. Пробу запыленного газа отбирают через специальную трубку, установленную входным отверстием навстречу газовому потоку с соблюдением равенства скоростей газа во входном сечении трубки и в потоке. Фиксированный объем пробы просасывают через фильтр и по его привесу находят массу выделенной из газа пыли. Ее концентрацию определяют по отношению массы пыли к данному объему газа. Фильтрующие материалы имеют тонковолокнистую структуру (стеклянные, синтетические или минеральные).

К массовым пылемерам относят радиоизотопные приборы для автоматического измерения концентрации пыли по приросту массы осадка на фильтре. Действие их основано на пропускании β - или γ -излучения через предварительно запыленный фильтр и нахождении степени поглощения этого излучения. Непрерывная работа таких приборов достигается применением движущихся ленточных стекловолоконистых фильтров.

В фотометрических пылемерах, используемых преимущественно для анализа атмосферного воздуха, массу пыли оценивают по интенсивности света, рассеянного (поглощенного) осадком на фильтре (обычно ленточном). Для контроля концентраций промышленной пыли наибольшее распространение получили оптические пылемеры, действие которых основано на поглощении или рассеянии светового пучка, пропущенного через слой запыленного газа в газоходе. В первом случае луч света от источника проходит через газовый поток и, будучи ослабленным за счет поглощения частицами пыли, попадает на один из двух фотоприемников. Одновременно на другой фотоприемник падает луч сравнения. При мостиковой схеме соединения обоих фотоприемников возникает сигнал рассогласования, который является степенью поглощения пучка света частицами пыли. Отличие пылемеров, измеряющих общее рассеяние света запыленным газовым потоком, состоит в том, что на фотоприемник поступают световые импульсы, рассеянные отдельными частицами пыли (рис. 1). Оптические пылемеры – автоматические приборы, требующие калибровки для каждого вида пыли, т.к. их показания зависят от ее дисперсного состава и оптических свойств. Применение ИК-излучения

позволяет уменьшить нижний предел измерений этих пылемеров с 30-50 до 10 мг/м³.

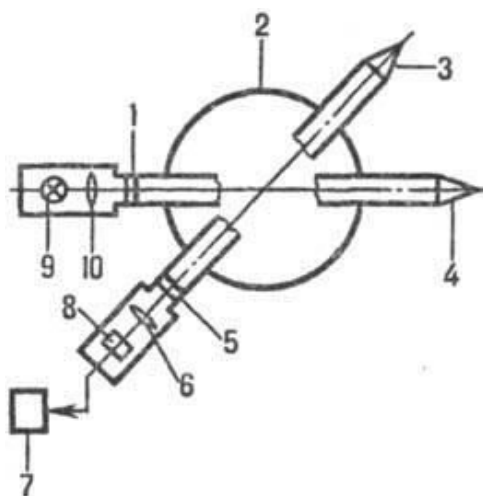


Рис. 1. Оптический пылемер:

1, 5-защитные стекла; 2-газоход; 3, 4-световые ловушки; 6, 10-линзы; 7-мостовая измерит. схема; 8-фотоприемник; 9-источник света

Широкую группу пылемеров составляют автоматические приборы, в которых непрерывно отбираемую пробу газа анализируют без получения пылевого осадка. Наиболее просты контактно-электрические пылемеры, действие которых основано на приобретении частицами пыли при трении о внутреннюю поверхность обычно пластмассовой трубки трибоэлектрического заряда; его величина пропорциональна площади поверхности частиц. Недостаток таких пылемеров – зависимость концентрации пыли не только от распределения частиц по размерам, но и от их электрических свойств. В индукционных пылемерах предварительно заряженные пылевидные частицы пропускают через измерительную камеру со специальным электродом, на котором индуцируется заряд, служащий мерой общего заряда частиц, определяемого площадью их поверхности и, значит, мерой концентрации при условии постоянства дисперсного состава пыли. В емкостных пылемерах запыленный воздух просасывают через трубку, внутри которой установлено устройство в виде двух пластин; между ними помещена сетка, находящаяся под напряжением. Устройство включено в контур генератора, частота колебаний которого f изменяется по мере осаждения частиц на сетке; изменение f – мера массы осажденной пыли.

Для измерения низких (до единиц мг/м³) концентраций пыли, присутствующей в основном в атмосферном воздухе, применяют фотоэлектрические счетчики, в которых запыленный воздух пропускают через освещенную зону (от 0,03 до нескольких мм³) и с помощью фотоумножителя регистрируют световые импульсы, рассеянные отдельными частицами под углами до 90°. Эти импульсы преобразуются в импульсы напряжения, которые посредством электронной схемы сортируются по амплитудам на несколько

диапазонов в соответствии с размерами частиц. Благодаря такой сортировке в приборах с рассеянием под малыми углами (несколько град) снижается влияние различных факторов на показания счетчика, который без специальной калибровки одновременно определяет концентрацию и размеры частиц (в интервале 0,3-20 мкм). Главный недостаток – ограниченный верхний предел так называемой счетной концентрации, который при использовании белого света лампы накаливания близок к 10^8 частиц/м³ и увеличивается в несколько раз в случае использования лазерного пучка.

Определение дисперсного состава промышленной пыли, особенно при ее высокой концентрации (несколько десятков мг/м³ и более), требует отбора пробы из газового потока с последующим суспендированием пыли в жидкой или газовой фазе, для чего используют специальные приборы. Для измерений размеров частиц без нарушения их агрегатного состояния (это важно для пыли конденсационного происхождения) широко применяют ручные приборы – импакторы (рис. 2), в которых сепарацию пыли осуществляют непосредственно в ходе отбора пробы, что позволяет оценивать размеры агрегированных (скоагулированных) частиц.

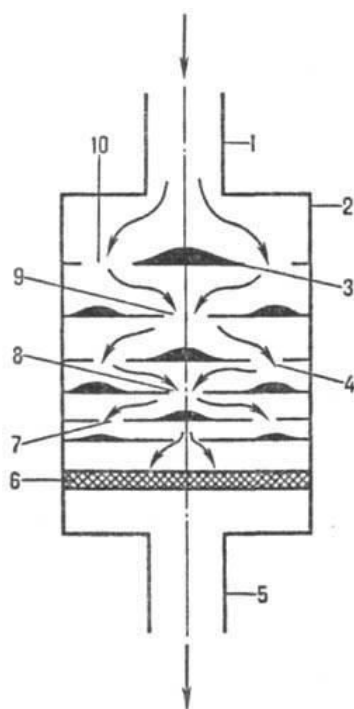


Рис. 2. Импактор:

1, 5-входной и выходной патрубки; 2 - корпус; 3 - пылевой осадок; 4, 7-10-сопла; 6-фильтр

Пыль, присутствующая в пробе, разделяется на 5-8 фракций при пропускании газа через последовательно установленные сопла постепенно уменьшающегося диаметра. Частицы соответствующего размера осаждаются на плоских подложках, размещенных напротив сопл. Содержание различных фракций находят по привесу подложек за время отбора пробы. Импакторы

позволяют одновременно с дисперсным составом оценивать также концентрацию пыли в газовом потоке.

Для большинства пылемеров характерна погрешность измерений до 20%. Наименьшей погрешностью обладают радиоактивные приборы, а также фотоэлектрические счетчики, наибольшей – ручные массовые пылемеры. При условии соответствующей калибровки ряд пылемеров можно применять также для определения концентраций и дисперсного состава туманов.

В настоящее время существует большой ряд приборов, позволяющих измерять как массовую, так и счетную концентрацию пыли в атмосферном воздухе. Но наибольшее распространение получили такие измерители как «Аэрокон», «ДАСТ-1», «ИКП-4», позволяющие производить измерения массовой концентрации пыли, и счетчики аэрозольных частиц «ПК.ГТА», «ПКЗВ», АЗ-5, американские Lighthouse HANDHELD.

Все эти приборы широко используются для экологического мониторинга атмосферы и контроля промышленных выбросов. Но с каждым годом все больше встает угроза возрастания концентраций пыли и смога в черте городских поселений из-за огромных скоплений автотранспорта, что негативно отражается на здоровье населения. Наиболее опасна пыль, которая не остается в носоглотке, а попадает в легкие. Это в основном мелкие фракции порядка 0,3-0,6 мкм.

