

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

ГЕО-СИБИРЬ-2005

Т. 2

ГЕОЛОГИЯ, ГЕОФИЗИКА, ГЕОДИНАМИКА И ГЕОМЕХАНИКА

Сборник материалов
научного конгресса

Новосибирск
СГГА
2005

УДК 55:550.3:551.2/.3:531
С 26

Ответственный за выпуск:

координатор направления «Геология, геофизика, геодинамика и геомеханика»,
доктор технических наук, профессор Сибирской государственной геодезической
академии
А.И. Каленицкий

С 26 ГЕО-Сибирь-2005. Т. 2. Геология, геофизика, геодинамика и
геомеханика: Сб. материалов научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2005», 25 – 29
апреля 2005 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2005. – 199 с.

ISBN 5-87693-164-0

В сборнике опубликованы материалы научного конгресса «ГЕО-Сибирь-
2005» направления «Геология, геофизика, геодинамика и геомеханика».

Печатается по решению Редакционно-издательского совета СГГА

Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 55:550.3:551.2/.3:531

ISBN 5-87693-164-0

© ГОУ ВПО «Сибирская государственная
геодезическая академия», 2005

УДК 528.21/22

521/282+521/93

551.24+528.2/3

Ю.И. Кузнецов

ИВМиМГ СО РАН, Новосибирск

В.К. Панкрушин

СГГА, Новосибирск

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕКУРРЕНТНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МЕХАНИКИ ГАМИЛЬТОНА – ЛАГРАНЖА

Рассматривается одномерный блок земной коры, как вязкоупругая геодинамическая система (ГДС) с конечным числом степеней свободы, находящаяся под нагрузкой. Деформация блока выражается рекуррентным уравнением с детерминированными и стохастическими воздействиями внешней среды. Настоящая работа выполнена в аспекте решения задачи математического моделирования и рекуррентной идентификации ГДС в пространстве состояний по многомерным пространственно-временным рядам наблюдений с использованием математического аппарата адаптивного рекуррентного фильтра Калмана [1] и механики Гамильтона – Лагранжа [2].

1. Стрoение земной коры весьма неоднородно, в том смысле, что деформируемые объемы состоят из разномасштабных структурных элементов – минеральных зерен, слоев, блоков и т. д., иначе говоря, среда не является ни дифференцируемой, ни непрерывной. Из этого следует, что математические модели, описывающие динамику напряженно деформируемых сред, не могут основываться на пространственных производных. Более предпочтительными представляются модели с конечным числом степеней свободы, основанные на векторно-матричном аппарате [1], [2]. В последние десятилетия установлены такие свойства сейсмичности, как группируемость землетрясений в пространстве, во времени и по величине сейсмической энергии. Их миграция и осцилляции указывают на волновую природу сейсмического процесса. О том, что этот процесс имеет планетарный масштаб, свидетельствуют данные о существовании взаимосвязи между землетрясениями и процессами в атмосфере, вариациями вращения планеты, нутацией ее полюса, гелиофизическими параметрами, космическими факторами и др. [1]. Планетарный масштаб сейсмического процесса обуславливает дальнедействующий характер полей напряжений в областях очагов землетрясений [5].

Динамические процессы широкого класса ГДС (объектов, явлений) могут моделироваться дифференциальными уравнениями второго порядка [2]:

$$a_2 \ddot{x} + a_1 \dot{x} + a_0 x = b \theta, \quad \dot{x} = dx/dt.$$

В зависимости от вида параметров (коэффициентов) этого уравнения, оно может описывать либо апериодическое, либо колебательное звено второго порядка с затухающими или растущими колебаниями. Параметрами a могут быть, в частности, динамическая вязкость, модули упругости и плотности объекта [6, 2].

Автоколебания моделируются уравнениями Ван дер Поля

$$\ddot{x} - 2\theta(1 - ax^2)\dot{x} + w^2x = 0,$$

где θ – параметр возбуждения, характеризующий подкачку энергии в систему от внешнего источника; при $a > 0$ и малом θ амплитуда автоколебаний равна $1/2a$ при частоте w . Приведенные выше уравнения относятся к более широкому классу, чем уравнения, моделирующие идеальные реологические среды (тела) в физике Земли и геомеханике [1].

Исходя из свойства самоподобия, или фрактальности, земной коры [4] в иерархической структуре блоков, можно считать, что блок на любом уровне иерархии ведет себя как целостная система с присущими ей вязкоупругими свойствами. Поэтому практически важен случай, описывающий вязкоупругую среду под нагрузкой, в соответствии с механикой Гамильтона – Лагранжа [4].

Функция Гамильтона – полная энергия системы – в нашей модели среды будет иметь вид

$$H = \frac{1}{2}m(\dot{z}, \dot{z}) + \frac{1}{2}(Sz, z).$$

Ограничимся одномерным случаем с закрепленными вдоль некоторого направления массами. Тогда матрица S , положительно определенная якобиева, имеет вид:

$$S = \begin{bmatrix} \delta_1 a_0 + a_1 & -a_1 & & & 0 \\ -a_1 & a_1 + a_2 & -a_2 & & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \\ & -a_{n-2} & a_{n-2} + a_{n-1} & -a_{n-1} & \\ 0 & & -a_{n-1} & a_{n-1} + \delta_{n+1} a_n & \end{bmatrix}, \quad a_i = \frac{\sigma}{l_i}.$$

Здесь σ – напряжение, под которым находится блок, l_j – расстояние между двумя массами, $(i - 1)$ -й и i -й, $i = 2(1)n$, l_0, l_{n+1} – расстояния от крайних масс до краев блока, а δ_1 и δ_{n+1} принимают значения 0 или 1 и определяют граничные условия Дирихле или Неймана.

Уравнения Лагранжа, учитывающие вязкость и внешние воздействия (вынуждающую силу), записываются в виде

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial H}{\partial \dot{z}} + \frac{\partial H}{\partial z} = -2bm\dot{z} + \rho e^{\omega t},$$

$$m\ddot{z} + 2bm\dot{z} + Sz = \rho \exp(\omega t). \quad (1)$$

Уравнения (1) связывают деформацию $z = z(t)$ с напряжением $\rho \exp(\omega t)$, где ω характеризует затухание напряжения с начальной амплитудой ρ и с коэффициентом вязкости b .

2. Решение уравнения (1) складывается из его частного решения и общего решения однородного уравнения

$$m\ddot{z} + 2bm\dot{z} + Sz = 0. \quad (2)$$

Эта модель в такой постановке рассматривалось нами в [4]. Частное решение уравнения (1) имеет вид

$$z(t) = \varphi \exp(\omega t), \quad (3)$$

где вектор ρ определяется уравнением

$$(S + m\omega^2 I + 2bm\omega I)\varphi = \rho. \quad (4)$$

Так как матрица S якобиева и положительно определена [2], ее собственные числа можно представить в виде $P = \text{diag}(p_1^2, \dots, p_n^2)$,

$$SU_j = p_j^2 U_j, \quad j=1(1)n, \quad U_j = (u_{1j}, \dots, u_{nj})^T. \quad (5)$$

Составим из столбцов U_j ортогональную матрицу $U = (U_1, \dots, U_n)$. Пусть $r = U^T \rho = (r_1, \dots, r_n)^T$, тогда, так как $S = UXU^T$, $I = UU^T$,

$$\varphi = U \left(P + (m\omega^2 + 2bm\omega)I \right)^{-1} U^T \rho = \sum_{j=1}^n \frac{r_j}{p_j^2 + m(\omega^2 + 2b\omega)} U_j,$$

$$\rho = Ur = \sum_{j=1}^n r_j U_j.$$

Общее решение уравнения (2) выразим следующим образом:

$$z(t) = \sum_{j=1}^n a_j(t) U_j.$$

Тогда для коэффициентов Фурье $a_j(t)$ получим нестационарную систему уравнений

$$m\ddot{a}_j + 2bm\dot{a}_j + p_j^2 a_j = 0..$$

Решение ее находится подстановкой $a_j = \exp(\lambda_j t)$, причем для определения λ_j служит уравнение

$$m\lambda_j^2 + 2bm\lambda_j + p_j^2 = 0.$$

Отсюда находится λ_j :

$$\lambda_j^{\pm} = -b \pm \sqrt{b^2 - p_j^2 / m}.$$

Теперь общее решение уравнения (2) запишем в следующем виде:

$$z(t) = \sum_{j=1}^n \left(c_j \exp(\lambda_j^+ t) + d_j \exp(\lambda_j^- t) + \frac{r_j}{p_j^2 + (\omega^2 + 2b\omega)m} \exp(\omega t) \right) U_j = \sum_{j=1}^n \gamma_j(t) U_j. \quad (6)$$

Введем вектор

$$\gamma(t) = (\gamma_1(t), \dots, \gamma_n(t))^T, \quad \gamma_j(t) = c_j \exp(\lambda_j^+ t) + d_j \exp(\lambda_j^- t) + \beta_j(t),$$

$$\beta_j(t) = \frac{r_j}{p_j^2 + (\omega^2 + 2b\omega)m} \exp(\omega t), \quad (7)$$

и представление (6) запишем в виде:

$$z(t) = U\gamma(t) = U(\exp(\Lambda_+ t)C + \exp(\Lambda_- t)D + \theta(t)),$$

а также

$$\dot{z}(t) = U\dot{\gamma}(t) = U(\Lambda_+ \exp(\Lambda_+ t)C + \Lambda_- \exp(\Lambda_- t)D + \dot{\theta}(t)).$$

Таким образом,

$$\begin{pmatrix} z(t) \\ \dot{z}(t) \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} I & I \\ \Lambda_+ & \Lambda_- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \exp(\Lambda_+ t) \\ \exp(\Lambda_- t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C \\ D \end{pmatrix} + U \begin{pmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Используя это равенство в два разных момента времени t_1 и t_2 ($\delta t = t_2 - t_1$), найдем рекуррентное соотношение:

$$\begin{pmatrix} z(t_2) \\ \dot{z}(t_2) \end{pmatrix} = \Phi(t_2, t_1) \begin{pmatrix} z(t_1) \\ \dot{z}(t_1) \end{pmatrix} - U \begin{pmatrix} \theta(t_1) \\ \dot{\theta}(t_1) \end{pmatrix} + U \begin{pmatrix} \theta(t_2) \\ \dot{\theta}(t_2) \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где введена матрица перехода

$$\Phi(t_2, t_1) = U \begin{pmatrix} I & I \\ \Lambda_+ & \Lambda_- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \exp(\Lambda_+ (\delta t)) \\ \exp(\Lambda_- (\delta t)) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I & I \\ \Lambda_+ & \Lambda_- \end{pmatrix}^{-1} U^T. \quad (10)$$

Обратим внимание, что вектор $\theta(t)$ может иметь не только экспоненциальную зависимость, использованную в (1).

3. Примером исследования системы из трех блоков одинаковой массы m , расположенных на горизонтальной скользкой основе в фиксированном направлении, является работа [7]. Блоки связаны между собой с жесткостью k , а с выделенными с обеих сторон границами – с жесткостью $k_1 = \xi k < k$. Силу вязкого трения примем пропорциональной скорости с коэффициентом $2bm$. Тогда в соответствии с пунктом 2 матрица S может быть представлена в виде $S = k\Sigma$, где

$$\Sigma = \begin{pmatrix} 1 + \xi & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 + \xi \end{pmatrix}.$$

Получаем собственные числа этой матрицы

$$\lambda_j^+ = -b + \sqrt{b^2 - p_j^2 / m}, \quad \lambda_j^- = -b - \sqrt{b^2 - p_j^2 / m},$$

где

$$p_1^2 = \frac{\xi + 3 - \sqrt{\xi^2 - 2\xi + 9}}{2}, \quad p_2^2 = (1 + \xi), \quad p_3^2 = \frac{\xi + 3 + \sqrt{\xi^2 - 2\xi + 9}}{2}, \quad p_1^2 < p_2^2 < p_3^2.$$

Зная собственные числа системы $\lambda_j^\pm$, определяем собственные векторы, нормированные на единицу, и векторы – столбцы U_j ортогональной матрицы U . Для реализации рекуррентного соотношения (9) с нулевой правой частью вычисляется матрица перехода (10), для диагональной матрицы которой имеем:

$$\text{diag}(e^{\lambda_1^+(\delta t)}, e^{\lambda_2^+(\delta t)}, e^{\lambda_3^+(\delta t)}, e^{\lambda_1^-(\delta t)}, e^{\lambda_2^-(\delta t)}, e^{\lambda_3^-(\delta t)}),$$

где $\lambda_j^\pm$ – собственные числа.

4. Выражение (1) можно представить в форме уравнения движения [7]:

$$\dot{x} = Ax + Bu + w, \quad (11)$$

где $x = x(t)$ – вектор параметров, связанных с движением, $u = u(t)$ – вектор параметров управления, $w = w(t)$ – вектор, включающий детерминированные внешние воздействия на систему, $A = A(t) \in R^{n \times n}$, $B = B(t) \in R^{n \times m}$ – матрицы параметров движения и управления соответственно.

Дифференциальное уравнение второго порядка (1) можно преобразовать в дифференциальное уравнение первого порядка

$$x = x(t) = (z, \dot{z})^T.$$

Тогда вместо (1) получим

$$\dot{x} = Ax + g, \quad (12)$$

где

$$A = \begin{pmatrix} 0 & I \\ -\frac{1}{m}S & -2bI \end{pmatrix}, \quad g = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{m}\rho \exp(\omega t) \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Таким образом, мы получили аналог уравнения (11), но в пространстве размерности $2n$. Вектор g есть воздействие на систему вынуждающей силы, поэтому он входит в вектор w из уравнения (11) (вообще, вектор g может принимать и другие значения, но мы ограничиваемся соотношением (13)). Для получения решения Коши [6] необходимо найти фундаментальную матрицу решений следующего уравнения

$$\dot{z} = Az. \quad (14)$$

Общее решение (14) имеет вид

$$z = \exp(At)z_0, \quad (15)$$

но чтобы найти фундаментальные решения, рассмотрим собственную проблему матрицы A

$$AY_j = \lambda_j Y_j, \quad j = 1(1), 2n. \quad (16)$$

Пусть $Y_j = (Y_j^{(1)}, Y_j^{(2)})^T$, тогда из представления (13) матрицы A находим

$$Y_j^{(2)} = \lambda_j Y_j^{(1)}, \quad -\frac{1}{m}SY_j^{(1)} - 2bY_j^{(2)} = \lambda_j Y_j^{(2)}, \quad j = 1(1)2n.$$

Эта система приводит нас к уже рассмотренной нами собственной проблеме для матрицы S :

$$SY_j^{(1)} = -(2\lambda_j b + \lambda_j^2 m)Y_j^{(1)} = p_j^2 Y_j^{(1)},$$

причем

$$Y_j^{(1)} = U_j, \quad -(2\lambda_j b + \lambda_j^2 m)m = p_j^2, \quad (17)$$

если принять обозначения (5). Будем считать собственные векторы U_j нормированными, следовательно, матрицу U – ортогональной, $U^T U = U U^T = I$. Тогда собственные векторы матрицы A примут вид

$$Y_j = (U_j, \lambda_j U_j)^T, \quad (18)$$

а ее собственные числа удовлетворяют квадратному уравнению (17) и равны

$$\lambda_j^\pm = -b \pm \sqrt{b^2 - p_j^2 / m}. \quad (19)$$

Каждому собственному значению матрицы S соответствуют два собственных значения матрицы A , которые и определяют $2n$ собственных векторов (18).

Теперь можно выразить фундаментальные решения уравнения (14):

$$\varphi_j = \exp(\lambda_j t) Y_j, \quad j = 1(1)n, \quad (20)$$

являющиеся столбцами фундаментальной матрицы $Y(t)$,

$$Y(t) = (Y_1, \dots, Y_{2n}) \text{diag}(\exp(\lambda_j t)). \quad (21)$$

5. Решение Коши [8] уравнения (11) есть

$$x(t) = \Phi(t_2, t_1) x(t_1) + \int_{t_0}^t \Phi(t_2, \tau) (B(\tau) u(\tau) + w(\tau)) d\tau. \quad (22)$$

Столбцы фундаментальной матрицы (матрицы перехода)

$$\Phi(t_2, t_1) = Y(t_2) \cdot Y^{-1}(t_1) \quad (23)$$

также есть решения уравнения (14), т. е. $\dot{X}(t, \tau) = AX(t, \tau)$, $X(\tau, \tau) = I$ при любом фиксированном τ , поскольку являются линейными комбинациями столбцов $Y(t)$.

Мы можем конкретизировать матрицу $\Phi(t, t_0)$. Пользуясь представлением (18), выразим $Y(t)$ в форме блочной матрицы второго порядка:

$$Y(t) = \begin{pmatrix} U & U \\ U\Lambda_+ & U\Lambda_- \end{pmatrix} \text{diag}(\exp(\lambda_j t)) = U \begin{pmatrix} I & I \\ \Lambda_+ & \Lambda_- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \exp(\Lambda_+ t) & \\ & \exp(\Lambda_- t) \end{pmatrix}, \quad (24)$$

где $U, \Lambda_+, \Lambda_- \in R^{n \times n}$, причем U – та же ортогональная матрица, что и в (8)

$$\Lambda_\pm = \text{diag} \left(-b \pm \sqrt{b^2 - p_j^2 / m} \right), \quad j = 1(1)n,$$

и, в силу (19), $m\Lambda_+\Lambda_- = P$, $\Lambda_+ + \Lambda_- = -bI$. Согласно определению (23),

$$\Phi(t_2, t_1) = U \begin{pmatrix} I & I \\ \Lambda_+ & \Lambda_- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \exp(\Lambda_+(\delta t)) & \\ & \exp(\Lambda_-(\delta t)) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} -\Lambda_- & I \\ \Lambda_+ & -I \end{pmatrix} (\Lambda_+ - \Lambda_-)^{-1}$$

U^T ,

что совпадает с (10). Но, в отличие от полученного нами решения (9), решение Коши не является рекуррентным.

6. По концепции авторов работы [9], геофизическая среда (отождествляемая с геодинамической средой) моделируется на качественном уровне как открытая нелинейная иерархическая система взаимодействующих отдельностей - блоков (неоднородностей). Указанной системе присущи самоподобные свойства, самоорганизация, колебательный автомодельный

характер, неустойчивость, случайность, большая роль флуктуационных процессов.

В работе [7] отмечается, что если компоненты матрицы A уравнения (11) являются функциями времени, то вряд ли можно указать общий метод построения в замкнутой форме решений этого уравнения при $n \geq 2$. Как правило, в таких случаях элементы фундаментальной (переходной) матрицы Φ в уравнении (22) решения Коши приходится определять численными способами.

С учетом положений работ [1, 2, 9, 7] модель геодинамической системы (ГДС) с *распределенными параметрами* типа «вход – состояние – выход» описывается нами системой двух уравнений состояния. Первое линеаризованное уравнение моделирует закономерности движений геодинамического объекта в пространстве состояний в рекуррентной векторно-разностной форме с учетом внешних воздействий среды, как детерминированных, так и стохастических [1]:

$$X_R(X, t) = F(X, t)(\hat{X}_R^T(X, t-1), C_\Sigma^T(X, t), \Theta_\Sigma^T(X, t))^T + \Phi(X, (t, t-1))\delta X_R(X, t-1) + B_\Psi(X, t)\Psi(X, t), \quad (25)$$

где $\delta X_R(X, t-1) = X_R(X, t) - \hat{X}_R(X, t-1)$; $\Phi(X, (t, t-1))$ – переходная матрица при линеаризации в окрестности $X_R = \hat{X}_R(\hat{X}, t-1)$:

$$\Phi(X, (t, t-1)) = \left. \frac{\partial}{\partial X_R} \partial F(X_R(X, t), \Theta(X, t), C_\Sigma(X, t)) \right|_{X_R = \hat{X}_R(\hat{X}, t-1)}.$$

Здесь $X_R(X, t)$ – расширенный вектор параметров состояния системы, в который входят параметры ГДС «Физическая поверхность и внешнее гравитационное поле»: координаты пунктов сети наблюдений $X = (x, y, z)$, скорости движений, ускорения, деформации, напряжения и др., а также сила тяжести, отклонения отвеса, аномалии высот и их вариации во времени. Строчный индекс (X, t) является символом, во-первых, *многомерных пространственно-временных рядов*, во-вторых, – ГДС с распределенными параметрами. В (25) $F(X, t)$ – эволюционный нелинейный оператор ГДС; $\Phi(X, (t, t-1))$ – переходная матрица, имеющая тот же смысл, что и фундаментальная матрица $\Phi(t_2, t_1)$ в уравнении (22) решения Коши; $C_\Sigma(X, t)$ – вектор заданных параметров (коэффициентов) модели Σ ; $\Theta(X, t)$ и $\Psi(X, t)$ – векторы, соответственно, детерминированных и стохастических воздействий (возмущений) внешней среды на объект (процесс); $B_\Psi(X, t)$ – матрица, отражающая влияние на объект внешних стохастических воздействий. Вектор стохастических воздействий характеризуется соответствующей ковариационной матрицей.

Второе линеаризованное уравнение состояния, моделирующее систему разнородных комплексных геодезических и геофизических наблюдений в гравитационном поле с потенциалом силы тяжести W , имеет в конечномерной форме (т. е. с включением в вектор $X_R(X, t)$ основных трансформант возмущающего потенциала силы тяжести [1]) следующий вид:

$$Y(X, W, t) = f(X, t)(\hat{X}_R(\hat{X}, t^-), C_Y(X, t), \Theta_Y(X, t)) + A(\hat{X}_R(\hat{X}, t^-))\delta X_R(\hat{X}, t^-) + \varepsilon_Y(X, t), \quad (26)$$

где

$$A(X_R(\hat{X}, t^-)) = \frac{\partial}{\partial X_R} f(X_R(X, t), C(X, t), \Theta_Y(X, t), C(X, t)) \Big|_{X_R = \hat{X}_R(t^-)};$$

$$\delta X_R(\hat{X}, t^-) = X_R(X, t) - \hat{X}_R(\hat{X}, t^-),$$

где $\Theta_Y(X, t)$ – вектор детерминированных воздействий внешней среды на систему наблюдений; $\delta_Y(X, W, t)$ – вектор ошибок результатов наблюдений с соответствующей ковариационной матрицей. Заметим, что в уравнении (26) матрица $A(X_R(\hat{X}, t^-))$ имеет другой смысл, чем матрица A в уравнении (11).

Адекватным математическим аппаратом для совместного решения уравнений (25) и (26), как решения обратной задачи – идентификации (в широком смысле) геодинимической системы по многомерным пространственно-временным рядам результатов разнородных комплексных геодезических и геофизических наблюдений $Y(X, W, t)$, является адаптивный рекуррентный фильтр Калмана – Бьюси (ФКБ). Алгоритм ФКБ является оптимальным по критерию минимума суммы дисперсий определяемых параметров состояния, входящих в вектор $X_R(X, t)$. Этот алгоритм обладает свойством устойчивости и позволяет определять текущие $\hat{X}_R(X, t)$ и одношаговые прогнозные $\hat{X}_R(X, t^-)$ оценки с соответствующими характеристиками их точности в форме ковариационных матриц (параметрическая идентификация). Кроме того, в адаптивном режиме он позволяет выполнять настройку коэффициентов модели $C_\Sigma(X, t)$ и ряда параметров состояния, а также решать задачу выбора адекватной модели закономерностей движений из выдвигаемых альтернативных моделей (структурная идентификация). Ниже приводится алгоритм фильтра Калмана – Бьюси с учетом вида уравнений (25) и (26) [10, 1].

1. Вычисление оценки одношагового прогноза расширенного вектора параметров состояний ГДС на эпоху t по результатам наблюдений до эпохи $t - 1$ включительно (обозначается строчным индексом $t^- = t/t - 1$):

$$\hat{X}_R^F(X, t^-) = F(X, t)(\hat{X}_R(X, t - 1), C(X, t)\Theta(X, t)). \quad (27)$$

2. Вычисление обратной весовой матрицы оценки одношагового прогноза расширенного вектора состояний:

$$Q(\hat{X}_R, t^-) = \Phi((t, t - 1)Q_{XR}(t, t - 1)\Phi^T(t, t - 1) + B_\Psi(t)Q_\Psi(t)B_\Psi^T(t)). \quad (28)$$

3. Вычисление оценки вектора одношаговых прогнозных результатов наблюдений и вектора невязок наблюдений ΔY :

$$\Delta Y(t^-) = Y(t) - \hat{Y}(t^-), \quad (29)$$

$$\text{где } \hat{Y}(t^-) = f(X, t)(\hat{X}_R(t^-), C(X, t), \Theta_Y(X, t)).$$

4. Вычисление обратной весовой матрицы невязок наблюдений:

$$Q_{\Delta Y}(t^-) = (A(t^-)Q(\hat{X}_R, t^-)A^T(t^-) + Q_Y(t))^{-1}, \quad (30)$$

где $Q_Y(t)$ – обратная весовая матрица ошибок наблюдений $\varepsilon_Y(t, X)$.

5. Обновление оценки расширенного вектора параметров состояния и вычисление обратной весовой матрицы этой оценки на эпоху t :

$$\hat{X}_R(X, t) = \hat{X}_R(X, t^-) + G(t^-)\delta Y(t^-); \quad (31)$$

$$Q_{XR}(X, t) = (I - G(t^-)A(t^-))Q(\hat{X}, t^-). \quad (32)$$

6. Выражение для матрицы коэффициентов усиления $G\{*\}$ имеет следующий вид

$$G(t^-) = Q(\hat{X}_R^F, t^-)A^T(t^-)Q_{\Delta Y}^{-1}(t^-). \quad (33)$$

Заметим, что в (33) строчный индекс t^- при G и A обозначает не прогноз указанных величин, а лишь их вычисление на эпоху t с использованием информации всех предыдущих эпох до эпохи $t-1$ включительно.

7. Определение оценки дисперсии единицы веса по совокупности наблюдении всех эпох $[6, 1]$:

$$\hat{\mu}_{\Sigma}^2(t) = \frac{\hat{\mu}_{\Sigma}^2(t-1)\nu_{\Sigma}(t-1) + \hat{\mu}^2(t)\nu(t)}{\nu_{\Sigma}(t)}, \quad (34)$$

где $\nu_{\Sigma}(t) = \nu_{\Sigma}(t-1) + \nu(t)$ и $\nu_{\Sigma}(t-1)$ – суммарные числа степеней свободы, равные числу избыточных измерений в эпохах от $t=1$ до эпох соответственно t и $t-1$ включительно; $\hat{\mu}^2(t)$ – вычисляется по невязкам наблюдений $\Delta Y(t^-)$ (29) и их обратной весовой матрице $Q_{\Delta Y}(t^-)$ (при ее обращении) (30).

8. Вычисление ковариационной матрицы оценки расширенного вектора параметров, на диагонали которой расположены квадраты их ошибок:

$$K_{XR}(t) = \mu_{\Sigma}^2(t)Q_{XR}(t). \quad (35)$$

9. В соответствии с принципом сочетания процедуры построения математических моделей геодинимической системы с процедурой идентификационного эксперимента обработка по адаптивному ФКБ ведется по нескольким альтернативным гипотезам и соответственно альтернативным математическим моделям закономерностей движений. Выбор адекватной модели из альтернативных моделей выполняется по статистическому F -критерию.

Пусть на эпоху конкурировали две гипотезы (модели) H_0 и H_1 соответственно с дисперсиями единицы веса

$$\hat{\mu}_0^2 = \hat{\mu}_0^2(t), \quad \hat{\mu}_1^2 = \hat{\mu}_1^2(t)$$

и с числами степеней свободы $\nu_0 = \nu_{\Sigma}(t, H_0)$, $\nu_1 = \nu_{\Sigma}(t, H_1)$; при этом $\nu_1 < \nu_0$.

Оценку F удобно начислять по формуле [6]:

$$\hat{F} = \frac{\hat{\mu}_0^2 v_0 - \hat{\mu}_1^2 v_1}{\hat{\mu}_1^2 v_1} \cdot \frac{v_1}{v_0 - v_1}. \quad (36)$$

Если $\hat{F} > F(v_0 - v_1; v_1; q)$, где $F(v_0 - v_1; v_1; q)$ – критическая точка F – распределения для уровня значимости q выбирается из таблиц математической статистики, то решение принимается в пользу модели H_1 .

Некоторые параметры и коэффициенты (например, упругость и вязкость) модели ГДС, входящие в $\Theta(X, t)$ и $C(X, t)$, могут включаться в определяемый по ФКБ расширенный вектор параметров состояния $X_R(X, t)$. Но включение в $X_R(X, t)$ дополнительных параметров (коэффициентов) приводит к увеличению размерности задачи фильтрации и, как следствие, к значительному увеличению объема вычислений. Для уменьшения этой размерности рационально использовать принцип декомпозиции, применяя адаптивный алгоритм ФКБ в сочетании с последовательным симплексным методом (ПСМ) [11, 1]. Адаптация заключается в том, что в процессе итераций обработки наблюдений по ФКБ с обращением к алгоритму ПСМ выполняется настройка (уточнение) некоторых параметров (коэффициентов) модели по ПСМ, которые в этом случае не включаются непосредственно в определяемый вектор $X_R(X, t)$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Панкрушин В.К. Математическое моделирование и идентификация геодинамических систем: Монография. – Новосибирск: СГГА, 2002.
2. Идентификация движений и напряженно-деформированного состояния самоорганизующихся геодинамических систем: Монография / В.А. Середович, В.К. Панкрушин, Ю.И. Кузнецов, Б.Т. Мазуров, В.Ф. Ловягин; Под общей редакцией В.К. Панкрушина. – Новосибирск: СГГА, 2004.
3. Гантмахер Ф.Р., Крейн М.Г. Осцилляционные матрицы и малые колебания механических систем. – 2-е изд. – М.: Гостехиздат, 1950.
4. Кузнецов Ю.И. Матрицы и многочлены, часть 2. – Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2004.
5. Викулин А.В. Вращение Земли, вихри материи и геодинамика // Международная конференция «Проблемы и перспективы развития горных наук», 1 – 5 ноября 2004 г., Новосибирск.
6. Васильев Е.А., Панкрушин В.К. Методика рекуррентного оценивания и анализа параметров движений и деформаций по геодезическим данным // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1983. – № 6. – С. 3 – 12.
7. Медведев Н.И. Модель колебаний блоков земной коры после землетрясения // Геология и геофизика. – 1986. – № 4. – С. 76 – 84.
8. Красовский Н.Н. Теория управления движением. Линейные системы. – М.: Наука, 1968.
9. Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Дискретные иерархические модели геофизической среды // Комплексные исследования по физике Земли. – М.: Наука, 1989. – С. 68 – 87.
10. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. – М.: Наука, 1991.
11. Васильев Е.А., Панкрушин В.К. Настройка динамической модели симплексным методом при прогнозировании движений по геодезическим наблюдениям адаптивным фильтром Калмана – Бьюси // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1986. – № 1. – С. 5 – 13.

© Ю.И. Кузнецов, В.К. Панкрушин, 2005

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ РАБОТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННОГО ГРАВИМЕТРИЧЕСКОГО И ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В последние годы произошли принципиальные изменения в аппаратном оснащении гравиметрических исследований. Геофизические организации приобретают высокоточные гравиметры, со смещением нуль-пункта несколько микрогал в день и автоматической записью результатов. Топографо-геодезическое обеспечение гравиметрических работ осуществляется с применением систем спутниковой навигации, электронных тахеометров и другого оборудования, позволяющего получить плановое и высотное положение гравиметрических пунктов с погрешностью несколько миллиметров. Соответственно резко возросла точность и производительность работ, однако вопросы методики и технологии полевых работ, обработки гравиметрических материалов, полученных с точностью первые десятки микрогал, остаются открытыми.

Не вызывает сомнений, что возможности гравиразведки на современном этапе вступают в противоречие с существующими инструктивными требованиями к ее проведению. Повышение геологической эффективности гравиметрических исследований невозможно на основе прежних методов наблюдений, обработки и интерпретации.

Современные особенности производства гравиметрических работ

Важным этапом гравиметрических исследований являются полевые работы. Очевидно, что от того, насколько точно будут получены исходные гравиметрические данные, зависит геологическая эффективность и достоверность выводов о геологическом строении территорий.

Одним из существенных недостатков отечественных гравиметров ГНУ-КС/КВ, которыми оснащены практически все гравиметрические предприятия, является нелинейное смещение нуль-пункта. Поскольку этот процесс является неуправляемым и непредсказуемым, для минимизации соответствующих погрешностей разработано большое количество технологий проведения полевых работ [2, 4, 6, 7], включающих и создание густой многоуровневой сети опорных пунктов, и специальные методики рейсов, что, естественно, приводит к уменьшению производительности работ.

Появление в 90-е годы на отечественном рынке качественно новых гравиметров, технические характеристики которых по данным [9, 11-15] приведены в табл. 1, позволило по-новому взглянуть на методику полевых работ. Учитывая, что современные гравиметры позволяют автоматически вводить поправки за приливные притяжения, наклон прибора, температуру, в них включены фильтры шумоподавления, длительность рядового рейса может быть достаточно большой.

Таблица 1. Технические характеристики современных гравиметров

Гравиметр	Изготовитель	Диапазон, мГал	Погрешность единичного измерения, мГал	Смещение нуля-пункта
ГНУ-КВ	ОАО «Нефтекип»	80-500	30	
ГНУ-КВК	ОАО «Нефтекип»	6000	20	0.2 мГал/сутки
CG-3М / CG-5	Scintrex Ltd.	8000	5	0.02 мГал/сутки
G-meter	LaCoste & Romberg Gravity Meters, Inc.	7000	40	<1.0 мГал/месяц
G-meter Aliod 100x	LaCoste & Romberg Gravity Meters, Inc.	100	10	0.001 мГал/1000 час
GRAVITON-EG	LaCoste & Romberg Gravity Meters, Inc	в любой точке мира	3	<1.0 мГал/месяц

Примечание: в 2001 году LaCoste & Romberg (Техас, США), Scintrex (Канада), Micro-g Solutions (Денвер, США) и Auslog Pty (Австралия), объединились в новую компанию LaCoste & Romberg - Scintrex, Inc.

Роль опорной гравиметрической сети при работе с современными гравиметрами сводится только к приведению результатов съемки к единому общегосударственному уровню, а для учета смещения нуля-пункта прибора достаточно проводить повторные наблюдения на одном пункте в начале и в конце рабочего дня.

Горный институт УрО РАН с 2000 года проводит полевые гравиметрические работы с гравиметрами Autograv CG-3М и CG-5 [1]. За этот период выполнено более 5000 км² в различных регионах России, отличающихся орографическими и климатическими условиями. Выполняются профильные региональные и площадные работы масштабов от 1:10 000 до 1:50 000. В процессе работ созданы и опробованы методики полевых наблюдений с использованием, как только автоматизированных гравиметров, так и совместно с отечественными ГНУ-КВ. При использовании этих методик многократно возросла производительность полевых работ; реальная точность съемки, получаемая по независимым контрольным наблюдениям, составляет от 10 до 25 мГал.

Современные особенности производства топографо-геодезических работ

Геодезические измерения при высокоточной гравиметрической съемке решают следующие основные задачи [5, 9]: вынос в натуру пунктов гравиметрических наблюдений, определение их координат и высот, по возможности, в едином технологическом цикле полевых работ, а также закрепление на местности опорных гравиметрических пунктов.

Каждый из этих видов работ имеет свою специфику и необходимо применять то оборудование и методики, которые наиболее целесообразны в данных условиях. В настоящее время широкое распространение получили автоматизированные методы проведения топографо-геодезических работ, основанные на использовании наземного и спутникового электронного

геодезического оборудования и последующей компьютерной обработки полевых измерений. Эти геодезические средства можно условно разделить на следующие группы:

- Оптико-электронное оборудование;
- GPS-оборудование;
- Программное обеспечение.

На сегодняшний день существует большой парк оптико-электронного оборудования, включая нивелиры, теодолиты, тахеометры. По опыту работ эффективным представляется использование электронных тахеометров. Преимущество их заключается в том, что можно производить любые угломерные измерения одновременно с измерением расстояний и по полученным данным проводить вычисления, сохраняя всю полученную информацию. Электронные тахеометры одинаково удобны для выполнения рутинной съемки и для разбивки пунктов. Эволюция электронного тахеометра продолжается с внедрением сервоприводов, автоматического слежения и безотражательной технологии.

Наиболее перспективной в настоящее время, безусловно, является технология спутникового геодезического и навигационного обеспечения гравиметрических работ из-за преимуществ в точности, производительности, универсальности и экономии. Однако применяемые при этом методы существенно отличаются от тех, которые используются при классических геодезических съемках. При соблюдении основных правил GPS съемка оказывается сравнительно простой и обеспечивает хорошие результаты. Самыми распространенными геодезическими спутниковыми приемниками, несомненно, являются приемники фирмы Trimble. Современной разработкой фазовой GPS аппаратуры компании Trimble являются двухчастотные GPS приемники Trimble Total Station пятого поколения.

Снижение стоимости спутниковых приемников, повышение точности геодезических определений, достижения в области геоинформационных технологий, реализация бескабельной многоканальной связи, включая пересылку данных с помощью Интернет, и высокотехнологичных интегрированных систем делает применение спутниковых технологий в геофизической отрасли эффективным и экономически привлекательным. Обзор характеристик и производительности геодезических приборов представлен в табл. 2.

Таблица 2. Обзор основных характеристик современного геодезического оборудования

Аппаратура	Точность		Производительность, пунктов в час
	плановая	по высоте	
Оптико-электронное оборудование:			
Цифровые нивелиры		1-5 см	15
Электронные теодолиты	2-5 см	-----	8-10
Электронные тахеометры	2-5 см	2-5 см	тахеометрический ход: 10 высотный ход: 20

Спутниковая аппаратура: Навигационные приемники	5-7 м	около 30 м 0.5-5 см	около 30
Двухчастотная аппаратура	0.5-5 см		быстрая статика: 7 кинематика: 25

В Горном институте УрО РАН полевые топографо-геодезические работы проводятся с новейшим оборудованием (электронные тахеометры Trimble 3305, GPS-систем Trimble 4700 - 5700, навигационные приемники Garmin). При использовании данного оборудования возросла производительность работ, точность геодезической съемки. В настоящее время среднеквадратическая погрешность съемки, в зависимости от типа и условий работ, составляет: в плане – 0.02-5.00 м; по высоте – 0.01-0.30 м.