Создаваемая система мониторинга, основанная на использовании разрабатываемых измерителей концентрации пыли, установленных в зонах возможного скопления автотранспорта и адаптированных к агрессивным условиям окружающей среды, позволит своевременно принимать меры по предупреждению и устранению значительных выбросов пыли и образования смога, в частности за счет корректировки движения автомобилей по городу, что в свою очередь облегчает пропускную способность городских улиц.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П.А. Коузов. – 2-е изд. – Л., 1974.
2. Клименко А.П. Непрерывный контроль концентрации пыли / А.П. Клименко, В.И. Королев, В.И. Шевцов. – Киев, 1980.
3. Горелик Д.О. Мониторинг загрязнения атмосферы и источников выбросов. Аэроаналитические измерения / Д.О. Горелик, Л.А. Конопелько. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 432 с.
4. Янковский С.С. Средства контроля запыленности газовых потоков в промышленных условиях / С.С. Янковский, Н.Г. Булгакова. – М., 1985.
5. Янковский С.С. Средства измерения массы и дисперсного состава частиц, взвешенных в газовом потоке / С.С. Янковский, Б.С. Сажин. – М., 1990.

© С.В. Хатюшин, 2007

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПОТОКОВ ВЕЩЕСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА

Одним из существенных преимуществ геоинформационных технологий является возможность создания пространственных моделей в трех измерениях.

При этом среди компонентов природно-территориальных комплексов наиболее актуальным для цифровой обработки является рельеф. Не трудно заметить, что все экологически значимые события могут меняться местами, а геоморфологический компонент, сохраняя основные черты, достаточную устойчивость, может оказывать определенное влияние на экологические свойства территории. При любом виде воздействия рельеф проявляет себя как распределитель не только геоморфологических процессов, но и процессов связанных с перераспределением тепла и влаги. В настоящее время в связи с доступностью быстрой компьютерной обработки громадных массивов высотных данных, становится реально выполнимой задача создания максимально приближенной к действительности цифровой модели рельефа (ЦМР), на основе которой возможно всестороннее изучение рельефа, районирование и оценка территорий по остроте эколого-геоморфологических обстановок и ситуаций, пространственное выделение потоков вещества, и связанного с ним геохимической миграции элементов.

В связи с тем, что до настоящего времени не производилось изучение рельефа равнинных территорий Новосибирской области, с использованием ЦМР, объектом исследования был выбран район плоской равнины Барабинской низменности, расположенный в границах Кыштовского района.

Работа включала следующие этапы:

1. Построение ЦМР;
2. Выделение эколого-геоморфологических районов с характерным типом рельефа; установление влияние рельефа на экологическую обстановку; прогнозирование эколого-геоморфологических ситуаций, связанных с движением потоков вещества;
3. Количественная оценка потоков вещества по уравнению эрозии почв USLE.

1. Исходными для создания ЦМР были выбраны топографические карты района исследования М 1:100 000. Построение ЦМР выполнялось средствами программы Surfer 7.0. Векторизация горизонталей проводилась в ручном режиме с интервалом оцифровки 100-150 м. Размер сетки и параметры интерполяции для каждого изображения подбирались индивидуально. Анализ моделей полученных различными методами интерполяции показал, что в данном случае наиболее перспективным оказалось применение кригинг - интерполяции. В результате были построены 15 фрагментов ЦМР содержащие около 70 000 пар точек плановых координат, при сечении рельефа 10 м.

ЦМР включали следующие слои: рельеф (гипсометрия); отметки высот; гидрография (речная сеть); векторная карта.

2. В качестве примера эколого-геоморфологическое районирование территории, с установлением соответствующих характеристик рельефа предлагается рассмотреть по одному из фрагментов ЦМР в районе районного центра Кыштовка.

В связи с развитием ГИС простейшие виды эколого-геоморфологического районирования могут быть выполнены с помощью операций пространственного анализа в рамках одного тематического слоя. Для выполнения более сложного комплексного районирования можно использовать оверлейные операции. В нашем случае, выделение эколого-геоморфологических районов на ЦМР основывалось на двух принципах: морфологии рельефа и анализа потоков вещества, показанных через такую характеристику рельефа как направление и величина векторов стока. Направление стока для каждой ячейки определялось соотношением ее высотной отметки с 4-8 отметками соседних ячеек. При этом длина стрелки вектора зависела от величины местного уклона поверхности, т.е. чем длиннее вектор, тем более крутой будет склон. Цвет вектора отражал изменение высот поверхности. Сопоставив векторную карту с трехмерной моделью рельефа, получаем возможность наблюдать не только за направлением поверхностного стока, но и за смывом материала и миграцией загрязнений (рис. 1).

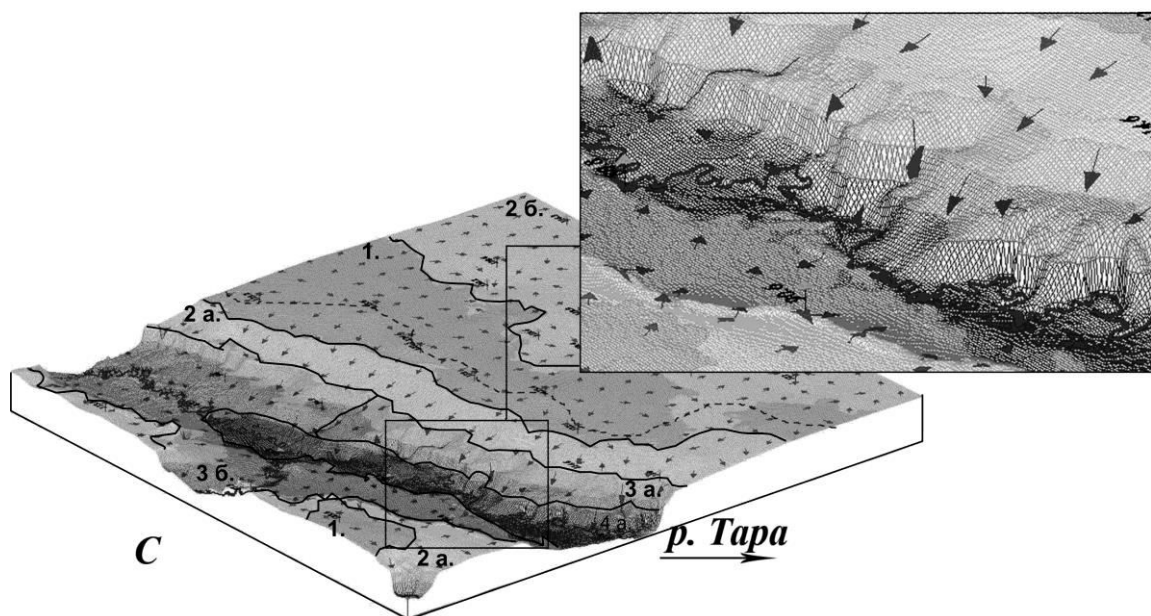


Рис. 1. Цифровая модель рельефа, сопоставленная с векторной картой (Векторы показывают направление поверхностного стока)

Выделение уровней миграции загрязняющих веществ, анализ пространственного распространения потоков вещества в пределах геоморфологических объектов, позволяет установить определенные

особенности динамики загрязнений в природной среде. В геоморфологических структурах, по направлению векторов, были определены следующие эколого-геоморфологические ситуации и обстановки, представленные в табл. 1 (по методикам, предложенным в источниках [1, 2]).