Таким образом, современная технология топографо-геодезического производства при высокоточных гравиметрических съемках вполне обеспечена прогрессивными методами съемки и современным геодезическим оборудованием.

Современные способы обработки гравиметрических материалов

Повышение точности полевых работ требует пересмотра методов камеральной обработки материалов. Необходимо более точное, чем это закреплено в «Инструкции по гравиразведке», введение различных редуций в наблюдаемые аномалии силы тяжести. Несмотря на длительную историю исследований в этой области, вопросы вычисления данных поправок до конца не решены.

Например, необходимо уточнение формулы вычисления уровня нормального поля, введение поправок за свободный воздух с учетом изменения вертикального градиента, вычисление влияния промежуточного слоя с переменной плотностью и др. В частности, для проведения высокоточных гравиметрических работ в Горном институте УрО РАН создана компьютерная технология определения поправок за влияние рельефа [3], отличительными особенностями которой являются максимально полное использование всей имеющейся информации о рельефе, автоматизация вычислений во всей области учитываемого влияния рельефа и высокая точность получаемых результатов. В качестве исходных данных используются цифровые модели местности, полученные путем векторизации скан-образов топографических карт и карты рельефа Земли GTOPO30.

Таким образом, дальнейшее повышение геологической эффективности детальной гравиразведки неразрывно связано с совершенствованием методики полевых наблюдений, обработки и интерпретации гравиметрических данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бычков С.Г. Основные направления совершенствования теории и практики гравиметрических исследований в Пермском Прикамье / Материалы междунар. семинара «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей», Пермь, Горный институт УрО РАН, 2005, с.32-34.
2. Гравиразведка: Справочник геофизика. /Под ред. Е.А. Мудрецов, К.Е. Веселова. М.: Недра, 1990. 607 с.
3. Долгаль А.С., Новоселицкий В.М., Бычков С.Г., Антипин В.В. Компьютерная технология определения поправок за влияние рельефа земной поверхности при гравиметрической съемке / Геофизический вестник, 5/2004, с.10-19.
4. Инструкция по гравиразведке. М., Недра, 1980.
5. Инструкция по развитию съемочного обоснования и съемке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. М., ЦНИИГАиК 2002, 124 с.
6. Костицын В.И. Методы повышения точности и геологической эффективности детальной гравиразведки / Пермь, Перм. ун-т, 2002. 224 с.
7. Маловичко А.К., Костицын В.И., Тарунина О.Л. Детальная гравиразведка на нефть и газ. М.: Недра, 1989. 224 с.
8. Михайлов И.Н., Рябиков Ю.К. Первый отечественный компьютеризированный наземный гравиметр (ГНУ-КВК) / http://www.neftekip.ru/rus/st_1.php
9. Прихода А.Г. Геодезическое обеспечение геологоразведочных работ / Геопрофи, 2/2003. с.3-5.
10. Справочник геодезиста / Под ред. В.Д.Большаков, Г.П.Левчук. М.: Недра, 1985. 485 с.
11. Aiken C.L.V., Balde M., Ferguson J.F., Lyman G.D., Xu X., Cogbill A.H. Recent developments in digital gravity data acquisition on land // The leading edge №1, Vol. 17, 1998, p. 93-97
12. Ander M.E., Summers T., Gruchalla M.E. LaCoste & Romberg gravity meter: System analysis and instrumental errors // Geophysics, VOL. 64, № 6, 1999, p. 1708–1719.
13. Chapin D. Gravity instruments: Past, present, and future // The leading edge №1, Vol. 17, 1998, p. 100-112
14. Chapin D.A., Crawford M.F., Baumeister M. A side-by-side test of four land gravity meters // Geophysics, Vol. 64, № 3, 1999, p. 765–775.
15. Hansen R.O. Gravity and magnetic methods at the turn of the millennium // Geophysics, Vol. 66, № 1, 2001, p. 36–37.

© С.Г. Бычков, А.А. Симанов, 2005

**ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ АНТРОПОГЕНА СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ШЕЛЬФА
БАРЕНЦЕВА МОРЯ**

Формирование кайнозойского осадочного чехла в границах описываемой территории тесно связано, во-первых, с активным океанообразованием в границах Норвежско-Гренландского бассейна в палеогене и Евразийского – в неогене и антропогене [9]. Во-вторых, в течение четвертичного периода существенное влияние оказывали неоднократные оледенения обширных участков акватории. Эти обстоятельства привели к формированию значительного стратиграфического перерыва, включающего палеоген, неоген и эоплейстоцен, и сокращению средней мощности четвертичных отложений.

На протяжении палеогена в связи с пульсирующими восходящими тектоническими движениями описываемая территория, как и вся восточная часть баренцевского шельфа, являлась устойчивой областью сноса.

В конце миоцена произошла крупнейшая регрессия, по средиземноморским событиям именуемая мессинским кризисом, когда уровень моря понизился примерно на -300 м относительно современного [2]. Одновременно активизировались тектонические движения на Западно-Арктическом шельфе. Вероятно, в это время началось дробление единых Свальбардского и Грумантского поднятий, приведшее к формированию современных архипелагов, и воздымание Новой Земли. Оставаясь относительно приподнятой сушей, рассматриваемая территория подвергалась денудации, снос обломочного материала происходил в северном и южном направлениях по системе речных долин.

В плиоцене по системам активизированных тектонических нарушений началось формирование основных орографических форм региона – желобов Франц-Виктория, Альбанова, Седова, Святой Анны, возвышенностей Персея, Кленовой и др. Однако достоверно установленных морских отложений плиоценового возраста в регионе до сих пор не обнаружено. Это может быть связано с двумя обстоятельствами: их уничтожением последующими денудационными процессами, сохранением обстановки сноса обломочного материала в условиях сохранения континентального режима. В южной части Баренцевского шельфа в настоящее время обнаружены и закартированы плиоценовые образования – колвинская и падимейская серии, хайпудырская и варандейская свиты, представленные в значительном объеме морскими отложениями [7]. Вполне вероятно, что в наиболее возвышенных частях описываемой территории в это время происходило формирование ограниченных по площади ледниковых массивов. В позднем плиоцене регион охватила, видимо, незначительная по масштабам трансгрессия – на северо-востоке арх. Земля Франца Иосифа (о. Гофмана) залегает маломощная сугробовская толща глинисто-алевритового состава с прослоями галечников, возраст которой датируется поздним плиоценом.

В эоплейстоцене продолжалось структурное оформление современных архипелагов и формирование основных морфоструктур в границах современной акватории. К югу от описываемой территории установлены бассейновые отложения в аллювиально-морских и прибрежно-морских фациях. Возможно, подобные обстановки осадконакопления были присущи и отдельным (скорее всего – южным) участкам описываемой территории, однако последующие процессы размыва уничтожили сформировавшиеся отложения. В течение эоплейстоцена происходило дальнейшее похолодание климата. В разрезах Печорской низменности выделены холодолюбивые палинокомплексы [7]. На арх. Шпицберген, ЗФИ и Новая Земля на фоне их обособления и воздымания происходило формирование устойчивых ледниковых массивов.

Неоплейстоценовый этап развития рассматриваемой территории начинается с обширной трансгрессии, охватившей и весь баренцевский шельф, связанной с общим погружением примерно на -200 м [7]. Отложения, сформировавшиеся в это время, сохранились от последующей денудации в южной части региона. Здесь они в существенном объеме представлены диамиктонами, формирование которых многими исследователями связывается с существовавшими суровыми климатическими условиями сезонно-замерзающих морей. В наиболее возвышенных частях сухопутного обрамления происходило дальнейшее формирование ледниковых массивов.

Во второй половине среднего неоплейстоцена, в условиях крупной регрессии, произошло значительное уменьшение морского бассейна и максимальное оледенение как сухопутного обрамления, так и шельфа, коррелируемое с днепровско-московским на Русской плите. Центрами оледенения являлись архипелаги и шельфовые возвышенности. Невозможно установить границы этого оледенения, так как на севере площади, вблизи арх. ЗФИ, его следы могли быть уничтожены более поздними экзарационными процессами. Однако, по материалам сейсмоакустического профилирования, в приосевой части желоба Святой Анны на современных глубинах моря более 400 м закартированы выраженные в рельефе гряды с «кrapчатой» волновой картиной, частично перекрытые поздненеоплейстоценовыми осадками. Их возраст предполагается среднеплейстоценовым, а генезис – ледниковым. По материалам с сопредельной, более южной, площади средненеоплейстоценовое оледенение охватывало на акватории по крайней мере значительные по площади Адмиралтейский вал и Западно-Новоземельский желоб [4].

Последующая микулинская (бореальная, казанцевская для Западной Сибири) трансгрессия в начале позднего неоплейстоцена охватила не только акваториальную часть площади, но и, в значительной части, сухопутное обрамление. На Новой Земле в это время формировались морские отложения кумжинской свиты, которые в настоящее время наблюдаются на высоте до +300 м [4, 9]. Вероятно, что подобные образования могли сохраниться и на ЗФИ. Морские отложения раннего неоплейстоцена закартированы на о-вах Земли Короля Карла и Западный Шпицберген, где они представлены сублиторальными алевритами, песками и галечниками, содержащими раковины *Macoma calcarea*, *Hiatella arctica*, *Mya truncata*, *Serripes groenlandicus* и *Mytilus edulis* [7]. Климат в

эту эпоху, по данным многочисленных исследователей, был не холоднее современного. Ледники на архипелагах значительно уменьшились в размерах вплоть до полной их деградации. На современном шельфе формировался плащ морских и ледово-морских отложений, в северной части рассматриваемой территории в значительной мере уничтоженный последующими экзарационными процессами. По материалам инженерно-геологического бурения в южной части исследованной территории отложения представлены неритмичным переслаиванием темно-серых глин и алевритовых песков, по всему разрезу наблюдается ракушечный детрит. По гранулометрическому составу отложения характеризуются смешанным спектром: содержание пелитовой фракции – 36,1%, алевритовой – 28,1%, песка – 35,3%, гравия – 0,5%.

Во время последующей ранневалдайской (зырянской в Западной Сибири) регрессии и заметного похолодания климата предполагается восстановление и формирование ледниковых массивов на архипелагах и наиболее возвышенных участках шельфа [1]. Одновременно в наиболее погруженных участках шельфа морское осадконакопление не прерывалось, однако в разрезе доминируют диамиктоны – показатель суровых климатических условий. С началом потепления и деградации ледников происходило формирование ледниково-морских отложений, сохранившихся в настоящее время в периферийных частях возвышенностей в южной части площади. По материалам сейсмоакустического профилирования они формируют мощную (до 70 м) акустически «прозрачную» сеймопачку, с отсутствием каких либо протяженных осей синфазности. Однако при анализе более высокочастотных материалов обнаруживается их близкая к регулярной горизонтальная слоистость [3]. Следует отметить, что ранее подобные мощные акустически «прозрачные» толщи были закартированы на нескольких участках баренцевского шельфа. Их аналогичная характеристика в волновом поле предполагает близкий генезис и литологический состав. По материалам донного опробования отложения сложены темно-серыми пелитами алевритовыми темно-серого цвета. Характерной особенностью является постоянное присутствие комочков черных относительно сухих пелитов гравийной размерности.

В течение молодого-шекснинской (каргинской) трансгрессии было восстановлено и продолжено морское и ледово-морское осадконакопление на шельфе. Тем не менее, в пределах архипелагов ледниковые массивы не исчезали полностью и продолжали свое существование в связи с более холодным по сравнению с современным климатом [8]. Одновозрастная морская терраса широко распространена на материковой суше, ее наличие отмечено на Новой Земле на высоте +100-200 м [9], Земле Короля Карла и Западном Шпицбергене, где выделены комплексы фораминифер соответствующего возраста.

Последняя крупная регрессия, вероятно, в основном гляциоэвстатической природы, в позднем валдае (сартане) вновь осушила наиболее возвышенные участки современного шельфа на рассматриваемой территории. Различными исследователями понижение уровня моря устанавливается величиной от 100 до

140 м [12]. В условиях значительного похолодания климата и относительного переувлажнения вновь началось формирование ледниковых массивов. В настоящее время существование фазы похолодания и ледниковых массивов в позднем валдае в границах баренцевского шельфа принято подавляющим большинством исследователей. Дискуссию же вызывает определение масштабов оледенения [1, 5, 10, 11]. Установлено, что ледниковые массивы существовали на Шпицбергене и ЗФИ; геолого-съёмочными работами здесь закартированы поздневалдайские ледниковые отложения, как на сухопутной части, так и прилегающем шельфе [6, 5]. На Новой Земле, по мнению ряда исследователей, поздневалдайское (сартанское) оледенение по масштабу было заметно меньше современного [6]. Однако, по результатам геолого-съёмочных работ, одновозрастные ледниковые отложения были закартированы на баренцевском склоне о. Северный арх. Новая Земля и западном склоне Восточно-Новоземельского желоба на современных глубинах моря до 200 м. Синхронные им ледниково-морские образования сформировали значительные по площади тела на шельфе вдоль западного и северного берегов Новой Земли [4].

По результатам сейсмоакустического профилирования на листах Т-37-43 в основном на южных склонах возвышенностей были закартированы выраженные в рельефе морского дна протяженные выпуклые с расчлененной кровлей тела с хаотической сейсмозаписью, интерпретированные как поздневалдайские моренные отложения (вероятнее всего – конечные морены). Действительно, трудно представить, в результате какого процесса морского осадконакопления могут быть сформированы подобные формы с приуроченностью в основном к южным присводовым частям возвышенностей, и, к тому же формирующие неясновыраженный пояс, окаймляющий с юга ЗФИ? При использовании предположения об их ледниковом происхождении эти обстоятельства уже не вызывают удивления. Также ледниковые отложения закартированы в западной части территории, на склонах плато Виктория и возвышенности Персея. По материалам сейсмоакустического профилирования отложения представляют собой вытянутые вдоль склонов гряды высотой до 60 м с сильно расчлененным мезорельефом. В волновом поле характеризуются хаотической записью, обычно отсутствием сколько-нибудь протяженных осей синфазности. Во всех наблюдаемых случаях ледниковые отложения залегают на значительно денудированном мезозойском основании. Также два пояса морен были закартированы на баренцевском склоне о. Северный арх. Новая Земля. По материалам донного опробования, отложения сложены песчано-алеврит-пелитовыми переуплотненными полутвердыми микритами темно-серого цвета с содержанием щебня, дресвы, гальки до 15% объемных.

Парагенетически и пространственно к ледниковым отложениям позднего валдая приурочены и ледниково-морские отложения, формирование которых наиболее интенсивно происходило на стадии дегляциации [13]. Они закартированы на склонах и подножьях возвышенностей, где формируют, по сейсмоакустическим материалам, акустически «прозрачную» сеймопачку мощностью до 60-70 м. Отложения сглаживают неровности погребенного рельефа, на отдельных участках отчетливо наблюдается, что они перекрывают

верхневалдайские ледниковые отложения. В приподошвенной части сейсмопачки довольно часто наблюдается протяженная ось синфазности, возможно, являющаяся границей раздела с погребенными морскими, ледово-морскими отложениями верхнего неоплейстоцена. По материалам донного опробования отложения представлены алевропелитами серого цвета, часто с примесью песка, редкими галькой и гравием, комочками относительно сухих пелитов. Отложения мягко - тугопластичные, на изломе часто крупинчатые.

Таким образом, имеются основания предположить существование в позднем валдае трех значительных по площади ледниковых массивов с центрами оледенения на архипелагах Шпицберген, ЗФИ и Новая Земля. Ответить на вопрос о возможном слиянии этих трех ледниковых массивов в настоящее время не представляется возможным. Однако, вероятнее всего, на участках желобов Франц-Виктория и Седова морской бассейн не прерывал своего существования. Исходя из этого, можно сделать два предположения. Во-первых, ледники существовали автономно. Во-вторых, мощность слившихся ледниковых массивов, скорее всего, составляла сотни метров и в границах глубоководных желобов) лед не касался морского дна и, таким образом, ледник был шельфовым [2].

Так или иначе, в результате экзарационной деятельности поздневалдайских ледников на акваториальной части площади в значительной мере были денудированы более древние четвертичные образования и формы рельефа (характерно практически полное отсутствие речных палеоврезов), сформирован своеобразный ледниковый тип рельефа, в значительной мере сохранившийся при последующей трансгрессии. Последнее обстоятельство может быть связано с очень быстрым повышением уровня моря, что отмечается рядом исследователей, в условиях «ледникового берега».

В ходе дегляциации ледников и послеледниковой трансгрессии в конце позднего валдая – начале голоцена на сопредельных с ледниковыми массивами участках происходило интенсивное ледниково-морское осадконакопление с образованием значительных по площади и мощности отложений. В это время, вероятно, значительной была роль айсбергов. По крайней мере, по материалам гидролокации бокового обзора, айсберговые борозды выпаживания устанавливаются на современных глубинах моря до 300 м.

В голоцене был сформирован прерывистый плащ современных осадков различного гранулометрического спектра, в большинстве случаев коррелирующегося с батиметрическим положением участка. Отмечается постоянное присутствие грубообломочного материала – продукта ледового разноса. Максимально наблюдаемая мощность голоцена составляет 3, 1 м. Однако на значительной территории – в границах возвышенностей, крутых склонах, прибрежной зоне, его мощность составляет первые сантиметры. Для этих участков характерно формирование палимпсестовых и эдафогенных осадков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Арктический шельф Евразии в позднечетвертичное время/А.А. Аксенов, Н.Н. Дунаев, А.С. Ионин и др. М., Наука, 1987. 278 с.
2. Баренцевская шельфовая плита / Под ред. И.С. Грамберга. Л., Недра, 1988. 263 с.
3. Гатауллин В.Н., Поляк Л.В. О присутствии ледниковых отложений в Центральной впадине Баренцева моря // Докл. АН СССР, Геология, 1990, т. 314, №6, с. 1463-1468.
4. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (новая серия). Лист S-38-40-Маточкин Шар. Объяснительная записка/Под ред. Б.Г. Лопатина. СПб., Изд-во ВСЕГЕИ, 1999. 203 с.
5. Данилов И.Д. Палеогеография Арктического шельфа Евразии и прилегающих долин в позднем КЗ.- В кн.: Возраст и генезис переуглублений на шельфах и история речных долин. М., Наука, 1984, с. 22-28.
6. Зархидзе В.С. Новейший этап развития Арктического шельфа.-В кн.: Геология и геоморфология шельфов и материковых склонов. М., Наука, 1985,с.58-65.
7. Зархидзе В.С., Мусатов Е.Е. Основные этапы развития Западной Арктики в позднем кайнозое.- В кн.: Критерии прогноза минерального сырья в приповерхностных образованиях Западной Сибири и Урала. Тюмень, ЗапСибНИГНИ, 1989, с. 123-140.
8. Зубаков В.А. Глобальные климатические события плейстоцена. Л., Гидрометеиздат, 1986. 288 с.
9. Красножен А.С., Барановская О.Ф., Зархидзе В.С., Малясова Е.С. Стратиграфия и основные этапы геологического развития архипелага Новая Земля в кайнозое.- В кн.: Кайнозой шельфа и островов Советской Арктики. Л., ПГО «Севморгеология», 1986, с. 23-26.
10. Матишов Г.Г. Дно океана в ледниковый период.- М.: Наука, 1984.- 176 с.
11. Матишов Г.Г. Общая палеогеографическая ситуация и проблемы оледенения шельфа // Палеогеография и палеоэкология Баренцева и Белого морей в четвертичный период.- Апатиты, 1987а.- с. 84-94.
12. Суздальский О.В. Палеогеография арктических морей СССР в неогене и плейстоцене. Л., Наука, 1976. 111 с.
13. Тарасов Г.А. Особенности позднекайнозойского седиментогенеза в арктических морях Европы // Проблемы кайнозойской палеоэкологии и палеогеографии морей Северного Ледовитого океана.- М.: Наука, 1992.- с.18-21.

© Д.А. Костин, 2005

УДК 55:550.3

В.С. Сурков

ФГУП СНИИГГиМС, Новосибирск

А.В. Липилин

Роснедра, Москва

Л.Л. Фельдман

Магаданнедра, Магадан

В.Л. Кузнецов, А.С. Сальников, В.М. Марков, В.В. Титаренко

ФГУП СНИИГГиМС, Новосибирск

СЕЙСМОТОМОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РУДНЫХ УЗЛОВ (НА ПРИМЕРЕ ПРОФИЛЯ 2-ДВ НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ РОССИИ)

В настоящее время Федеральное агентство по недропользованию МПР России (Роснедра) успешно реализует проект регионального изучения территории северо-востока России. При выполнении опорного геофизического профиля 2–ДВ главную роль играют сейсмические исследования методами МОГТ, КМПВ и ГСЗ, призванные осветить строение земной коры на всю ее мощность, включая поверхность верхней мантии. Этими методами отработано уже около полутора тысяч километров профиля. Анализ сейсмических материалов показал, что в условиях гетерогенных сред, составляющими разрез

земной коры вдоль профиля, ни МОГТ, направленный на изучение слоистой среды со слабонаклоненными границами, ни КМПВ, предполагающий наличие выдержанных преломляющих границ, не обеспечивают эффективное изучение строения верхней части разреза земной коры, которая представляет реальный интерес при поисках рудных узлов. В связи с этим, для изучения строения таких сред рационально использовать альтернативные способы обработки и интерпретации сейсмических материалов.

Одним из таких способов является двумерная сейсмическая томография на временных задержках первых волн, разработанная в Институте геофизики СО РАН под руководством члена-корреспондента СО РАН С.В.Крылова (Мишенькина, Шелудько, Крылов, 1993). Этот способ разработан для непрерывных двумерно-неоднородных сред с нарастанием скорости с глубиной. При этом допускается наличие прерывистых волноводных включений. Реализация этого способа обеспечивает изучение неоднородностных свойств коры, в том числе гетерогенных сред, путем построения двумерного поля скоростей.

ФГУП «СНИИГГиМС» усовершенствовал технологию обработки этим способом материалов региональных сейсмических исследований и использовал его при изучении глубинного строения земной коры Западной и Восточной Сибири (Сурков, Кузнецов, Лотышев и др. 1998, Сурков, Гришин, Кузнецов и др., 1998.). В результате сейсмотомографической переобработки и интерпретации получена новая, дополнительная и весьма важная информация о строении геологических сред этих провинций, свидетельствующая о высокой эффективности способа обработки сейсмических данных.

Этот опыт был использован при сейсмотомографической обработке и интерпретации материалов КМПВ и первых волн материалов МОГТ, полученных на опорном профиле 2-ДВ.

Работы КМПВ на этом участке профиля были выполнены при следующих условиях: взрывной интервал составил 30 км, длина годографа – до 30 км, шаг наблюдения первых волн – 50 м.

Исходными материалами для томографических преобразований явились времена прихода волн в первых вступлениях до расстояний 30 км от источников возбуждения.

Построение временных полей выполнялось в автоматизированном режиме на персональном компьютере и в ручном варианте. Поля времен построены для баз, изменяющихся в диапазоне от 0,5 до 23 км. Этот диапазон наблюдений охватывает область регистрации волн, распространяющихся в верхней части земной коры. Поле времен построено от выровненной поверхности дневного рельефа.

Для интерпретации поля $t(x,l)$ первых волн использован вариант алгоритма с адаптирующимся начальным приближением, обеспечивающим требуемую достаточно малую величину временных задержек даже при значительных возмущениях исходного поля времен.

Скоростные параметры среды рассчитывались в соответствии с полем времен от горизонтальной линии, затем по специальной программе были пересчитаны на линию рельефа земной поверхности.

Структурные элементы среды и основные глубинные разломы определялись по особенностям поведения изолиний скоростей. С этой целью использовались результаты математического моделирования полей времен $t(x,l)$ и сейсмотомографических разрезов для типовых структур строения земной коры: блоковая модель, модель выклинивающегося слоя, зоны дезинтеграции фундамента и волновода. Моделирование проведено как для преломленных, так и для рефрагированных волн.

Ниже приводятся результаты сейсмотомографической интерпретации первых волн, зарегистрированных при наблюдениях КМПВ и ОГТ на участке опорного профиля 2-ДВ (п-ов Кони – о. Врангеля).

Фрагмент сейсмотомографического разреза на участке 820 – 1100 км профиля 2-ДВ в изолиниях скоростей освещает среду на глубину до 5 км. По значениям скоростей в разрезе можно выделить два слоя: нижний со значениями скоростей 6.0 - 6.4 км/с, прослеженный дискретно по профилю и верхний, характеризующийся изменением скоростей от 3,4 до 6,0 км/с. Можно полагать, что поверхность нижнего слоя отражает поверхность кристаллического фундамента, а верхний, со значениями скоростей 3.4-6.0 км/с, представляет собой вулканогенно-осадочный слой. Судя по характеру поведения изолиний скорости 6.0-6.4 км/с, кристаллический фундамент построен сложно. В его поверхности с одной стороны наблюдаются резко приподнятые блоки (пикеты 830-845; 960-970 км) высокоскоростных пород, с другой – в теле фундамента можно видеть зоны дезинтеграции, характеризующиеся пониженными скоростями (пикеты 840-845; 895-905 км). Наименьшие глубины до поверхности фундамента составляют 1,5 км (пикеты 830-845 км), максимальные – более 4 км (пикеты 965-972 км).

Вулканогенно-осадочный чехол также характеризуется сложным строением. В нем наблюдаются локальные приподнятые зоны пород, характеризующиеся относительно повышенными скоростями (пикеты 870-885 км; 945-960 км; 970-990 км; 990-1010 км; 1070-1080 км).

Приподнятые зоны в чехле и фундаменте, как правило, ограничены разрывными нарушениями и разграничены между собой зонами полого залегающих низкоскоростных пород (пикеты 850-870; 885-945; 960-995; 1010-1070 км).

Сопоставление отмеченных приподнятых зон в чехле и фундаменте с распределением известных рудных узлов по профилю показывает, что между ними существует тесная корреляционная связь. Это было отмечено и ранее при сейсмотомографической обработке данных КМПВ на участке профиля 2-ДВ 0-820 км. Установленная корреляционная связь может быть использована в качестве критерия при прогнозировании новых рудных узлов.

Однако, применение сейсмотомографической обработки и интерпретации материалов КМПВ при тех методических параметрах, которые в настоящее время используются, обеспечивает выделение только высокоскоростных

столбообразных тел. При этом детальное строение приповерхностной части разреза из-за редкой системы наблюдений остается не освещенным.

Для получения более детального разреза самой верхней части среды целесообразно использовать данные первых вступлений ОГТ, обработав их по способу сейсмотомографии, что было осуществлено на участке профиля 820-1095 км.

Анализ разреза показывает, что верхняя часть геологической среды по профилю освещена изолиниями скоростей на глубину 1.5-2.0 км. Она весьма дробно разбита на блоки, разграниченные субвертикальными разломами. Горизонтальные размеры блоков изменяются от 0.5 до 10 км. Крупные блоки, как правило, характеризуются сравнительно низкими скоростями (от 3.0 до 4.0 км/с), мелкие – чаще всего повышенными значениями скоростей (от 5.0 до 7.0 км/с).

В разрезе контрастно выделяются сложно построенные зоны, представленные столбообразными прорывами к поверхности высокоскоростных пород (пикеты 825-850; 871-885; 945-960; 973-977; 1000-1010; 1060-1065; 1070-1083 км). Значения скоростей в этих зонах, в основном, от 5.0 до 7.0 км/с. Эти зоны разделены между собой достаточно протяженными зонами пород с пониженными скоростями: 3.0-4.0 км/с (пикеты 850-870; 887-945; 965-1000; 1010-1060 км) и разбиты на блоки, которые характеризуются менее сложной структурой: в них наблюдается сравнительно плавный характер поведения изолиний скоростей, свойственный платформенным условиям осадконакопления.

Сопоставляя полученный сейсмотомографический разрез с распределением по профилю известных рудных узлов, можно видеть их весьма тесную, стопроцентную корреляционную связь с зонами столбообразного прорыва высокоскоростных пород. Используя эту связь в качестве критерия обнаружения новых рудных узлов, можно спрогнозировать в пределах этого участка профиля еще два неизвестных рудных узла, расположенных в пределах пикетов 973-978 и 1060-1065 км.

Рассматривая структуру известных рудных узлов можно отметить, что они весьма сложно построены: разбиты множеством разломов, в их пределах наблюдается чередование высокоскоростных блоков ($V = 6.4-7.1$ км/с) с горизонтальными размерами 0.5-2.0 км с блоками таких же размеров, характеризующимися сравнительно пониженными скоростями (5.0-6.0 км/с).

Однако, субвертикальный, столбообразный характер залегания тех и других блоков является результатом неадекватного соотношения горизонтального и вертикального масштабов отображения структуры среды (1 к 10).

Таким образом, сейсмотомографическая обработка волн, зарегистрированных при обработке интервала профиля 2-ДВ 820-1095 км способом ОГТ, позволила изучить детальную структуру и строение рудных узлов с выделением структурных элементов размерами до 500 м и спрогнозировать два рудных узла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мишенькина З.Р., Шелудько И.Ф., Крылов С.В. Использование линеаризованной постановки обратной кинематической задачи для двумерных полей времен $t(x,l)$ рефрагированных волн / Численные методы в сейсмических исследованиях. – Новосибирск, Наука, 1993. – С.140-152..
2. Сурков В.С., Кузнецов В.Л., Лотышев В.И. и др. Структура земной коры Западно-Сибирской плиты / Российская Арктика: геологическая история, минерагения, геоэкология. - Санкт-Петербург, 2002. – С.325-327 + 4 (цветной блок рис.)
3. Сурков В.С., Гришин М.П., Кузнецов В.Л. и др. Модель земной коры Нижнего Приангарья. / Методы изучения, строения и мониторинг литосферы. – Новосибирск, Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1998. – С.291-292.

© В.С. Сурков, А.В. Липилин, Л.Л. Фельдман, В.Л. Кузнецов,
А.С. Сальников, В.М. Марков, В.В. Титаренко, 2005

**СЕЙСМИЧЕСКАЯ ТОМОГРАФИЯ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ
НЕФТЕГАЗОПЕРСПЕКТИВНЫХ КАРБОНАТНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В ВЕРХНЕЙ
ЧАСТИ СКЛАДЧАТОГО ФУНДАМЕНТА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ (НА ПРИМЕРЕ
ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ)**

Нефтегазоносность в кровле палеозоя в условиях Западно-Сибирской плиты в большинстве случаев связана с выходом на доюрскую поверхность карбонатных или карбонатно-терригенных толщ. Эта закономерность, в первую очередь, обусловлена способностью карбонатных толщ формировать резервуары, обладающие высокими емкостными свойствами. Последние образуются под действием вторичных процессов (трещиноватость, кавернозность, карстогенез) как на стадии формирования пенеплена, так и в мезозойский период. В различных районах Западно-Сибирской плиты открыто значительное количество месторождений углеводородов, приуроченных к дезинтегрированной кровле этих карбонатных толщ. В связи с этим, обнаружение и картирование карбонатных массивов, выходящих на доюрскую поверхность или перекрытых эффузивно-осадочными образованиями триаса небольшой мощности, приобретает чрезвычайно важное значение. С этой целью был использован метод сейсмотомографической интерпретации (Мишенькина, Шелудько, Крылов, 1993, Сурков и др., 2000) данных КМПВ, отработанных ранее в междуречье рек Васюгана и Оби (Томская область).

Системы наблюдений по профилям КМПВ были направлены на регистрацию головных волн, связанных с поверхностью доюрского фундамента и преломляющей границей внутри него. Наблюдения велись в интервале расстояний источник – приемник 10-70 км, шаг между каналами – 100 м, между пунктами взрыва – 4.7 км, система наблюдений – центральная.

Для сейсмотомографической переобработки из этих материалов были отобраны времена регистрации волн в первых вступлениях с каждого пункта взрыва через 1.0 км. Они послужили основой для построения поля времен первых волн $t(x, l)$ на базах от 10 до 70 км с различным шагом между изолиниями $l = \text{const}$ ($dl = 2, 3, 5, 10$ км), по которым были рассчитаны скоростные разрезы.

Для того, чтобы можно было использовать этот алгоритм для построения скоростной модели доюрского комплекса по данным первых вступлений КМПВ, был осуществлен пересчет полей времен по разработанному алгоритму на новый уровень наблюдений, находящийся на глубине минус 2.5 км, т.е. совпадающий с подошвой осадочного чехла. Скоростная модель выше линии приведения была взята крайне простой - однородный пласт мощностью 2.6 км (добавлено 0.1 км за рельеф) со скоростью 2.4 км/с. По пересчитанным данным были построены исправленные поля времен, а по ним рассчитаны скоростные разрезы ниже новой линии наблюдений.

Сейсмотомографический разрез по профилю 81.9.1 освещает строение центральной части Нюрольской впадины (площади Восточно-Моисеевская,

Поньжевая, Глуховская, Южно-Фестивальная, Квензорская), Лугинецкого куполовидного поднятия, Салатский прогиб и западный склон Парабельского мегавала. Полученный скоростной разрез позволяет прогнозировать региональные особенности строения палеозойских образований по данному пересечению.

Глубина освещения палеозоя по профилю колеблется в пределах от 8 до 13 км. Скорость распространения продольных волн в палеозойском интервале разреза меняется от 5.0 до 7.0 км/с. На профиле выделяются три крупные низкоскоростные аномалии (V_p от 5.0 до 5.9 км/с) и две высокоскоростных (V_p от 6.0 до 6.6 км/с). Низкоскоростные аномалии располагаются в пределах центральной части Нюрольской впадины, Салатского прогиба и западного борта Парабельского мегавала. Высокоскоростные аномалии выделяются в пределах Лугинецкого поднятия и на южном продолжении Соболиного вала (Чаруская площадь). Высокоскоростная аномалия в пределах Лугинецкого поднятия может быть отождествлена с верхне-среднедевонскими карбонатными толщами, выходящими на поверхность доюрских образований. В западном направлении эти толщи погружаются до глубины 5 – 7 км и перекрыты низкоскоростной толщей (мощность от одного до трех километров), которую можно отождествить с эффузивно-осадочными отложениями триаса, вскрытыми многими скважинами.

Высокоскоростная аномалия в пределах Чаруской площади, отличающаяся наиболее высокими значениями скоростей V_p (6.5 - 6.6 км/с), может быть отождествлена с наиболее древними толщами, выходящими на поверхность доюрских образований в пределах центральной части Западно-Сибирской плиты (ордовик – силур). Столбообразное строение аномальной зоны позволяет высказать предположение о ее связи с крупным листрическим разломом, вдоль которого на поверхность доюрских образований оказались выведенными нижнепалеозойские породы.

Восточную низкоскоростную зону можно отождествить с терригенно-карбонатной складчатой толщей нижнего карбона – верхнего девона. Средняя низкоскоростная зона отождествляется, в основном, с зеленосланцевой толщей среднего палеозоя.

Таким образом, результаты сейсмотомографической переобработки материалов КМПВ по профилю 81.9.1 позволили спрогнозировать в региональном плане основные особенности строения палеозойских образований, их литологический состав и выделить участки, наиболее перспективные в отношении нефтегазоносности верхней части палеозойских образований. По приведенному пересечению таковым, в частности, является карбонатный выступ в пределах Лугинецкого куполовидного поднятия, сложенный карбонатами среднего-верхнего девона и нижнего карбона. Одной из скважин Лугинецкой площади в верхней части палеозойских образований открыта полупромышленная залежь нефти. Можно полагать, что карбонатная верхнепалеозойская толща может представлять интерес и на тех участках Нюрольского прогиба, где она перекрыта эффузивно-осадочными образованиями триаса небольшой мощности (не более 1.0 – 1.5 км).

В восточной части профиля (западный склон Парабельского мегавала) перспективными в отношении нефтегазоносности верхней части палеозойских образований могут оказаться карбонатные толщи среднего-верхнего девона.

Сейсмотомографический разрез по профилю 78.9.1 пересекает с запада на восток погруженную северо-западную оконечность Лавровского наклонного вала (Майская площадь), Фестивальный прогиб, Тамбаевскую, Западно-Останинскую, Останинскую площади, северо-восточную часть Чузикского рифта, Горело-Ярское куполовидное поднятие, Бакчарскую впадину. Интервал освещения палеозойской части разреза от 3-х до 8-и км. Диапазон изменения скоростей V_p такой же, как и на профиле 81.9.1. Здесь также высокоскоростные зоны характеризуются выходом на поверхность доюрских образований нижнедевонских - силурийских карбонатных отложений. Морфология высокоскоростных зон позволяет предположить, что они, в свою очередь, контролируются глубинными разломами листрической природы. Низкоскоростные зоны (V_p от 5,0 до 5,6 км/с) наблюдаются в пределах Фестивального прогиба и Бакчарской впадины. Этим зонам соответствуют эффузивно-осадочные отложения триаса, с максимальными толщинами порядка двух км.

Промышленная нефтегазоносность кровли палеозойских образований в пределах профиля 78.9.1 установлена на Южно-Тамбаевской, Герасимовской, Останинской и Верхне-Комбарской площадях. Месторождения залежей УВ, в основном, связаны с выходом на поверхность доюрских образований высокоскоростных блоков, сложенных карбонатными литофациями. Таковыми являются западный склон Лугинецкого поднятия, западный склон Тамбаевского поднятия, восточный склон Горелоярского куполовидного поднятия, западный склон Бочкарской впадины. На больших глубинах степень метаморфизма органического вещества в палеозое достаточно высокая и соответствует грациям $МК_3$ - $АК_1$. Поэтому здесь следует ожидать открытия не нефтяных, а газовых месторождений.

На сейсмотомографическом разрезе по профилю 80.9.1 нашли четкое отображение в западной части - область тяготения к Уренгойскому грабен-рифту, в восточной части - Бакчарская впадина. В пределах Лавровского наклонного вала на поверхность доюрских образований выходит высокоскоростная толща. В пределах этой толщи находится Средне-Юлжавская залежь УВ в кровле палеозоя. Выделяется также локальная высокоскоростная зона, к которой приурочивается Солоновская залежь УВ.

Полученные сейсмотомографические разрезы по описанным выше и другим профилям были использованы для изучения региональных особенностей строения палеозойских образований. Была построена схематическая карта выхода на доюрскую поверхность высокоскоростных ($V_{пл.} > 5800$ м/с) масс. Все скважины, приуроченные к области выхода на доюрскую поверхность высокоскоростных ($V_{пл.} > 5800$ м/с) образований, вскрыли преимущественно карбонатные породы средне-верхнепалеозойского возраста. Выделяются два обособленных массива, выходящие на доюрскую поверхность. Центральный из них охватывает район от Лугинецкой площади на

севере до Солоновской площади на юге, а также включают в себя Лавровский наклонный вал и Юлжавский вал. Восточный массив высокоскоростных пород располагается, в основном, в пределах Горело-Ярского к. п. и на севере доходит до Чарусной площади.

Практически все выявленные промышленные залежи УВ в кровле палеозоя располагаются в пределах выхода на доюрскую поверхность высокоскоростных преимущественно карбонатных толщ. Наибольшее их количество сосредоточено в пределах центрального карбонатного массива, в его южной половине. Здесь располагаются такие относительно крупные залежи УВ, как Урманская, Арчинская, Герасимовская, Северо-Калиновая, Калиновая, Северо-Останинская и др. В области небольших глубин погружения высокоскоростного слоя находятся месторождения УВ на Останинской и Южно-Останинской площадях. В пределах восточного карбонатного массива выявлены залежи УВ в кровле палеозоя на Верхнекомбарской и Селимхановской площадях.

Вне развития карбонатных толщ в пределах Нюрольской впадины выявлены непромышленные скопления УВ только в пределах Межовской и Веселовской площадей (коллекторами являются дезинтегрированные граниты), а также на Фестивальной площади (резервуаром служат выветрелые серпентиниты, развитые по ультраосновным породам).

Проведенные исследования позволяют утверждать: в пределах Нюрольской впадины и окружающих территорий залежи УВ в кровельной части палеозоя контролируются преимущественно карбонатными толщами. Такая приуроченность залежей УВ наблюдается не только в пределах Нюрольской впадины, но и в других областях Западно-Сибирской плиты, где на доюрскую поверхность выходят карбонатные отложения палеозоя. Таковыми являются районы Нижне-Вартовского свода (Медведевская, Северо-Варьеганская площади), п-ва Ямал (Новопортовская площадь) и некоторые другие. Таким образом, картирование карбонатных толщ, выходящих на доюрскую поверхность или перекрытых триасовыми и верхнепалеозойскими отложениями небольшой мощности, приобретает вполне определенный разведочный интерес и может использоваться как один из важных критериев при региональном нефтегеологическом районировании.

Анализ геофизической изученности показал, что на территории Томской области выполнено около десяти тысяч километров региональных профилей КМПВ, из которых изъята далеко не полная полезная информация.

Переобработка материалов этих профилей по способу двухмерной сейсмической томографии, как было показано выше, может без трудоемких и дорогостоящих полевых работ обеспечить получение дополнительной, новой весьма важной геологической информации, связанной с поисками нефтегазовых залежей в палеозойских отложениях, в частности, выявление в них карбонатных коллекторов, благоприятных для скопления углеводородов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мишенькина З.Р., Шелудько И.Ф., Крылов С.В. Использование линеаризованной постановки обратной кинематической задачи для двумерных полей времен $t(x,l)$ рефрагированных волн / Численные методы в сейсмических исследованиях. – Новосибирск, Наука, 1993. – С.140-152.
2. Сурков В.С., Старосельцев В.С., Кузнецов В.Л., Сальников А.С. Сейсмическая томографии при изучении земной коры Сибири / Региональная геология и металлогения, № 10. –С.-Петербург, 2000. – С. 117-124.

© А.С. Сальников, В.Л. Кузнецов, В.М. Марков, Б.А. Канарейкин, 2005

УДК 55:550.3

С.Г. Бычков, А.С. Долгаль

Горный институт УрО РАН, Пермь

П.В. Кирплюк

Норильский филиал ВСЕГЕИ, Норильск

В.М. Новоселицкий, Г.В. Простолупов

Горный институт УрО РАН, Пермь

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ПОПИГАЙСКОЙ АСТРОБЛЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕКТОРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

В настоящее время широкое распространение приобретают методы томографической интерпретации геопотенциальных полей, базирующиеся на различных алгоритмах псевдоинверсии поля, позволяющие (при известных теоретических ограничениях) получать приближенную объемную картину распределения физических неоднородностей в изучаемом объеме геологической среды. К числу таких методов относится технология векторного сканирования, разработанная в Горном институте УрО РАН. В данной статье приведена краткая характеристика этой технологии и представлены результаты ее применения при интерпретации гравитационного поля Попигайской астроблемы.

Попигайская астроблема находится в пределах северо-восточной окраины Анабарского щита Сибирской платформы и имеет диаметр около 100 км. Астроблема образовалась в конце эоцена в результате падения крупного космического тела.

Геологический разрез района имеет двухярусное строение: докембрийский кристаллический фундамент перекрывается платформенным чехлом верхнепротерозойско-мезозойского возраста, представленным преимущественно карбонатными и терригенными породами, прорванными раннемезозойскими интрузиями основного состава. Внутри самого кратера широко развиты коптогенные образования – импактные брекчии и импактиты. Коптогенные образования образуют сложнопостроенную систему субгоризонтальных линзовидных тел и обычно залегают на частично раздробленных образованиях фундамента и осадочного чехла. Их мощность в центральной части структуры составляет около 2 км. Достаточно широко развиты рыхлые плиоцен-четвертичные и четвертичные отложения (рис. 1).

Попигайская астроблема представляет собой сложную многокольцевую структуру, включающую в себя центральное поднятие (диаметр 10-15 км), внутренний кольцевой желоб (диаметр 20-25 км); кольцевое поднятие (диаметр около 45 км), внешний кольцевой желоб (диаметр 55-60 км), внешнюю пологую воронку [1]. Все эти структуры находят достаточно отчетливое отражение в наблюдаемом гравитационном поле исследуемой территории (рис. 2). В первую очередь это обусловлено значительной отрицательной аномальной плотностью брекчий и импактитов по отношению к породам мишени, достигающей 0.3-0.5 г/см³ по модулю.

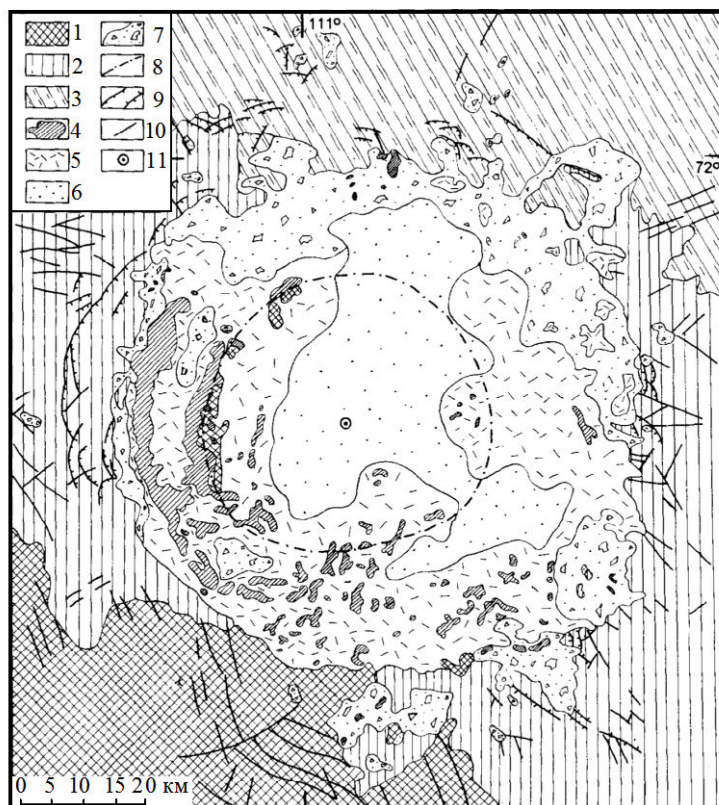


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Попигайской астроблемы (по В.Л. Масайтису и др., [1])

1 – кристаллические породы архея; 2 – осадочные породы верхнего протерозоя и нижнего палеозоя; 3 – осадочные, вулканогенно-осадочные и изверженные породы верхнего палеозоя и мезозоя; 4 – тагамиты; 5 – зювиты; 6 – коптокластиты; 7 – аллогенные брекчии; 8 – ось кольцевого поднятия; 9 – надвиги и сбросы; 10 – разломы не установленной морфологии; 11 – геометрический центр астроблемы

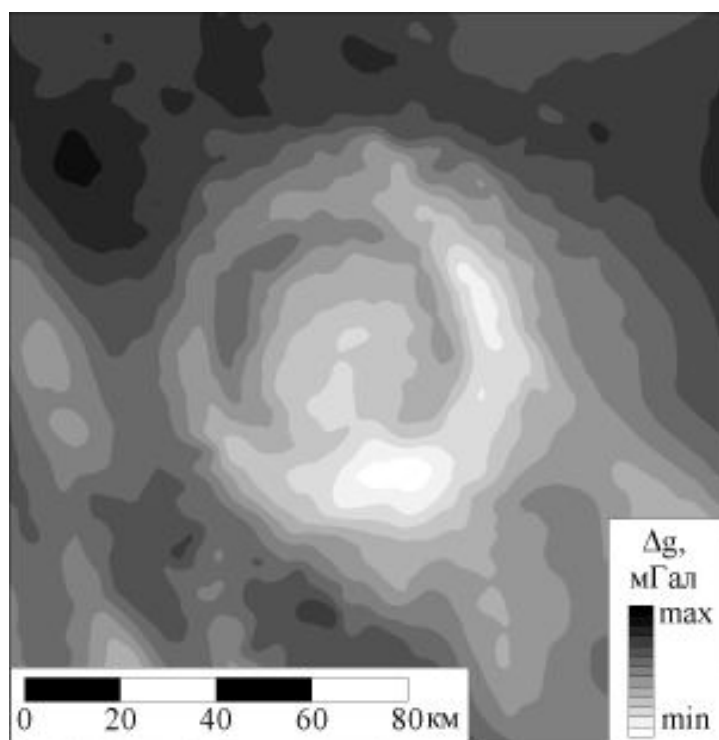


Рис. 2. Гравитационное поле Попигайской астроблемы

В результате ударных преобразований и плавления горных пород внутри астроблемы образовались поликристаллические алмазы, являющиеся продуктами преобразования графита, содержащегося в материнских гнейсах и плагиогнейсах. Основными алмазоносными породами являются тагамиты и зювиты, распределение алмазов по территории характеризуется как концентрически-зональной, так и азимутальной неоднородностью, с превышением содержаний над фоновыми в пределах локальных участков в 2-7 раз и более [1, 2].

Гравитационное поле площади около 25000 кв. км, включающей в себя Попигайскую астроблему, интерпретировалось с использованием векторного сканирования, реализованного в компьютерной технологии «ВЕКТОР». Основы метода заложены в начале 80-х годов прошлого столетия [3] при доказательстве устойчивости вычисления горизонтальных векторов в треугольном полигоне и возможности их усреднения в скользящем окне различных размеров с учетом направления вектора градиента поля.

Усреднение градиентов в скользящем окне с учетом направления вектора позволяет разделить поле на локальную и региональную составляющие, последующее интегрирование которых дает восстановленное поле.

Результаты векторной обработки гравиметрических данных могут быть представлены в следующем виде [4, 5]:

1. Карты векторов градиента аномалий силы тяжести (аномальная и региональная составляющие) при различных значениях коэффициента трансформации (окна сканирования);
2. Карты модулей векторов градиента аномалий силы тяжести (аномальная и региональная составляющие);
3. Карты восстановленного из градиентов поля аномалий силы тяжести (аномальная и региональная составляющие).

Эти карты представляют собой гравитационный эффект слоя пород от земной поверхности до некоторой эффективной глубины $h_{\text{эфф}}$, определяемой коэффициентом трансформации k_i (размером окна сканирования), т.е. это влияние слоя выше $h_{\text{эфф}}$ для аномальной составляющей и ниже $h_{\text{эфф}}$ для региональной.

Эффект подавления поля глубинных источников при векторном сканировании объясняется различным характером убывания на бесконечности самого поля и его градиента. Поскольку градиент убывает значительно быстрее, а усреднение в скользящем окне производится с учетом направления вектора градиента, то при интегрировании на большой площади (при больших коэффициентах k_i) приповерхностные источники подавляются значительно сильнее, чем при обычном усреднении поля.

В системе VECTOR реализовано также вычисление разностных составляющих интерпретируемого поля. После решения задачи выделения поля от двух полупространств, находящихся ниже глубин $h_{\text{эфф}}^1$ и $h_{\text{эфф}}^2$, становится возможным выделить гравитационный эффект от источников, локализованных в горизонтальном слое между этими глубинами. Глубина кровли и подошвы слоя

(а значит толщина слоя) определяются двумя коэффициентами трансформации. В результате могут быть построены соответствующие разностные карты.

Принципиально новый способ представления результатов наземной гравиметрической и магнитной съемок - трехмерные диаграммы поля. Они могут быть построены как на базе карт модулей градиентов и карт восстановленного из градиентов поля Δg – трехмерные интегральные диаграммы гравитационного поля, так и на базе карт разностей модулей градиентов и карт разностей восстановленного поля – трехмерные разностные диаграммы гравитационного поля. Последние можно считать диаграммами распределения квазиплотности (квазинамагниченности) геологической среды. Анализ 3D-диаграмм полей и их произвольных горизонтальных и вертикальных срезов позволяет локализовать в пространстве источники аномалий. Трехмерные разностные диаграммы, наряду с картами разностного поля, являются основным материалом для изучения геологического строения территорий.

В результате томографической интерпретации гравитационного поля Попигайской астроблемы получена объемная картина распределения полусферических зон, отвечающих основным морфоструктурным элементам астроблемы (рис. 3). Сам характер зональности, отражает, в первую очередь, поведение затухающей ударной волны и вторичные процессы перемещения и аккумуляции вещества преобразованных горных пород мишени.

Пространственное распределение квазиплотностных неоднородностей, отраженное на 3D-диаграммах и горизонтальных срезах, подтверждает ранее сделанный В.Л. Масайтисом и др. вывод о косом направлении удара космического тела, траектория которого имела юго-западное направление [1].

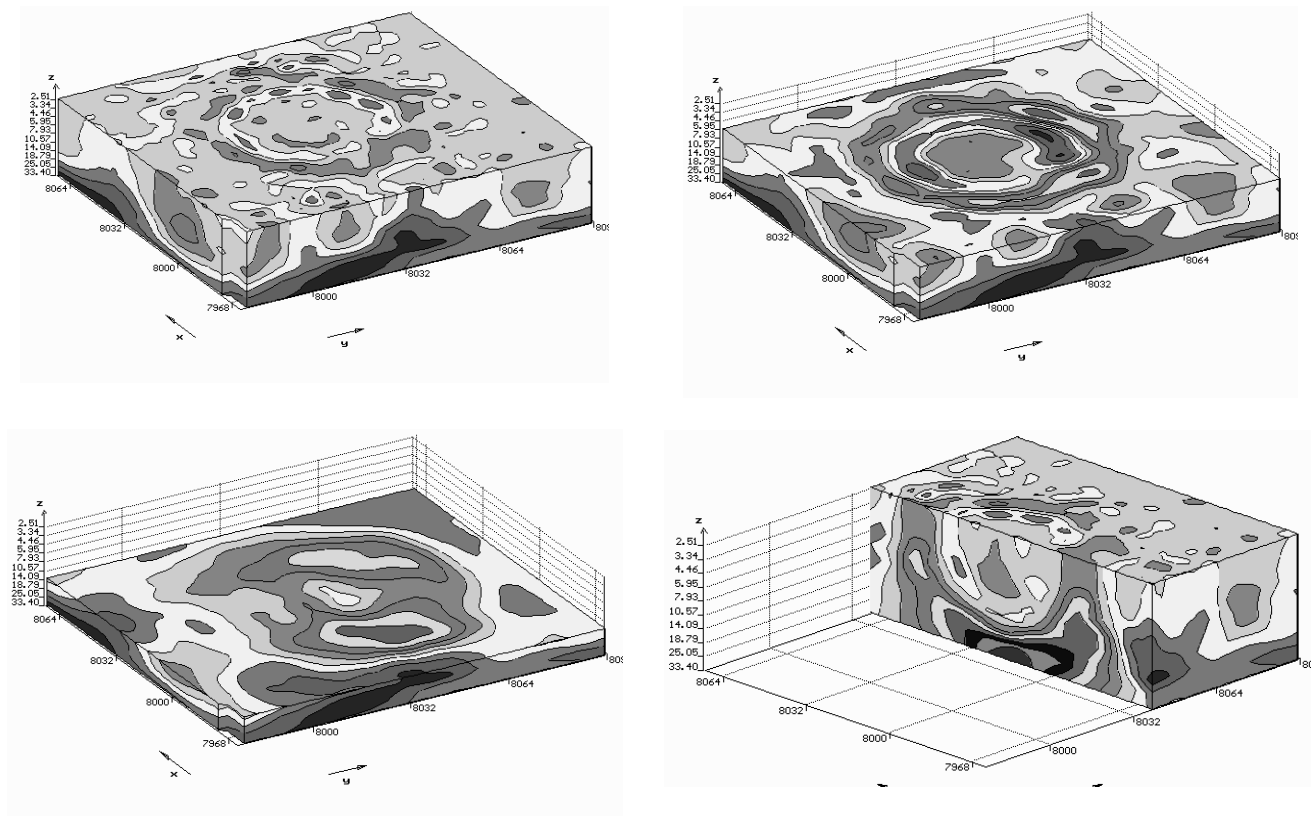


Рис. 3. Горизонтальные и вертикальные срезы гравитационного поля Попигайской астроблемы

Кроме того, на различных глубинах от дневной поверхности в пределах различных морфоструктурных зон прослеживаются внутренние неоднородности, предположительно связанные с изменением литологического состава горных пород. Следует акцентировать внимание на том, что в результатах векторного сканирования отчетливо прослеживается замыкание на глубине всех выделяемых у поверхности Земли кольцевых зон, т.е. подтверждается их полусферическая форма.

В целом отмечается корреляция локальных гравитационных аномалий отрицательного знака с областями, где импактные брекчии и импактиты имеют максимальную мощность. Эти аномалии тяготеют к желобообразным кольцевым зонам и отдельным радиальным желобам.

Положительные локальные гравитационные аномалии отмечаются, преимущественно, над участками, где кристаллические породы истинного дна находятся на сравнительно небольших глубинах от дневной поверхности.

При дальнейших исследованиях Попигайской астроблемы представляется целесообразным выполнение высокоточной гравиметрической съемки масштаба 1:50 000, с последующей интерпретацией материалов методом векторного сканирования. Эти материалы могут быть использованы для решения геологических задач не только геокартировочного, но и прогнозно-поискового характера.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алмазонасные импакты Попигайской астроблемы / В.Л. Масайтис, А.И. Райхлин и др. СПб.: ВСЕГЕИ, 1998, 179 с.
2. Масайтис В.Л., Симонов О.Н. Уникальные месторождения технических алмазов Попигайского района. // Минеральные ресурсы Таймырского автономного округа и перспективы их освоения. Материалы научно-практической конференции 25-28 октября 2004 г. ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург. С. 156-161.
3. Бычков С.Г., Новоселицкий В.М., Простолупов Г.В., Щербинина Г.П. Объемная интерпретация геопотенциальных полей в системе «VECTOR» / Минеральные ресурсы Таймырского автономного округа и перспективы их освоения. Материалы научно-практической конференции, С.Петербург, ВСЕГЕИ, 2004, с. 29-32
4. Новоселицкий В.М., Маргулис А.С., Чадаев М.С. Использование гравиметрической градиентной съемки для локализации плотностных неоднородностей / Геофизические работы при региональных и геологосъемочных исследованиях на Урале. Свердловск, 1989. С. 33-35.
5. Новоселицкий В.М., Простолупов Г.В. Векторная обработка гравиметрических наблюдений с целью обнаружения и локализации источников аномалий // Геофизика и математика. М.: ИОФЗ РАН, 1999. С. 104-107.

© С.Г. Бычков, А.С. Долгаль, П.В. Кирплюк,
В.М. Новоселицкий, Г.В. Простолупов, 2005

УДК 550.834

А.П. Базылев, В.Г. Конюхов

СОМГЭИС – филиал ОАО «Сибнефтегеофизика», Новосибирск

О.М. Сагайдачная

ФГУП «СНИИГГиМС», Новосибирск

Н.В. Стариков

СОМГЭИС – филиал ОАО «Сибнефтегеофизика», Новосибирск

А.А. Табаков

ООО «ГЕОВЕРС», Москва

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ В ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО ТЕХНОЛОГИИ СОВМЕЩЕННЫХ НАЗЕМНО-СКВАЖИННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Правилом детальных исследований сложно построенных углеводородсодержащих объектов является комплексирование сейсмических методов, основанных на скважинных и наземных наблюдениях [2, 3]. Современный уровень техники, технологии и методики вертикального сейсмического профилирования ВСП обеспечивает возможность изучения геологического разреза в околоскважинном пространстве как на интервале глубин, вскрытых скважиной, так и ниже забоя. Работами ВСП обеспечивается широкий частотный диапазон 5÷150 Гц наблюдаемых сейсмических данных. Сейсмические исследования повышенной разрешённости позволяют расширить информацию о строении геологической среды, полученную данными промысловой геофизики на вертикальном профиле (вдоль линии скважины).

Однако максимальная дальность освещения исследуемых горизонтов от скважины составляет около $\frac{1}{4}$ от их глубины, то есть около 600 метров при глубине целевого горизонта 2400 м. Кроме того, при попытках изучения околоскважинного пространства в дальней зоне от скважины возрастают проблемы, связанные с принципиальными ограничениями метода ВСП:

- Системы наблюдений не обеспечивают достаточной информации для оценки модели среды, и достоверность получаемых решений зависит от справедливости весьма узких ограничений на вариации модели;

- Изучаемые границы освещаются при меняющихся по латерали углах падения прямой волны. Учитывая сильную зависимость коэффициентов рассеяния на границе от угла падения и свойств среды, оценки литологического состава пород, пористости и нефтенасыщенности следует считать неточными. Возможность коррекции фактора различия углов падения весьма ограничена, так как требуется знать все детальные параметры среды, которые и являются объектом изучения.

Поэтому при сложном строении геологической среды результаты обработки данных ВСП из удалённых пунктов возбуждения часто не дают необходимой информации о глубинных пластах, а полученная информация относится к фиксированным лучевым плоскостям. Более того, анализ и сопоставление результатов наземных и скважинных сейсмических наблюдений, как правило, выполняются по отдельным отражающим горизонтам.

Наземная сейсморазведка с многократными перекрытиями (2D, 3D) дает необходимую информацию для построения непрерывных изображений

строения изучаемой толщи практически с одинаковой надежностью по всей площади. Однако точность оценки глубины не лучше ± 10 метров, что совершенно недостаточно при изучении продуктивных пластов мощностью в единицы метров. Существует, по крайней мере, два принципиальных ограничения для повышения разрешенности и точности наземной сейсморазведки:

- Оценка скоростной модели с необходимой детальностью затруднена из-за интерференционного характера волнового поля;
- Оценка формы импульса каждого воздействия, используемого для выполнения высокоразрешающей деконволюции, не соответствует требуемой точности.

Успешное решение перечисленных проблем возможно с использованием технологии совмещенных 2D/3D+ВСП наземно-скважинных сейсмических наблюдений, в том числе с использованием многокомпонентной регистрации волн разной поляризации (продольных, поперечных и обменных) [1].

Общая характеристика методики совмещенных 2D/3D+ВСП наземно-скважинных сейсмических наблюдений

Полевая технология совмещенных 2D/3D+ВСП наземно-скважинных сейсмических наблюдений включает при выполнении каждого физического наблюдения методом ОГТ одновременную регистрацию данных ВСП многоточечным трехкомпонентным зондом вблизи забоя скважины. Измерения ВСП выполняются по всему стволу скважины из нескольких ПВ. Полевая система наземных наблюдений МОГТ проектируется при максимальных удалениях ПВ от устья глубокой скважины до 5 км. На дневной поверхности около устья скважины отрабатывается несколько профилей. Площадь исследования в окрестности скважины может составлять до 25 км².

Обычно при наземных измерениях шаг между пунктами приёма и пунктами возбуждения составлял 25 м, длительность регистрации сейсмической записи достигала 5 с, интервал квантования 1 мс.

Полевые наземно-скважинные работы по методике 2D/3D+ВСП были выполнены с использованием отечественных технических средств регистрации и возбуждения сейсмических волн.

Скважинные наблюдения методом ВСП проводились с применением цифрового многоточечного зонда СКАТ-Ц (разработка СОМГЭИС, г. Новосибирск) с управляемым прижимом и трехкомпонентной регистрацией.

Наземные сейсмические наблюдения методом продольного и непродольного профилирования были проведены с использованием 24-х разрядной многоканальной телеметрической станцией СТС-24Р (разработка ФГУП «СНИИГГиМС», г. Новосибирск), обеспечивающей широкодиапазонную и широкополосную прецизионную регистрацию упругих колебаний в реальном времени [4]. Программно-аппаратные средства станции позволяют проводить сбор и регистрацию сейсмических данных в ведущем, ведомом и пассивном (мониторинг) режимах с различными источниками возбуждения упругих колебаний (взрывными, импульсными, вибрационными). В режиме «ведомый»

осуществляется прием сигналов внешнего запуска, что позволяет организовать работу станции совместно с другой регистрирующей аппаратурой.

В качестве источника возбуждения упругих колебаний применялись взрывы в скважинах, за исключением работ, выполненных в Кузбассе в районе промышленной добычи угля (Талдинское месторождение). В этом случае применение взрывных источников сейсмических колебаний с позиций обеспечения экологической безопасности техногенных объектов практически было исключено. Работы были выполнены с невзрывным электромагнитным импульсным источником «Енисей-КЭМ4» (разработка ОАО «Енисейгеофизика», г. Минусинск, Красноярский край).

Обработка материалов, полученных по технологии совмещенных наземно-скважинных наблюдений, была проведена в ООО «ГЕОВЕРС» (г. Москва). Была выполнена специализированная обработка сейсмической информации в интегрированной системе «ЮНИВЕРС» (разработка ООО «ГЕОВЕРС») и стандартная, с использованием пакетов «PROMAX» и «СЦС-5». Специализированная обработка данных совмещенных наземно-скважинных сейсмических исследований позволила повысить качество сейсмических исследований относительно результатов наземной площадной сейсморазведки за счет:

- Точного контроля формы импульса каждого воздействия и компенсации неоднородностей условий возбуждения,
- Определения по скважинным данным достоверных скоростей распространения упругих волн,
- Определения горизонтального градиента скоростей в верхней части разреза (ВЧР), рассчитываемого по временам прихода прямой волны по системе многократных наземных наблюдений;
- Использования достоверных статических поправок за пункт возбуждения.

Результаты применения технологии 2D/3D+ВСП для детальных исследований углеводородсодержащих объектов Западной Сибири

За период 2002 – 2004 гг. СОМГЭИС (филиал ОАО «Сибнефтегеофизика») совместно с ФГУП «СНИИГГиМС» провели по технологии совмещенных 2D/3D+ВСП наземно-скважинных наблюдений детальные сейсмические исследования на месторождениях Западной Сибири: Верхнее-Черногорское, Пылинское, Мохтиковское (Ханты-Мансийский АО), Верх-Тарское (Новосибирская обл.), Талдинское (Кемеровская обл.).

Первые работы по апробации технологии совмещенных наземно-скважинных сейсмических наблюдений 2D+ВСП были проведены на Верх-Тарском месторождении для изучения межскважинного пространства с целью поиска высокопроницаемых нефтенасыщенных объектов в коре выветривания палеозойских пород. Был отработан профиль МОГТ длиной около трёх пог. км на исследуемой площади, где ранее были выполнены детальные сейсмические работы 3D-ОГТ. В результате был получен высококачественный сейсмический материал с частотным диапазоном до 125 Гц, который послужил достоверной основой для построения временного и глубинного разрезов околоскважинного и межскважинного пространства. В качестве иллюстрации эффективности данной

технологии детальных сейсмических исследований приведены сравнительные временные сейсмические разрезы: 2D+ВСП и выборка из куба 3D (рис. 1). На временном разрезе 2D+ВСП более точно, чем на временном разрезе 3D прослежены в верхнем палеозое тектонические нарушения и области резкого изменения отражающих характеристик целевого пласта.

На месторождениях Ханты-Мансийского АО детальные сейсмические исследования углеводородных объектов были целенаправленно выполнены по технологии совмещённых наземно-скважинных наблюдений. Например, на Пылинском месторождении исследования проводились в двух глубоких скважинах, расположенных в северной и южной частях месторождения при общей длине наземных профилей 22 пог. км. В пределах изучаемых площадей были уточнены структурные карты продуктивного пласта Ю₁¹ (рис. 2) и карты сейсмических атрибутов, выполнена переоценка начальных запасов.

На Талдинском месторождении Кузбасса сейсмические исследования выполнены по технологии 2D+ВСП при двухкомпонентной z-, x- регистрации продольных и обменных волн. Исследования были проведены для уточнения структурного плана залегания групп угольных пластов, выявления разрывных нарушений, зон повышенной трещиноватости и пористости горных пород, а также оценки мощностей перспективных газонасыщенных интервалов. Кроме того, были выделены в изучаемом околоскважинном пространстве зоны разрушенных массивов, появившихся вследствие техногенных воздействий.

Выводы

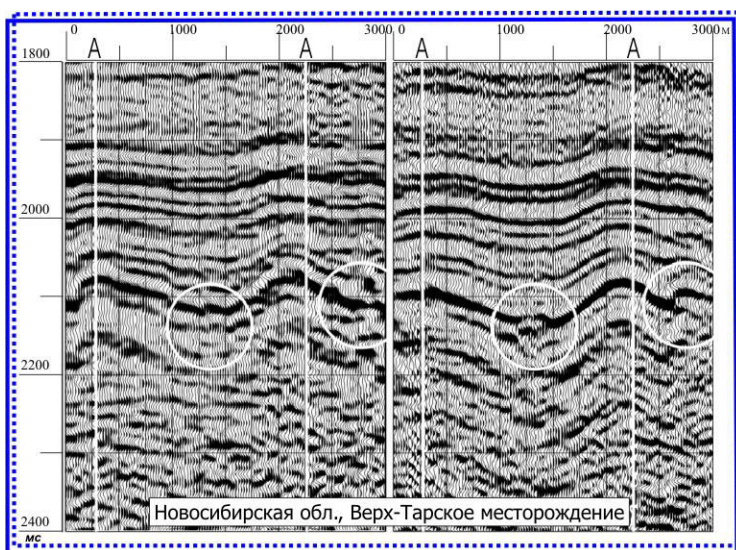


Рис. 1. Временной разрез 3D, выборка (слева) и временной разрез 2D+ВСП (справа)

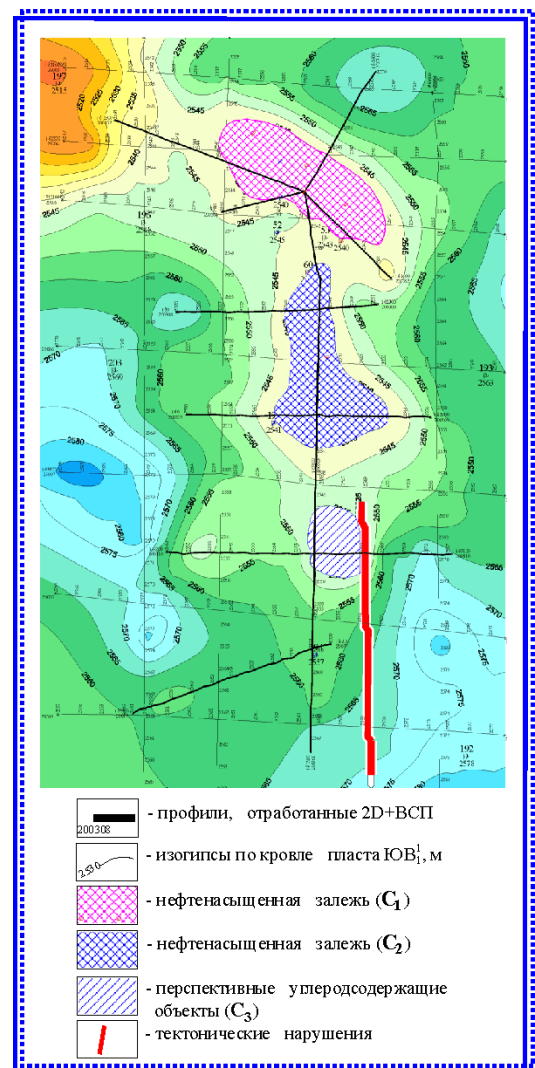


Рис. 2. Структурная карта по кровле пласта Ю₁, построенная по результатам работ 2D+ВСП

Технология совмещённых 2D/3D+ВСП наземно-скважинных наблюдений с одновременным сбором сейсмических данных на вертикальном и горизонтальных профилях повышает эффективность сейсмических работ за счет увеличения объёма информации, размерности исследований и достоверности обработки данных наземной съёмки.

Применение технологии сейсмических совмещённых 2D/3D+ВСП наблюдений на этапе разведки и доразведки углеводородосодержащих объектов обеспечивает детальное изучение структурных планов и решение литологостратиграфических задач, в том числе:

- Картирование границ, вскрытых и не вскрытых скважиной;
- Выявление и трассирование тектонических нарушений;
- Изучение латеральных литологических изменений разреза;
- Оценка коллекторских свойств продуктивных объектов;
- Уточнение запасов на изучаемых и разрабатываемых нефтегазоносных объектах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баранов К.В., Бикеев В.С., Стариков Н.В., Табаков А.А. Результаты применения методик «3D+ВСП локальный проект» и «2D+ВСП локальный проект» в условиях Западной Сибири / Технологии сейсморазведки, 2004, 1.
2. Гальперин Е.И. Развитие методов экспериментального изучения сейсмических волн в реальных средах / Развитие идей Г.А. Гамбурцева в геофизике. М: Наука, 1982.
3. Пузырёв Н.Н., Тригубов А.В., Бродов Л.Ю. и др. Сейсмическая разведка методом поперечных и обменных волн. М: Недра, 1985.
4. Сагайдачная О.М., Шмыков А.Н. Отечественные сейсмотелеметрические станции / Разведка и охрана недр, 2003, 11-12.

© А.П. Базылев, В.Г. Конюхов, О.М. Сагайдачная, Н.В. Стариков, А.А. Табаков, 2005

УДК 002.637: 553.061.3 (571.15)

А.Я. Швецов, В.С. Осьмушкин

ОАО «АлтайТИСИЗ», Барнаул

МОНИТОРИНГ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ НЕФТЕПРОДУКТАМИ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ БАРНАУЛЬСКОЙ НЕФТЕБАЗЫ

Барнаульская нефтебаза ОАО «Сибнефть-Барнаулнефтепродукт» является одним из крупнейших хранилищ нефтепродуктов Алтайского края. Она находится в восточной части г. Барнаула. Площадь её 10,4 га.

Нефтебаза была построена в 1936 г. и эксплуатируется 68 лет.

Основными сооружениями являются:

- Комплексы наземных хранилищ бензина, масел и дизельного топлива;
- Подъездной железнодорожный путь и эстакада слива нефтепродуктов;
- Путепроводы напорной и товарной линий светлых и темных нефтепродуктов;
- Автоэстакада для заправки автоцистерн нефтепродуктами;
- Административные здания, мастерские, гаражи, складские помещения.

Годовой оборот нефтепродуктов за 2002 г. составил – 85 тыс. т, в том числе: бензин А-80 – 30 тыс. т, А-92 – 21 тыс. т, А-96 – 0,7 тыс. т, дизельное топливо – 30 тыс. т, масла – 3,3 тыс. т.

В геоморфологическом отношении площадка нефтебазы расположена на приобровочной территории Приобского плато. Местность ровная, с небольшим уклоном на юго-восток (к бровке плато). Абсолютные отметки колеблются от 186 до 189 м.

На востоке площадка ограничивается склоном долины р. Оби. Высота склона 50-59 м. Отметки подошвы склона 130-135 м. Крутизна склона 25-55°, местами отмечаются субвертикальные обрывистые стенки.

Восточнее площадки нефтебазы расположен «Ковш» – длинный залив р. Оби, шириной 100-120 м.

В межень вдоль русла «Ковша» обнажается песчаный пляж шириной 20-30 м.

На Обском склоне происходит пластовое выклинивание подземных вод. В местах выклинивания отмечаются мочажины и родники, питающие ручьи, стекающие в «Ковш».

На той части Обского склона, которая примыкает к площадке нефтебазы, зарегистрировано 12 ручьев с дебитом от 0,001 до 0,15 л/с. Наиболее водообильны ручьи весной (в апреле – мае). Осенью большая их часть пересыхает.

Геологический разрез (сверху вниз):

- Современные отложения, представленные насыпным грунтом мощностью 0,1 – 2 м и почвой мощностью 0,2 – 0,5 м;

- Верхнечетвертичные лессовидные супеси и суглинки желтовато-бурые мощностью 9,8 – 13,3 м.;

- Нижне-среднечетвертичные пески мелкие желтого и серовато-желтого цвета (с 23 м – голубовато-серые), влажные, мощность слоя 15,5 – 19,5 м. Суглинки желтовато-бурого и бурого цвета, мощность слоя 2,1 – 5,7 м. Пески мелкие и средней крупности, серые, влажные, с глубины 37,4 – 38,0 м – водонасыщенные, мощность слоя 4 – 6,9 м;

- Верхнеплиоценовые суглинки вскрытой мощностью 1,6 м.

На площадке нефтебазы отмечаются верховодка и грунтовые воды. Верховодка приурочена к основанию верхней пачки песков красnodубровской свиты и встречена на глубине 29,9 м. Мощность слоя водонасыщенных песков 0,1 м. Воды гидрокарбонатные магниевые-кальциевые. Этот горизонт непостоянен.