Таблица 1. Характеристика эколого-геоморфологических обстановок и ситуаций, по направлению потоков вещества

№	Геоморфологическая структура		Влияние рельефа на экологическую обстановку	Эколого-геоморфологические ситуации
1	2		3	4
1.	Водораздел		Рельеф относительно-стабильный, не изменяет экологической обстановки	Оседание внешней толщи грунтов, образование понижений, роль рельефа рассеивающая, воздействия могут быть ограничены аэрозольным переносом
2.	Приводораздельная морфологическая зона:			
	2 а. Районы, прилегающие к бассейну р. Тара до 100 изогипсы:	Правое водораздельное пространство	Увеличение динамики рельефообразующих процессов, роль рельефа концентрирующая, наблюдается линейное движение вещества	Рельеф слабо усиливает остроту экологической обстановки
		Левое водораздельное пространство		
	2 б. Районы, аллювиальных пониженных равнин		Рельеф не изменяет экологической обстановки	Повышение степени заболоченности, роль рельефа рассеивающая, в местах сходимости векторов - барьерная
3.	Склоны речных долин:		Рельеф слабо усиливает остроту эколого-геоморфологической обстановки	Автономно транзитные ситуации, наблюдается линейное движение вещества
	3 а. Склоны правой борта долины р. Тара			
	3 б. Склоны левого борта долины р. Тара		Рельеф значительно усиливает остроту экологической обстановки, значение приобретает сток поверхностных и подземных вод, осложненный сбросами производственных и бытовых вод	Транзитные ситуации, связаны с режимом склоновых процессов, линейная эрозия почв плоскостной смыв; линейное движение вещества локально изменяющее траекторию движения
4.	Днища балок, тальвегов, речных долин		Рельеф значительно усиливает остроту эколого-геоморфологической обстановки	Транзитно-аккумулятивно-эрозионный характер ситуации, роль рельефа барьерная

Распространение какого-либо процесса связанного с потоками вещества может иметь следующий характер:

- Ареальный, если вектора стока концентрически расходятся в стороны от источника опасности и покрывают ту или иную площадь;
- Линейный – направление процесса и его действие происходит более менее узкой полосой, (вниз по тальвегу или водотоку), при этом распространение может происходить как по поверхности, так и вглубь земной коры.

Роль рельефа при выделении эколого-геоморфологических ситуаций может быть:

- Концентрическая – в случае линейного направления векторов;
- Рассеивающая – при ареальном распространении;
- Изменяющая траекторию движения;
- Барьерной – если по пути потоков вещества встречаются различного рода орографические барьеры, естественного или искусственного происхождения [2].

При выделении различных эколого-геоморфологических районов необходимо всегда предусматривать, что вся территория единое целое. Через границы районов всегда будет происходить обмен вещества и энергии различного происхождения, качества и количества (потоки водных и воздушных масс, грузопотоки вещества).

3. Данный пространственный анализ связи эколого-геоморфологических районов и потоков вещества дает возможность оценить масштабы и скорости горизонтальной миграции вещества. Это может быть использовано при оценке эрозионной опасности территорий, с помощью универсального уравнения эрозии почв USLE:

$$A=R K L S C P,$$

где А – прогнозируемая расчетная величина среднегодовой почвенной эрозии в единицах массы на единицу площади; R – показатель количества осадков; K – коэффициент эродированности; L – длина склона; S – угол наклона; C – показатель растительного покрова; P – применяемые эрозионные мероприятия.

Расчет эрозионной опасности по данному уравнению может производиться в ГИС ArcView. Для этого, полученная ЦМР экспортируется в shape файлы ArcView, производится привязка по отметкам высот, и с помощью модуля Spatial Analyst, подсчитывается длины тальвегов и склонов, строятся карты углов наклонов.

Для расчета крутизны поверхности территория покрывалась сетью непересекающихся квадратов со стороной 1 км, в каждом квадрате оценивается средняя высота, по первой пространственной производной рассчитывается крутизна поверхности. Имея данные о количестве осадков и

характере растительности не трудно рассчитать величину потери вещества на единицу площади в результате эрозии почв.

Таким образом, данный анализ является первым шагом на пути количественной оценки потоков вещества тестируемого объекта и имеет важное прикладное значение для хозяйственного освоения территории.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кружалин, В.И. Экологическая геоморфология суши / В.И. Кружалин. – М.: Научный мир, 2001. – 175 с.
2. Геоморфологическая опасность и риск / Э.А. Лихачева и др. // Рельеф среды жизни человека. – М.: Медиа-Пресс, 2002. – С.208-229.

© А.Г. Власова, А.Г. Гриценко, 2007

УДК 502

В.В. Тараканов, Л.К. Трубина, Ю.Ю. Иванова, Е.В. Зинин
СГГА, Новосибирск

АНАЛИЗ ИЗМЕНЧИВОСТИ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПРИЗНАКОВ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ ПО ЦИФРОВЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

Леса являются важнейшим компонентом биосферы, продуцентом биомассы и кислорода. Велика их роль в качестве стабилизатора природной среды, так как лесные насаждения выполняют ряд экологических функций. Среди характеристик лесных ресурсов важнейшей является породный состав. В Сибири и Алтайском крае наиболее распространенной древесной породой является сосна обыкновенная. Ухудшение состояния лесов и постоянно увеличивающийся спрос на сосновую древесину повышают актуальность проблемы охраны генофонда, сохранения и увеличения продуктивности сосняков, в том числе методами лесной селекции и генетики [1]. В середине 70-х годов в Сибири наряду с другими регионами страны была развернута программа по селекции и семеноводству хвойных пород, заложены лесосеменные плантации. Одним из эффективных средств повышения результативности лесокультурного материала является использование для посадки и посева селекционного материала.

Отбор хозяйственно ценных форм древесных растений (селекция) производится из природных популяций по большому количеству фенотипических признаков, определяющих качество древесины, в том числе количественные характеристики деревьев, непосредственно влияющие на семяношение. Не малое влияние на рост дерева оказывает и область питания, определяемая формой рельефа подстилающей поверхности.

Для анализа изменчивости количественных признаков клонов сосны на экспериментальных площадках лесосеменных плантаций предложено использовать цифровую наземную стереосъемку [2].

С появлением качественных цифровых фотоаппаратов возможности приложения наземной фотосъемки для решения прикладных задач расширились

по сравнению с другими методами, обеспечивающими получение количественных характеристик древесных растений, такими как лазерное сканирование или съёмка электронными тахеометрами, она является более доступной [3].

В докладе представлены результаты применения материалов цифровой наземной стереосъёмки для изучения клонов сосны обыкновенной на одной из экспериментальных площадок сосны обыкновенной Института леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН в Алтайском крае. Данный экспериментальный участок заложен в 1980 году, общая площадь исследуемого участка составляет 2,5 гектара, густота посадки деревьев составляет 6х8 метров.

Непосредственно на участке были проведены геодезические работы, заключающиеся в измерении электронным тахеометром координат характерных точек рельефа и высот деревьев. Цифровые стереосъёмки всех деревьев выполнялись цифровыми камерами Casio QW-3000 Ex и Sony DSC – F707 в разных масштабах. Для каждого дерева (клона) получено несколько стереопар с разным ракурсом, при этом масштаб выбирается таким образом, чтобы дерево отобразилось в целом, стереосъёмка отдельных веток выполнялась в более крупном масштабе.

Для обработки полученных материалов применялись следующие программные продукты: Surfer, Image 3D, Photo Modeler.

В результате обработки полученных материалов сформирована цифровая модель рельефа, на которой показано относительное положение деревьев и их высота (рис. 1).