Грунтовые воды приурочены к нижней пачке песков красnodубровской свиты. Они вскрыты на глубине 37,4 – 37,8 м. Воды безнапорные. Мощность водонасыщенного слоя песков 5 – 5,2 м. Водоупорным слоем служат плотные суглинки кочковской свиты, залегающие на глубине 42,6–42,8 м. Воды хлоридно-карбонатные магниевые-кальциевые. На площадке нефтебазы и на прилегающей к ней территории (склон Приобского плато) развиты опасные природные процессы: овраги, суффозионные процессы и оползнеобразование на Обском склоне.

Обской склон у нефтебазы протяженностью 480 м является оползневым. Степень пораженности склона оползнями высокая, около 90%. За период с 1974 по 2002 г. на участке нефтебазы зафиксировано 43 оползня и оползнепроявлений объемом 0,05 – 10 тыс. м³.

На склоне отмечено 7 коротких оврагов, расчленяющих склон и вершинами своими врезающихся в Приобское плато.

Основанием для проведения мониторинга явились данные о выявлении в 1999 г. загрязнения нефтепродуктами (радужная пленка, специфический запах) родникового стока и грунтов в подошве Обского склона. Мониторинг загрязнения нефтепродуктами природной среды нефтебазы был выполнен в 2002 – 2004 гг.

В 2002 г. ОАО «Алтайская гидрогеологическая экспедиция» пробурена скважина глубиной 48 м (до водоупора) и исследованы пробы грунта по ней, а также пробы грунтовых вод и вод родников на Обском склоне.

В 2003–2004 гг. экологические исследования были продолжены ФГУП (ныне ОАО) «АлтайТИСИЗ». Была пробурена 2-ая скважина до водоупора (глубина 44,5 м), пройден ряд закопшек, отобраны и изучены на загрязненность нефтепродуктами почвы на территории нефтебазы, грунты по скважине и на Обском склоне, грунтовые воды из обеих скважин, воды родников (ручьев) на Обском склоне, вода Оби и «Ковша», а также пробы грунта на пляже «Ковша».

Отбор и изучение проб подземных и поверхностных вод выполнены в 3 цикла в 2003 г. и 2 цикла – в 2004 г. По результатам исследований 2003 г. ФГУП «АлтайТИСИЗ» разработал мероприятия по сокращению утечек нефтепродуктов, которые вошли как составная часть в комплексный план ОАО «Сибнефть-Барнаулнефтепродукт» по предотвращению утечек нефтепродуктов.

Работы по реконструкции сооружений нефтебазы начались несколько ранее, со 2-ой половины 2002 г. и продолжились в 2003 – 2004 гг. Был осуществлен ряд серьезных мероприятий.

В частности, произведены диагностика и ремонт резервуаров бензина, дизтоплива и масел, вывод из эксплуатации нескольких резервуаров светлых и темных нефтепродуктов, имеющих 100 % износа, ликвидирована система регенерации и подземных резервуаров отработанных масел, построены новые очистные сооружения для светлых нефтепродуктов, построена новая эстакада для налива светлых нефтепродуктов, испытаны (проверены) трубопроводы нефтепродуктов, заасфальтирована и забетонирована территория нефтебазы и др.

Это обусловило уменьшение утечек нефтепродуктов и снижение степени загрязнения природной среды нефтебазы, что отразили работы по экологическому мониторингу.

Результаты мониторинга приведены ниже.

Мониторинг содержания нефтепродуктов в грунтовых водах

Таблица 1

Номер скважин	Содержание нефтепродуктов, мг/дм ³					
	Даты отбора проб					ПДК
	7 августа 2002 г.	25 июня 2003 г.	17 октября 2003 г.	25 мая 2004 г.	30 сентября 2004 г.	
1	41,8	1,4	1,64	1,60	3,8	0,05
1-а	-	1,3	1,28	1,25	4,0	

Мониторинг загрязненности нефтепродуктами вод ручьев (родников)

Таблица 2

Наименование водотоков	Содержание нефтепродуктов, мг/дм ³						ПДК
	Даты отбора проб						
	7 августа 2002 г.	23 июня 2003 г.	3 сентября 2003 г.	21 октября 2003 г.	27 мая 2004 г.	29 сентября 2004 г.	
1	2	3	4	5	6	7	8
Ручей 1	0,28	2,0	1,2	1,6	0,05	0,07	
Ручей 2	0,58		1,0	1,2	0,054	0,10	0,05
Ручей 3	-	0,4	0,32	0,5	-	0,08	
Ручей 5	657,0	5,0	0,68	1,8	-	0,06	
Ручей 7	191,7	53,9	58,0	92,0	6,2	5,0	
Ручей 8	-	-	-	-	0,52	1,0	
Ручей 9	114,5	13,1	5,0	15,2	1,5	1,5	
Ручей 10	1,69	1,1	2,0	1,9	0,054	0,10	
Ручей 11	-	1,9	-	1,2	0,06	0,08	
Ручей 12	-	1,3	0,8	1,5		0,70	
Ручей 13	-	2,5	0,62	1,7	0,058	0,85	

Мониторинг загрязненности нефтепродуктами вод «Ковша»

Воды «Ковша» помимо нефтебазы имеют многие другие источники загрязнения. В первую очередь, это суда речного флота, а также многочисленные промпредприятия, расположенные близ бровки Приобского плато.

Таблица 3

Место отбора проб	Содержание нефтепродуктов, мг/дм ³	
	Даты отбора проб	ПДК

	23 июня 2003 г.	3 сентября 2003 г.	21 октября 2003 г.	29 сентября 2004 г.	
1	2	3	4	5	6
Ковш, у устья ручья № 7, у берега	2,0	1,2	2,1	0,08	0,05
Ковш, у устья ручья № 7, в 5-10 м от берега	0,6	0,1	0,8	0,1	
Ковш, у устья ручья № 9, у берега	1,6	0,1	0,35		
Ковш, у устья ручья № 9, в 10 м от берега	0,4	0,14	0,4		
Ковш, у устья ручья № 10, у берега	0,5	1,8	1,6	0,06	
Ковш, у устья ручья № 10, в 5-10 м от берега	0,2	0,12	0,3	0,09	
Ковш, у устья ручья № 11, у берега	1,1	1,2	1,0		
Ковш, у устья ручья № 11, в 10 м от берега	0,6	0,16			
Ковш, в 200 м южнее нефтебазы, в 10 м от берега		0,10	0,3	0,05	
Ковш, крайняя южная точка, у берега			0,3	0,9	
Ковш, крайняя южная точка, в 5-10 м от берега			0,1	0,5	

Мониторинг загрязненности вод Оби

Таблица 4

Место отбора проб	Содержание нефтепродуктов, мг/дм ³				
	Даты отбора проб				ПДК
	03.09.03 г.	21.10.03 г.	25.05.04 г.	01.10.04 г.	
Объ, в 600 м ниже нефтебазы			0,3	0,15	0,1
Объ, в 600 м ниже нефтебазы			0,1	0,10	
Объ, в 3 км выше нефтебазы		1,9		0,06	
Объ, в 3 км выше нефтебазы		1,6		0,06	

Загрязнение почв грунтов территории нефтебазы

Исследование почв территории нефтебазы показало, что они значительно загрязнены. При фоновом значении загрязнения нефтепродуктами, равном 3-4 мг/кг, почвы комплекса хранилищ бензина загрязнены нефтепродуктами от 113 до 1940 мг/кг, комплекс хранилищ масел и дизтоплива – от 3160 до 7922 мг/кг, площадка эстакады слива – от 933 до 2928 мг/кг, площадка отстойника – 187 мг/кг, площадка автоэстакады для заправки автоцистерн – 4732 мг/кг. На остальных площадках почвы менее загрязнены (от 3-х до 115 мг/кг). На

участках интенсивного загрязнения почвы имеют характерный маслянисто-черный цвет.

Загрязнение грунтов

Грунты территории нефтебазы, начиная с глубины 2 м и до 44 м, практически не загрязнены (менее 0,5 мг/кг), хотя обе скважины были пробурены в местах ожидаемого наибольшего загрязнения грунтов в пределах комплекса резервуаров бензина. Лишь на глубине 2 м отмечается небольшое загрязнение (3,3 мг/кг).

Это свидетельствует о том, что на площадке нефтебазы в грунтах каких-либо значительных скоплений нефтепродуктов (масел, бензина) не имеется.

На Обском склоне, выше линии выклинивания грунтовых вод, грунты также не загрязнены. Но ниже этой линии загрязнение грунтов, в пределах зоны, примыкающей к нефтебазе, весьма существенно: от 500 до 2860 мг/кг. Грунты (суглинки, пески) имеют темно-бурый, темно-коричневый до черного цвет, с радужной ирризацией и запахом бензина.

Грунты пляжной зоны «Ковша» (пески) также содержат большое количество нефтепродуктов (1099 – 1500 мг/кг, а в районе лестницы – до 4602 мг/кг). Южнее и севернее нефтебазы содержание нефтепродуктов в пляжных песках ниже, но достаточно высокое (до 38 мг/кг), что обязано эксплуатационной деятельности речного флота.

Анализ результатов мониторинга позволил сделать следующие выводы:

1. Длительная эксплуатация нефтебазы (около 70 лет) привела к значительному износу металлических резервуаров и трубопроводов нефтепродуктов, обусловив их утечки, имеющие как постоянный характер, так и форсмажорный, связанный с аварийными ситуациями.

2. Уровень загрязнения почв территории нефтебазы высокий.

3. Грунты на территории нефтебазы ниже 2 м практически не загрязнены. Грунты на Обском склоне также не загрязнены выше линии выклинивания подземных вод, но очень загрязнены ниже этой линии. Грунты пляжной зоны «Ковша» сильно загрязнены.

4. Грунтовые воды в 2002 г. характеризовались повышенным уровнем загрязнения нефтепродуктами, но в 2003 г. содержание их резко снизилось по сравнению с 2002 г. В первой половине 2004 г. оно не изменилось по сравнению с 2003 г., а во второй половине года содержание нефтепродуктов несколько увеличилось.

5. В водах ручьев, стекающих с Обского склона, на участке, примыкающем к нефтебазе, содержание нефтепродуктов в 2002 г. было высокое. В 2003 г. оно значительно сократилось по сравнению с 2002 г., особенно в водах наиболее загрязненных ручьев №№ 5, 7, 9. В 2004 г. наблюдалось дальнейшее резкое сокращение содержания нефтепродуктов в водах ручьев. Ширина зоны выклинивающихся загрязненных грунтовых вод сократилась от 240 м в 2002 г. до 50-70 м – в 2004 г.

6. В водах «Ковша» содержание нефтепродуктов в 2003 г. было сравнительно небольшим. В 2004 г. на участке, прилегающем к нефтебазе, у устья наиболее загрязненных ручьев №№ 7 и 9 оно значительно уменьшилось и

находилось на уровне ПДК. Более высокий уровень загрязнения вод «Ковша» отмечается в крайней южной его части, где находится стоянка речных судов.

7. Воды Оби загрязнены нефтепродуктами незначительно, на уровне ПДК (данные на октябрь 2004 г.).

Таким образом, результаты мониторинга загрязнения природной среды Барнаульской нефтебазы показывают, что по сравнению с 2002 г. содержание нефтепродуктов существенно снизилось в 2003 – 2004 гг. в подземных водах, водах ручьев (родников) Обского склона и в водах «Ковша», что свидетельствует о сокращении утечек нефтепродуктов.

Это обязано тому, что в 2002 – 2004 гг. ОАО «Сибнефть – Барнаулнефтепродукт» выполнил ряд мероприятий по предотвращению утечек нефтепродуктов.

© А.Я. Швецов, В.С. Осьмушкин, 2005

МОНИТОРИНГ ГЕОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «ОБСКОЙ МОСТ – ПРИРОДНАЯ СРЕДА»

Новый мостовой переход через р. Обь у г. Барнаула – крупный объект, оказывающий большое влияние на окружающую среду. Строительство его было начато в 1988 г. В 1997 г. основные работы были завершены и 25 июля 1997 г. было открыто движение автотранспорта по новому мосту через р. Обь. Полностью работы были закончены в 2000 г.

Помимо указанного моста в состав объекта входят мосты через р. Барнаулку, каналы спрямления рек Лосиха и Талой, подходы ко всем мостам, 4 транспортные развязки, струенаправляющая дамба, автодорога от Обского моста до Новосибирского тракта и др.

В период строительства объекта Алтайским Центром РАЕН в 1992 – 1999 гг. при участии авторов статьи, были выполнены экологические исследования по изучению воздействия мостового перехода на природную среду и обратное воздействие ее на сооружения объекта.

Воздействию подверглись все компоненты природной среды: земельные ресурсы, атмосферный воздух, поверхностные и подземные воды, почвы, недра, растительный и животный мир.

По характеру воздействие на окружающую среду, в основном, прямое, а в ряде случаев, опосредованное (на подтопление территорий, на развитие оползневых процессов и др.).

Интенсивность воздействия различна: от незначительной (на условия заболачиваемости, на оврагообразование) до весьма значительной (русовые процессы, затопление и др.).

По динамике воздействие на природную среду в большой мере постоянное. Продолжительность его до тех пор, пока будет существовать мост через р. Обь. Воздействие некоторых видов закончилось: снос застройки, изменение рельефа на большинстве участков и др.

Пространственный охват территории значителен - 95 км².

Исследованиями АЦ РАЕН рассмотрено множество аспектов воздействия мостового перехода на природную среду.

В короткой статье невозможно полностью отразить результаты мониторинга, и мы остановились только на наиболее важных вопросах.

1. Изменение процессов затопления поймы р. Оби и пос. Затон

В процессе строительства моста через р. Обь возникли волнения и недовольства жителей пос. Затон, расположенного на правобережной пойме Оби; в печати был опубликован ряд статей, в которых отмечалось, что сооружение моста существенно повысит уровень затопления поймы, в результате чего пострадают жители пос. Затон.

Анализ наблюдений за уровнем воды подтверждает эти опасения лишь в некоторой мере. Пойма затопливается почти ежегодно. Затопление пос. Затон начинается при уровне в 520 см над нулем графика водпоста. Уровни выше 520 см

наблюдались 70 раз за период наблюдений с 1893 по 1999 г., а за период строительства (12 лет) – 6 лет. То есть, частота затопления поймы за период строительства моста меньше, чем за весь период наблюдений.

Наивысший уровень вод р. Оби за период наблюдений составил 763 см над нулем графика (1937 г.), а за период строительства – 633 см (1993 г.). Этот уровень до начала строительства моста фиксировался 10 раз.

При уровнях ниже 550 см подпор фактически отсутствует. За период строительства (12 лет) уровни выше 550 см наблюдались 4 года (1992 – 1995 гг.). Но в 1992 и 1994 гг. высшие уровни составляли 551 и 560 см. Таким образом, фактически подпор у пос. Затон отмечался в 1993 и 1995 г. с максимальной высотой 18 см (1993 г.).

Максимальный подпор в половодье 1% обеспеченности (УВВ 763 см) оценивается величиной 0,5 м. При уровнях 720 см и выше, с учетом подпора, уровень воды может превысить уровень половодья 1% ВП. Анализ показывает, что за период более 100 лет уровни, превышающие 720 см, отмечались лишь дважды (1937 и 1969 гг.).

Таким образом, можно отметить некоторое ухудшение условий затопления пос. Затон лишь в высокие половодья при уровне более 550 см над нулем графика. Сооружение 2-х новых мостов (через протоки Бобровка и Талая) и дороги, связывающие Затон с правобережным подходом к Обскому мосту, дают возможность подъезда и эвакуации из поселка по мостовому переходу при любых половодьях.

2. Речной вокзал г. Барнаула

При строительстве речного вокзала высокий левый берег Оби был уположен и укреплен плитами. Прилегающая к левому берегу полоса русла Оби была укреплена каменной наброской.

Новый Обской мост находится в 220 м выше по течению от речного вокзала. Были опасения, что при формировании подмостовой ямы (обязанной строительству моста), произойдет подмыв и разрушение берегоукрепительных сооружений у речного вокзала.

В процессе строительства моста после установки опор, стала формироваться подмостовая яма. В створе моста низшие отметки русла составили: до строительства моста – 125 м, в процессе строительства: 16.05.90 г. – 123,4 м; 29.10.90 г. – 119,7 м; 03.06.93 г. – 117,6 м; 20.02.99 г. – 118,6 м.

Пик размыва пришелся на 1993 г. и составил 7,6 м. Максимальные глубины размыва с левого берега (до начала строительства) сместились к правому берегу.

В 300 м ниже моста по течению, величина максимального размыва в 1994 г. составила только 0,3 м. В последующие годы здесь отмечается повышение отметок и в 1999 г. они стали на 1-2 м выше, чем до строительства моста.

Обследования, выполненные в 1999 г., показали, что подмыв плит на участке речного вокзала отсутствует, при низких уровнях обсыхает часть каменной наброски у плит.

Таким образом, после сооружения моста через Обь, отметки дна русла у левого берега на участке речного вокзала не понизились (как ожидалось), а повысились. Угрозы подмыва берегоукрепления нет.

3. Оползневые процессы

До строительства моста через р. Обь были определенные опасения, что создание подпора по завершении строительства обусловит некоторое повышение интенсивности размыва крутого левого берега, что вызовет активизацию оползневых процессов и уничтожение прибрежной территории Нагорного парка и стоящих на ней зданий и сооружений.

В процессе строительства моста и по завершении его на левом берегу выше моста был выполнен комплекс противооползневых и берегоукрепительных работ: улоаживание крутого склона, отсыпка каменных «шпор», создание каменного контрбанкета вдоль подножия склона. Все это положительно сказалось на устойчивости склона и замедлило оползневые процессы.

4. Условия судоходства

Проект моста был согласован с Министерством речного флота РСФСР, в том числе отметки низа конструкции (151,84 м БС) и ширина судоходных пролетов (120 м). Сооруженные конструкции моста выполнены с учетом требований водного транспорта.

Сформированные русловыми процессами отметки дна русла Оби после строительства моста не ухудшили условия судоходства, за исключением участка входа судов в Бобровскую протоку и пос. Затон. Здесь ухвостье острова Дрокин начало увеличиваться вниз по течению в виде песчаной косы, перекрывая при низких уровнях воды вход в Бобровскую протоку.

В какой-то мере осложнилось и движение судов: появился некоторый риск навала судна на опоры моста, кроме того, освещение на мосту в темное время суток делает менее различимыми огни навигационных знаков и сигнальные огни судов.

Но, в целом, условия судоходства отвечают требованиям движения водного транспорта на реках.

5. Воздействие на атмосферный воздух г. Барнаула

До строительства моста транзитный транспорт, следовавший из Западной Сибири в Казахстан, Среднюю Азию, а также в южные районы Алтайского края, проходил через Барнаул и, в значительной мере, загрязнял воздушный бассейн города и без того загрязненный выше нормы.

Загрязнение воздушной среды города вредными веществами (оксид и диоксид азота, углеводороды, оксиды углероды и серы, свинец и его соединения, бензин и др.) превышало ПДК от 2 до 5 раз.

Сооружение нового Обского моста позволило пустить транзитный поток автомобилей, составляющий 7-8 тыс. авт./сутки, в обход города Барнаула.

В результате в значительной мере улучшилось экологическое состояние атмосферного воздуха города, уменьшилась возможность образования «автомобильных «пробок» и ДТП.

Итак, возведение нового автомобильного моста через р. Обь у г. Барнаула с сопутствующими сооружениями, оказало существенное многостороннее воздействие на природную среду: улучшило экологическую обстановку в городе (снижение уровня загрязнения атмосферного воздуха), усилило динамику русловых процессов, несколько ухудшило условия судоходства на отдельных участках Оби, в небольшой мере повысило уровень затопления пос. Затон, замедлило оползневые процессы.

© А.Я. Швецов, В.С. Осьмушкин, 2005

НАСТРОЙКА МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЙ И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СООРУЖЕНИЙ И ОБЪЕКТОВ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОДИНАМИКИ ПО ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ НАБЛЮДЕНИЯМ

Настоящая работа выполнена на основе понятий, категорий, принципов, подходов и концептуальных положений теории математического моделирования и идентификации геодинамических систем (ГДС) по многомерным пространственно-временным рядам комплексных геодезических и геофизических наблюдений [1]. ГДС (объекты, процессы, явления) рассматриваются как сложные открытые нелинейные геодинамические системы (ГДС) – глобальные (планетарные), региональные и локальные. При этом они организованы как иерархические многоуровневые системы. В локальные ГДС могут включаться объекты инженерной геодинамики, состоящие из двух подсистем – инженерные сооружения и геолого-геофизическая среда.

Идентификация движений и напряженно-деформированного состояния сооружений и объектов инженерной геодинамики имеет важное практическое значение при решении задач проектирования и эксплуатации, при определении допустимых нагрузок и других подобных задач.

Параметры геодинамических процессов, как правило, недоступны для непосредственного измерения и могут определяться только косвенно – по результатам наблюдений в пространстве и времени некоторых величин, являющихся функционалами таких параметров. Это обстоятельство приводит к проблеме идентификации динамических систем (объектов, процессов, явлений) в широком смысле, заключающейся не только в оценивании параметров, но и в определении пространственно-временной структуры модели системы. Структура определяет упорядоченность в пространстве и времени элементов объекта (системы); при этом элементами могут являться процессы, а также свойства и отношения. Идентификация должна выполняться в процессе совместного решения обратных (в общем случае некорректно поставленных) задач оптимальной фильтрации результатов наблюдений и их интерпретации в форме математических моделей закономерностей поведения (состояния) системы.

При математическом моделировании ГДС (земной коры, инженерной геодинамики, инженерных сооружений) наряду с моделями движений жестких тел, колебаний и других используются модели механики сплошных сред, в частности, теории упругости. Методами теории упругости определяются напряженно-деформированное состояние (НДС) идеализированных моделей сплошной среды и простейших конфигураций изучаемых областей, горных массивов, плотин, геологических структур, испытывающих силовые, температурные, кинематические и др. воздействия, а также допустимые

нагрузки, при которых в рассчитываемом объекте не возникают напряжения или перемещения, опасные с эксплуатационной точки зрения.

При усложнении структуры и состава ГДС выполняют дискретизацию континуальной модели на базе метода конечных элементов (МКЭ). Изучаемое тело разбивают на совокупность конечных элементов (КЭ), например треугольников. Для каждого элемента поле перемещений описывается линейной интерполяционной моделью. Для упругой стадии деформирования возможно описание, линейно связывающее компоненты нагрузки F и перемещения узлов расчетной схемы – $U = U(u_x, u_y)$.

$$F = K_{\Omega} U,$$

где F – вектор-столбец узловых нагрузок, к которым сведены внешние воздействия, распределенные по области системы Ω ; K_{Ω} – матрица жесткости деформируемого объекта в целом.

Обычно это соотношение используется для решения задачи вычисления узловых перемещений $U(u_x, u_y)$ по известным значениям узловых нагрузок F

$$U = K_{\Omega}^{-1} F.$$

По результатам геодезических измерений (прямых или косвенных) узловых перемещений $U(u_x, u_y)$ возможна идентификация НДС ГДС.

В [2] излагаются методические, теоретические, математические, алгоритмические основы компьютерной технологии идентификации движений и напряженно-деформированного состояния геодинамических систем по пространственно-временным рядам комплексных геодезических и геофизических наблюдений. Приведены необходимые сведения из теории упругости, метода конечных элементов.

Предлагаемая методология, математическое и алгоритмическое обеспечение идентификации (в широком смысле) движений и напряженно-деформированного состояния геодинамических систем по пространственно-временным рядам комплексных геодезических и геофизических наблюдений позволяет по натурным наблюдениям оценивать особенности поведения геодинамических систем, связанные с необратимыми деформациями и неоднородностью полей напряжений не только в двумерном, но и трехмерном пространстве. Результатом математической обработки наблюдений являются как оценки смещений точек ГДС, так и оценки параметров текущего и одношагового прогноза, характеризующих НДС ГДС с оценкой точности определяемых параметров. Поля деформаций и напряжений визуализируются на компьютере в удобном для анализа экспертом виде.

Кроме того, описывается вычислительный эксперимент идентификации НДС локальной ГДС по модельным геодезическим наблюдениям во времени. Этапы эксперимента и его результаты представлены в приложениях. Приведен пример компьютерной визуализации полей деформации и полей напряжения смоделированной ГДС.

Здесь мы приводим некоторые новые результаты продолжения вычислительного эксперимента [2]. В настоящей статье описывается методика и

вычислительный эксперимент идентификации по трем циклам (эпохам) пространственно-временных рядов геодезических наблюдений параметров движений и напряженно-деформированного состояния (НДС) локальной геодинамической системы (ГДС) с оценкой точности их определения. В качестве локальной ГДС выбрана модель плотины, работающая в условиях плоской деформации. Задача сводится к расчету НДС пластины в форме прямоугольной трапеции толщиной 1 метр, как реакции на воздействие давления воды и напора льда. Для аналитического (модельного) расчета смещений узлов вся поверхность пластины Ω была разбита на 10 прямоугольных конечных элементов (КЭ) размерами 5.6 м (вдоль оси x) и 8 м (вдоль оси y) и 4 треугольных конечных элемента с катетами 8 м и 5.6 м (рис. 1) [2]. Граничное условие задачи – точки 15 – 20 пластины считаются неподвижными.

Направления векторов сил возмущающих внешних воздействий составляют 90 градусов к боковой стороне и лежат в плоскости пластины. Значения этих сил в период между первым и вторым циклами следующие: $F_3 = 0.3067$ МН, $F_6 = 0.64$ МН, $F_{10} = 1.28$ МН. В период между вторым и третьим циклами по прогнозу ожидается увеличение значений сил на 25%. Упругие свойства материала при малых деформациях выражены через модуль Юнга $E = 0.2 \cdot 10^{11}$ Па и коэффициент Пуассона $\nu = 0.293$. При моделировании структуры ГДС нами была введена трещина в средней части пластины. Штриховыми линиями на рис. 1 показано (в условном масштабе) перемещение пластины после воздействия сил F_3, F_6, F_{10} .

Система наблюдений полностью повторяет систему наблюдений в работе [2]. Порядок математической обработки результатов первой и второй эпох наблюдений также совпадает с порядком обработки, описанным в книге [1]. Новые положительные результаты получены при обработке наблюдений 3 эпохи.

В соответствии с теорией метода идентификации НДС, описанными в работе [1, 2], были найдены прогнозные одношаговые оценки координат узлов и их смещений на цикл $t=3$ по всем наблюдениям до цикла $t=2$ включительно $\hat{X}_R(X, t=3/t=2)$ с ковариационной матрицей $K_{\hat{X}_R}(X, t=3/t=2)$ для ожидаемого по метеорологическим данным в период со 2-го по 3-й цикл увеличения сил на 25%. При этих расчетах использовалась переходная матрица $\Phi(t=3, t=2) = \begin{bmatrix} E & 0.25E \\ 0 & 0.25E \end{bmatrix}$. После этого были рассчитаны прогнозные оценки компонентов вектора деформаций $\hat{\varepsilon}(r, t=3/t=2)$, прогнозные оценки компонентов вектора напряжений $\hat{\sigma}(r, t=3/t=2)$ для каждого конечного элемента r и выполнена оценка точности этих параметров НДС. В таблице 2 приведены прогнозные оценки параметров НДС на 3-й цикл для треугольного КЭ $r=13$ с узлами 8, 12 и 13 (рис. 2.) для ожидаемого увеличения сил на 25%.

Затем была выполнена обработка геодезических наблюдений третьего цикла. При этом по критерию $\min tr K_{XR}(X, t=3)$ для совокупности измерений трех циклов

была выполнена адаптация (настройка) модели с использованием фильтра Калмана – Бьюси. В результате было установлено, что в период со 2 по 3 цикл произошло увеличение сил воздействия не на 25%, как прогнозировалось, а на 20% (табл. 1).

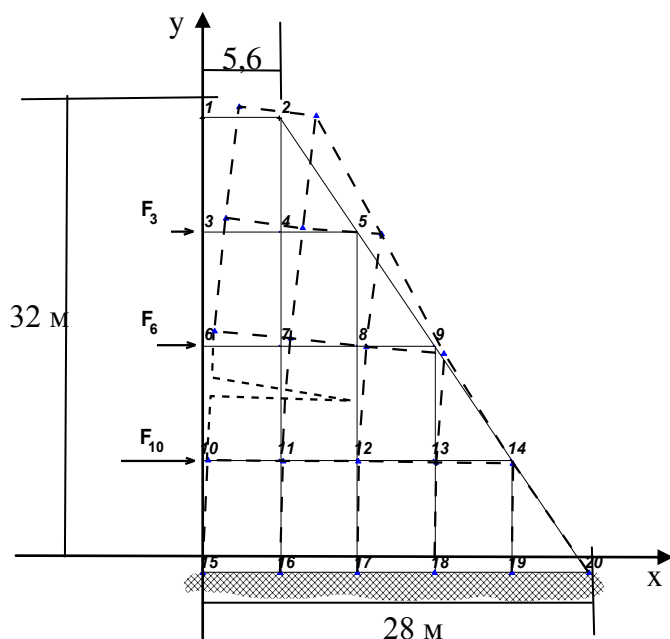


Рис. 1. Модель ГДС – пластина, работающая в условиях плоской деформации

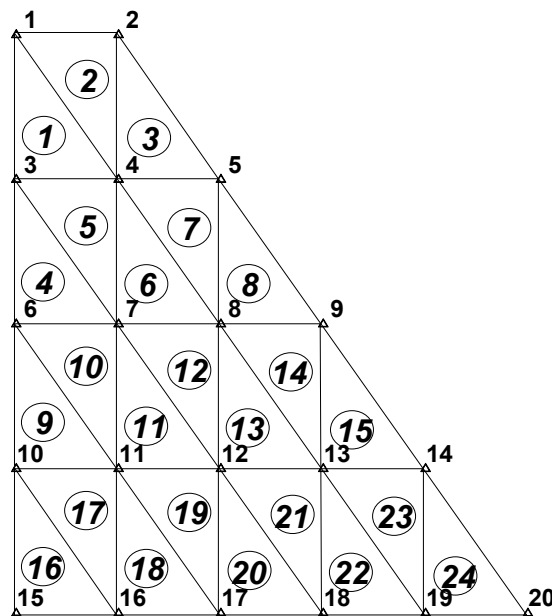


Рис. 2. Разбиение ГДС на треугольные КЭ

Таблица 1. Прогнозное увеличение сил воздействия и соответствующие значения $\hat{\mu}$ и trK_{XR}

Увеличение сил	10%	12.5%	15%	17.5%	20%	22.5%	25%
$\hat{\mu} (t=3)$ (мм)	0.264	0.232	0.207	0.190	0.184	0.188	0.203
$trK_{XR} (X, t = 3)$ (мм ²)	2.205	1.795	1.497	1.326	1.298	1.432	1.745

В табл. 2 приведены полученные по алгоритму ФКБ прогнозные и текущие оценки параметров НДС и их точностные характеристики на 3-й цикл для треугольного КЭ $r=13$ с узлами 8, 12 и 13 (рис. 2).

Таблица 2. Прогнозные и текущие оценки параметров НДС в третьем цикле

	$\hat{\epsilon}_{xx}$	$\hat{\epsilon}_{yy}$	$\hat{\epsilon}_{xy}$	$\hat{\sigma}_{xx}$ (Па)	$\hat{\sigma}_{yy}$ (Па)	$\hat{\sigma}_{xy}$ (Па)
Прогнозные (25%)	$3.80 \cdot 10^{-4}$	$3.57 \cdot 10^{-5}$	$2.93 \cdot 10^{-4}$	$1.30 \cdot 10^7$	$4.36 \cdot 10^6$	$3.66 \cdot 10^6$
Точность	$1.21 \cdot 10^{-5}$	$8.39 \cdot 10^{-6}$	$1.16 \cdot 10^{-5}$	$4.15 \cdot 10^5$	$3.04 \cdot 10^5$	$1.46 \cdot 10^5$
Прогнозные (20%)	$3.66 \cdot 10^{-4}$	$3.58 \cdot 10^{-5}$	$2.81 \cdot 10^{-4}$	$1.25 \cdot 10^7$	$4.25 \cdot 10^6$	$3.51 \cdot 10^6$
Точность	$9.70 \cdot 10^{-6}$	$6.71 \cdot 10^{-6}$	$9.31 \cdot 10^{-6}$	$3.32 \cdot 10^5$	$2.43 \cdot 10^5$	$1.16 \cdot 10^5$
Текущие	$3.64 \cdot 10^{-4}$	$3.33 \cdot 10^{-5}$	$2.79 \cdot 10^{-4}$	$1.24 \cdot 10^7$	$4.14 \cdot 10^6$	$3.49 \cdot 10^6$
Точность	$7.08 \cdot 10^{-6}$	$5.22 \cdot 10^{-6}$	$6.83 \cdot 10^{-6}$	$2.43 \cdot 10^5$	$1.88 \cdot 10^5$	$8.54 \cdot 10^4$

Заключение. В нашей работе [2] и в настоящей статье разработаны теория метода и методика рекуррентной идентификации движений и напряженно-

деформированного состояния (НДС) динамических систем – сооружений и объектов инженерной геодинамики по пространственно-временным рядам геодезических наблюдений и приведены результаты соответствующего вычислительного эксперимента.

Учитывая априорную неопределенность по прогнозу сил в 3-м цикле, была выполнена настройка возмущающих прогнозных сил модели объекта. Прогнозные оценки параметров НДС на 3-й цикл были определены при силах больших на 20%, чем были заданы на 2-й цикл (при аналитическом расчете).

Сравнительный анализ методов определения НДС по действующим силам (аналитические, проектные расчеты НДС) и геодезическим наблюдениям в пространстве и времени приводит к выводу о необходимости совместного использования этих методов. При этом аналитические (проектные) расчеты НДС, выполненные по информации о возмущающих силах и априорных физических свойствах объекта, контролируются и настраиваются (корректируются) в процессе строительства и эксплуатации инженерных сооружений по натурным геодезическим наблюдениям в пространстве и времени.

В качестве адекватного математического аппарата для решения задачи математического моделирования и идентификации движений и НДС сооружений выбран адаптивный рекуррентный фильтр Калмана – Бьюси (ФКБ) оптимальный по критерию минимума обобщенной дисперсии оцениваемых параметров. Этот математический аппарат позволяет разработать современную информационную технологию оптимальной математической обработки и интерпретации пространственно-временных рядов комплексных геодезических и геофизических наблюдений за динамическими объектами. Заметим, что результаты геодезических наблюдений в циклах (в нашем случае в 3-м цикле) позволяют настраивать модель, подтвердить или скорректировать прогнозные оценки сил внешних воздействий и соответственно прогнозные оценки смещений и параметров НДС, используя адаптивный рекуррентный ФКБ.

Алгоритм ФКБ обеспечивает определение как текущих и одношаговых прогнозных оценок параметров движений и НДС, так и характеристик их точности. Это позволяет не только иметь информацию о надежности оценок определяемых динамических параметров, но и объективно выбирать адекватную структуру модели динамики объекта. Информация о состоянии динамического объекта может быть использована и для управления объектом в аспекте снижения степени риска и последствий природных и техногенных катастроф.

Предлагаемый подход позволяет выполнять моделирование и идентификацию динамических систем не только по однородным геодезическим наблюдениям, но и по разнородным комплексным геодезическим и геофизическим наблюдениям, как в двумерном, так и в трехмерном пространстве.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Панкрушин В.К. Математическое моделирование и идентификация геодинамических систем. – Новосибирск: СГГА, 2002.

2. Середович В.А. и др. Идентификация движений и напряженно-деформированного состояния самоорганизующихся геодинамических систем по комплексным геодезическим и геофизическим наблюдениям: Монография / Середович В.А., Панкрушин В.К., Кузнецов Ю.И., Мазуров Б.Т., Ловягин В.Ф; Под общ. ред. В.К. Панкрушина; СГГА. – Новосибирск, 2004. – 356 с.

© А.А. Крамаренко, Б.Т. Мазуров, В.К. Панкрушин, 2005

ИДЕНТИФИКАЦИОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ: ПОСТРОЕНИЕ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ В ВУЛКАНИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ

В книге [1] в аспекте проблемы идентификации геодинамических систем (ГДС) дана теория метода и математическое обеспечение решения задачи совместной математической обработки и интерпретации пространственно-временных рядов комплексных нивелирных и гравиметрических наблюдений; при этом для сокращения размерности задачи в определяемые параметры вектора состояний вводятся масконы (mass concentration) – аномалиеобразующие тела (АОТ), как функции пространственных координат и времени. С помощью таких масконов выполняется аппроксимация гравитационного поля в пространстве и времени.

Для разработки методики идентификационного эксперимента, алгоритмического обеспечения и компьютерной технологии решения задачи совместной математической обработки и пространственно-временной интерпретации результатов разнородных комплексных геодезических и гравиметрических наблюдений нами была построена модель вертикальных движений и временных вариаций гравитационного поля, аномалии которого аппроксимируются в пространстве и времени двумя масконами – глубинным и поверхностным.

В качестве физической модели геодинамической системы (ГДС) был выбран локальный участок на земной поверхности, расположенный в области действующего вулкана (рисунок). Система наблюдений за геодинамическим объектом включает нивелирные и гравиметрические наблюдения в пространстве и времени.

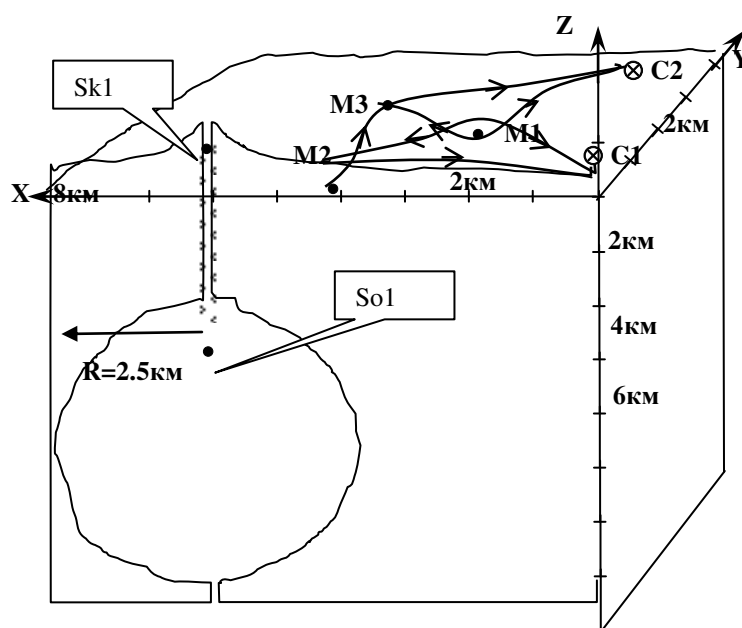


Рис. Физическая модель геодинамического объекта и системы наблюдений

Нивелирная сеть состоит из двух условностабильных пунктов (реперов) С1 и С2 (их взаимное положение со временем не меняется) и трех мобильных пунктов М1, М2 и М3 [2].

При моделировании ГДС «Движения физической поверхности и изменения гравитационного поля Земли» из множеств параметров состояний выделим следующие множества (векторы параметров состояний), которые необходимо будет определить в процессе идентификации системы [1]:

$X_i\{P_i(t)\}$ – вектор пространственных координат пунктов $P_i(t)$ сети наблюдений в дискретные моменты времени (эпохи) $t=1,2,\dots, i=1,2,\dots,N$;

$W_i\{P_i(X,t)\}$ – вектор внешнего потенциала силы тяжести в тех же пунктах или, при задании нормального потенциала $U_i\{P_i(X,t)\}$, вектор возмущающего потенциала $T_i\{P_i(X,t)\}$;

$X_D(X,t)$ – вектор параметров движений в широком смысле (изменений как геометрических, так и физических параметров).

Из перечисленных выше векторов формируется так называемый расширенный вектор определяемых параметров состояний ГДС:

$$X_R(X,t)=[X_i^T\{P_i(t)\},W_i^T\{P_i(X,t)\},X_D^T(X,t)]^T \in X_\Sigma \quad (1)$$

или, при задании нормального потенциала $U_i\{P_i(X,t)\}$, -

$$X_R(X,t)=[X_i^T\{P_i(t)\},T_i^T\{P_i(X,t)\},X_D^T(X,t)]^T, \quad (2)$$

где $T_i\{P_i(X,t)\}$ – возмущающий потенциал; верхний индекс T – символ транспонирования.

Входящий в (1), (2) вектор $X_D(X,t)$ формируется в следующем виде:

$$X_D(X,t)=[X_{D(\Phi\PЗ)}^T, X_{D(BГ\PЗ)}^T(X,t)]^T, \quad (3)$$

где $X_{D(\Phi\PЗ)}(X,t)$ – вектор параметров движений и деформаций физической поверхности Земли или, в общем случае, вектор параметров напряженно-деформированного состояния земной коры (горных пород);

$X_{D(BГ\PЗ)}$ – вектор параметров изменений (вариаций) во времени внешнего гравитационного поля Земли.

Для построения конечномерных моделей с пространством состояний переходим от возмущающего потенциала $T_i\{P_i(X,t)\}$ к его основным трансформантам в пространстве и времени:

$$q_i\{P_i(X,t)\}=[\Delta g_i^T\{P_i(X,t)\},\xi_i^T\{P_i(X,t)\},\eta_i^T\{P_i(X,t)\},\zeta_i^T\{P_i(X,t)\}]^T, \quad (4)$$

где Δg , ξ , η , ζ – соответственно, аномалии силы тяжести, компоненты уклонения отвесной линии, аномалии высот.

Пусть в состав разнородных комплексных наблюдений $Y(X,W,t)$ за геодинимической системой (объектом, процессом, явлением) входят измерения превышений $h_{ij}(X,W,t)$ методом геометрического нивелирования в моменты времени (эпохи) $t=1,2,\dots$ между пунктами (реперами) сети наблюдений на ФПЗ $P_i(X_j,W_j,t) \in \Phi\PЗ$ и $P_j(X_j,W_j,t) \in \Phi\PЗ$, $i,j=1,2,\dots,N$.

Наблюдаемые превышения $h_{ij}(X, W, t)$ могут быть представлены пространственно-временными геодезическими функционалами высот (геодезических, нормальных, ортометрических) и соответствующих основных трансформант $q\{P(T, X, t)\}$ возмущающего потенциала $T\{P(X, t)\}$.

Линейную модель пространственно-временных рядов результатов измерений превышений в гравитационном поле Земли представим в следующем виде [1]:

$$h_{ij}(X, W, t) = H_j(X, t) - H_i(X, t) + [\xi_{ij}^m(X, t) + \Delta \xi_{ij}^m(X, t)] \Delta x_{ij}(X, t) + \eta_{ij}^m(X, t) \Delta y_{ij}(X, t) + \varepsilon_h(X, W, t), i, j = 1, 2, \dots, \quad (5)$$

где $\varepsilon_h(X, W, t)$ – ошибки наблюдений превышений;

$\Delta x_{ij}(X, t) = x_j(t) - x_i(t)$; $\Delta y_{ij}(X, t) = y_j(t) - y_i(t)$ – приращения координат.

При моделировании абсолютных наблюдений силы тяжести, принимается, что в вектор параметров состояния ГДС, включены ускорения силы тяжести $g_i\{P_i(X_i, W_i, t)\}$ на пунктах сети наблюдений $P_i(X_i, W_i, t)$, где $X = (x, y, H), i = 1, 2, \dots, N, t = 1, 2, \dots$

Модель пространственно-временных рядов абсолютных наблюдений силы тяжести строится в следующем виде:

$$g_i\{P_i(X, W, t)\} = \hat{g}_i^F\{P_i^F(\hat{X}_i^F, \hat{W}_i^F, t^-)\} - \frac{\partial \gamma_i}{\partial H}\{P_i^F(\hat{X}_i^F, \hat{U}_i^F, t^-)\} \delta H_i^B\{P_i^F(\hat{X}_i^F, t^-)\} + \delta g_i^B\{P_i^F(\hat{X}_i^F, \hat{W}_i^F, t^-)\} \delta W + \varepsilon_g(X, W, t). \quad (6)$$

В (6) $\hat{g}_i^F\{P_i^F(\hat{X}_i^F, \hat{W}_i^F, t^-)\}$ – счислимая одношаговая прогнозная оценка фона наблюдаемой силы тяжести на эпоху t по всем наблюдениям до эпохи $t - 1$ включительно; $\frac{\partial \gamma_i^F}{\partial H}\{P_i^F(\hat{X}_i^F, \hat{U}_i^F, t^-)\}$ – вертикальный градиент нормальной силы тяжести; $\varepsilon_g(X, W, t)$ – ошибки наблюдений силы тяжести.

Для составления общей системы уравнений разнородных комплексных геодезических и геофизических наблюдений, которые были бы связаны общими параметрами, используется подход, который заключается в использовании понятий аномалиеобразующих тел (АОТ), масконов и точечных масс при аппроксимации аномального гравитационного поля.

Сущность его состоит в следующем: аномальное гравитационное поле в пространстве и времени, представленное возмущающим потенциалом $T\{P(X, t)\}$ или его основными трансформантами $q\{P(X, W, t)\} = q\{P(X, T, t)\}$ и их вариациями $\delta q\{P(X, T, t)\}$, аппроксимируется комбинациями простых распределений масконов (АОТ) и их вариаций $M_\kappa\{O_\kappa(X, t)\}, \kappa = 1, 2, \dots, S, \delta M_\kappa\{O_\kappa(X, t)\}$ [1].

Для составления общей системы разнородных наблюдений $Y(X, W, t)$ и аппроксимации ГПЗ совокупностью аномальных масс (масконов) $M(X, t)$ переходят к представлению расширенного вектора параметров ГДС $X_R(X, t)$ в следующем виде:

$$X_R(X,t)=[X_i^T\{P_i(t)\},M_k^T\{O_k(X,t)\},X_D^T(X,t)]^T. \quad (7)$$

Вектор координированных масконов, входящий в определяемые параметры расширенного вектора ГДС, позволяет существенно сократить размерность задачи, так как размерность вектора параметров M_k , $k = 1,2,...,S$ существенно меньше, чем, если бы в определяемые параметры входил вектор основных трансформант возмущающего потенциала силы тяжести q_i , $i = 1,2,...,N$, у которого размерность намного больше.

В нашем примере изменение гравитационного поля на локальном участке местности характеризуется деятельностью ближайшего вулкана, иначе говоря, перемещением аномальных масс вдоль подводящего канала от зоны образования магмы до магматической камеры, заполнением камеры и выходом магмы на поверхность при извержении вулкана (формирование его конуса). Значения составляющих уклонений отвесных линий можно выразить через аномальные массы и координаты центров масс.

С учетом этого математическую модель состояний геодинамической системы (Рисунок) без учета детерминированных и стохастических воздействий внешней среды [1] представим уравнением

$$X_R(t)=\Phi(t,t-1)X_R(t-1), \quad (8)$$

где $X_R(t)$ – расширенный вектор определяемых параметров состояния геодинамической системы, в который входят: геодезические отметки мобильных пунктов H_{M1} , H_{M2} , H_{M3} , параметры вертикальных смещений мобильных пунктов u_{M1} , u_{M2} , u_{M3} , масса MK маскона, аппроксимирующего аномальное гравитационное поле, и масса δMK , аппроксимирующая изменение (вариацию) аномального гравитационного поля. Масса маскона MK аппроксимирует влияние конуса вулкана, а через массу δMK может быть определена масса маскона MO , аппроксимирующего влияние пустого шарового маскона в верхней части магматической камеры, $\Phi(t,t-1)$ – переходная матрица, показывающая закономерность изменений значений параметров от эпохи $t-1$ к эпохе t .

Интервал времени между эпохами Δt постоянный и равен $\Delta t = 2$ месяца (61 сутки). Выполняются четыре эпохи нивелирных и гравиметрических наблюдений в течение шести месяцев. В соответствии с работой [4] нами была смоделирована следующая хронология событий эксперимента. Первая эпоха наблюдений была сделана 7 мая. Ровно через сутки – 8 мая началось извержение вулкана. Вторая, третья и четвертая эпохи наблюдений выполнялись соответственно 7 июля, 6 сентября и 6 ноября.

На протяжении всего периода наблюдений (с 1-й по 4-ю эпоху) происходят вертикальные движения физической поверхности вблизи вулкана. Модель вертикальных движений задана нами как равномерное вращение одного жесткого блока (плиты), на котором находятся пункты $M1$, $M2$, $M3$ [2]. Ось вращения параллельна линии $M2-M3$ и находится на расстоянии 0.95 км от нее и на расстоянии 0.50 км от пункта $M1$. Угловая скорость вращения плиты ω

является постоянной и равна $\omega = 1.95 \cdot 10^{-5}$ рад/год. При таком расположении оси и значении угловой скорости модельные смещения пунктов М1, М2, М3 за шесть месяцев составили $u_{M1} = -48.70 \text{ мм}$, $u_{M2} = 92.53 \text{ мм}$, $u_{M3} = 92.53 \text{ мм}$.

Модельные значения отметок пунктов в четыре эпохи представлены в таблице:

Таблица. Модельные значения отметок пунктов М1, М2 и М3

Пункт	H(t = 1) (мм)	H(t = 2) (мм)	H(t = 3) (мм)	H(t = 4) (мм)
М1	1151060.00	1151044.00	1151028.00	1151011.00
М2	1365190.00	1365221.00	1365252.00	1365283.00
М3	1280610.00	1280641.00	1280672.00	1280703.00

Гравитационное поле в первую эпоху наблюдений характеризуется значением силы тяжести, вызванной притяжением бесконечной горизонтальной плиты толщиной плиты $dH = 8$ км и шара, аппроксимирующего конус вулкана. Плотность масс $\delta = 2.63 \text{ г/см}^3$.

Для вычисления влияния конуса вулкана в 1-ю эпоху необходимо знать массу шара $MK(t=1)$, аппроксимирующего этот конус. Для радиуса шара $RK(t=1) = 500$ м и плотности $\delta = 2.63 \text{ г/см}^3$, получим массу:

$$MK(t=1) = \frac{4}{3} \pi [RK(t=1)]^3 \delta = 1.37706 \cdot 10^{15} \text{ г.}$$

Масса шара, аппроксимирующего магматическую камеру (магматический очаг) вулкана:

$$MO(t=1) = \frac{4}{3} \pi R^3 \delta = 1.72133 \cdot 10^{17} \text{ г,}$$

где $R = 2500 \text{ м}$ – радиус шара, аппроксимирующего магматический очаг вулкана в 1-ю эпоху.

Аномалия силы тяжести для 2-й, 3-й и 4-й эпох будет вызвана излиянием вещества из магматической камеры и увеличившейся массой конуса вулкана. Для построения модельных значений соответствующих этим массам шаровых масконов необходимо задать закон расхода магмы. Моделирование расхода магмы $W(t)$ в моменты времени t выполнялось в соответствии с экспоненциальным законом [3]

$$W(t) = W_0 e^{-W_0 t / \Delta B}, \quad (9)$$

где W_0 – начальный расход магмы; ΔB – избыток магмы в очаге; t – время от начала извержения.

Были выбраны следующие параметры для закона расхода магмы. Начальный расход магмы $W_0 = 1042 \text{ т/с}$ (1042 тонны в секунду). Избыток магмы в очаге $\Delta B = 1.12 \cdot 10^7$ тонн.

Следствием закона (9) будет формула расчета количества магмы, извергнутой ко времени t с начала извержения $M_{изл.}(t) = \Delta B(1 - e^{-W_0 t / \Delta B})$. Время с начала извержения составляет 60 суток для второй эпохи, 121 и 182

суток для третьей и четвертой эпох соответственно. Получаем с учетом заданных нами параметров и их размерностей следующие значения массы излившейся из резервуара магмы:

$$M_{изл.}(t = 2) = 1.12 * 10^7 * (1 - e^{-1000 * 60 * 24 * 60 * 60 / 1.16 * 10^7}) = 4.28 * 10^9 \text{ тонн};$$

$$M_{изл.}(t = 3) = 1.12 * 10^7 * (1 - e^{-1000 * 121 * 24 * 60 * 60 / 1.16 * 10^7}) = 6.96 * 10^9 \text{ тонн};$$

$$M_{изл.}(t = 4) = 1.12 * 10^7 * (1 - e^{-1000 * 182 * 24 * 60 * 60 / 1.16 * 10^7}) = 8.61 * 10^9 \text{ тонн}.$$

Этим значениям с учетом плотности $\delta = 2.63 \text{ г/см}^3$ соответствуют радиусы пустых шаровых масконов в верхней части магматического очага для 2-й, 3-й и 4-й эпох. Применяя формулу связи радиуса и объема шара, получаем:

$$RO(t = 2) = 724 \text{ м}; RO(t = 3) = 855 \text{ м}; RO(t = 4) = 921 \text{ м}.$$

При извержении вулкана не все вещество остается в конусе вулкана и на его поверхности, т.к. его часть выбрасывается в атмосферу. Поэтому примем, что в конусе остается 70% от излившегося из магматического резервуара вещества в эпохи 2 и 3, и 90% в эпоху 4. Таким образом, получаем массу конуса вулкана в эпохи 2, 3 и 4:

$$MK(t = 2) = MK(t = 1) + M_{изл.}(t = 2) * 0.7 = 4.305 * 10^9 \text{ тонн};$$

$$MK(t = 3) = MK(t = 1) + M_{изл.}(t = 3) * 0.7 = 6.200 * 10^9 \text{ тонн};$$

$$MK(t = 4) = MK(t = 1) + M_{изл.}(t = 4) * 0.9 = 7.746 * 10^9 \text{ тонн}.$$

Этим значениям соответствуют радиусы шаровых масконов, аппроксимирующих конус для 2-й, 3-й и 4-й эпох:

$$RK(t = 2) = 731 \text{ м}; RK(t = 3) = 826 \text{ м}; RK(t = 4) = 889 \text{ м}.$$

Смоделированные массы масконов, как функции пространства и времени, позволили нам описать дискретно гравитационное поле в каждую эпоху – через вычисленные значения компонент уклонений отвесной линии ξ , η и силы тяжести g для всех пяти пунктов геодезической сети (значения здесь не приводятся ввиду ограничений по объему статьи).

Таким образом, нами построена физико-математическая модель вертикальных движений земной поверхности и изменений гравитационного поля в вулканической области, для корректной идентификации которой необходима совместная математическая обработка пространственно-временных рядов разнородных комплексных нивелирных и гравиметрических наблюдений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Панкрушин В.К. Математическое моделирование и идентификация геодинамических систем. – Новосибирск: СГГА, 2002.
2. Панкрушин В.К. Губонин П.Н., Дементьев Ю.В. Автоматизация математической обработки и интерпретации геодезических наблюдений за движениями и деформациями / Под ред. Панкрушина В.К.: Учебное пособие. – Новосибирск: НИИГАиК, 1989.
3. Большое трещинное Толбачинское извержение. (1975 – 1976 гг., Камчатка). Отв. редактор С.А.Федотов. – М.: Наука, 1984.

ИДЕНТИФИКАЦИОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ: МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ДИНАМИКОЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ В ВУЛКАНИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ

В работе [1] построена физико-математическая модель динамики вертикальных движений земной поверхности и гравитационного поля в вулканической области. В настоящей работе описывается пример моделирования системы наблюдений за вертикальными движениями и изменением гравитационного поля. Система наблюдений включает в себя пространственно-временные ряды комплексных наблюдений нивелирных превышений и абсолютных значений ускорения силы тяжести [2].

Введение в вектор параметров аномальных масс позволяет компактно описывать локальное гравитационное поле. По значениям и координатам этих масс могут быть вычислены компоненты уклонений отвесной линии ξ , η и аномалия силы тяжести Δg для любой точки геодинимической системы.

С учетом этого подхода система наблюдений моделируется линейным уравнением

$$Y(t) = A(t) X_R(t) + \delta(t), \quad (1)$$

где $A(t)$ – матрица коэффициентов уравнений наблюдений; $Y(t)$ – вектор измеренных величин; $X_R(t)$ – расширенный вектор определяемых параметров состояния геодинимической системы, в который входят: отметки H_i пунктов сети наблюдений, аномальные массы, параметры движений пунктов сети наблюдений; $\delta(t)$ – вектор ошибок наблюдений.

Для первой эпохи (до извержения) расширенный вектор параметров будет состоять только из отметок мобильных пунктов H_{M1}, H_{M2}, H_{M3} и массы конуса вулкана MK :

$$X_R(t=1) = (H_{M1}, H_{M2}, H_{M3}, MK)^T. \quad (2)$$

Для эпох 2, 3 и 4 расширенный вектор параметров будет состоять из отметок мобильных пунктов H_{M1}, H_{M2}, H_{M3} , характеристик вертикальных движений этих пунктов, массы конуса вулкана MK и массы δMK , аппроксимирующей изменение (вариацию) аномального гравитационного поля. Например, если принимается гипотеза равномерного произвольного вертикального движения каждого мобильного пункта, то расширенный вектор параметров для эпохи 2, 3 и 4 будет:

$$X_R = (H_{M1}, H_{M2}, H_{M3}, u_{M1}, u_{M2}, u_{M3}, MK, \delta MK)^T, \quad (3)$$

где u_{M1}, u_{M2}, u_{M3} – вертикальные смещения мобильных пунктов между соседними эпохами.

Нами были смоделированы нивелирные превышения для всех четырех эпох. Были найдены составляющие аномалий силы тяжести в пунктах нивелирной сети по осям x , y и z . Аномалии силы тяжести вызваны влиянием

шарового маскона, моделирующего конус вулкана и пустого шарового маскона в верхней части магматической камеры вулкана.

При моделировании учитывался вид уравнений наблюдений (уравнения 5, 6 в [1]).

Модельные превышения между пунктами (без поправок за влияние аномальных масс) для четырех эпох наблюдений по данным отметкам пунктов представлены в табл. 1:

Таблица 1. Модельные превышения между пунктами сети для четырех эпох наблюдений и длины ходов нивелирования

	Ход (кон-нач)	Длина хода (км)	$h_{ij}(t = 1)$ (мм)	$h_{ij}(t = 2)$ (мм)	$h_{ij}(t = 3)$ (мм)	$h_{ij}(t = 4)$ (мм)
1	C1-M2	4.2	-180170,0	-180200,8	-180231,7	-180262,5
2	C1-M1	3.2	33960,0	33976,2	33992,5	34008,7
3	M2-M1	2.0	214130,0	214177,1	214224,2	214271,2
4	M3-M2	2.8	-84580,0	-84580,0	-84580,0	-84580,0
5	M3-M1	2.0	129550,0	129597,1	129644,2	129691,2
6	C2-M1	3.0	52710,0	52726,2	52742,5	52758,7
7	C2-M3	3.6	-76840,0	-76870,8	-76901,7	-76932,5

Далее вычисляются поправки в превышения, вызванные излиянием вещества из магматической камеры и увеличившейся массой конуса вулкана (табл. 2), по формуле:

$$\delta h_{ij}(t) = (\Delta g_{ix} \Delta x_{ij} + \Delta g_{iy} \Delta y_{ij}) / \gamma, \quad (4)$$

где $\gamma = 980000$ мГал – нормальное значение силы тяжести.

Таблица 2. Поправки в превышения, вызванные влиянием массы шара, аппроксимирующего массу конуса в 1-ю эпоху

	Ход	Δx_{ij} (м)	Δy_{ij} (м)	Δg_{ix} [мкгал]	Δg_{iy} [мкгал]	δh_{ij} [мм]
1	M2-C1	4199.95	0	-1479.72	0.00	6,3416
2	M1-C1	2842.73	1468.92	-458,08	154,36	1,0974
3	M1-M2	-1357.22	1468.92	-1685,18	154,36	-2,5652
4	M2-M3	-127.01	-2792.05	-1571,25	363,55	0,8321
5	M1-M3	-1484.23	-1323.13	-549,61	517,90	-0,1332
6	M1-C2	1997.81	-2243.86	-423,36	220,32	1,3675
7	M3-C2	3482.04	-920.73	-309,43	429,51	1,5030

Аналогично вычисляются поправки в превышения, вызванные влиянием массы шара, аппроксимирующего массу конуса для эпох 2, 3 и 4. Вычисленные поправки вводим в модельные превышения (табл. 1). В превышения эпох 2, 3 и 4 вводятся также поправки, вызванные появлением пустого шарового маскона в верхней части магматического очага. Вычисляются они так же, как и поправки за влияние конуса по формуле (4). Затем с помощью датчика случайных чисел вводим ошибки измерений, соответствующие точности нивелирования $\mu = 0.5$ мм/км. При этом учтем длины линий нивелирования. Стандарт случайной

ошибки, вводимой в каждое превышение, будет равен $\sigma_{\delta h} = 0.5 \text{ мм} \sqrt{L}$, где L – длина хода в км.

Результаты вычислений значений составляющих аномалии силы тяжести по осям координат в мкгалах, вызванных массой конуса вулкана для всех четырех эпох, представлены в табл. 3.

Таблица 3. Составляющие аномалий силы тяжести, вызванных массой конуса вулкана

Пункт	1-я эпоха			2-я эпоха		
	Δg_{ix}	Δg_{iy}	Δg_{iz}	Δg_{ix}	Δg_{iy}	Δg_{iz}
C1	-252,62	0,00	-21,05	-780,54	0,00	-95,11
C2	-183,17	131,92	-17,10	-566,86	408,26	-78,33
M1	-663,54	308,71	-112,22	-2001,34	931,12	-484,96
M2	-2706,81	0,00	-480,94	-7751,71	0,00	-2372,52
M3	-435,69	727,10	-105,32	-1317,67	2198,99	-500,52
Пункт	3-я эпоха			4-я эпоха		
	Δg_{ix}	Δg_{iy}	Δg_{iz}	Δg_{ix}	Δg_{iy}	Δg_{iz}
C1	-1117,43	0,00	-153,77	-1389,77	0,00	-205,97
C2	-812,14	584,92	-127,12	-1010,64	727,88	-170,65
M1	-2830,99	1317,12	-770,77	-3490,44	1623,93	-1020,60
M2	-10650,54	0,00	-3819,13	-12848,84	0,00	-5061,25
M3	-1864,86	3112,17	-813,76	-2299,62	3837,72	-1090,86

Результаты вычислений значений составляющих аномалии силы тяжести по осям координат, вызванных появлением пустого шарового маскона в верхней части магматической камеры в мкгалах, даны в табл. 4.

Таблица 4. Составляющие аномалий силы тяжести, вызванных появлением пустого шарового маскона в верхней части магматической камеры

Пункт	1-я эпоха			2-я эпоха		
	Δg_{ix}	Δg_{iy}	Δg_{iz}	Δg_{ix}	Δg_{iy}	Δg_{iz}
C1	0	0	0	529,95	0,00	-284,77
C2	0	0	0	396,52	-285,58	-249,43
M1	0	0	0	836,67	-389,26	-845,38
M2	0	0	0	879,82	0,00	-1663,93
M3	0	0	0	464,69	-775,50	-922,06
Пункт	3-я эпоха			4-я эпоха		
	Δg_{ix}	Δg_{iy}	Δg_{iz}	Δg_{ix}	Δg_{iy}	Δg_{iz}
C1	849,22	0,00	-474,88	1046,28	0,00	-596,57
C2	636,84	-458,66	-416,80	785,51	-565,74	-524,16
M1	1302,77	-606,11	-1370,43	1582,34	-736,18	-1697,56
M2	1325,53	0,00	-2603,39	1584,74	0,00	-3170,53
M3	720,66	-1202,67	-1486,42	873,62	-1457,94	-1836,35

Измеренные в каждую эпоху на каждом пункте i нивелирной сети значения силы тяжести g_i моделируем с учетом фонового нормального поля силы тяжести γ , влияния плоского слоя толщиной 8 км, конуса вулкана, пустого шарового маскона в верхней части магматической камеры и вертикального смещения пунктов u_i :

$$g_i = \gamma + \Delta g_i^{\text{плиты}} + \Delta g_i^{\text{конуса}} + \Delta g_i^{\text{магм.кам.}} + \Delta g_i^{\text{смещ.}}. \quad (5)$$

Бесконечная горизонтальная плита плотностью δ и толщиной dH создает в точке над плитой аномалию силы тяжести

$$\Delta g = 2 \pi G \delta dH.$$

Здесь $G = 6.673 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/(\text{Гал с}^2)$ – гравитационная постоянная. При этом аномалия силы тяжести не зависит от высоты точки над плитой.

Влияние бесконечной плиты на аномалию силы тяжести в любой точке рассматриваемой нивелирной сети составит:

$$\Delta g_{\text{изнл.}} = 2 \pi G \delta dH = 882158.7 \text{ мкгал.}$$

В (5) $\Delta g_i^{\text{смещ.}}$ вычисляется с учетом вертикального градиента силы тяжести: $\Delta g_i^{\text{смещ.}} = -0.3086 u_i$.

Также учитываем, что

$$\Delta g_i = \sqrt{\Delta g_{ix}^2 + \Delta g_{iy}^2 + \Delta g_{iz}^2}. \quad (6)$$

В эти значения g_i вводятся ошибки измерений δg с учетом точности 5 мкгал. В совокупности с нивелирными измерениями мы получаем вектор измеренных величин $Y(t)$ системы наблюдений (1).

В табл. 5 приводятся значения псевдослучайных нормально распределенных чисел, которые использовались как ошибки измерений нивелирных превышений и абсолютных значений силы тяжести для эпох 1, 2, 3 и 4.

Таблица 5. Смоделированные псевдослучайные ошибки измерений

	Измерение	t = 1	t = 2	t = 3	t = 4
1	δh_1 (мм)	-0,428	-0,380	-0,359	-0,132
2	δh_2 (мм)	0,592	-0,456	-0,014	0,186
3	δh_3 (мм)	-0,815	-0,308	-0,192	0,089
4	δh_4 (мм)	-0,774	-0,557	-0,286	0,946
5	δh_5 (мм)	0,792	-0,345	-0,021	0,014
6	δh_6 (мм)	0,007	0,788	-1,289	0,339
7	δh_7 (мм)	-0,525	0,003	-0,419	-0,718
8	δg_{C1} (мкгал)	-0,638	-1,276	0,959	-1,699
9	δg_{C2} (мкгал)	-6,571	9,388	-2,389	2,687
10	δg_{M1} (мкгал)	2,892	-9,401	-2,115	-6,965

11	δg_{M2} (мкгал)	8,906	-0,580	6,049	3,207
12	δg_{M3} (мкгал)	0,474	3,484	-4,717	4,512

Приведем результаты моделирования нивелирных и гравиметрических наблюдений за вертикальными движениями и гравитационным полем в вулканической области для всех 4-х эпох с уже введенными случайными ошибками.

Нами предложена модель системы наблюдений за вертикальными движениями земной поверхности и изменениями гравитационного поля в вулканической области. Смоделированные пространственно-временные ряды разнородных комплексных наблюдений нивелирных превышений и абсолютных значений силы тяжести (табл. 6) должны обрабатываться совместно в ходе выполнения вычислительного идентификационного эксперимента.

Таблица 6. Смоделированные измерения превышений и абсолютных значений силы тяжести в эпохи 1, 2, 3, 4.

	Измерение	Y(t = 1)	Y(t = 2)	Y(t = 3)	Y(t = 4)
1	h_1 (мм)	-180164,54	-180186,12	-180211,88	-180237,93
2	h_2 (мм)	33962,16	33977,08	33994,51	34011,63
3	h_3 (мм)	214126,28	214170,58	214215,84	214261,57
4	h_4 (мм)	-84580,46	-84579,38	-84578,44	-84575,85
5	h_5 (мм)	129550,99	129596,39	129643,87	129690,93
6	h_6 (мм)	52711,38	52729,74	52742,93	52762,67
7	h_7 (мм)	-76839,49	-76868,26	-76899,18	-76929,76
8	g_{C1} (мкгал)	980882137,0	980881766,7	980881531,5	980881354,7
9	g_{C2} (мкгал)	980882135,0	980881830,9	980881612,8	980881466,8
10	g_{M1} (мкгал)	980882049,4	980880788,2	980880027,0	980879449,3
11	g_{M2} (мкгал)	980881686,7	980878007,0	980875727,8	980873902,7
12	g_{M3} (мкгал)	980882053,9	980880691,4	980879836,5	980879208,2

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мазуров Б.Т., Панкрушин В.К. Идентификационный эксперимент: Построение физико-математической модели динамики земной поверхности и гравитационного поля в вулканической области. Сб. материалов Международной выставки и научного конгресса «ГЕО-СИБИРЬ-2005». – Новосибирск, 2005.

2. Панкрушин В.К. Математическое моделирование и идентификация геодинамических систем. – Новосибирск: СГГА, 2002.

© Б.Т. Мазуров, В.К. Панкрушин, 2005

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ИДЕНТИФИКАЦИОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ: СОВМЕСТНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НИВЕЛИРНЫХ И ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ДИНАМИКОЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ В ВУЛКАНИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ

Настоящая работа является продолжением работ [1, 2] и описывает вычислительный идентификационный эксперимент по совместной математической обработке и интерпретации смоделированных в работе [2] пространственно-временных рядов комплексных наблюдений нивелирных превышений и абсолютных значений ускорения силы тяжести. Исследуемой геодинамической системой являются вертикальные движения земной поверхности и гравитационное поле в районе действующего вулкана [1].

Математическая обработка выполнялась с использованием алгоритма рекуррентного фильтра Калмана-Бьюси (ФКБ) [3] аналогично тому, как это описано в работе [4].

Для первой эпохи (до извержения) расширенный вектор параметров будет состоять только из отметок мобильных пунктов H_{M1}, H_{M2}, H_{M3} и массы конуса вулкана MK :

$$X_R(t=1) = (H_{M1}, H_{M2}, H_{M3}, MK)^T.$$

Матрица $A(t)$ коэффициентов уравнений наблюдений формируется известным образом: каждое измерение $y_i(t)$ выражается как функция от параметров $X_R(t)$. Частные производные этих функций будут коэффициентами матрицы $A(t)$. Покажем это на примере превышения $h_1(t=1)$. С учетом схемы сети (рис. 1 в [1]) это превышение выражаем как функцию от вектора параметров:

$$h_1(t=1) = H_{M2}(t=1) - H_{C1} + k_{h_1}^{MK}(t=1)MK(t=1) + \delta_{h_1}, \quad (1)$$

где $H_{M2}(t=1)$ – отметка пункта M_2 в эпоху 1; H_{C1} – отметка исходного (стабильного) пункта C_1 ; $MK(t=1)$ – масса маскона, моделирующего конус вулкана в эпоху 1; δ_{h_1} – ошибка измерения превышения между пунктами C_1 и M_2 ; $k_{h_1}^{MK}(t=1)$ – коэффициент, учитывающий влияние этого маскона на превышение $h_1(t=1)$. Величина $k_{h_1}^{MK}(t=1)$ вычисляется по известным координатам начального, конечного пунктов линии нивелирования и координатам центра шарового маскона Sk_1 .

Пример уравнения наблюдений абсолютного значения силы тяжести g – уравнение наблюдений g на пункте C_1 в эпоху $t=1$:

$$g_{C1}(t=1) = \gamma + \Delta g^{плиты} + k_{g_{C1}}^{MK}(t=1)MK(t=1) + \delta_{g_{C1}}. \quad (2)$$

В этом уравнении $\delta_{g_{c1}}$ – ошибка измерения силы тяжести на пункте C_1 ; коэффициент $k_{g_{c1}}^{MK}(t=1)$ при $MK(t=1)$ вычисляем по известным координатам пункта C_1 линии нивелирования и координатам центра шарового маскона Sk1.

В эпохи 2, 3 и 4 в уравнениях наблюдений присутствуют слагаемые, учитывающие влияние не только увеличивающейся массы конуса вулкана (маскон MK) но и уменьшение массы в магматическом очаге (маскон MO), а также изменение высоты мобильных пунктов (через вертикальный градиент).

Координаты центра шарового маскона Sk1 достаточно знать приближенно (не грубее 50 метров). Для их определения используем результаты геодезических измерений размеров и формы конуса вулкана. Например, в работе [5] описана методика и результаты определения расхода магмы и размеров конуса при извержении Толбачинского вулкана.

Соотношение весов превышений и измерений силы тяжести устанавливалось с учетом точности измерений: $\mu_h = 0.5 \text{ мм/км}$, $\mu_g = 5 \text{ мкгал}$.

Веса превышений $p_{h_i} = \frac{1}{L_i}$, где L_i – длина хода в км (табл. 1 в [2]). Вес измерения абсолютного значения силы тяжести для всех пунктов сети $p_{g_i} = 0.01$.

Через сутки после наблюдений первой эпохи началось извержение вулкана. При этом происходят одновременно вертикальные движения мобильных пунктов M_1, M_2, M_3 , уменьшение массы магматической камеры на величину MO и увеличение массы конуса MK на величину δMK . Соответственно меняется и гравитационное поле.

Для создания модели вертикальных движений мобильных пунктов и изменения гравитационного поля на протяжении всего периода наблюдений, мы воспользуемся понятием ступенчатой функции [3] – функции, которая меняет свои значения только в дискретной последовательности точек разрыва. Это означает, что для каждого интервала времени между соседними эпохами принимается свое значение смещения или изменения массы, независимое от смещения или изменения массы в другие интервалы времени.

Расширенный вектор параметров для эпохи 2 будет:

$$X_{R1} = (H_{M1}, H_{M2}, H_{M3}, u_{M1}, u_{M2}, u_{M3}, MK, \delta MK, MO)^T,$$

где u_{M1}, u_{M2}, u_{M3} – вертикальные смещения мобильных пунктов между эпохами 1 и 2.

Масса конуса увеличивается в результате излияния части вещества из магматической камеры. Определение характеристик процесса излияния является одной из важнейших задач при изучении вулканизма. Заметим, что адекватная математическая модель этого процесса будет работать на уточнение параметров, которые мы оцениваем по геодезическим и гравиметрическим наблюдениям. Однако, параметры экспоненциального закона можно определить только после нескольких эпох наблюдений, причем приближениями – модель должна настраиваться. Одновременно должна настраиваться еще одна

важнейшая величина – процент оставшегося в конусе вулкана и на его поверхности вещества, т.к. его часть выбрасывается в атмосферу.

Пока мы примем, что в конусе остается 70% от излившегося из магматического резервуара вещества. Неточность априорного задания этой величины отразится на поправках в результаты измерений после математической обработки – они резко возрастут.

В качестве начальных оценок H_{M1}, H_{M2}, H_{M3} и массы конуса вулкана MK и их ковариаций мы используем оценки, полученные при обработке наблюдений первой эпохи. Начальные оценки u_{M1}, u_{M2}, u_{M3} и MO найдем по четырем необходимым измерениям второй эпохи h_1, h_2, h_7, g_{c1} . Используем при этом уравнения наблюдений, аналогичные (1) и (2).

Затем обрабатываем результаты наблюдений третьей и четвертой эпох. Заметим, что при обработке третьей эпохи вектор параметров расширится за счет включения параметра δMO , который останется и в составе вектора параметров четвертой эпохи:

$$X_{R1} = (H_{M1}, H_{M2}, H_{M3}, u_{M1}, u_{M2}, u_{M3}, MK, \delta MK, MO, \delta MO)^T.$$

Напомним, что мы моделируем изменения отметок и масс масконов с использованием ступенчатых функций – допускаем независимость этих величин в разные интервалы времени. Поэтому и в третью эпоху и в четвертую вычисляем вначале по необходимым измерениям начальные оценки $u_{M1}, u_{M2}, u_{M3}, \delta MK, \delta MO$. За исходные оценки параметров $H_{M1}, H_{M2}, H_{M3}, MK, MO$ берутся оценки, полученные по наблюдениям предыдущей эпохи.

Полученные оценки отметок мобильных пунктов, их вертикальных смещений, масс масконов и их изменений от эпохи к эпохе позволяют выдвигать конкурирующие гипотезы закономерностей движений и изменений масс. Замечаем, что оценки смещений u_{M1}, u_{M2}, u_{M3} примерно равны в разные эпохи – отметки мобильных пунктов меняются с постоянной скоростью. Сложнее подобрать закон изменения во времени масс MK, MO . Увеличение массы конуса δMK от эпохи к эпохе будет снижаться. Причиной этому является падение со временем избыточного давления в магматическом очаге, и как следствие, уменьшение излияния магмы, пропорционального этому давлению. Закон расхода магмы при извержении близок к экспоненциальному [5]. Для определения закона расхода магмы воспользуемся оценками параметров, вычисленных по модели со ступенчатыми функциями. Расчет количества магмы, извергнутой ко времени τ с начала извержения выполняется по формуле $M_{изл.}(\tau) = \Delta B(1 - e^{-W_0\tau / \Delta B})$, где W_0 – начальный расход магмы; ΔB – избыток магмы в очаге. Для трех эпох будем иметь три таких нелинейных уравнения с двумя неизвестными ΔB и W_0 . Мы определили эти неизвестные графическим способом. Избыток магмы в очаге $\hat{\Delta B} = 1.12 \cdot 10^7$ тонн. Начальный расход магмы $\hat{W}_0 = 0.90 \cdot 10^7$ тонн / сутки = 1042 тонн / секунда.