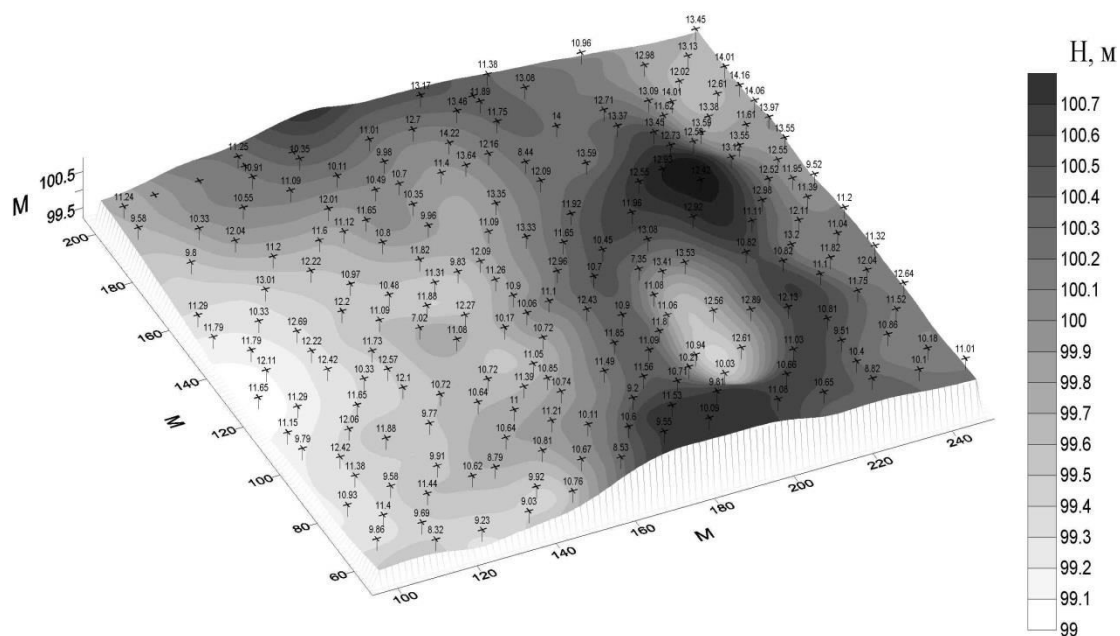


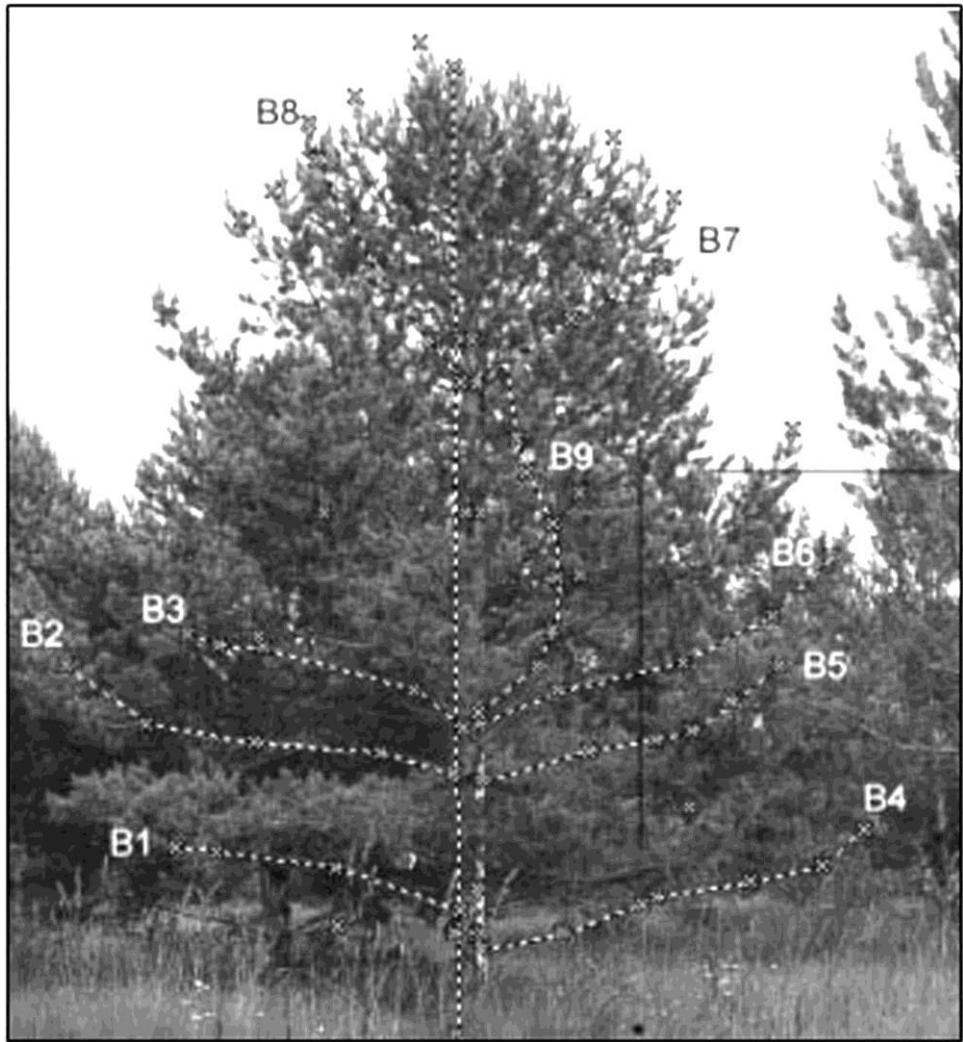
Рис. 1. Цифровая модель рельефа с относительным положением каждого дерева и его высотой

С помощью данных о рельефе выполнена оценка области питания каждого дерева.

Всего получено и обработано свыше 50 стереопар с изображением клонов, для которых измерены следующие характеристики: высота дерева, диаметры ствола на разной высоте, диаметр основной части веток, длины ветвей, а также произведен количественный подсчет числа ветвей, шишек. Полученные результаты сформированы в таблицы.

Основные количественные характеристики, полученные по результатам обработки стереопары одного из клонов (№21 10-8) приведены в табл. 1.

Таблица 1



Высота дерева (м)	
Определена тахеометром	11.8
Определена по стереопарам	11.6
Ветви (м)	
Нижний ярус	
B1	4.38
B2	4.88
B4	4.93
B5	3.66
Среднее значение	4.46
Средний ярус	
B3	3.81
B6	4.04
B9	4.03
Среднее значение	3.96
Верхний ярус	
B7	2.52
B8	3.38
Среднее значение	2.95
Количество ветвей	54
Диаметр ствола (см)	Высота измерения (м)
30.0	2.0

В табл. 1 представлены значения высоты дерева, определённые электронным тахеометром и по стереопаре. Это свидетельствует о точности, обеспечиваемой фотограмметрическими методами, в пределах 2%. Показаны длины ветвей в разных ярусах, а также вычислены средние значения, количество шишек на ветви и количество ветвей на дереве. Так же показан диаметр ствола, определённый на уровне 2 метра.

Полученные результаты переданы в Институт леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН.

Таким образом, опыт применения цифровой наземной стереосъёмки для получения количественных признаков сосны на лесосеменной плантации показал её эффективность. Основная трудность заключается в организации проведения съёмок площадок, на которых деревья достигли большей высоты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Селекционное семеноводство сосны обыкновенной в Сибири [Текст] / В.В. Тараканов и др. – Новосибирск.: Наука, 2001. – 230 с.
2. Лесовосстановление на Алтае [Текст] / Е.Г. Парамонов и др. – Барнаул, 2000. – 312 с.
3. Трубина Л.К. Стереомодели в изучении биологических объектов [Текст]: монография / Л.К. Трубина. – Новосибирск: СГГА, 2006. – 136 с.

© В.В. Тараканов, Л.К. Трубина, Ю.Ю. Иванова, Е.В. Зинин, 2007

УДК 528.7:574

А.М. Климашин

СГГА, Новосибирск

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ПЛОЩАДКАХ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

Важным фактором в локальных, региональных и даже глобальных экологических процессах являются лесные пожары. Планирование охраны лесов от пожаров, а также использование огня в различных целях лесного хозяйства должно регламентироваться применительно к конкретным лесным экосистемам, ландшафтам и лесорастительным зонам. Для этого необходимы исследования природы пожаров, условий их возникновения, распространения и развития, а также лесоводственных, экологических и экономических последствий воздействия огня на компоненты экосистемы.

Лесные пожары также являются мощным источником загрязнения атмосферы. Эмиссии аэрозольных частиц при обширных лесных пожарах являются важным климатическим и экологическим фактором.

Естественные лесные пожары, возникающие от неизвестных источников возгорания и стихийно распространяющиеся по территории, не могут быть базой для выявления ряда важных факторов, определяющих поведение пожара и степень воздействия на компоненты природной среды. В этом случае необходимые сведения можно получить экспериментально при натурном

моделировании пожаров с заданными характеристиками поведения огня и последующего мониторинга послепожарных сукцессий [1].

Реконструкция пожаров позволяет выявить пожарные режимы, типичные для данного ландшафта и восстановить их многовековую ретроспективу в прошлом, которую можно использовать как основу для сравнения с современными режимами, а также для прогнозирования развития лесных экосистем.

При проведении натурно-модельных экспериментов по исследованию пожаров в бореальных лесах России, реализуемых в рамках международного проекта «Оценка и мониторинг воздействия гарей и интенсивности пожаров на эмиссии, баланс углерода, состояние и устойчивость лесов Средней Сибири», прежде всего, детально изучают состав растительного покрова, определяют запас лесных горючих материалов, подробно описывают все пологи леса и подлесок по известным методикам и т. д. [1].

Экспериментальные лесные участки, размером порядка 200х200 м, выбирались в разных лесорастительных зонах Красноярского края. При этом определялись характеристики, как процесса распространения пожара, так и характеристики компонентов биоценоза. Такие данные о лесном участке собирались до и после проведения контролируемых выжиганий, а также в последующие годы. Дополнительно к методам сбора информации об экспериментальном участке, традиционно применяемым экологами, предложен технологический цикл решения задач информационного обеспечения натурно-модельных экспериментов с применением цифровых фотосъемок. Ряд характеристик, определяемых при проведении геоботанических описаний, возможно определять по материалам цифровых съемок разных масштабов, а для получения характеристик рельефа применять геодезическую съемку [2].

Эффективность методов фотосъемок обусловлена такими техническими характеристиками современных цифровых камер, как высокая разрешающая способность ПЗС – матриц и их высокая чувствительность, широкий диапазон фокусных расстояний, большой выбор установок экспозиционных параметров, возможность дистанционного управления камерами и др. Наличие таких параметров в камере обеспечивает широкие возможности при съемке различных объектов, отличающихся как по размерам, так и по динамике (дымовые облака), при этом позволяют работать в сложных условиях освещения.

Комплексное использование крупномасштабных цифровых съемок при натурно-модельных экспериментах обеспечивает оперативность и сохранность сбора информации о компонентах экосистемы, которые могут быть уничтожены пожаром.

На рис. 1 представлены этапы натурных экспериментов и предложены методы информационного обеспечения таких исследований.

От характера рельефа участка зависит, в первую очередь, структура живого напочвенного покрова, а также особенности распространения фронта горения при пожаре. В силу того, что исследуемые участки представляют собой лесные массивы небольшого размера, сбор данных о рельефе целесообразно

осуществлять геодезическим способом. Предложено использовать сеть базовых точек, которая разбивается на каждом экспериментальном участке. Точки маркируются на местности металлическими прутьями на расстоянии 25 м друг от друга. Схема расположения точек сети одного из участков показана на рис. 1.

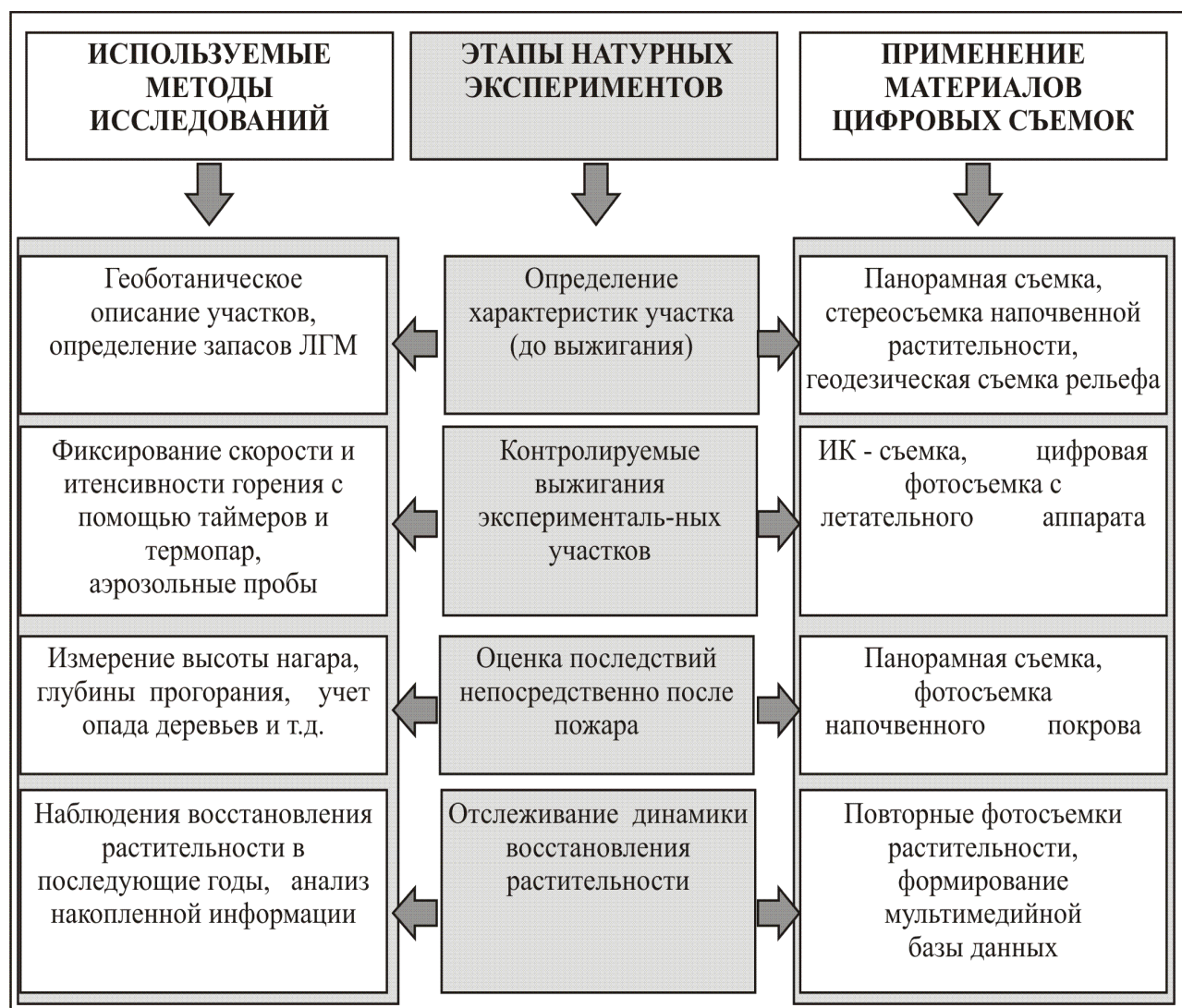


Рис. 1. Структурная схема информационного обеспечения натурно-модельных исследований лесных пожаров

Целью такой сети являлось привязка пробных площадок и получение целостного профиля различных слоев данных. По результатам геодезических измерений формировались цифровые модели рельефа (ЦМР) каждого участка. Такая модель важна для комплексного анализа накопленной разноплановой информации, характеризующей различные яруса растительности.

Важным информационным документом о состоянии участка служат панорамные изображения, дополняющие геоботаническое описание экспериментальных участков. Сложность их получения обусловлена густой лесной растительностью при требованиях максимальной обзорности и детальности. Для достижения этого, предлагается специальная методика

проведения цифровой фотосъемки. Ее сущность заключается в выполнении круговой панорамной съемки, при этом, точки фотографирования закрепляются на месте и располагаются на разных сторонах участка, что необходимо для проведения режимных съемок (с этих же позиций). При этом с каждой точки делается серия перекрывающихся снимков (от 5 до 8), при последовательном развороте камеры в горизонтальном направлении. Камера при этом устанавливается на штативе, который центрируется над закрепленной точкой и горизонтируется.

В дальнейшем с помощью графических компьютерных редакторов эти снимки преобразуются в цельное панорамное изображение. Общее представление об участке получается при формировании минимум четырех панорам снятых с базовых точек, расположенных на разных сторонах участка. Высокая детальность таких панорам достигается за счет использования при съемке цифровых фотоаппаратов, имеющих высокое разрешение изображения (в среднем 5-8 миллионов пикселей). В итоге получаем содержательный источник данных, который можно эффективно использовать при геоботаническом описании участков, а также на этапах отслеживания восстановления растительного покрова. Для оценки произошедших изменений на лесном участке после выжигания предлагается выполнять повторную панорамную съемку участков с тех же точек, с которых фотографировались участки до их выжиганий.