Экспоненциальный закон излияния магмы с этими параметрами мы использовали для составления переходных матриц при обработке наблюдений с другими тремя моделями (произвольного смещения, движений жестких блоков и вращения жесткой плиты). Необходимо учесть, что в общем случае закон изменения параметров от эпохи к эпохе может быть различным. В нашем примере это касается масс масконов – увеличение этих масс от эпохи к эпохе неодинаково для разных пар соседних эпох. Сложно определить δMK по оценке MO – необходимо знать процент оставшегося на конусе вещества в каждую эпоху. Эти величины могут быть определены по оценкам параметров модели 1. Но мы выполнили адаптацию (настройку) этих величин по критерию $\min trK_{XR}(X, t)$ с использованием фильтра Калмана-Бьюси. В результате установили, что в эпоху 2 и 3 доля оставшегося на конусе вещества составляла 70%, а в эпоху 4 – 90%.

Эта модель перераспределения масс масконов, аппроксимирующая динамику изменения гравитационного поля, сочеталась с тремя моделями вертикальных движений земной поверхности. Если принимать гипотезу произвольного смещения пунктов (модель 2), то расширенный вектор параметров будет:

$$X_{R1} = (H_{M1}, H_{M2}, H_{M3}, u_{M1}, u_{M2}, u_{M3}, MK, \delta MK)^T,$$

где u_{M1}, u_{M2}, u_{M3} – вертикальные смещения мобильных пунктов между соседними эпохами.

Третья модель соответствует ситуации, когда пункты C_1 и C_2 расположены на неподвижном жестком блоке, пункт M_1 расположен на подвижном жестком блоке A , а пункты M_2 и M_3 расположены на другом подвижном жестком блоке B . Расширенный вектор параметров будет:

$$X_{R2} = (H_{M1}, H_{M2}, H_{M3}, u_A, u_B, MK, \delta MK)^T,$$

где u_A, u_B – вертикальные смещения блоков между соседними эпохами.

Согласно гипотезе 4 вертикальные движения мобильных пунктов M_1, M_2, M_3 можно объяснить вращением жесткой плиты вокруг оси параллельной линии M_2M_3 . Соотношение полученных по предыдущим моделям оценок смещений пункта M_1 и пунктов M_2, M_3 позволяет принять при моделировании расположение оси вращения на расстоянии 0.50 км от M_1 и 0.95 км от линии M_2M_3 .

Учитывая малость угла поворота $\omega \Delta t$, связь отметок пунктов двух эпох обеспечивается введением угловой скорости вращения плиты ω (в рад/год). Расширенный вектор параметров в этом случае будет:

$$X_{R3} = (H_{M1}, H_{M2}, H_{M3}, \omega, MK, \delta MK)^T.$$

При обработке наблюдений по всем конкурирующим моделям получены оценки параметров состояния и их точностные характеристики. Приведем в табл. 1 те из них, которые отражают динамику земной поверхности и гравитационного поля – скорости вертикальных движений, массы масконов и их изменения для четырех эпох наблюдений по трем конкурирующим моделям.

Используя F-критерий аналогично тому, как это описано в [4], была выбрана адекватной модель 4. Согласно этой модели динамика земной поверхности описывается равномерным вращением блока с мобильными пунктами, а динамика гравитационного поля – изменениями масс поверхностного и глубинного масконов в соответствии с экспоненциальным законом излияния магмы и значениями доли остающегося на поверхности конуса излившегося вещества в эпохи 2 и 3 – 70%, в эпоху 4 – 90%.

По оценкам масс этих масконов и ковариационным матрицам векторов параметров в каждую эпоху для каждого пункта нами были вычислены оценки силы тяжести g , компонент уклонений отвесной линии ξ , η и аномалия высоты ζ на пунктах геодезической сети с оценкой их точности (табл. 2).

Таблица 1. Модельные значения параметров, их оценки и точность

X_R	t = 2			t = 3			t = 4		
	Модельные	Оценки	Точность	Модельные	Оценки	Точность	Модельные	Оценки	Точность
Модель произвольного смещения пунктов и экспоненциального закона излияния магмы									
u_{M1}	-16.23 мм	-16.09 мм	0.89 мм	-16.23 мм	-16.09 мм	0.39 мм	-16.23 мм	-16.13 мм	0.89 мм
u_{M2}	30.84 мм	30.86 мм	1.07 мм	30.84 мм	30.86 мм	0.47 мм	30.84 мм	30.82 мм	1.07 мм
u_{M3}	30.84 мм	30.05 мм	1.05 мм	30.84 мм	30.05 мм	0.46 мм	30.84 мм	31.09 мм	1.05 мм
MK	$4.39 \cdot 10^9$ тонн	$4.38 \cdot 10^9$ тонн	$4.90 \cdot 10^6$ тонн	$6.20 \cdot 10^9$ тонн	$6.19 \cdot 10^9$ тонн	$3.55 \cdot 10^6$ тонн	$4.39 \cdot 10^9$ тонн	$7.74 \cdot 10^9$ тонн	$2.94 \cdot 10^6$ тонн
δMK	$3.01 \cdot 10^9$ тонн	$3.02 \cdot 10^9$ тонн	$4.90 \cdot 10^6$ тонн	$1.81 \cdot 10^9$ тонн	$1.81 \cdot 10^9$ тонн	$1.33 \cdot 10^6$ тонн	$3.01 \cdot 10^9$ тонн	$1.55 \cdot 10^9$ тонн	$0.72 \cdot 10^6$ тонн
Модель движения жестких блоков и экспоненциального закона излияния магмы									
u_{M1}	-16.23 мм	-16.12 мм	0.85 мм	-16.23 мм	-15.66 мм	0.38	-16.23 мм	-16.13 мм	0.23 мм
$u_{M2} = u_{M3}$	30.84 мм	30.43 мм	0.89 мм	30.84 мм	31.16 мм	0.39	30.84 мм	30.96 мм	0.24 мм
MK	$4.39 \cdot 10^9$ тонн	$4.38 \cdot 10^9$ тонн	$4.71 \cdot 10^6$ тонн	$6.20 \cdot 10^9$ тонн	$6.19 \cdot 10^9$ тонн	$3.47 \cdot 10^6$ тонн	$4.39 \cdot 10^9$ тонн	$7.74 \cdot 10^9$ тонн	$2.92 \cdot 10^6$ тонн
δMK	$3.01 \cdot 10^9$ тонн	$3.02 \cdot 10^9$ тонн	$4.71 \cdot 10^6$ тонн	$1.81 \cdot 10^9$ тонн	$1.81 \cdot 10^9$ тонн	$1.30 \cdot 10^6$ тонн	$3.01 \cdot 10^9$ тонн	$1.55 \cdot 10^9$ тонн	$0.71 \cdot 10^6$ тонн
Модель вращения жесткой плиты и экспоненциального закона излияния магмы									
ω	$1.95 \cdot 10^{-5}$ рад/год	$1.92 \cdot 10^{-5}$ рад/год	$3.05 \cdot 10^{-7}$ рад/год	$1.95 \cdot 10^{-5}$ рад/год	$1.94 \cdot 10^{-5}$ рад/год	$1.38 \cdot 10^{-7}$ рад/год	$1.95 \cdot 10^{-5}$ рад/год	$1.95 \cdot 10^{-5}$ рад/год	$0.82 \cdot 10^{-7}$ рад/год
u_{M1}	-16.23 мм	-16.04 мм	0.25 мм	-16.23 мм	-16.16 мм	0.12 мм	-16.23 мм	-16.24 мм	0.07 мм
$u_{M2} = u_{M3}$	30.84 мм	30.48 мм	0.48 мм	30.84 мм	30.70 мм	0.22 мм	30.84 мм	30.86 мм	0.13 мм
MK	$4.39 \cdot 10^9$ тонн	$4.38 \cdot 10^9$ тонн	$4.60 \cdot 10^6$ тонн	$6.20 \cdot 10^9$ тонн	$6.18 \cdot 10^9$ тонн	$3.50 \cdot 10^6$ тонн	$4.39 \cdot 10^9$ тонн	$7.74 \cdot 10^9$ тонн	$2.92 \cdot 10^6$ тонн
δMK	$3.01 \cdot 10^9$ тонн	$3.02 \cdot 10^9$ тонн	$4.60 \cdot 10^6$ тонн	$1.81 \cdot 10^9$ тонн	$1.81 \cdot 10^9$ тонн	$1.31 \cdot 10^6$ тонн	$3.01 \cdot 10^9$ тонн	$1.55 \cdot 10^9$ тонн	$0.71 \cdot 10^6$ тонн

Таблица 2. Значения основных трансформант гравитационного поля, (модельные и полученные в результате обработки по ФКБ)

Пункт		$g_z(\text{мкгал})$	ξ''	η''	$\zeta(\text{см})$	$g_z(\text{мкгал})$	ξ''	η''	$\zeta(\text{см})$	$g_z(\text{мкгал})$	ξ''	η''	$\zeta(\text{см})$
		$t = 2$				$t = 3$				$t = 4$			
C_1	Модель	980881768.0	$5.3 \cdot 10^{-2}$	0.0	0.92	980881531.5	$5.6 \cdot 10^{-2}$	0.0	1.38	980881354.7	$7.2 \cdot 10^{-2}$	0.0	1.72
	Оценка	980881767.4	$5.2 \cdot 10^{-2}$	0.0	0.92	980881529.8	$5.6 \cdot 10^{-2}$	0.0	1.38	980881355.4	$7.2 \cdot 10^{-2}$	0.0	1.72
	Точность	0.37	$3.7 \cdot 10^{-4}$	0.0	$1.2 \cdot 10^{-3}$	0.70	$3.3 \cdot 10^{-4}$	0.0	$1.2 \cdot 10^{-3}$	0.72	$3.0 \cdot 10^{-4}$	0.0	$1.1 \cdot 10^{-3}$
C_2	Модель	980881821.5	$3.6 \cdot 10^{-2}$	$-2.6 \cdot 10^{-2}$	0.88	980881612.8	$3.7 \cdot 10^{-2}$	$-2.6 \cdot 10^{-2}$	1.31	980881466.8	$4.7 \cdot 10^{-2}$	$-3.4 \cdot 10^{-2}$	1.63
	Оценка	980881821.0	$3.6 \cdot 10^{-2}$	$-2.6 \cdot 10^{-2}$	0.88	980881614.5	$3.6 \cdot 10^{-2}$	$-2.6 \cdot 10^{-2}$	1.31	980881463.2	$4.7 \cdot 10^{-2}$	$-3.4 \cdot 10^{-2}$	1.64
	Точность	0.33	$2.8 \cdot 10^{-4}$	$2.0 \cdot 10^{-4}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	0.61	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$1.8 \cdot 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$	0.63	$2.3 \cdot 10^{-4}$	$1.6 \cdot 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$
M_1	Модель	980880797.6	$2.5 \cdot 10^{-1}$	$-1.2 \cdot 10^{-1}$	1.46	980880027.0	$3.2 \cdot 10^{-1}$	$-1.5 \cdot 10^{-1}$	2.15	980879449.3	$4.0 \cdot 10^{-1}$	$-1.9 \cdot 10^{-1}$	2.67
	Оценка	980880796.4	$2.5 \cdot 10^{-1}$	$-1.2 \cdot 10^{-1}$	1.46	980880027.6	$3.2 \cdot 10^{-1}$	$-1.5 \cdot 10^{-1}$	2.15	980879453.7	$4.0 \cdot 10^{-1}$	$-1.9 \cdot 10^{-1}$	2.67
	Точность	0.86	$7.7 \cdot 10^{-4}$	$3.6 \cdot 10^{-4}$	$1.9 \cdot 10^{-3}$	2.00	$6.0 \cdot 10^{-4}$	$2.8 \cdot 10^{-4}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$	2.05	$5.2 \cdot 10^{-4}$	$2.4 \cdot 10^{-4}$	$1.6 \cdot 10^{-3}$
M_2	Модель	980878007.6	1.5	0.0	2.35	980875727.8	2.0	0.0	3.39	980873902.7	2.4	0.0	4.18
	Оценка	980878008.5	1.5	0.0	2.35	980875723.0	2.0	0.0	3.39	980873897.3	2.4	0.0	4.18
	Точность	0.31	$2.2 \cdot 10^{-3}$	0.0	$3.0 \cdot 10^{-3}$	4.00	$1.4 \cdot 10^{-3}$	0.0	$2.4 \cdot 10^{-3}$	1.55	$1.1 \cdot 10^{-3}$	0.0	$1.2 \cdot 10^{-3}$
M_3	Модель	980880687.9	$1.8 \cdot 10^{-1}$	$-3.0 \cdot 10^{-1}$	1.53	980879836.5	$2.4 \cdot 10^{-1}$	$-4.0 \cdot 10^{-1}$	2.25	980879208.2	$3.0 \cdot 10^{-1}$	$-5.0 \cdot 10^{-1}$	2.80
	Оценка	980880686.6	$1.8 \cdot 10^{-1}$	$-3.0 \cdot 10^{-1}$	1.53	980879839.6	$2.4 \cdot 10^{-1}$	$-4.0 \cdot 10^{-1}$	2.25	980879201.0	$3.0 \cdot 10^{-1}$	$-5.0 \cdot 10^{-1}$	2.80
	Точность	0.98	$4.8 \cdot 10^{-3}$	$8.0 \cdot 10^{-4}$	$2.0 \cdot 10^{-3}$	2.16	$3.6 \cdot 10^{-4}$	$6.0 \cdot 10^{-4}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$	2.21	$3.1 \cdot 10^{-4}$	$5.1 \cdot 10^{-4}$	$1.7 \cdot 10^{-3}$

Закключение. Результатом совместной математической обработки и интерпретации смоделированных пространственно-временных рядов комплексных геодезических и геофизических наблюдений по алгоритму ФКБ явились оценки отметок мобильных пунктов, оценки вертикальных смещений этих пунктов, оценки аномалий силы тяжести, компонент уклонений отвесной линии и аномалия высоты на пунктах геодезической сети с оценкой их точности в 4-х эпохах. Совместная обработка нивелирных и гравиметрических наблюдений с использованием рекуррентного ФКБ позволила при адекватных моделях закономерностей движений земной поверхности и изменений масс поверхностного и глубинного масконов в соответствии с экспоненциальным законом и высокой точности наблюдений нивелирных превышений значительно повысить точность оценивания. Выполнен вычислительный эксперимент: параметрическая и структурная идентификация динамики земной поверхности и гравитационного поля в вулканической области.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мазуров Б.Т., Панкрушин В.К. Идентификационный эксперимент: построение физико-математической модели динамики земной поверхности и гравитационного поля в вулканической области. Сб. материалов Международной выставки и научного конгресса «ГЕО-СИБИРЬ-2005». – Новосибирск, 2005
2. Мазуров Б.Т., Панкрушин В.К. Идентификационный эксперимент: моделирование системы наблюдений за динамикой земной поверхности и гравитационного поля в вулканической области. Сб. материалов Международной выставки и научного конгресса «ГЕО-СИБИРЬ-2005». – Новосибирск, 2005
3. Панкрушин В.К. Математическое моделирование и идентификация геодинамических систем. – Новосибирск: СГГА, 2002.
4. Панкрушин В.К. Губонин П.Н., Дементьев Ю.В. Автоматизация математической обработки и интерпретации геодезических наблюдений за движениями и деформациями / Под ред. Панкрушина В.К.: Учебное пособие. – Новосибирск: НИИГАиК, 1989.
5. Большое трещинное Толбачинское извержение.(1975 – 1976 гг., Камчатка). Отв. редактор С.А.Федотов. – М.: Наука, 1984.

© Б.Т. Мазуров, В.К. Панкрушин, 2005

УДК 528.242: 528.286

А.С. Глазунов, А.И. Каленицкий

СГГА, Новосибирск

ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ВЫСОТ КВАЗИГЕОИДА

Астрономо-геодезия, важнейшими составляющими которой являются высшая геодезия, геодезическая гравиметрия и геодезическая астрономия, совместно с геофизикой и геологией входят в комплекс наук о Земле. Только тесное взаимодействие этих наук, о чем писал ещё Ф.Н. Красовский [1], позволит лучше понять строение Земли и земной коры, закономерности многих геодинамических процессов, которые мы наблюдаем в виде движения полюсов Земли, горизонтальных и вертикальных движениях блоков земной коры, в катастрофических землетрясениях, горных ударах и других проявлениях, изучение и предсказание которых связано не только с потребностями науки, народного хозяйства и обороны, но и с безопасностью жизнедеятельности, экологической безопасностью, то есть с устойчивостью развития территорий.

Завершение работ по созданию единой ГГС СССР и переход на новые технологии развития плановой и высотной геодезической основы, ставит перед геодезической наукой и производством новые задачи. Так Федеральная целевая программа РФ предусматривает внедрить метод спутникового нивелирования взамен традиционного геометрического нивелирования III и IV классов [2], а это требует знания высот квазигеоида с точностью не менее 5см на 100 километров, а лучше хотя бы в два раза точнее.

В последние десятилетия развитие новых астрономо-геодезических методов позволило решить многие задачи геодезии на качественно новом уровне. В нашей стране использование методов космической геодезии позволило выполнить уравнивания АГС СССР, создаваемой на протяжении нескольких десятилетий с помощью различных технических средств и в соответствии с различными инструктивными требованиями. По результатам глобальных наблюдений ГЕОИК получена геоцентрическая система координат ПЗ-90, а из совместного уравнивания АГС, КГС и ДГС получена новая высокоточная референсная система геодезических координат СК-95 [3].

Однако при уравнивании АГС не удалось достичь для всей сети приемлемой точности параметров преобразований СК-42 в СК-95. Эти ошибки свойственны участкам на краях геодезической сети, на стыках раздельно уравненных блоков сети, вблизи уравненных рядов триангуляции и полигонометрии I-го класса и особенно на стыках этих рядов. Кроме того существуют большие невязки высокоточных нивелировок и сплошных сетей триангуляции вдоль зоны сочленения Западно-Сибирской низменности с Алтае-Саянской складчатой областью и Сибирской платформой (вдоль долины р. Енисей). Одной из причин этих невязок могут быть ошибки высот квазигеоида, полученные из астрономо-гравиметрического нивелирования вследствие больших расстояний между астропунктами в аномальных и горных районах, а также недостаточной точностью редуцирования аномального потенциала и ошибками в поправках за отклонения отвеса в центральной зоне, определённых на основе учёта топографических масс [4].

В настоящее время существует несколько методов определения отклонений отвесных линий, необходимых для вывода высот квазигеоида, это традиционные – астрономо-геодезический, гравиметрический и астрономо-гравиметрический. Из новых методов можно назвать спутниковые альтиметрические измерения и сочетание нивелирных и GPS-измерений. Каждый из этих методов обладает своими достоинствами, и их совместное применение позволяет взаимно контролировать передачу высот квазигеоида.

Рассмотрим возможности повышения точности определения высот квазигеоида методом астрономо-гравиметрического нивелирования. Оценка точности астрономо-гравиметрического нивелирования дана во многих работах [5, 6, 7, 8]. В работе [7] погрешность определения высоты квазигеоида этим методом представлена в виде

$$\delta\zeta = \sqrt{\delta\zeta_{AG}^2 + \delta\zeta_{GP}^2}, \quad (1)$$

где $\delta\zeta_{AG}$ – погрешность высоты квазигеоида обусловленная погрешностями астрономо-геодезического уклонения отвеса $\delta\vartheta_{AG}$, а $\delta\zeta_{GP}$ – погрешность высоты квазигеоида, обусловленная погрешностями определения гравиметрического уклонения отвеса $\delta\vartheta_{GP}$. Для $\delta\zeta_{AG}$ и $\delta\zeta_{GP}$ можно записать

$$\delta\zeta_{AG} = 2 \cdot l \cdot \delta\vartheta_{AG}; \quad \delta\zeta_{GP} = 2 \cdot l \cdot \delta\vartheta_{GP},$$

где $2 \cdot l$ – расстояние между астрономическими пунктами.

Далее запишем

$$\delta\zeta_{AG} = \sqrt{\delta\zeta_{асмп}^2 + \delta\zeta_{геод}^2}, \quad (2)$$

где влияние астрономической составляющей на высоту квазигеоида можно представить в виде

$$\delta\zeta_{асмп} = 2 \cdot l \cdot \sqrt{\delta\varphi^2 \cdot \cos^2 A + \delta\lambda^2 \cdot \cos^2 \varphi \cdot \sin^2 A}, \quad (3)$$

а геодезической составляющей соответственно

$$\delta\zeta_{геод} = 2 \cdot l \cdot \sqrt{\delta B^2 \cdot \cos^2 A + \delta L^2 \cdot \cos^2 \varphi \cdot \sin^2 A}. \quad (4)$$

Систематические ошибки триангуляции раньше считались наиболее опасными с точки зрения накопления погрешностей [7], однако в настоящее время точность плановой геодезической основы позволяет считать влияние этой части погрешности ζ пренебрегаемо малой. Следовательно, дальнейшее повышение точности передачи высот квазигеоида ζ можно добиться за счёт повышения точности определений астрономических координат и гравиметрического уклонения отвеса. Так при точности полевых астроопределений координат не грубее $0,1''$ и среднем расстоянии между астропунктами 70 км астрономическая составляющая погрешности $\delta\zeta_{AG}$ для отдельного звена будет 2 см, а для линии длиной 1000 км составит 7 см. Эти величины меньше погрешностей нивелирования II класса.

Влияние погрешностей гравиметрической съёмки на высоту квазигеоида выражается формулой [7]

$$\delta\zeta_{GP} = 2 \cdot l \cdot \delta\vartheta_{GP} \quad (5)$$

где $\delta\vartheta_{GP}$ – погрешность гравиметрического уклонения отвеса.

На погрешность гравиметрического уклонения отвеса $\delta\vartheta_{GP}$ оказывает влияние радиус зоны интегрирования, радиус центральной зоны, погрешности интерполирования уклонений отвеса. Для повышения точности вывода уклонений отвеса предложено выполнять гравиметрическую съёмку сгущения вокруг пунктов, для которых вычисляется уклонение отвеса [6]. В таком случае погрешность интерполяции для равнинных районов можно принять равной

$$\delta\vartheta_{GPин} = 0,15''.$$

Значение случайной погрешности гравиметрической поправки для отдельного звена, вызванной ограничением области интегрирования, можно выразить в виде формулы [7]

$$\delta\vartheta_{GPpz} = 0,11'' \cdot (g - \gamma)_m / (\rho^2 - 1),$$

где согласно Молоденскому $\rho = R/l$, R – радиус зоны, непосредственно окружающей исследуемый пункт, в котором аномалии силы тяжести известны; l

– радиус меньшей зоны, в которой разности между астрономо-геодезическими отклонениями отвеса и гравиметрическими, обусловленными действием аномалий меняются линейно. При соответствующем подборе параметров можно добиться, чтобы величина $\delta\mathcal{G}_{ГРрз}$ для равнинных районов не превышала 0,1".

Таким образом, для выражения общей погрешности высоты квазигеоида, обусловленной гравиметрической составляющей, можно записать

$$\delta\zeta_{ГР} = 2 \cdot l \cdot \sqrt{\delta\mathcal{G}_{ГРин}^2 + \delta\mathcal{G}_{ГРрз}^2}. \quad (6)$$

Для расстояния 70 км в равнинных районах она будет равна 6 см, а для расстояния 1000 км – 23 см, что несколько выше точности нивелирования III – го класса.

Можно сделать вывод, что при достижении точности полевых астрономических определений, характеризуемой величиной 0,1", окончательная суммарная погрешность астрономо-гравиметрического нивелирования будет зависеть от повышения точности гравиметрического отклонения отвеса.

Точность вывода высот квазигеоида из геометрического нивелирования и GPS – измерений (GPS-нивелирование) зависит от погрешностей каждого из этих методов. Как известно [9], невязки нивелирования I класса составляют от $1,5 \cdot \sqrt{L}$ мм до $4 \cdot \sqrt{L}$ мм, для нивелирования II класса – от $2,5 \cdot \sqrt{L}$ мм до $6 \cdot \sqrt{L}$ мм, для нивелирования III класса – от $5 \cdot \sqrt{L}$ мм до $10 \cdot \sqrt{L}$ мм. Точность оперативных передач высот из GPS – измерений составляет 10 мм + 2 мм/км, что хуже гравиметрического метода. Использование технологий определений ФАГС и ВАГС позволит повысить точность такой передачи с потерей оперативности и повышением стоимости работ. Теоретически погрешность этого метода может соответствовать нивелированию III класса.

Учитывая, что существующие линии нивелирования I класса проходят друг от друга на расстоянии примерно 1000 км, II класса – не менее чем на расстоянии 100 км, для вывода высот квазигеоида для участков между нивелирными трассами необходимо привлекать материал гравиметрических съёмок и астрономических определений. Практическое испытание этого метода пока не даёт однозначно-положительных результатов. Так сравнение гравиметрических высот с высотами, полученными из нивелирования и GPS – измерений на опытном полигоне ССГА дало величину систематического расхождений 4 метра [10]. Вместе с тем отмечено хорошее совпадение астрономо-геодезических отклонений отвеса с GPS-нивелирными отклонениями для равнинных участков и ухудшение результатов для участков с более выраженным рельефом, на основании чего делается вывод о необходимости дальнейших испытаниях этого метода в регионах с различным рельефом. Необходимо также отметить, что на точность результатов этого метода заметное влияние может оказать смещение реперов вследствие эндогенных и техногенных процессов.

В заключение следует отметить, что в настоящее время астрономические определения сохраняют своё значение для получения астрономо-геодезических уклонений отвесных линий и вывода геоида [12–19].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Красовский, Ф.Н. О некоторых научных задачах астрономо-геодезии в связи с изучением строения твёрдой оболочки Земли [Текст] / Ф.Н. Красовский // Избр. соч. Т.1. – М., 1953. – С. 251 – 269.
2. Федеральная целевая программа РФ «Перевод геодезического обеспечения территории России на спутниковые методы»: Геодезия России [Текст]. – М., 1996. – 65 с.
3. Состояние и перспективы развития системы геодезического обеспечения страны в условиях перехода на спутниковые методы [Текст] / Б.В. Бровар и др. // Геодезия и картография. – 1999. – № 1. – С. 29 – 33.
4. Каленицкий, А.И. К проблеме повышения качества редуцирования гравитационного поля и его аномальной составляющей в геодезии и геодинимике [Текст] / А.И. Каленицкий // Вестн. СГГА. – 2005. – № 10. (В печ.)
5. Молоденский, М.С. Методы изучения внешнего гравитационного поля Земли [Текст] М.С. Молоденский, В.Ф. Еремеев, М.И. Юркина // Тр. ЦНИИГАиК. – М., 1960. – Вып. 131. – 231 с.
6. Пеллинен, Л.П. Требования к гравиметрической съёмке, связанные с обработкой астрономо-геодезических и нивелирных сетей [Текст] / Л.П. Пеллинен // Тр. ЦНИИГАиК. – 1960. – Вып. 139. – С. 8 – 80.
7. Бровар, В.В. Теория фигуры Земли [Текст] / В.В. Бровар, В.А. Магницкий, Б.П. Шимбирев. – М.: Геодезиздат, 1961. – 256 с.
8. Пеллинен, Л. П. Оценка точности астрономо-гравиметрического нивелирования СССР [Текст] / Л. П. Пеллинен, Л. А. Говорова // Тр. ЦНИИГАиК. – М., 1962. – Вып. 145. – С. 43 – 59.
9. Справочник геодезиста [Текст]: в 2-х кн. / Под ред. В.Д. Большакова и Г.П. Левчука. – 2-е изд. – М.: Недра, 1975. – 2 кн.
10. Аубакирова, А.К. Сравнение гравиметрических высот квазигеоида с высотами, полученными из GPS-измерений [Текст] / А.К. Аубакирова // Современные проблемы геодезии и оптики: сб. материалов ЛIII научно-техн. конф. СГГА, ч. 3. – Новосибирск, 2003. – С. 208 – 210.
11. Soler T, Carlson A., Evans A. Determination of vertical deflections using the global positioning system and geodetic leveling//Geophysical research letters. – 1989. – Vol. 16, № 7. – P. 695 – 698.
12. Application of astronomical positioning for local geoid Determination: Pap. 2 th Gen. Assem. Eur. Geophys. Soc., The Hague, Febr.,1996: Abstr. Book. Pt 1. Heftv J., Husar L., Melicher J. // Ann.geophys. – 1996. 14 Suppl. – N1, Pt 1.- 41.
13. Astrogeodesie in Nederland// Schreutelkamp. Geodesia.- 1997.- 39. – N10. – P.423-429.
14. The new Netherlands geoid : 21th Gen. Assem. Eur. Geophys. Soc., The Hague, Febr., 1996: Abstr.Book. Pt1.De Min Erik//Ann.geophys.-1996.14.Suppl N1,Pt1.-P. 243
15. Astrogeoid versus gravimetric geoid: Abstr.Eur. Geopys. Soc. Symp. «Solid. Earth Geopys. and Natur. Hazards», Vienna, 1997, Pt 1. Gerstbach Gottfried. *Ann. Geophys.* 1997. 15. Suppl., № 1. C 126.
16. Active determination of the plumb line deflection by astro-geodetic method: Abstr. Eur. Geopys. Soc. Symp. «Solid. Earth Geopys. and Natur. Hazards», Vienna , 1997, Pt 1. Savchuk S., Zhylyk Oksana. . *Ann. Geophys.* 1997. 15. Suppl., № 1. C 214.

17. Recomputation of the Austrian astrogeodetic geoid: Pa[p.2nd Contin. Worcshop Geoid Eur., Budapest. March 10-14, 1998. Heiland R., Hofmann-Wellenbehof B., Kienast G., Kühtreiber N. *Suomen geod. latiok. tied.* 1998. № 4. 235-238.
18. The new geoid CHGEO97 of Switzerland: Pap. 2nd Contin. Workshop Geoid. Eur., Budapest. March 10-14, 1998. Marti Urs. *Suomen geod. latiok. tied.* 1998. № 4. 281-287.
19. Schietloodafwijkingen bepaald uit geodetisch-astronomische waarnemingen. *Schreutelkamp F. H. geodesia (Netherlans)*. 2000. № 4. 155-162.

© А.С. Глазунов, А.И. Каленицкий, 2005

О ПОВЫШЕНИИ ТОЧНОСТИ ПОЛЕВЫХ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

Завершение работ по созданию единой ГГС СССР и переход на новые технологии развития плановой и высотной геодезической основы ставит перед геодезической наукой и производством новые задачи. Так новые геоинформационные технологии требуют знания высот квазигеоида с сантиметровой точностью [1]. В тоже время, при уравнивании АГС не удалось достичь для всей сети приемлемой точности параметров преобразований СК-42 в СК-95. Одной из причин этих невязок могут быть ошибки высот квазигеоида, полученные из астрономо-гравиметрического нивелирования, вследствие больших расстояний между астропунктами в аномальных и горных районах, а также недостаточной точностью гравиметрического редуцирования. [2].

Точность передачи высот квазигеоида можно повысить за счёт повышения точности астрономических определений – составной части астрономо-геодезического и астрономо-гравиметрического нивелирования. Необходимость повышения точности астроопределений ставилась ещё Ф.Н.Красовским, а также другими исследователями [1,3-6]. Априорный подсчёт показывает, что при точности уклонений отвеса $0,1''$ и расстоянии между астропунктами 70 км астрономическая составляющая ошибки в передаче высот квазигеоида на расстояние 1000 км составит 0,07 м, что выше точности нивелирования II класса [7]. Повышения точности определений координат и азимута необходимо также и для геодинамических исследований [6].

Повышение точности и производительности способов астроопределений координат и азимута возможно за счет повышения точности систем координат, а также за счёт совершенствования: технических средств наблюдений; методов астрономических определений; методов обработки результатов астроопределений; методов учёта инструментальных постоянных и внешних влияний.

Астрономические определения выполняются в рамках двух систем координат: одна из них – «небесная» невращающаяся система координат (НСНК), вторая – «земная» система координат (ЗСК) [8]. Построение НСНК или инерциальной системы координат (ИСК) выполняется методами астрометрии [9]. В настоящее время ИСК соответствует международная небесная система координат (ICRS), физической реализацией которой является международная система отсчёта (ICRF), закреплённая опорными квазарами [10]. В оптическом диапазоне эта система закреплена фундаментальным каталогом FK6, созданном на основе каталога HIPPARCOS, имеющего точность положений звёзд $0,001''$ и наземных наблюдений (каталог FK5), благодаря чему удалось в два раза повысить точность собственных движений общих звёзд с каталогом HIPPARCOS до $0,35 \text{ mas/год}$ [10, 11]. Кроме того, новая прецессионно-нутационная модель IAU2000, введённая МАС с 1 января 2003 года позволяет учитывать положение полюса ICRF с точностью до 1 mas [10]. Несомненно, что реальную точность

FK6 и прецессионно-нутационной модели IAU2000 можно определить только по прошествии некоторого времени.

Земная система координат задаётся координатами полюса и параметрами вращения Земли по разности всемирного и координированного времени (UT1 – UTC), которые публикует международная служба вращения Земли (IERS). Эти данные можно найти на сайте IERS <http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>. Координаты полюса определяются IERS с точностью 0,1 mas, а время 0,00002^s. Расхождение между координатами полюса IERS и данными Института метрологии времени и пространства (Россия) на 2003 год не превышает 0,001", а времени 0,0001^s [12]. Таким образом, совокупная ошибка систем координат, влияющая на точность астрономических определений, не превосходит 0,01". Следует отметить, что совокупная точность систем координат на основе каталога FK5 составляла 0,07" [13].

Вопросы оценки инструментов, обеспечивающих высокоточные определения рассмотрены в [5, 14]. Можно отметить, что астроуниверсал для астрономических определений координат с точностью 0,1" должен обладать следующими основными параметрами: диаметр объектива не менее 70 мм; увеличение не менее 70^x; ошибка определения наклона $m_b \leq 0,1'' \div 0,2''$. Для автоматизации процесса наблюдения и уменьшения влияния субъективного фактора необходимо для регистрации прохождений звёзд применять фотоэлектрический микрометр либо приёмник на базе ПЗС матрицы, а влияния наклона осей исключать с помощью высокоточного компенсатора. Таким параметрам отвечают или близки к ним теодолиты Theo 002; TA-05 и пассажный инструмент ПИ 70/700 [5].

Появление электронных теодолитов, кварцевых хронометров, портативных персональных компьютеров позволяет: изменить методику наблюдения, увеличив число отсчётов; автоматизировать процесс наблюдения; производить обработку наблюдений в режиме реального времени, что поможет уменьшить внешние воздействия на результаты наблюдений, повысить их точность и поднять производительность астроопределений, а следовательно – удешевить их. Широкое внедрение в топографо-геодезическое производство вычислительной техники позволяет усовершенствовать обработку астроопределений, прежде всего за счёт учёта большего числа факторов при уравнивании результатов и назначении весов измеренных величин, что также позволит повысить точность результатов. Этому же может способствовать внедрение новых методов астроопределений координат и азимутов направлений или модернизация известных методов с учётом новых технических возможностей [4, 14].

При точности определения координат 0,1" для контроля инструментальных констант, а особенно цены деления микрометра и уровня, а также состояния инструмента следует учитывать методики, разработанные в астрометрии [15-18]. Практическая модернизация этих методик для применения в полевой астрономии рассмотрена в [19-21].

К внешним воздействиям на астрономические наблюдения следует отнести устойчивость основания, влияние температуры и влияние атмосферы [5]. Устойчивость и отсутствие вибраций обеспечивается конструкцией столба для установки инструмента. Температурные воздействия проявляются, прежде всего, в неравномерном нагреве различных частей инструмента теплом выделяемым наблюдателем либо внешним источником. Вопросы уменьшения этого влияния рассмотрены в [17].

Влияние атмосферы выражается в астрономической (атмосферной) рефракции и флуктуации (дрожании) изображения, вызываемой оптической нестабильностью атмосферы. Наиболее полно вопросы нестабильности атмосферы и их влияние на астрономические наблюдения рассмотрены в работе [22]. Так как флуктуации имеют знакопеременный характер, то для ослабления их влияния необходимо выполнять наблюдения каждой звезды в примерно течение минуты.

Рефракция подразделяется на нормальную и аномальную. Учёт нормальной рефракции традиционно выполняется по таблицам, составленным на основе принятой теории модели атмосферы. Последними и наиболее совершенными можно считать таблицы обсерватории имени Энгельгардта и Пулковской обсерватории [23, 24].

Атмосфера Земли наиболее динамичная из всех геосфер, находящаяся в постоянном процессе изменения параметров: температуры, давления, влажности. Каждый из этих параметров изменяется с высотой по-разному, в зависимости от времени года. Инверсии температуры, наклоны слоёв атмосферы равной плотности, зависящие от рельефа местности, ветра, сезонных и суточных градиентов температуры, вызывают аномалии рефракции и приводят к систематическим погрешностям, например, в определении широт до $0,1''$ [25, 26].

Учитывать наклон слоёв атмосферы можно используя параметры атмосферы, полученные зондированием, что требует дополнительных затрат, либо, что менее точно, по картам барической топографии [27-29]. Однако наиболее приемлемым для полевых астроопределений, по-видимому, можно считать метод рефракционных пар [30]. При этом методе из наблюдений широтных пар на малых и больших зенитных расстояниях получают как широты, так и поправки к ним за влияние аномалий рефракции.

Уменьшению влияния рефракционных аномалий на астрономические определения будет способствовать предварительное исследование местных рефракционных аномалий перед выбором места закладки пункта, наблюдения в периоды года и суток с наименьшими значениями аномалий, учет хроматической рефракции на основе спектрофотометрического градиента, а также уменьшение или полный отказ от наблюдений двойных звезд в программах определений широт, долгот и азимутов [25, 26, 31, 32].