Также эффективным средством информационного обеспечения таких исследований являются крупномасштабные цифровые стереосъемки, которые позволяют детально изучать различные компоненты природной среды, и незаменимы при изучении динамических процессов [3].

Стереофотосъемка покровной растительности выполняется с каждой точки сетки, разбитой на участке. По стереопарам восстанавливается объемная модель, при стереоскопическом наблюдении которой воспроизводится объективная картина состава и качества растительного покрова участка до пожара. Кроме того, могут быть измерены различные пространственные характеристики. В данных исследованиях детальная информация о состоянии растительности до пожара в виде стереомоделей имеет особо важное значение, т.к. они позволяют сохранить данные о растительном покрове до пожара, определить видовое разнообразие, а также проективное покрытие различных видов растительности, такая информация невосполнима [4].

Для реализации предложенных способов выбрано соответствующее математическое и программное обеспечение, в частности, для построения ЦМР используется Surfer, для формирования панорам – Photoshop, для работы со стереоснимками – Images 3D, Erdas, Photomodeler и т. д.

Так как данные научные исследования являются многолетними и направлены (в том числе) на выявление особенностей восстановления растительного покрова после пожаров, то является целесообразным выполнение повторных (через 1-2,3 года) панорамных и стереофотосъемок.

За период 2002 -2006 гг. накоплена обширная база данных, получены цифровые модели рельефа для одиннадцати экспериментальных участков,

сформировано свыше 50 панорам и сфотографировано около 200 стереопар напочвенного покрова. Для эффективного использования полученных материалов необходима их систематизация. Для этих целей предложено создать мультимедийную базу данных, для которой разработана специальная структура. Такая база создана и оформлена в виде CD-диска «Пожарный медведь».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванова, Г.А. Зонально-экологические особенности лесных пожаров в сосняках средней Сибири: дис. / Г.А. Иванова. – Красноярск, 2005. – 368 с.
2. Климашин, А.М. Применение цифровых крупномасштабных снимков для изучения воздействия лесных пожаров на компоненты биоценоза / А.М. Климашин // Фундаментальные проблемы новых технологий в 3-м тысячелетии: материалы 3-й Всерос. конф. молод. учен. – Томск: Изд-во Ин-та оптики атмосферы, СО РАН, 2006. – 714 с.
3. Трубина, Л.К. Стереомодели в изучении биологических объектов: монография / Л.К. Трубина. – Новосибирск: СГГА, 2006.
4. Исследование воздействий пожаров на лесные экосистемы по материалам крупномасштабных цифровых съемок / А.М. Климашин, Л.К. Трубина, Г.А. Иванова, К.П. Куценогий // Сб. материалов междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2006», 24-28 апр. 2006г. – Новосибирск. СГГА, 2006. – С. 249-254.

© А.М. Климашин, 2007

УДК 574

Н.В. Власова, Е.И. Дюхина, Л.К. Трубина
ЦСБС СО РАН, СГГА, Новосибирск

ИССЛЕДОВАНИЕ БОТАНИЧЕСКИХ ТАКСОНОВ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В условиях ухудшения экологического состояния окружающей среды особое значение приобретают новые методы и средства, обеспечивающие получение объективной информации о различных компонентах природной среды с целью оценки изменения экологических факторов. Негативные воздействия могут проявляться в изменении видового состава, соотношения видов, морфологии отдельных органов у живых организмов, в частности, у растений. Для их идентификации эффективно применение информационных технологий. Для объектов каждого таксономического уровня необходимо получать свои характеристики [1].

В работе исследовались представители семейств *Злаки*, *Бобовые* и *Гвоздичные*. Выбор обусловлен их важным хозяйственным значением в качестве продуктов питания, лекарственных средств и кормовой базы животных. Кроме того, виды этих семейств распространены во всех растительных зонах и поясах Сибири. Общее описание изучаемых объектов приведено в таблице.

Таблица 1. Характеристики и источники данных анализируемых объектов

Таксон	Ареал	N / M	Объект	Характеристики
Солодка	Европа, Кавказ, Сибирь, Средняя и Центральная Азия	20/50	Плод (боб)	Разнообразие формы выростов и их количественные характеристики: площади и периметры их железок, густота размещения на единицу площади, высота ножек
		20/41	Гербарий	
Тонконог	Лесостепная зона от Днепра до Енисея, низкогорья и предгорья Северного Алтая	1/130	Пыльцевые зерна	Форма и диаметры зерна, оперкула и поры, ширина и высота ободка поры, степень зернистости, скульптура поверхности экзины, у пыльников – поверхность тапетума и диаметр орбикул
Остролодка	Средняя и Восточная Сибирь, северо-восток Азии и северо-запад Америки	17/22*	Виды	Пространственное распространение видов секции <i>Arctobia</i> рода <i>Oxytropis</i> Взаимосвязь различных видов данной секции
Примечание: N – число изученных видов; M – число проанализированных изображений; M* – число архивных карт.				

Особенности объектов каждого таксономического уровня потребовали своих подходов для их анализа.

Для изучения пыльцы растений разработана методика анализа цифровых микроизображений, получаемых с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) (рис. 1).

С применением разработанной методики проведено детальное исследование пыльцы вида *Тонконог Делявиня*, одного из широко распространенных во флоре России злаковых растений, взятых из нескольких пунктов распространения вида.

Проанализировано более сотни микроизображений пыльцевых зерен разных видов рода *Тонконог*. Дано общее описание пыльцы вида на основе выявленных морфологических признаков каждого пыльцевого зерна.

Разработанная методика по сравнению с существующими ранее обеспечивает расширение набора характеристик об исследуемом объекте и высокую степень детального описания строения пыльцевого зерна за счет обработки изображений с разным увеличением [2].



Рис. 1. Основные процессы получения и обработки микроизображений

Следующая методика позволяет изучать более крупные объекты, например репродуктивные органы растений, такие, как плоды.

Для изучения репродуктивных органов растений предложена методика получения и обработки цифровых изображений в режиме «макросъемка» [3].

По материалам макросъемки выполнен анализ цифровых снимков гербарных образцов и плодов разных видов *Солодки*. При визуальном анализе стереоскопических пар изображений плодов *Солодок* исследовались особенности строения трихом на их поверхности, выделены основные типы.

В итоге анализ пятидесяти изображений плодов *солодки*, полученных при фотосъемке в режиме «макро» показал, что использование компьютерного анализа цифровых макроизображений при изучении выростов обеспечивает получение разнообразной качественной и количественной информации.

Выявленные особенности опушения плодов *солодки* позволяют проследить их связь с экологическими условиями произрастания [4].

Разработанная методика, позволяет изучать структурные особенности разных органов растений, не только репродуктивных, но и вегетативных. Это было достижимым только с использованием микроскопа, а при макросъемке, которая позволяет получать изображение с увеличением, получение информации о структуре поверхности органов стало более оперативным. Использование стереоизображений позволило идентифицировать те элементы, которые по одиночным не распознаются.

Важным источником данных в целях изучения и систематизации биоразнообразия являются гербарные образцы. Для компьютерного представления гербариев предлагается методика формирования коллекций

образцов растений в виде структуры, включающей набор цифровых изображений масштабного ряда, например, растение целиком – гербарный лист, и далее – отдельно каждый орган растения (стебель, лист, корень). В коллекцию можно включать снимки и стереомодели отдельных органов растения: семени, листа, пыльца, получаемых цифровой камерой в режиме «макро» и при микросъемке. Для реализации подхода предложена методика формирования электронной коллекции средствами программы Front Page.

Предложенные подходы отличаются новизной именно в комбинации изображений разного масштаба плюс дополнение их стереомоделями. Разработанная методика обеспечивает передачу универсальной информации о конкретном таксоне в наиболее полном объеме. Тем самым на мониторе будет представлена вся информация, которую можно получить непосредственно с оригинала гербарного листа, рассматривая его через световой биологический микроскоп [3].

Важным в изучении биоразнообразия является отслеживание пространственного распространения видов.

С помощью ГИС-технологий систематизированы данные о распространении видового разнообразия секции *Arctobia* рода *Остролодка*. Анализировалась территория России и северо-запад Америки.

Результаты анализа представлены в виде различных тематических карт. Определено процентное соотношение перекрывающихся ареалов видов, количество видов на единицу площади и др. [5].

Систематизированные данные о распространении видов позволили провести статистический анализ, который осуществлялся средствами программы Statistica 6.0. Выполнен кластерный анализ. В результате получено иерархическое дерево или дендрограмма (рис. 2).

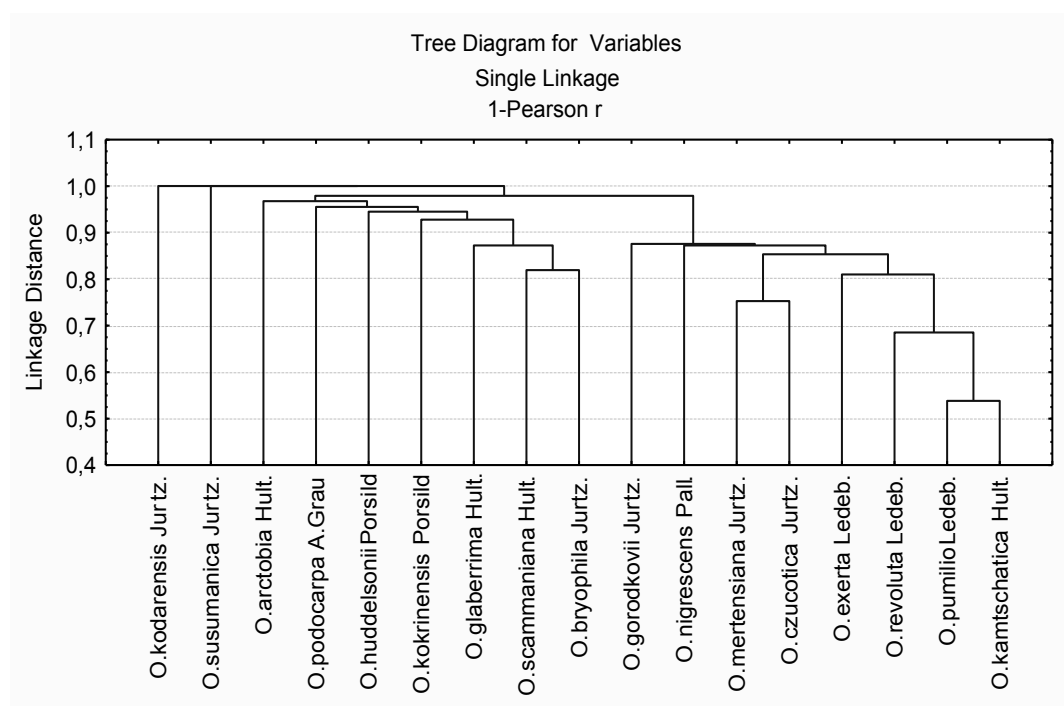


Рис. 2. Дендрограмма распространения видов секции *Arctobia*

Использование ГИС позволило обобщить опубликованные сведения о распространении видов. Сделало возможным проведение статистического анализа и наглядную форму представления результатов анализа.

В целом все разработанные методики позволяют системно изучать ботанические таксоны, т.к. для каждого таксономического уровня предложены подходы, позволяющие собирать объективную достоверную информацию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дюхина Е.И. Исследование ботанических таксонов на основе информационных технологий для индикации биоразнообразия: автореф. дис. канд. техн. наук: 25.00.36 – «Геоэкология» / Е.И. Дюхина – Новосибирск, 2006. – 26 с.
2. Дюхина Е.И. Сравнительно-морфологическое исследование пыльцы вида *Тонконог Делявиня* из разных местонахождений с использованием компьютерных технологий / Е.И. Дюхина, Н.В. Власова // Теорет. и приклад. исследования в ботанике: сб. материалов Междунар. научно-практ. конф. – Белгород: Изд-во ООО ИПЦ «Политерра». – 2005. – С. 12 – 17.
3. Трубина Л.К. Стереомодели в изучении биологических объектов: монография / Л.К. Трубина. – Новосибирск: СГГА, 2006. – 136 с.
4. Дюхина Е.И. Анализ цифровых изображений для изучения микроструктуры поверхности бобов солодки / Е.И. Дюхина // Мониторинг окружающей среды, геоэкология, дистанционные методы зондирования Земли: сб. материалов науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2005». – Новосибирск, 2005. – С. 167 – 172.
5. Власова Н.В. Род *Остролодка (Oxytropis, Fabaceae)* на северо-востоке Азии / Н.В. Власова, Л.К. Трубина, Е.И. Дюхина // Роль ботан. садов в сохранении биоразнообразия растительного мира Азиатской России: настоящее и будущее: сб. материалов Всерос. конф., посвящ. 60-летию Центрального сиб. ботан. сада. – Новосибирск: Изд-во «Сибтехнорезерв». – 2006. – С. 58 – 60.

© Н.В. Власова, Е.И. Дюхина, Л.К. Трубина, 2007

СОДЕРЖАНИЕ

Peter Schreiber. Latest Achievements in Airborne Surveying Technology and New Applications by Leica Geosystems AG	3
Адров В.Н., Карионов Ю.И., Титаров П.С., Чекурин А.Д. Фотограмметрическая обработка стереоскопических данных CARTOSAT-1 в системе PHOTOMOD в рамках программы ISPRS/ISRO C-SAP.....	6
Бучнев А.А., Пяткин В.П. Контролируемая и неконтролируемая классификация многоспектральных данных дистанционного зондирования Земли.....	6
John C. Trinder. State of the art and future developments in photogrammetry and remote sensing.....	16
Антипов И.Т. Уравнивание сферической фототриангуляционной сети	26
Гук А.П., Худогилов К.А., Евстратова Л.Г. Фотограмметрическая обработка аэрокосмических снимков для решения задач проектирования границ муниципальных образований малообжитых районов.....	33
Быков В.Л., Быков Л.В., Макаров А.А. Результаты калибровки снимков на испытательном полигоне	35
Гук П.Д. Дифференциальное цифровое ортотрансформирование.....	39
Коркин В.С. Алгоритм обратного трассирования лучей для формирования цифровых макетных снимков.....	41
Гук А.П., Антипов И.Т., Тихонов В.И., Никитин В.Н. Технология построения пространственной аналитической сети фототриангуляции для малоконтурных лесных территорий с использованием программных комплексов MonoSDS И PHOTOCOM	44
Ессин А.С., Ессин С.С. Разработка методики пространственной фотограмметрической обработки материалов цифровой аэрофотосъемки, полученной с беспилотного летательного аппарата	48
Гук А.П., Гук Н.А. К вопросу о фотограмметрической обработке материалов лазерной аэросъемки.....	53
Худогилов К.А. Оценка возможности использования космических снимков для установления границ муниципальных образований республики Саха (Якутия).....	55
Евстратова Л.Г., Саваренко А.А. Опыт создания ортофотопланов по материалам аэросъемки цифровой неметрической камерой	57
Кузнецов Ю.И., Мазуров Б.Т., Тихонов В.И. Математическая модель вращательных кольцевых структур Земли	61
Колесникова О.Н. Использование ПК ENVI для решения прикладных задач	66
Широкова Т.А., Комиссаров Д.В., Комиссаров А.В. Исследование точности внешнего ориентирования сканов с использованием результатов моделирования.....	71
Черемушкин А.В. Имитация аэрофотосъемочного процесса в учебных целях	75