Априорный расчёт показывает, что с принятыми параметрами астроуниверсала, достигнутой точностью каталога FK6 и неучтённого влияния рефракции на уровне $0,05''$ погрешность определения координат из одного приёма не превысит $0,3''$ [5, 14].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Машимов М.М. Высшая геодезия [Текст] / М.М. Машимов. – М.:ВИА, 1991. – 552 с.
2. Каленицкий А.И. К проблеме повышения качества редуцирования гравитационного поля и его аномальной составляющей в геодезии и геодинимике [Текст] / А.И. Каленицкий // Вестн. СГГА. – 2005. – № 10. (В печ.)
3. Красовский Ф.Н. Новые предложения по уравниванию астрономо-геодезической сети [Текст] Ф.Н. Красовский // Избр. соч. Т. 1. М, 1953. – С. 351 – 360.
4. Уралов С.С. Современные проблемы геодезической астрономии// Исследования по геодезии, аэрофотосъемки и картографии / МИИГАиК. – М., 1978. – С. 4 – 9.
5. Исследования по геодезической астрономии и астрономо-геодезическим приборам [Текст]. – М.: ЦНИИГАиК, 1980. – Вып. 223. – 190 с.
6. Краснорылов И.И. Об астрономических определениях в АГС СССР и задачах геодезической астрономии [Текст] / В.Г. Львов, Г.Д. Сафонов // Геодезия и картография. – 1995. – № 8. – С. 22 – 27.
7. Бровар В.В. Теория фигуры Земли [Текст] / В.В. Бровар, В.А. Магницкий, Б.П. Шимбирев. – М.: Геодезиздат, 1961. – 256 с.
8. Яцкив Я.С. Об основных координатных системах, применяемых в астрометрии и геодинимике [Текст] / Я.С. Яцкив, В.С. Губанов // Геодинимика и астрометрия. – Киев: Наукова думка, 1980. – С. 110 – 120.
9. Подобед В.В. Общая астрометрия [Текст] / В.В. Подобед, В.В. Нестеров, М.: Наука, 1982. – 576 с.
10. Труды института прикладной астрономии РАН. Вып. 10 [Текст] / СПб, 2004. – 488 с.
11. Нефедьев Ю.А. Космический эксперимент HIPPARCOS [Текст] / Ю.А. Нефедьев, А.И. Нефедьева, В.С. Боровских. – Казань: Унипресс, 2002. – 288 с.
12. Всемирное время и координаты полюса: Ежекварт. бюл. Е / Ин-т метрологии времени и пространства; ФГУП «ВНИИФТРИ». – М., 2003. – 27 с.
13. Колгунов В.М. Внешняя обусловленность точности полевых прецизионных астроопределений [Текст] / В.М. Колгунов, И.М. Цюпак // Маркшейдер. дело и геодезия. – СПб, 1997. - С. 40 – 43.
14. Глазунов А.С. Исследование и совершенствование разностно-зенитальных способов определения широты [Текст]: Дис. на соиск. учён. степ. канд.техн. наук. – Новосибирск: СГГА, 2002. – 197 с.
15. Зуллиев А.М. Об исследовании талькоттовских уровней зенит-телескопов и определении их цены деления [Текст] / А.М. Зуллиев., И.Ф. Корбут // Изв. глав. астроном. обсерватории в Пулкове. - 1971. - № 187. - С. 159 - 163.
16. Шептунов Г.С. Определение цены оборота микрометрического винта ЗТЛ-180 в Благовещенске [Текст] / Г.С. Шептунова, А.Н. Шептунова // Изв. главн. астроном. обсерватории в Пулкове. - 1966. - № 179. - С. 48 - 51.
17. Павлов Н.Н. О термических эффектах в перекладывающихся пассажных инструментах [Текст] / Н.Н.Павлов // Астроном. журн. - 1953. - Т. 30, № 1. - С. 85 - 92.
18. Павлов Н.Н. Пути повышения точности астрономических определений [Текст] / Н.Н. Павлов // Вращение Земли. - Киев: Наукова думка, 1963. - С.136 - 144.
19. Глазунов А.С. Оперативный контроль цены деления уровня Талькотта на пункте [Текст] / А.С. Глазунов // Современные проблемы геодезии и оптики: сб. материалов ЛП научно-техн. конф. СГГА, ч. 3. - Новосибирск, 2003. - С. 210 - 213.
20. Глазунов А.С. Вывод цены оборота окулярного микрометра из наблюдений шкальных пар с учётом веса [Текст] / А.С. Глазунов // Современные проблемы геодезии и

оптики: сб. материалов LIII научно-техн. конф. СГГА, ч. 3. - Новосибирск, 2003. - С. 214 - 217.

21. Глазунов А.С. Об определении неперпендикулярности оси талькоттовского уровня к горизонтальной оси трубы астроуниверсала [Текст] / А.С. Глазунов // Сб. материалов LIV научно-техн. конф. СГГА. - Новосибирск, 2005 (в печати).

22. Колчинский И.Г. Оптическая нестабильность земной атмосферы по наблюдениям звёзд [Текст] / И.Г. Колчинский. - Киев: Наукова думка, 1967. - 184 с.

23. Нефедьева, А.И. Таблицы астрономической рефракции [Текст] / А.И. Нефедьева // Изв. АОЭ № 45. - Казань, 1978. - С. 3 - 81.

24. Таблицы рефракции Пулковской обсерватории. [Текст] / Под ред. В.К. Абалакина. - 5-е изд. - Л., 1985. - 49 с.

25. Могилин А.О. Изучение влияния аномалий астрономической рефракции приземного слоя атмосферы на высокоточные наблюдения [Текст]: Автореферат на соиск. учён. степ. канд. техн. наук / А.О. Могилин. - М., 1975. - 22 с.

26. Василенко Н.А. Исследование аномалий астрономической рефракции [Текст]: Автореферат на соиск. учён. степ. канд. физ. мат. наук / Н.А. Василенко. - Л., 1977. - 15 с.

27. Тютерев Г.С. Влияние наклона приземного слоя воздуха на определение широты и времени [Текст] / Г.С. Тютерев // Вращение Земли. - Киев: Наукова думка, 1963. - С. 281 - 288.

28. Тютерев Г.С. Исследование влияния наклонов атмосферных слоёв равной плотности на определение широты места и точного времени по аэрологическим данным [Текст] / Г.С. Тютерев // Колебание широт и движение полюсов. - М., 1965. - С. 51 - 72.

29. Нефедьева А.И. Астрономическая рефракция [Текст]: Автореферат на соиск. учён. степ. д-р физ. мат. наук / А.И. Нефедьева. - М., 1973. - 19 с.

30. Сергиенко, В.И. Исследование влияния рефракционных аномалий на широтные наблюдения в Иркутске и Благовещенске [Текст] / В.И. Сергиенко // Астроном. журн. - 1970. - Т. 47, № 6. - С. 1328 - 1336.

31. Мельников О.А. О поправках рефракции для звёзд разного цвета [Текст] / О.А. Мельников // Астроном. журн., Т. 33, № 2. - 1956, С. 266 - 273.

32. Двойные звезды как проблема оптической реализации Международной небесной системы отсчета = Binaries as a problem of optical realization of ICRS / Gontcharov G.A., Titov O.A., Andronova A.A., Kornilov E.V. // Journées "Syst. réf. spatio-temporels" et IX. Lohrmann-Kolloq., Dresden, 13-15 Sept., 1999. - Paris, 2000. - С 141.

© А.С. Глазунов, 2005

**АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИЙ КАМЕННО-НАБРОСНОЙ ПЛОТИНЫ
МАЛОУЛЬБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА И ВОЗМОЖНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ЕЕ
КАТАСТРОФИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ**

Мало-Ульбинское водохранилище (Западный Алтай, Республика Казахстан) находится в 35 км к юго-востоку от г. Риддера Восточно-Казахстанской области, в верховьях р. Малой Ульбы, на высоте свыше 1500 м над уровнем моря. Водоохранилище было создано в 1930-е годы (введено в эксплуатацию в 1938 г.) для покрытия дефицита воды Риддерского промышленного узла, коммунального водоснабжения г. Риддера и энергетики.

Малая Ульба - левый крупнейший приток р. Ульбы, который последняя принимает на расстоянии 25 км от устья. Длина реки 119 км, площадь бассейна – 2 300 км², лесистость достигает 50%. Истоки Малой Ульбы лежат вблизи горного узла Западного Алтая с высотами 2 300 – 2 500 м. В самом верховье Малая Ульба представляет собой горный ручей, скатывающийся с почти отвесного склона. Затем склоны уменьшаются, и река выходит на безлесное холмистое плато (район водохранилища). На этом участке река близко подходит к Левой Громотухе, одному из истоков р. Ульбы, отделяясь от нее невысоким водоразделом. Ниже водохранилища оно входит в узкое ущелье и около 7 км течет бурным потоком с большими уклонами. В среднем течении ее неширокая долина неоднократно сужается подступающими горами. Средневзвешенный уклон потока из истоков до устья составляет 7,7%.

Бассейн Малой Ульбы имеет развитую речную сеть, чему благоприятствует горный рельеф территории и высокие атмосферные осадки (до 2 000 мм в год, толщина снежного покрова на водохранилище в отдельные годы достигает 6 м). Коэффициент густоты речной сети в бассейне составляет в среднем 0,47 км/км², достигая местами 0,84 км/км².

Главным источником питания являются талые воды, пик половодья чаще всего приходится на май. Его максимум за период наблюдений у с. Горная Ульбинка (2130 км²) составил 1060 м³/с (29 мая 1979г.), наивысший расход дождевого паводка – 516 м³/с, отмечен 21 сентября 1970 года.

Водоохранилище образовано в русле Малой Ульбы каменно-набросной плотиной высотой 34,5 м и длиной по гребню 367 м. Ширина гребня 5 м, наибольшая ширина плотины по низу – 74,5 м. Отметка гребня – 1574,00 БС. В плане плотина имеет криволинейное очертание и крутую напорную грань. Помимо каменно-набросной плотины, в понижениях водораздельного хребта между бассейном Малой Ульбы и Левой Громотухи возведены две земляные, в одной из которых устроен тоннельный водоспуск для сброса воды из водохранилища в Левую Громотуху. Высота первой плотины 15 м, протяженность по гребню 310 м, высота второй 14 м, протяженность 195,5 м. Проектные отметки гребней 1575,00 БС. Между собой плотины разделены небольшой песчаной грядой.

Площадь зеркала водохранилища при НПУ 1 572,00 БС составляет 6,5 км², длина 5 км, наибольшая ширина 3 км. Средняя глубина водоема 13,4 м, наибольшая глубина 31,5 м. Площадь водосбора 40,5 км². Расчетный объем водохранилища при НПУ 88,3 млн. м³, минимальный уровень сработки – 1549,00, полезный объем составляет 84,2 млн. м³.

Для предотвращения фильтрации через каменно-набросную плотину в ее основании заложен бетонный зуб, заглубленный в скалу на глубину 6 -11 м. под которым устроена цементная завеса. В верховой стенке плотины до отметки 1569,00 первый метр кладки выполнен на цементном растворе. Водонепроницаемость плотины обеспечивается деревянным экраном из трех взаимно перпендикулярных слоев досок из лиственницы, уложенных по напорному откосу плотины. Между слоями досок уложены два слоя битумных матов. Доски с обеих сторон сжаты брусьями, стянутыми прижимными болтами. Внутренние брусья к кладке прикреплены анкерными болтами. Для предотвращения фильтрации через плотину №1 в ее теле заложен экран из суглинка, сопряженный со скалой при помощи зуба глубиной 4 м. Плотина №2 имеет только противофильтрационный экран и понур, выполненные из суглинка.

Заполнение водохранилища происходит в весенне-летний период, а зимой, когда естественный сток падает, накопленные запасы воды через водоспуск сбрасываются в Левую Громотуху, откуда вода поступает на сооружения Ульбинского каскада ГЭС и к другим потребителям г. Риддера.

Практически с самого начала эксплуатации Малоульбинского водохранилища были обнаружены деформации каменно-набросной плотины, проявившиеся в виде осадки и горизонтального смещения гребня. К августу 1980 г. максимальная величина осадки в центральной части плотины (марка15) составила 217 мм. Створные измерения показали, что в центральной ее части (марки 17, 19, 21 и 23) смещение гребня в сторону нижнего бьефа достигло 597-662 мм. При этом более значительному смещению подвергся прямолинейный участок плотины (восточное крыло). Основной причиной смещения гребня, по-видимому, следует считать гидростатическое давление водной массы на напорную грань [5].

Исследование состояния сооружения показало также, что сухой откос из каменной наброски, хорошо уложенный при строительстве на многих участках превратился в хаотическое нагромождение камней. Из-за отсутствия капитального ремонта разрушаются многие элементы конструкций плотины. Противофильтрационный деревянный экран, особенно в зоне колебания уровня, сильно поврежден и находится в плохом состоянии.

Величина фильтрации воды через тело плотины невелика, в зависимости от уровня воды в водохранилище она колеблется в пределах 28-68 л/с, с тенденцией к увеличению. Земляные плотины также находятся в неудовлетворительном состоянии.

Из-за неудовлетворительного состояния плотин, особенно противофильтрационного экрана каменно-набросной плотины, водохранилище заполняется в настоящее время лишь до отметки 1567,00 БС. Высота напора в этом случае составляет около 28 м, на 5 м меньше проектного.

Хотя специалисты, неоднократно проводившие обследование подпорных сооружений водохранилища, отмечают их надежность, ссылаясь на продолжительный опыт эксплуатации каменно-набросных плотин, все же необходимо признать наличие определенного риска, обусловленного самим существованием водохранилища. Расположенное более чем на 1000 м выше г. Усть-Каменогорска и более чем на 700 м выше г. Риддера, Малоульбинское водохранилище представляет реальную опасность. В случае разрушения одной из плотин, большая масса воды может создать катастрофическую ситуацию для населенных пунктов, расположенных ниже водохранилища.

В мировой практике известны катастрофы, связанные с разрушением плотин. Одна из таких трагедий произошла 31 мая 1889 г. на р. Литл-Коунфман (штат Пенсильвания, США). В результате вызванного проливными дождями переполнения водохранилища, образованного на реке 20-метровой каменно-набросной плотиной Саунт-Форк, вода начала переливается через ее гребень, размывая низовой откос. В итоге произошло разрушение плотины и через пролом 20-метровой глубины, мощный поток воды устремился вниз. Был полностью уничтожен расположенный в 16 км ниже по течению городок Джонстаун, погибло 2 209 человек.

Возможность разрушения плотин Малоульбинского водохранилища может быть обусловлено как отдельными причинами (переполнение, вызванное длительными и обильными осадками, землетрясение силой 7-8 баллов), так и их наложением. Несмотря на малую вероятность этих событий, исключать их возможность было бы неверным, учитывая участвовавшие в последнее время случаи природных аномалий. В случае катастрофы существенную роль будет играть степень наполнения водохранилища, время года и суток.

Вероятность выпадения в районе водохранилища обильных и длительных осадков достаточно высокая. Средняя многолетняя (1930-1948 гг.) годовая величина осадков по станциям Малая Ульба (1577 м), приведенная к показаниям приборов и исправленная поправками, составляет 1891 мм [1]. На уровне снеговой границы (2100-2300 м) годовые осадки могут достигать даже 2500 мм.

Максимальная сумма месячных осадков (964 мм) в районе водохранилища зарегистрирована в мае 1971 г., а суточный максимум, обеспеченностью 16%, составил 174,1 мм (29 мая 1979г.). За период 1978-1987 гг. здесь отмечено 160 случаев выпадения осадков свыше 30 мм, в том числе 56 случаев с осадками от 50 до 100 мм [2].

Хотя полное и мгновенное разрушение водохранилища маловероятно, но, оценивая возможные катастрофические последствия, следует исходить из реальности именно такой ситуации.

В первом приближении максимальный расход воды ($Q_{\text{мак}}$) при прорыве плотины можно оценить по формуле, рекомендованной Корпусом американских военных инженеров:

$$Q_{\text{мак}} = 0,29 * g * K^{0,28} * B * H^{1,5}, \quad (1)$$

где g – ускорение силы тяжести, фут/с²;

B – ширина прорыва, фут;

Н – глубина в месте прорыва, фут;

К – коэффициент, в случае сплошного прорыва принимается равным 1,00.

В случае сплошного прорыва каменно-набросной плотины Малоульбинского водохранилища, заполненного до проектного уровня, и с учетом коэффициента сжатия потока, принимаемого равным 0,5, величина расхода прорыва, согласно формулы (1), может достигать 20 000 м³/с. Максимальный расход прорыва через земляные плотины будут в пределах 3 000- 4000 м³/с.

Образовавшаяся волна паводка характеризуется неустановившимся режимом движения. В полной форме неустановившийся режим движения воды в русле описывается уравнениями Сен-Венана в частных производных. Решение этих уравнений дает возможность получить значение расхода воды, уровня, площади живого сечения и скорости течения в зависимости от времени и расстояния по длине потока. Однако решение этой системы не линейных дифференциальных уравнений сопряжено с большими трудностями. Среди упрощенных методов расчета, не установившегося движения воды в русле, следует назвать метод Маскингам [3], метод Г.П. Калинина – П.И. Милюкова, метод кривых добеганий, метод соответственных уровней и расходов [4].

На начальном этапе расследования данного вопроса, оценка характеристик движения воды прорыва по руслу Малой Ульбы в первом приближении оценена по формулам гидравлики с использованием в дальнейшем более строгих методов расчета, или же физического моделирования полученных результатов на основе критериев подобия.

Полный сброс воды из водохранилища при среднем расходе прорыва порядка 7000 – 8000 м³/с произойдет за 3 - 4 часа. Рассчитанная по формуле Шези-Маннинга средняя скорость потока по руслу Малой Ульбы составит в среднем 5-6 м/с. Следовательно, устья паводочная волна достигнет примерно за 5 часов. По реке будет двигаться высокий вал воды с относительно крутой фронтальной поверхностью и более пологой тыловой.

Для приближенной оценки величины максимально трансформированного руслом расхода прорыва в устье Малой Ульбы использована формула Г.А. Алексеева. Связывающая скорость течения по длине реки ($V_{\text{ср}}$) с максимальным расходом воды в замыкающем створе и средневзвешенным ($i_{\text{ср. вЗВ}}$) уклоном потока.

$$V_{\text{ср}} = a * Q_{\text{макс}}^{0,25} * i_{\text{ср. вЗВ}}^{0,33} \quad (2)$$

При среднем значении $a = 0,15$ и величине средневзвешенного уклона в нижнем течении Малой Ульбы 2%, средней скорости течения, по Шези-Маннингу, 2,0 м/с, величина максимально трансформированного расхода в устье реки составит около 10 000- 12 000 м³/с. Движущаяся с большой скоростью такая масса воды, обладающая огромной кинетической энергией, способна произвести большую разрушительную работу. Поток увлечет вниз по течению камни плотины, донную отмостку русла, продукты выветривания со склонов долины и поймы, обломки деревьев, формируя мощный водно-грязе-каменный поток. При выбросе этой селевой массы в русло р. Ульбы возникнет подпор уже ее течению

(что особенно опасно в период паводка или половодья) с последующим прорывом и выносом этой массы отложений и большого количества воды в р. Иртыш.

Следствием катастрофы могут быть повреждения или разрушения производственных и жилых строений, коммуникаций, человеческие жертвы. Последующая аккумуляция выноса в русле Иртыша приведет к нарушению его режима и изменению русла на участке Усть-Каменогорская ГЭС – Шульбинское водохранилище, ухудшению условий судоходства, нанесет ущерб водному хозяйству, гидроэнергетике, создаст экологические проблемы ниже по течению Иртыша. В настоящее время Малоульбинское водохранилище не имеет того водохозяйственного и энергетического значения, которое оно имело в 1930 – 1950 гг. С переходом г. Риддер на другие источники водоснабжения и с учетом возможных катастрофических последствий для ниже расположенных населенных пунктов целесообразен его спуск с последующим разрушением каменно-набросной плотины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голубцов В.В., Ли В.В, Предварительная оценка элементов водного баланса горных бассейнов Западного Алтая // Тр. Каз. РНИИ. – Вып. 98. – М.: Гидрометеиздат, 1985.
2. Климат Юго-Западного Алтая / Под ред. А.В. Егориной. – Усть-Каменогорск, 2002.
3. Линслей Р.К., Колер М.А., Паулюс Д.Л. Прикладная гидрология. Перевод с англ. – Л.: Гидрометеиздат, 1962.
4. Нежиховский Р.А. Русловая сеть бассейна и процесс формирования стока воды. Л.: Гидрометеиздат, 1971.
5. Хасенов К.Б., Хахулина Н.Б. Отчет по топографо-геодезическим работам, выполненным для наблюдения за каменно-набросной плотинной Мало-Ульбинского водохранилища ВКО, Усть-Каменогорск, 2004.

© К.Б. Хасенов, Р.И. Гета, Н.Б. Хахулина, К.М. Калеева, 2005

УДК 523

А.К. Аубакирова

СГГА, Новосибирск

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИУС-ВЕКТОРОВ ОСНОВНОЙ УРОВЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Применяемый на практике способ вычисления высот квазигеоида над эллипсоидом [1] не позволяет получать решение свободное от систематических погрешностей обусловленных особенностями самого способа.

Планетарные, главные особенности геоида и отступление его от Нормальной Земли представляются в виде множества высот квазигеоида ζ над общеземным эллипсоидом по формуле Брунса

$$\zeta = \frac{T}{\gamma} + \frac{W_0 - U_0}{\gamma} = \zeta_1 + \zeta_0, \quad (1)$$

где T – возмущающий потенциал, W_0 – значение потенциала силы тяжести на поверхности геоида (в нуле футштока), U_0 – значение потенциала на поверхности отсчётного эллипсоида, γ – нормальная сила тяжести.

При вычислении высот ζ над общеземным эллипсоидом принимают [1] $U_0 = W_0$ и $\zeta_0 = 0$, и затем в (1), подставляют $T = V - V_0$, разность реального потенциала притяжения V и потенциала Нормальной Земли V_0 :

$$T = \frac{fM}{r} \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a_e}{r} \right)^n (\Delta C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\cos \vartheta), \quad (2)$$

где fM – гравитационная постоянная, a_e – экваториальный радиус Нормальной Земли, r – модуль радиус-вектора исследуемой точки на поверхности квазигеоида, $\Delta C_{nm} = C_{nm} - C_{nm}^0$ и S_{nm} – гармонические коэффициенты разложения возмущающего потенциала, а коэффициенты нормального потенциала кроме чётных зональных $C_{2,0}^0, C_{4,0}^0, \dots$ равны нулю. Из выражения (1) и (2), принимая в сферическом приближении $a_e \approx r \approx R$, $\gamma = fM/R^2$ и

$$\left(\frac{a_e}{r} \right)^n \approx 1 \quad (3)$$

получаем

$$\zeta = R \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n (\Delta C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\cos \vartheta) \quad (4)$$

где λ – геоцентрическая долгота и $\vartheta = 90^\circ - \varphi$ полярное расстояние.

Далее предлагается вводить поправки за влияние ближней зоны [1].

Чтобы оценить погрешность сферического приближения, левую часть выражения (3) преобразуем к виду

$$\left(\frac{a_e}{r} \right)^n = \left(1 + \frac{\delta}{a_e} \right)^{-n}, \quad (5)$$

где $\delta = r - a_e$, $\frac{\delta}{a_e} \ll 1$, разложим выражение (6) в степенной ряд [3]

$$\left(\frac{a_e}{r} \right)^n = 1 - \frac{n\delta}{a_e} + \frac{n(n+1)}{2} \left(\frac{\delta}{a_e} \right)^2 - \dots \quad (6)$$

Можно видеть, что ряд сходящийся и знакопеременный. При подстановке (6) в (4) первый член ряда отвечает за сферическое приближение, второй член ряда представляет величину погрешности сферического приближения $\Delta\zeta_2$, третий погрешность определения ошибки за сферическое приближение (3) $\Delta\zeta_3$. Например:

$$\Delta\zeta_2 = r \sum_{n=2}^N \sum_{m=0}^n \frac{n\delta}{a_e} (\Delta C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin \varphi) \quad (7)$$

При вычислении $\Delta\zeta_2$ и $\Delta\zeta_3$ считаем, что $r = r_{\text{елл}} = f(\varphi)$ радиус-вектор эллипсоида вращения, т.к. $\delta_{\text{max}} \approx 21\text{км}$ (влияние сжатия Земли), а отступления квазигеоида от эллипсоида меньше 100м. Вычисления выполнены по модели Нормальной Земли GRS 80 [4], и модель потенциала силы тяжести GEM 10 [5] до 30-го порядка и степени. В результате вычислений $\max |\Delta\zeta_2| = 0.365\text{м}$, $\text{CKO} \Delta\zeta_2 = 0,090\text{м}$, $\max |\Delta\zeta_3| = 0.002\text{м}$. $\text{CKO} \Delta\zeta_3 = 0,0004\text{м}$.

Например, работы [7, 8] посвящены преодолению этих трудностей. Однако, предложенные решения записаны в системе эллипсоидальных координат и их численная реализация сложна или ещё не разработана вовсе.

В тоже время, существует несколько способов получения основной уровенной поверхности Земли путём вычисления радиус-векторов точек её поверхности. Причём, вычисляется лишь модуль геоцентрического радиус-вектора, а сферические координаты φ и λ могут быть заданы произвольно. Для рассмотрения были выбраны три способа, которые обозначим «А», «Б», «В»:

Способ «А» – рассмотрен в работах Г.А. Мещерякова [5];

Способ «Б» – предложен Машимовым М.М. [8];

Способ «В» – приводится в работе М.Бурши [9].

Применение этих алгоритмов на практике требует разработки технологии, программного обеспечения, и доказательство того, что они обеспечат необходимую точность представления основной уровенной поверхности Земли.

Рассмотрим более подробно каждый из них.

Особенности способа «А» – подробно рассмотрены в работе [10], приведём лишь конечное уравнение, пригодное для итераций.

Заданы границы изменения $r: \beta > r \leq \alpha$, принимается

$$x = \alpha / r, \quad (8)$$

$$K = \frac{\alpha}{Gm} W(\vartheta, \lambda), \quad A^* = \frac{q_0}{3} (1 - P(\vartheta, \lambda)), \quad q_0 = \frac{\omega^2 \alpha^3}{GM} \quad (9)$$

$$\sum_{m=0}^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_n^m(\cos \vartheta) = Z_n(\vartheta, \lambda), \quad (10)$$

и получается

$$x = K - A^* x^{-2} - x \sum_{n=2}^N Z_n x^n \quad (11)$$

– основное уравнение, разрешающее задачу. Очевидно, что величины K , A^* , Z_n – есть функции ϑ и λ , т.е. для любой данной точки земной поверхности они принимают определённое постоянное значение и выражение (11) есть алгебраическое уравнение степени $N+3$ вида $x = \varphi(x)$.

Рассмотрим способ «Б»:

$$r^0 = R \left[1 - \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a_e}{r_0} \right)^n \sum_{m=0}^n (J_{nm} \cos m\lambda + K_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin \varphi) + \frac{1}{2} q \left(\frac{r_0}{a_e} \right)^3 \cos^2 \varphi \right]; \quad (12)$$

$$\nu = \frac{3}{2} q \cos^2 \varphi + J_2 (3 \sin^2 \varphi - 1), \text{ получено окончательное выражение (13)}$$

$$r = R \left[1 - \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a_e}{r_0} \right)^n \sum_{m=0}^n (J_{nm} \cos m\lambda + K_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin \varphi) + \frac{1}{2} q \left(\frac{r_0}{a_e} \right)^3 \cos^2 \varphi \right] + (r^0 - r_0) \nu,$$

Таким образом, вычисление геоцентрического радиус-вектора точки геоида r_2 выполняется двумя приближениями.

Рассмотрим способ «В». В работе [9] приводится формула для геоцентрического радиус-вектора основной эквипотенциальной поверхности

$W=W_0$. Указывается, что такой радиус-вектор r может быть представлен через геопотенциальный скалярный фактор R , набор Стоксовых параметров и угловую скорость вращения Земли.

$$r = R_0 \left(1 + A_0^{(0)} + \sum_{n=2}^n \sum_{k=0}^n (A_n^{(m)} \cos k\lambda + B_n^{(m)} \sin k\lambda) P_n^{(m)}(\sin \varphi) \right) \quad (14)$$

где коэффициенты $A_0^{(0)}$, $A_n^{(m)}$, $B_n^{(m)}$ – функции Стоксовых параметров $J_n^{(m)}$, $S_n^{(m)}$ (сохраняем авторские обозначения) и параметра q

$$q = \frac{\omega^2 a_e^3}{GM},$$

где $P_n^{(m)}$ – полиномы и присоединённые функции Лежандра,

R – геопотенциальный скалярный фактор, т.е. $R = 6363672.40 \pm 0.10$ м.

Удерживая члены порядка $(J_2^{(0)})^3$, q^3 и пренебрегая их зависимостью от времени, имеем

$$A_0^{(0)} = \frac{1}{3} \nu^{-3} q + \frac{2}{5} \nu^{-6} q^2 - \frac{1}{15} \nu^{-1} J_2^{(0)} q - \frac{2}{5} \nu^4 (J_2^{(0)})^2 + \frac{24}{35} \nu^{-9} q^3 - \\ - \frac{8}{35} \nu^{-4} J_2^{(0)} q^2 + \frac{1}{21} \nu (J_2^{(0)})^2 q + \frac{2}{5} \nu^6 (J_2^{(0)})^3,$$

$$A_2^{(1)} = 0, \quad B_2^{(1)} = 0, \quad A_2^{(2)} = \nu^2 J_2^{(2)}, \quad B_2^{(2)} = \nu^2 S_2^{(2)}, \quad (15)$$

$$A_n^{(0)} = \nu^n J_n^{(0)}, \quad n = 3, 5, 7, 8, 9 \dots N,$$

$$\left. \begin{aligned} A_n^{(m)} &= \nu^n J_n^{(m)} \\ B_n^{(m)} &= \nu^n S_n^{(m)} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} n &= 3, 4, \dots, N \\ m &= 1, 2, \dots, N \end{aligned}, \quad \text{где } \nu = \frac{a_e}{R}.$$

Алгоритм представления высот квазигеоида из разложения возмущающего потенциала в ряд по сферическим функциям обозначим – способ «00».

Для того чтобы сравнивать подобные величины, из радиус-векторов полученных по способам «А», «Б» и «В» мы вычитаем радиус-векторы эллипсоида вращения $r_{елл}$ [10] и получаем ζ_A , ζ_B , ζ_V соответственно. Сравниваем поверхность получаемую по способам «А», «Б» и «В» с результатами, вычисленными по способу «00».

Однако, величина $r - r_{елл}$ не точно равна высоте геоида ζ [9], измеренной по нормали к эллипсоиду, они отличаются, но мало:

$$\zeta = (r - r_{елл}) \cos \varepsilon. \quad (16)$$

Откуда ε малый угол между r и вертикалью в соответствующей точке геоида, М (рис. 2.1). Пусть $|r - r_{елл}| \leq 200$ м, $\varepsilon < 0,3^\circ$, то мы можем, считать, что $\cos \varepsilon = 1$ скажется в уравнении (16) с ошибкой меньше чем 1 см. Таким образом, этой ошибкой можно пренебречь.

Вычисления модулей радиус-векторов по способам «А», «Б», «В» и «00» выполнены по исходным данным, описанным выше, в узлах регулярной сети с шагом по широте и долготе 5° . Результаты численных экспериментов позволяют сформулировать следующие выводы:

– В способе «А» необходимо отказаться от редуцирования стоксовых постоянных на сферу Бьерхаммера, как это предлагается в [5], поскольку это приводит к расхождениям со способом «00» более чем на 15,0м;

– Тогда способы «А» и «Б» дают результаты близкие по величине, их расхождения не хуже чем 0,0079м;

– После доработки способа «А», величины отклонений от высот квазигеоида по способу «00» близки по величине (не хуже чем 1.927м) и пространственному распределению близки к величинам и распределению ошибок сферического приближения, таким образом, видно, что способы «А» и «Б» позволяют исключить погрешности сферического приближения;

– Однако, способ «В» даёт результаты не сходные ни с одним из вышеперечисленных способов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пеллинен Л.П. Высшая геодезия (теоретическая геодезия). М., Недра, 1978, 264 с.
2. Молоденский М.С., Еремеев А.Ф., Юркина М.М. Методы изучения внешнего гравитационного поля и фигуры Земли. Тр. ЦНИИГАиК, М.: 1960 г., Вып. 131, 251 с.
3. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисление. Т. 2, М.: Наука, гл. ред. Физ.-мат. лит.-ры. 1970 г., 576 с.
4. Moritz H. Geodetic Reference System 1980. Bulletin geodesique, 1980, vol. 54, № 3, p. 395 – 405.
5. Мещеряков Г.А. Задачи теории потенциала и обобщённая Земля. – М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. литературы, 1991. – 216 с.
6. Юркина М.И. Уточнение связи высоты квазигеоида с возмущающим потенциалом. Физическая геодезия. Научно.-техн. сборник по геодезии, аэрокосмическим съёмкам и картографии. – М.: ЦНИИГАиК, 1999 г. – с. 55 – 70.
7. Бровар В.В., Бровар Б.В. Высокоточный метод определения внешнего возмущающего потенциала реальной Земли. С. 14 – 54. Научно-технический сборник по геодезии, аэрокосмическим съёмкам и картографии. Физическая геодезия. ЦНИИГАиК. – М.: ЦНИИГАиК, 1999. – 120 с.
8. Машимов М.М. Геодезия. Теоретическая геодезия. Справочное пособие / Под ред. В.П. Савиных и В.Р. Яценко. – М.: Недра, 1991. – 268 с.
9. Bursa Milan, Jan Kostecky Space Geodesy and Spase Geodynamics. Prague. 1999 Czech Technical.
10. Аубакирова А.К. Решение обратной задачи теории потенциала методом итераций. Материалы VI международной конференции АПЕП-2002, том 6, Новосибирск, 2002 г., с. 9 – 13.
11. Закатов П.С. Курс высшей геодезии. Изд. 4, переработанное и дополненное, М., «Недра», 1976, 511 с.

© А.К. Аубакирова, 2005

**РЕШЕНИЕ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИИ НА ТЕРРИТОРИИ
ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

На основании карты скоростей современных вертикальных движений земной коры, составленной по результатам многократных повторных высокоточных нивелировок Колмогоровым В.Г. на территорию Западной Сибири, получены исходные данные для решения краевой задачи динамической геодезии типа Дирихле на данной территории. На основании этих данных в результате гармонического анализа получена информационная матрица гармонических коэффициентов, которая, в свою очередь, позволила составить аналитическое выражение, определяющее обобщенные скорости изменения высот земной коры в любом пункте на территорию Западной Сибири. С применением машинной графики построена обобщенная карта скоростей современных вертикальных движений земной поверхности на территорию Западной Сибири.

Краевая задача динамической геодезии типа Дирихле заключается в том, что если на граничной поверхности, за которую принимается стационарная модель гравитационного поля и фигуры Земли, отнесенная к некоторой эпохе, заданно граничное условие в виде скорости изменения потенциала силы тяжести или высот точек земной поверхности в исследуемой области, то можно определить закономерность изменения этих функций в любой точке исследуемой области земной поверхности и вне ее [1, 2, 3]. Связь между изменениями этих двух функций устанавливается дифференцированием формулы Брунса по времени. Решение краевой задачи динамической геодезии наиболее эффективно выполняется методом гармонического анализа скоростей изменения высот точек земной поверхности, полученных из результатов обработки высокоточного повторного нивелирования на изучаемой территории.

Краевая задача динамической геодезии формулируется так: если на граничной поверхности, за которую принимается стационарная модель гравитационного поля и фигуры Земли, отнесенная к некоторой эпохе задано граничное условие в виде скорости изменения потенциала силы тяжести dW/dt или скорости изменения высот точек земной поверхности dh/dt в исследуемой области, то можно определить закономерность изменения этих двух функций в любой точке исследуемой области земной поверхности и вне ее. Связь между значениями этих двух функций устанавливается дифференцированием формулы Брунса по времени

$$\frac{dh}{dt}g + \frac{dg}{dt}dh = \frac{dW}{dt}. \quad (1)$$

Так как, при значениях величин, входящих в формулу (1), на земной поверхности, второе слагаемое исчезающее мало по сравнению с первым, то практически связь между значениями этих двух функций устанавливается формулой

$$\frac{dW}{dt} = \frac{dh}{dt} g. \quad (2)$$

Особенностью решения краевой задачи динамической геодезии типа Дирихле методом гармонического анализа является то, что граничное условие (2) в виде скорости изменения потенциала силы тяжести dW/dt и высот dh/dt точек земной поверхности получают в настоящее время из повторного высокоточного нивелирования, выполняемого на отдельных участках земной поверхности, координаты которых нам неизвестны, так как они то же являются функциями времени, и поэтому граничные условия относятся к уже известной нам граничной поверхности, за которую принята выбранная стационарная модель планетарного гравитационного поля и поверхности Земли на заданную эпоху. Значения потенциала силы тяжести $W_{ст}$ и геодезические $(B, L, H)_{ст}$ или прямоугольные геоцентрические $(X, Y, Z)_{ст}$ координаты точек этой стационарной модели потенциала силы тяжести и фигуры Земли принимаются начальными при решении краевых задач динамической геодезии.

Решение краевой задачи динамической геодезии типа Дирихле выполнено на территории Западной Сибири расположенной между параллелями с широтами 52° и 68° северной широты и меридианами с долготами 60° и 90° восточной долготы. В качестве исходного граничного условия являлась цифровая модель скоростей изменения высот h , полученная по результатам повторного высокоточного нивелирования [5]. В результате решения формируется информационная матрица гармонических коэффициентов скоростей изменения высот точек земной поверхности на изучаемой территории с учетом сферических функций до порядка N_0 . Аналитическое выражение вида

$$\dot{h}(\varphi, \lambda) = \sum_{n=0}^{N_0} \sum_{m=0}^n [\dot{a}_{nm} \cos m\lambda + \dot{b}_{nm} \sin m\lambda] P_{nm}(\sin \varphi), \quad (3)$$

где $\dot{a}_{nm}, \dot{b}_{nm}$ – полученные значения гармонических коэффициентов скорости изменения высот. Значения гармонических коэффициентов позволяют определять обобщенные скорости изменения высот в любом пункте на территории Западной Сибири и соответствующие им скорости изменения потенциала силы тяжести $\dot{W}$ по формуле (2).