Быков Л.В., Беспалов И.А. Создание планово-высотного обоснования космической съемки местности на основе каркасной аэрофотосъемки	78
Emil R. Bayramov. Research of the new GIS method for the prediction of Caspian Sea Fluctuation Impacts on the Protected Areas located along coastal line for the environmental monitoring purposes.....	81
Исследование нового ГИС метода для прогнозирования колебания Каспийского моря на прибрежные охраняемые природные зоны с целью мониторинга окружающей среды	81
Медведева Е.А. Особенности фотограмметрической обработки снимков, полученных съемочными камерами с различными параметрами.....	85
Гук А.П., Никитин В.Н. MonoSDS – дополнительный модуль для расширения возможностей цифровой фотограмметрической станции	89
Леонова Г.А. Биофильтрующая система водных растений литорали на пути миграции химических элементов	93
Льготин В.А., Макушин Ю.В., Плевако Г.А. Мониторинг геологической среды как информационная основа управления состоянием недрна территории Сибирского Федерального округа.....	119
Якутин М.В., Лхагвасурэн Ч., Цвельчугов А.Н. Современные методы почвенной микробиологии в экологическом мониторинге пастбищ в полупустынях западной Монголии	103
Груничев Н.С., Хоренко Т.А. Влияние хозяйственной деятельности на окружающую среду Прибайкалья	108
Воронина Л.В., Смирнова А.Н. Зонально-провинциальные особенности и экологическое значение суммарной солнечной радиации в пределах Новосибирской области.....	112
Дулупов В.И., Лелюх Н.Н. Исследование и контроль состояния морских донных экосистем с использованием подводной робототехники	117
Грабаум Р., Майер Б., Смоленцева Е.Н. Метод МУЛЬБО: оптимизация природопользования в Германии на основе ГИС-технологий	121
Ломанович К.А., Тесленко В.С. Разработка методов спектрального экспресс-анализа водных ресурсов с помощью диафрагменных разрядов.....	125
Белоус И.Н., Казанцев В.А. Селективный характер зимнего солепереноса в почвах Барабинской равнины	130
Якутин М.В., Анопченко Л.Ю. Картографические методы в мониторинге запасов органического углерода в почвах Причановской территории Барабы	134
Кленов Б.М., Гриценко А.Г. Гидролизруемость гуминовых кислот как один из возможных параметров почвенно-экологического мониторинга..	139
Никонов А.И., Тужиков М.Е. Информационно-аналитические системы для решения задач геодинамического мониторинга природно-технических систем	143

Хахулина Н.Б. Геоэкологическая ситуация казахстанского сектора Каспийского моря.....	148
Якутин М.В., Анопченко Л.Ю., Проскурникова И.И., Шувалов С.Н. Структура запасов органического углерода в экологическом мониторинге молодых экосистем Барабы	152
Копылов В.Н., Полищук Ю.М., Хамедов В.А. Синтез оптических и радиолокационных космических снимков при решении задачи оперативного обнаружения лесных гарей	157
Калантаев П.А. Функции семантической обработки данных космического мониторинга.....	162
Чимитдоржиев Т.Н., Архинчеев В.Е., Дмитриев А.В., Сангадиев С.Ш. Применение фрактального подхода для классификации и оценки параметров земных покровов по радиолокационным поляриметрическим изображениям	165
Хлебникова Е.П. Повышение эффективности регионального мониторинга по многозональным космическим снимкам	171
Болсуновский М.А. Новейшие спутники дистанционного зондирования Земли 2007 – оптические и радарные – для решения прикладных задач	175
Сидорова В.С. Неконтролируемая классификация текстурных изображений	178
Перфильев С.Е. Аспекты космического аграрно-промышленного мониторинга.....	183
Ким П.А. Полидуга как элемент конструирования профилей масштабируемой модели рельефа	188
Никитина Ю.В. Разработка алгоритма моделирования процесса формирования изображения съёмочной системой	192
Чимитдоржиев Т.Н., Сангадиев С.Ш. Когерентная обработка радиолокационных изображений	198
Гопп Н.В., Смирнов В.В. Пространственная дифференциация парагенетических ландшафтов тундрового типа в окрестностях озера Джунгукуль (республика Алтай)	203
Карпухин С.С. Концептуальные положения универсального геоинформационного картографирования для целей мониторинга окружающей среды	208
Смоленцева Е.Н., Мартысевич У.В., Королюк А.Ю. Мониторинг компонентов наземных экосистем Чуйской котловины Горного Алтая по данным спутниковых наблюдений.....	213
Алексеев А.С., Глинский Б.М., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С. Вибрационные геотехнологии в XXI веке: состояние и перспективы	218
Геза Н.И., Сапрыкин И.В., Юшин В.И. Методика прецизионного вибромониторинга времен пробега в релаксирующей среде	225
Смирнов В.А. О природе катастрофических извержений	231

Арнаутов Г.П., Калиш Е.Н., Стусь Ю.Ф., Смирнов М.Г. Мониторинг вариаций гравитационного поля модернизированным баллистическим гравиметром.....	236
Глинский Б.М., Фатьянов А.Г. Теоретическое и экспериментальное исследование сейсмических зон и вулканических очагов на основе разномасштабности их строения.....	241
Хайретдинов М.С. Эффекты взаимодействия смежных геофизических полей в проблеме мониторинга окружающей среды.....	246
Седухина Г.Ф. Пространственные эффекты нелинейности вибросейсмического волнового поля	251
Воскобойникова Г.М. Результаты численного моделирования распространения сейсмических волн в нелинейно-упругих трещиноватых средах.....	256
Ефимов С.А. Формирование функции ядра преобразования оптимального фильтра с использованием экспериментальных записей в ближней зоне для обработки сейсмических сигналов, формируемых распределенными карьерными взрывами.....	261
Григорюк А.П., Брагинская Л.П. Управление данными вибросейсмического мониторинга.....	265
Хайретдинов М.С., Авроров С.А. Поточное обнаружение и распознавание сейсмических волн в шумах.....	269
Ефимов С.А. Исследование особенностей корреляционной обработки данных вибросейсмической технологии с целью повышения эффективности исследования земной коры и строения вулканов	274
Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Седусов Р.Г., Бойко Е.В. Современные движения Алтае-Саянского региона по экспериментальным данным	279
Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Грибанова Е.И. Вариации наклонов и деформаций в БРЗ	284
Кузин В.И., Лобанов А.С. Анализ климатической изменчивости поверхностной температуры Тихого океана	290
Протасов А.В. Динамико-вероятностный метод четырехмерного анализа и вариационного усвоения полей метеоэлементов	294
Фоменко А.А., Курбацкая Л.И. Реакция термических полей в высоких широтах на вариации облачности, обусловленные гелиофизической активностью	299
Рапута В.Ф., Смоляков Б.С. Анализ пространственной динамики изменения ионного состава снега в зоне влияния нефтегазового факела	304
Шлычков В.А. Численная модель русловой и пойменной аккумуляции стока при прохождении волны паводка	310
Леженин А.А. Численное моделирование атмосферного пограничного слоя над неоднородной местностью	315
Малахова В.В., Щербаков А.В. Метангидраты как возможный источник метана в океане.....	320

Дубровская О.А., Мальбахов В.М. Циркуляция воздушных масс над зоной массовых лесных пожаров в Восточной Сибири	325
Балакин С.В. Марковское стохастическое моделирование поведения временных рядов суточных сумм жидких осадков	330
Крупчатников В.Н., Боровко И.В. Динамика стратосферного полярного вихря в циркуляции внетропической тропосферы	333
Бизин М.А., Куценогий К.П., Макаров В.И., Куценогий П.К. Сезонная изменчивость суточного цикла массовой концентрации субмикронной фракции атмосферного аэрозоля в пригородной зоне Новосибирской области	338
Беленко О.А., Куценогий К.П. Оценка формы частиц и дисперсного состава грубодисперсной фракции атмосферных аэрозолей	339
Хатюшин С.В. К вопросу о средствах инструментального мониторинга загрязнения атмосферы промышленных центров	344
Власова А.Г., Гриценко А.Г. Пространственная оценка потоков вещества с использованием цифровых моделей рельефа	348
Тараканов В.В., Трубина Л.К., Иванова Ю.Ю., Зинин Е.В. Анализ изменчивости количественных признаков сосны обыкновенной по цифровым изображениям	352
Климашин А.М. Информационное обеспечение исследований экологических последствий лесных пожаров на экспериментальных площадках Красноярского края	355
Власова Н.В., Дюхина Е.И., Трубина Л.К. Исследование ботанических таксонов на основе информационных технологий	359