В результате решения краевой задачи динамической геодезии типа Дирихле построена картосхема обобщенных скоростей изменения высот земной поверхности на территории Западной Сибири.

Оценка точности моделирования выполнена по разностям исходного (рис. 1) и восстановленного (рис. 2) по формуле (3) поля скорости изменения высот точек земной поверхности на территории Западной Сибири. Средняя квадратическая ошибка моделирования исходного поля скоростей высот на территории Западной Сибири составила ± 0.276 мм/год, при среднем абсолютном их значении 3.543 мм/год.

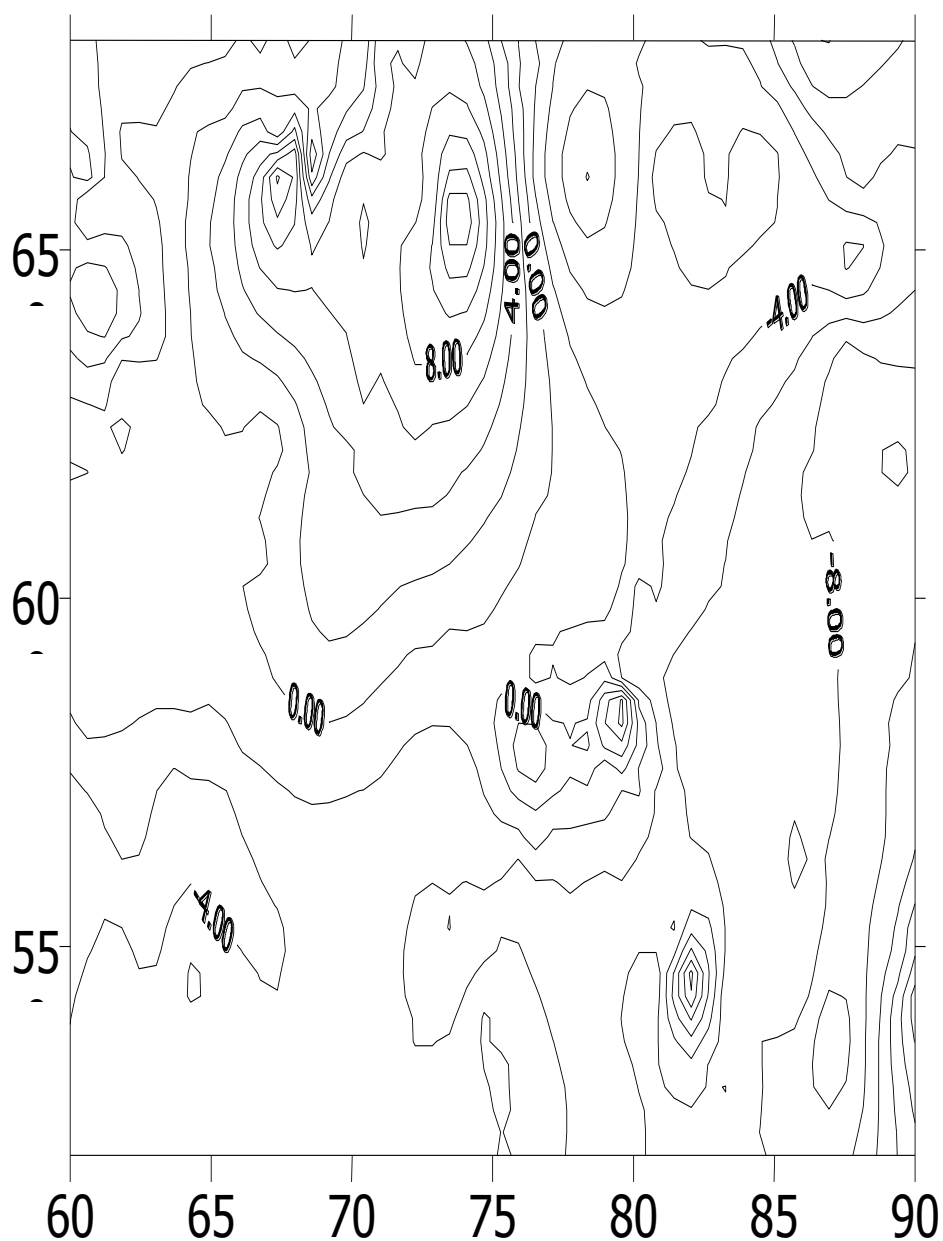


Рис. 1. Картосхема скорости изменения высот земной коры, построенная по исходным данным полученным по результатам многократных высокоточных нивелировок, выбранных с карты вертикальных движений земной коры на территории Западной Сибири составленной Колмогоровым В.Г.

Изолинии проведены через 2,0 мм/год

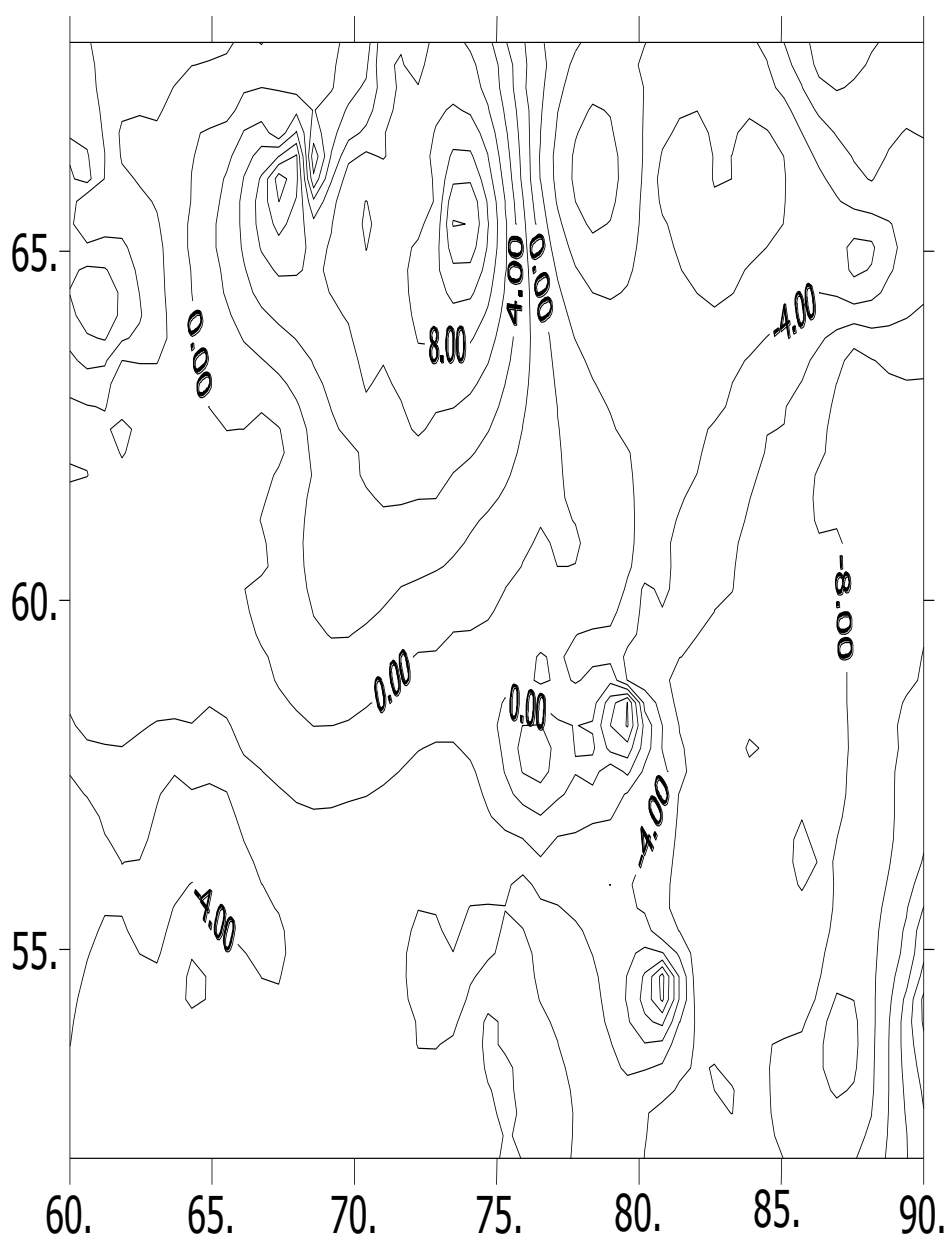


Рис. 2. Картограмма скорости изменения высот земной коры, построенная по восстановленным данным

Изолинии проведены через 2,0 мм/год

Выполненное экспериментально решение краевой задачи динамической геодезии типа Дирихле по предложенной методике позволяет установить общую закономерность изменения скоростей высот на исследуемых территориях и уточнить районы современной тектонической активности земной коры верхней мантии Земли, с целью прогноза сейсмической опасности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Постановка проблемы динамической геодезии, как решение геодезической краевой задачи Молоденского с краевыми условиями и граничной поверхностью, изменяющимися во времени. // Отчет НИР /промежуточ/ Руководитель В.В. Бузук - № Гр. 0196.00012360; Инв. № 02.97.0003632, СГГА, Новосибирск, 1996. - 45 с.

2. Выбор исходной стационарной модели гравитационного поля Земли и основные дифференциальные уравнения динамической геодезии // Отчет НИР /промежуточ/ Руководитель В.В. Бузук № Гр. 0196.00012360, СГГА, - Новосибирск, 1997. - 49 с.
3. Алгоритм моделирования вековых изменений потенциала силы тяжести и его характеристик на основании информационных матриц, характеризующих их динамику. Постановка краевых задач динамической геодезии. // Отчет о НИР /промежуточный/. Руководитель В.В. Бузук № 0196.0012360, Инв. № 02.20.0001776, СГГА, Новосибирск, 1998. - 79 с.
4. Борисенко А.Н., Таранов И.Е. Векторный анализ и начала тензорного исчисления. М.: «Высшая школа», 1963. - 262 с.
5. Колмогоров В.Г. Кинематика земной поверхности Западной Сибири по результатам экспериментальных методов // Геология и геофизика. - Новосибирск, 1997. - Т.38. - С. 1538-1549.
6. Бузук В.В., Вовк И.Г., Канушин В.Ф., Костына Ю.Р., Суздалев А.С. Математическое моделирование скалярных полей рядом Фурье по системе сферических функций. НИИГАиК, Деп. ВИНТИ 10 апр. №1284-79. - 12 с.
7. Канушин В.Ф. Моделирование аномалий силы тяжести с учетом данных о рельефе Земли в условиях неполной гравиметрической изученности / Канн. диссертация, НИИГАиК. - Новосибирск, 1984. - 291 с.
8. Бузук В.В. Вовк И.Г., Канушин В.Ф., Суздалев А.С. Разработка алгоритмов и программ на языке «АЛГОЛ – АЛЬФА» и «ФОРТРАН» для аппроксимации дневного и погребенного рельефа. Отчет НИР / НИИГАиК, Руководитель В.В. Бузук - Новосибирск, № 5881657. 1980. - 55 с.
9. Вовк И.Г., Костына Ю.Г. Об аппроксимации рельефа рядом Фурье по системе ортогональных функций // Изв. вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка», № 4, Москва, 1981. - С. 19 - 25.

© В.Г. Колмогоров, В.Ф. Канушин, И.Г. Ганагина, Д.Н. Голдобин, 2005

УДК 550.34 (571.15 + 571.151)
В.С. Осьмушкин, А.Я. Швецов
ОАО «АлтайТИСИЗ», Барнаул
Г.Я. Барышников
АлтГУ, Барнаул

СЕЙСМИЧНОСТЬ РУССКОГО АЛТАЯ И СТЕПНОЙ ЗОНЫ АЛТАЙСКОГО КРАЯ

Исследуемая территория охватывает Русский Алтай (Рудный Алтай, Горный Алтай), равнинную и предгорную часть юга Западной Сибири, Салаирский кряж в административных границах Алтайского края и Республики Алтай и находится на стыке крупных тектонических структур I порядка: Алтае-Саянской горно-складчатой области и Западно-Сибирской платформы (плиты).

Алтае-Саянская горно-складчатая область сформировалась в течение салаирского, каледонского и герцинского этапов тектонизма. Отложения протерозоя и палеозоя, слагающие эту область, испытали интенсивную складчатость, смяты в крупные складки и разбиты тектоническими нарушениями, ряд которых имеет глубинный характер и региональное протяжение до 100-200 км и более.

В состав Алтае-Саянской горно-складчатой области в пределах исследуемой территории входят структуры II порядка: Рудный Алтай, Горный Алтай, Неня-Чумышская впадина, Салаир и Колывань-Томская зона.

Горный Алтай состоит из системы отрицательных (синклиналиев) и положительных (антиклиналий) структур III порядка северо-западного и

субмеридионального простирания: Чагырский (Чарышско-Инской) синклиний, Талицкий антиклинорий, Ануйско-Чуйский синклиний, Катунский (Бийско-Катунский) антиклинорий, Коргонский синклиний. Эти структуры разделяются региональными глубинными разломами Чарышским, Бащелакским и Сарасинско-Курайским (Телецко-Курайским), протяженностью по 100-140 км каждый. Помимо их намечена серия протяженных разломов северо-западного, северо-восточного и субширотного направлений.

Рудный Алтай находится между Иртышской и Северо-Восточной зонами смятия и представляет собой два синклинория (Рудно-Алтайский и Рубцовский), разделенные Алтайским антиклинорием. Здесь развита серия разломов северо-западного, субмеридионального и субширотного направлений. Крупнейшие из них Локтевско-Караиртышский, Саввушкинский и Иртышские глубинные разломы.

На Салаире основными структурами третьего порядка являются Хмелевская синклиналь, Тягунский антиклинорий (горст), Горновский грабен, Уксунайский антиклинорий и Ельцовская антиклиналь. Здесь также прослежены многочисленные разломы северо-западного и северо-восточного направлений. Крупнейшими из них являются Предсалаирский и Уксунайский глубинные разломы и Бердский региональный разлом.

Колывань-Томская складчатая зона представлена структурой III порядка – Каменским поднятием.

Между Горным Алтаем и Салаиром находится Неня-Чумышская впадина. Вдоль северного фаса Алтая выделяется крупнейший глубинный Алейско-Саяно-Минусинский разлом (Змеиногорско-Калманско-Салаирский разлом), прослеживающийся от Рудного Алтая до Салаира и далее на восток. Западно-Сибирская плита – молодая эпипалеозойская платформа. В пределах Алтайского края к ней относятся структуры II порядка: Кулундинская (Бийско-Барнаульская) впадина, имеющая двухэтажное строение. Нижний этаж – складчатый фундамент, прошедший геосинклинальную стадию развития в протерозое и палеозое. Верхний этаж – платформенный чехол, состоящий из рыхлых мезокайнозойских осадков мощностью от 200-300 до 1200 м, залегающих субгоризонтально. Рельеф палеозойского фундамента впадины ступенчато погружается от предгорий Алтая и Салаира к центральной части впадины. В пределах впадины выделяют четыре структурные террасы (с востока на запад): Рубцовская, Бийская, Барнаульская и Центрально-Кулундинская. Палеозойский фундамент разбит рядом разломов северо-западного и северо-восточного простирания.

Сейсмические проявления в Алтае-Саянской горноскладчатой области отмечаются, практически, повсеместно. Сейсмогенерирующими структурами являются глубинные разломы, к которым относятся Алейско-Саяно-Минусинский (вдоль северного фаса Алтая), Телецко-Курайский (Сарасинско-Курайский), Чарышско-Теректинский, Шапшальский (Чулышмало-Шапшальский), Северо-Восточная зона смятия Рудного Алтая (Локтевско-Караиртышский разлом). В пределах орогенной ступени, где развиты районы наиболее интенсивных поднятий с тектоническими внутригорными впадинами,

приуроченными к приразломным грабенам, заполненными третичными и четвертичными отложениями, расположенными на различных гипсометрических уровнях, зоны сопряжений являются сейсмически активными. На Алтае к ним относятся Джулукульская, Чуйская, Курайская, Усть-Коксинская, Усть-Канско-Чарышская, Телецкая, Улаганская, Чульчинско-Сайгонская. В пределах этих впадин или районов к ним прилегающих, зафиксировано наибольшее число землетрясений интенсивностью 8-9 баллов и более. Установлены районы распространения третичных и четвертичных базальтов, что свидетельствует об активных сейсмических зонах, приуроченных к глубинным разломам на Алтае: Чарышско-Теректинской зоне, Чокракской, Шапшальской. Менее активные сейсмические проявления зафиксированы в предорогенной (приприплатформенной) ступени Западной Сибири в пределах сопряжения Бийско-Барнаульской впадины, Салаирского предгорья, Обско-Каменского выступа. Районы слабых землетрясений распространены на стыке Салаирского Кряжа с отрогами Алтая и на западе – в районе Рудного Алтая.

Сложно построенные новейшие структуры и узлы, сформировавшиеся на структурах до палеозойского времени, оказываются наиболее тектонически активными. Наблюдается так же повышенная сейсмичность древних разломов на участках их пересечения с новейшими нарушениями. Высокая концентрация эпицентров наблюдается на участках разно ориентированных разломов, образующих «пучки» пересечений, сгущений.

Анализ расположения землетрясений за период с 1761 г. по 2003 г. позволяет выделить ряд сейсмических зон: Чуйская, Шапшальская, Южно-Алтайская, Коргонская, Коксинская, Урскульская, Каменская. Наиболее интенсивные землетрясения 7-9 баллов зафиксированы в Чуйской, Шапшальской и Южно-Алтайской сейсмических зонах.

Чуйская сейсмическая зона вытянута в широтном направлении от слияния рек Катунь и Чуя на западе до границы с Монгольской народной республикой на востоке. Протяженность зоны 220-230 км, ширина – 50-60 км. В зону входят Курайский, Северо-Чуйский и Южно-Чуйский хребты с максимальными абсолютными отметками соответственно 3412 м, 4177 м и 3936 м. Зону пересекает Чарышско-Теректинский и Телецко-Курайский (Сарасино-Курайский) глубинные разломы, которые сближаются в Чуйской впадине, выполненной мощной толщей (около 1000 м) рыхлых кайнозойских отложений. В Чуйской зоне зафиксированы десятки землетрясений интенсивностью 5 баллов, пять землетрясений – 6 баллов, три землетрясения – 7 баллов, два землетрясения – 8 баллов и два землетрясения интенсивностью – 9 баллов: 27 сентября и 1 октября 2003 года.

Шапшальская сейсмическая зона приурочена к Шапшальскому хребту и одноименному глубинному разлому северо-западного направления. Максимальные отметки хребта 2618-3149 м. Глубинный разлом хорошо выражен в рельефе в виде уступа. Протяженность с северо-запада на юго-восток 140-150 км, с запада на восток до 100 км. Здесь, как в Чуйской сейсмической зоне, высокая повторяемость землетрясений интенсивностью 5 баллов, шесть землетрясений – 6 баллов и три землетрясения с максимальной интенсивностью 7 баллов, два

из них около вершины с абсолютной отметкой 3022 м. К юго-востоку от Шапшальской зоны, примерно, в 50-60 км от границы Республики Алтай, на территории Монголии зафиксировано землетрясение интенсивностью 9 баллов.

Южно-Алтайская сейсмическая зона северо-восточного простирания пространственно тяготеет к хребту Южный Алтай, северные склоны которого относятся к Республике Алтай, южные – к Казахстану, Монголии, Китаю. Протяженность зоны 130 км, ширина 30-40 км. Северная часть заходит в Республику Алтай и здесь два землетрясения интенсивностью 7 баллов (1960 и 1962 гг.) попадают на плато Укок в районе горы Текекунген с абсолютной отметкой 3097 м. Максимальная интенсивность землетрясения в Китае в 15-20 км от границы с Россией – 8 баллов (1908 г.) около горы Джагыртау (абс. отм. 3871 м). Общее количество землетрясений от 5 до 7 баллов – 10 землетрясений.

В Коргонской сейсмической зоне отмечено 3 землетрясения интенсивностью 5 баллов, одно 6-ти и одно 7-и балльное. Зона охватывает наиболее высокую часть узла хребтов Коргонского, Коксуйского и Тигирецкого с максимальными отметками 2299 – 2490 м. Размер зоны с севера на юг 60 км, с запада на восток – 40 км. Зафиксировано 4 землетрясения в 5 баллов, одно – 6 баллов и одно землетрясение интенсивностью 7 баллов.

Коксинская сейсмическая зона вытянута в северо-западном направлении, имеет длину – 80 км, ширину – 40 км. В зону входят часть хребтов Коксинского и Холзунского. Зафиксировано 8 землетрясений интенсивностью 5 баллов и 3 землетрясения 6-ти балльных.

Урсульская сейсмическая зона северо-западного направления, длиной 60 км, шириной 40 км пространственно относится к Теректинскому хребту с максимальной абсолютной отметкой 2821 м. Здесь отмечено 5 землетрясений интенсивностью 5 баллов и 4 землетрясения 6 баллов.

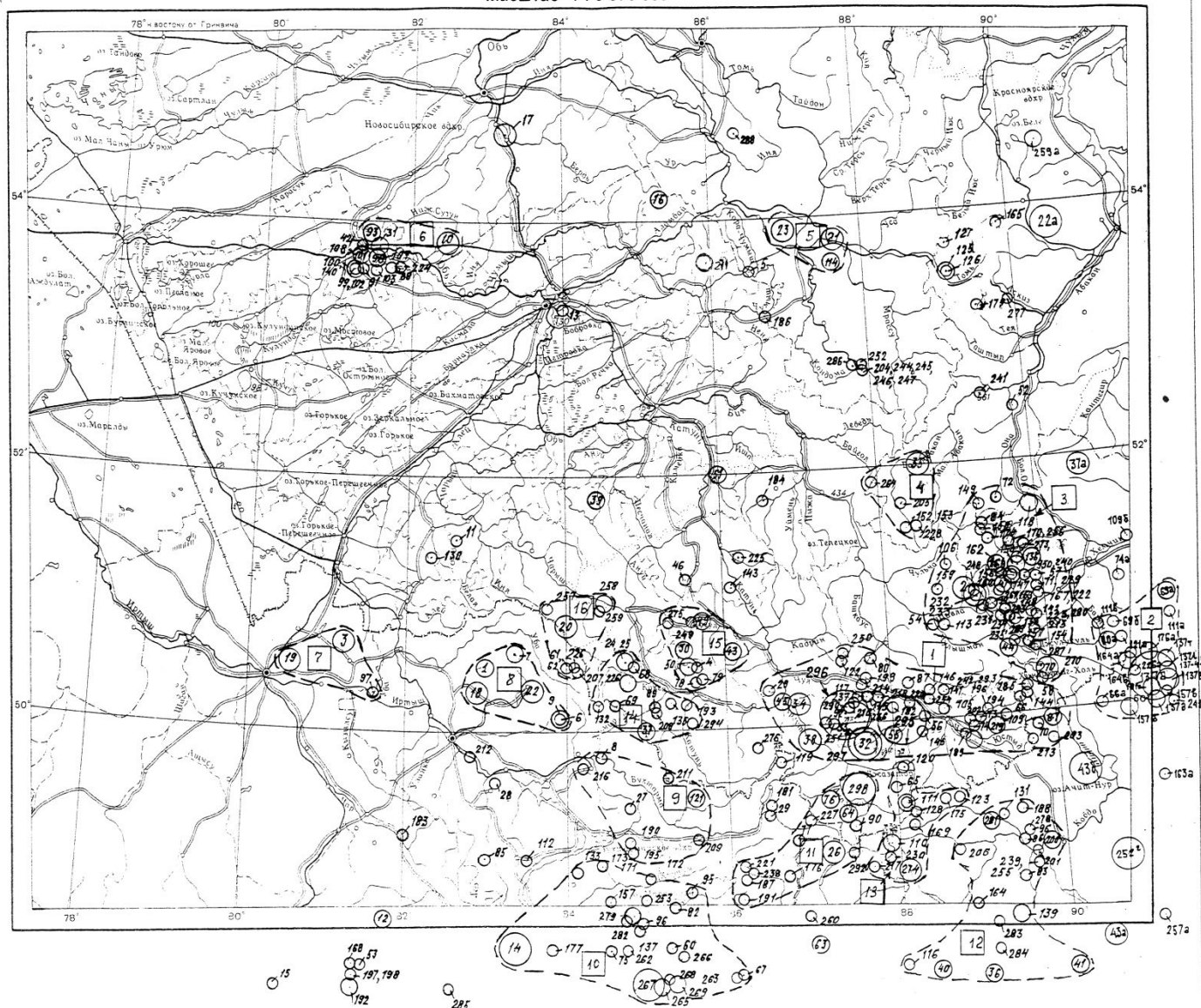
Коргонская, Коксинская и Урсульская сейсмические зоны относятся к низко – и среднегорной части Горного Алтая и через них проходят глубинные разломы Чарышко-Теректинский и Башчелакский.

Особняком находится Каменская сейсмическая зона – в равнинной части Бийско-Барнаульской впадины на южной оконечности Томь-Колыванской складчатой зоны. Крупной структуро-контролирующей единицей площади является субширотный Каменский разлом на линии г. Камень-на-Оби – пос. Сузун, вдоль которого северное крыло приподнято относительно южного, вследствие чего севернее разлома отмечаются выходы палеозойских пород на поверхность в ряде мест у г. Камня-на-Оби.

Первые сведения о землетрясении в Каменской зоне относятся к 1829 г., когда отмечался сейсмический толчок интенсивностью 6-7 баллов. Всего в зоне зафиксировано 6 землетрясений интенсивностью 5 баллов, 5 землетрясений 6-ти балльные и 1 землетрясение – 7 баллов (15 февраля 1965 г.). Зона вытянута с запада на восток на 70-100 км, с севера на юг – 50-70 км.

Рабочая карта эпицентров землетрясений

Масштаб 1 : 3 370 000



Условные обозначения:

Эпицентры землетрясений, их номера
и сейсмическая интенсивность в баллах
по шкале MSK-64



- 1** Сейсмические зоны и их номера:
 1 – Чуйская, 2 – Барлыкская, 3 – Шапшальская
 4 – Абаканская, 5 – Горно-Шорская,
 6 – Каменская, 7 – Семипалатинская,
 8 – Убинская, 9 – Бухтарминская,
 10 – Саур-Тарбагатайская (Зайсанская),
 11 – Южно-Алтайская, 12 – Ховдинская,
 13 – Сайлюгемская, 14 – Коксинская,
 15 – Урскульская, 16 – Коргонская.

Салаирский кряж – блок слабых поднятий, здесь отмечено два землетрясения интенсивностью 5 баллов и два землетрясения – 6-ти бальные. На общий фон сейсмичности оказывает влияние пространственная близость Кузнецкой зоны, где в историческое время в непосредственной близости отмечались 7-8 бальные землетрясения (1898 и 1903 гг.).

В предгорной части Рудного и Горного Алтая вдоль ее границы с равниной зафиксированы 3 землетрясения интенсивностью 5 баллов и два землетрясения – 6-ти бальные.

На равнине на правобережье р. Оби в районе г. Барнаула отмечено землетрясение интенсивностью 5 баллов (1846 г.).

Анализируя распределение землетрясений на изучаемой территории, можно выделить районы различной сейсмической активности.

Равнинная часть – это территория слабой сейсмической активности – до 5 баллов включительно. Исключение составляет район г. Камня-на-Оби с интенсивностью до 7 баллов включительно.

Предгорья Рудного и Горного Алтая можно отнести к территории с интенсивностью до 6 баллов включительно.

Границу между равнинной (5 баллов) и Предгорьями Рудного и Горного Алтая (6 баллов) можно провести по Рубцовской структурной террасе, которая является шарнирной наиболее стабильной зоной, так как ниже ее преобладают опускания, а выше преобладают поднятия, размах которых достигает нескольких километров.

27 сентября 2003 г. в Чуйской сейсмической зоне произошло сильное «Чуйское» землетрясение. По данным информационно-обрабатывающего центра Геофизической службы РАН (ИОЦ ГС РАН) землетрясение произошло в 15 часов 33 мин. по московскому времени с магнитудой 7,3 – 7,5 по шкале Рихтера. Глубина гипоцентра 17 км, координаты эпицентра $50^{\circ}04'$ с.ш. и $88^{\circ}07'$ в.д. в горной перемычке между Курайской и Чуйской межгорными впадинами. Поселок Бельтир Республики Алтай оказался в эпицентральной зоне и наиболее сильно пострадал. Была разрушена одноэтажная школа с пристроенным двухэтажным спортивным залом, на поверхности земли образовались трещины шириной до 0,5 – 0,7 м, из некоторых трещин изливалась жижа серого цвета (смесь серого суглинка и водой).

На правом борту р. Талтур (северный склон Южно-Чуйского хребта), в 3,5 – 4,0 км от пос. Бельтир образовался крупный сейсмообвал. Длина обвала по фронту 400-450 м, ширина (от подошвы вверх по склону) 350-400 м. Стенка отрыва высотой 25-30 м. Сейсмообвал произошел в моренных многолетнемерзлых отложениях (валуны, галечник, гравий, грубый песок, лед). «Панцирь» мерзлых пород мощностью 25-30 м сместился вниз по склону метров на 50-60. Трещины разбили оползневое тело мерзлых пород на крупные блоки, ширина трещин до 2-3 м и более, глубина трещин до 15-20 м. Характер изменения рельефа на участке сейсмообвала дает основание оценить интенсивность землетрясения в 10 баллов по шкале MSK-64.

По характеру деформаций зданий и сооружений, поведению людей и изменениям в рельефе, можно оценить интенсивность землетрясения 27.09.2003

г. на равнинной территории, в предгорьях Рудного и Горного Алтая и на Салаирском кряже до 5-6 баллов включительно.

Выводы

1. По интенсивности землетрясений, отмеченных за весь период наблюдений, на изучаемой территории можно выделить районы:

- Равнинная территория – 5 баллов;
- Предгорья Рудного и Горного Алтая – 6 баллов;
- Район Камня-на-Оби – 7 баллов;
- Салаирский кряж – 6 баллов;
- Низкогорье и среднегорье Рудного и Горного Алтая – 7 баллов;
- Высокогорная Шапшальская сейсмическая зона – 8 баллов;
- Высокогорная Чуйская сейсмическая зона – 9 баллов.

2. На равнине, предгорной части Рудного и Горного Алтая, на Салаирском кряже интенсивность от сильного «Чуйского» землетрясения (9 баллов) 27 сентября 2003 г. оценивается нами максимум в 5-6 баллов.

3. Данные сейсмических наблюдений за весь исторический период (1761 – 2003 гг.), а также фактический материал по сильному «Чуйскому» землетрясению в Горном Алтае позволяют откорректировать границы сейсмической интенсивности на карте А Общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР-97-А) в пределах исследуемой территории (Алтайский край, Республика Алтай).

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (грант ур 08.01.004).

© В.С. Осмушкин, А.Я. Швецов, Г.Я. Барышников, 2005

УДК 622.83 + 551.21.3

А.Д. Сашурин

ИГД УрО РАН, Екатеринбург

СОВРЕМЕННАЯ ГЕОДИНАМИКА И РАЗВИТИЕ КАТАСТРОФ НА ОБЪЕКТАХ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

Чем плотнее люди заселяют территорию Земли, чем более развитыми и сложными являются производства и используемые технологии, чем сложнее быт и жилище, тем уязвимее становится человек, тем заметнее влияние природных, техногенных и природно-техногенных катастроф. За год в России возникает более тысячи чрезвычайных ситуаций, а на ликвидацию их негативных последствий затрачивается более 15% валового дохода. При сохранении такой динамики событий отечественная экономика в ближайшее время может не справиться с ликвидацией последствий аварий и катастроф.

В жизни человеческого общества сфера недропользования занимает значительное место, охватывая не только добычу, переработку и транспортировку полезных ископаемых, но весь широкий спектр деятельности, в котором массив горных пород и земная поверхность выступают в качестве неотъемлемого важнейшего инженерно-геологического компонента. Это и среда, в которой создаются подземные сооружения, это и основание для всех

наземных сооружений, это и трассы подземных и наземных инженерных коммуникаций.

Исследованиями последних лет в качестве основной причины возникновения катастроф все более и более четко высвечивается современная геодинамика приповерхностной части литосферы и земной поверхности.

Геодинамике, как самостоятельной научной дисциплине, отводят широкий и разнообразный круг вопросов [1]. Общая, или глобальная, геодинамика изучает глубинные процессы, определяющие движущий механизм преобразований в литосфере. Частная, или региональная, геодинамика изучает развитие поверхностных оболочек. Теркот Д.Л. и Шуберт Дж. определяют геодинамику как науку, изучающую движения и деформации, происходящие в земной коре, мантии, ядре, и их причины [2].

Ниже рассматриваются лишь современные геодинамические движения, протекающие в настоящее время в приповерхностной части литосферы и на земной поверхности в период срока службы объекта недропользования, потенциально опасного по возникновению катастрофических явлений.

Относительно изученности геодинамических процессов можно выделить две принципиально отличающиеся области геодинамики – фундаментальную и прикладную. В фундаментальной геодинамике роль современных геодинамических движений в формировании катастроф очевидна. Здесь подвижность массива горных пород и земной поверхности ни у кого не вызывает сомнений, а, следовательно, все объекты недропользования находятся под ее воздействием.

Иначе обстоит дело в прикладной области. В ней, по-видимому, из-за недостаточной изученности параметров современных геодинамических движений свойство подвижности массива горных пород и земной поверхности пока не нашло отражения.

Кардинальный пересмотр взглядов на роль и место геодинамического фактора, как в фундаментальных проблемах, так и в решении прикладных задач, связанных с недропользованием, начался со второй половины прошлого века. Появившаяся в начале столетия гипотеза А. Вегенера о дрейфе континентов уже во второй его половине обрела статус теории глобальной тектоники литосферных плит [3]. Эта теория по сути утверждает, что литосферные плиты и материки движутся в горизонтальной плоскости; это движение можно наблюдать и в настоящее время. Спутниковые технологии геодезии позволили экспериментально определить численные значения некоторых параметров этих перемещений.

А далее, с постановкой обширных экспериментальных исследований современных движений земной коры на геодинамических полигонах различного назначения, были выявлены внутриплитовые геодинамические движения. Причем, на ряде разломов различного типа были обнаружены аномальные вертикальные и горизонтальные движения [4]. Эти аномальные события, названные суперинтенсивными геодинамическими движениями, высокоамплитудны (до 50–70 мм/год), короткопериодичны (0.1 – 1.0 год), пространственно локализованы (0.1 – 1.0 км) и обладают пульсационной и знакопеременной направленностью.

И, наконец, внедрение дифференциальных технологий спутниковой геодезии в периодическом (дискретном) и непрерывном вариантах мониторинга за смещениями и деформациями позволило коллективу ученых ИГД УрО РАН выявить новый класс геодинамических движений в разломных зонах с амплитудами до 60–110 мм, периодами 30–60 сек, 40–60 мин. и подтвердить движения с периодами до года и более. Всем этим движениям, наряду с трендовой составляющей, свойственны пульсационный характер и знакопеременная направленность [5].

Трендовые и циклические знакопеременные геодинамические движения геологической среды, особенно вблизи разломов, свидетельствуют о ее постоянной подвижности и выступают в качестве естественной формы существования. В связи с этим, роль и место современной геодинамики трудно переоценить среди фундаментальных наук о Земле. Не менее важно ее значение в решении практических задач обеспечения устойчивости объектов недропользования.

Механизм воздействия геодинамики на объекты недропользования зависит от вида движений, их параметров, состояния и свойств массива и конструктивных особенностей сооружений. Места проявления геодинамических движений, а, следовательно, и места проявления аварий и катастроф в большей мере тяготеют к активным тектоническим структурам и непосредственно прилегающим к ним объемам пород и участкам земной поверхности. Так, например, на магистральных нефтепроводах повторяющиеся аварии разрывов более чем на 80 % концентрируются в разломных зонах [6].

Объекты, расположенные на активных тектонических структурах с выраженными трендовыми движениями, зачастую разрушаются при достижении в их конструктивных элементах предельных деформаций или напряжений. Однако тектонические структуры со значимыми трендовыми движениями встречаются не часто. Иногда они могут инициироваться техногенной деятельностью. Так, например, на шахте «Магнетитовая», разрабатывающей Высокогорское железорудное месторождение, в 2000 г. произошла подвижка по взбросо-сдвигу Среднему на 25–30 см, зафиксированная в подземных горных выработках.

Циклические движения более распространенные, воздействие их более многогранно и, в зависимости от частоты, проявляется как в непосредственном влиянии циклических деформаций на сам объект, так и через изменение свойств массива горных пород в разломных зонах под влиянием переменных циклических нагрузжений. Механизм непосредственного воздействия циклических деформаций на инженерные сооружения достаточно прост. Если амплитуда знакопеременных деформаций длиннопериодных и короткопериодных движений превысит допустимые деформации конструктивных элементов сооружений, то в нем проявятся нарушения с соответствующими аварийными последствиями.

Если уровень деформаций ниже допустимых значений, то аварийные последствия от короткопериодных циклических движений определяются усталостными эффектами. Наибольшую опасность в этом плане представляют

короткопериодные колебания с продолжительностью циклов около одной минуты и около одного часа, создающие, соответственно, 500000 и 9000 циклов нагружения в год. Время разрушения от циклических нагружений зависит от соотношения амплитуды переменных деформаций со значениями предельных деформаций.

Изменение свойств массива горных пород в разломных зонах под влиянием переменных циклических нагружений довольно распространенное явление. Однако внешне его признаки не контрастны и выявление непосредственного их влияния на объекты весьма проблематично. Известно, что в природе явление тиксотропии возникает в некоторых видах грунтов и пород в период землетрясений. За счет знакопеременных циклических нагружений грунты, имеющие в статическом состоянии достаточную несущую способность, разжижаются, резко снижая свои прочностные и деформационные характеристики. Это вызывает деформирование зданий и инженерных сооружений и нередко ведет к их перекосу и опрокидыванию. Но это явление происходит лишь в короткий период действия землетрясения. Впоследствии грунты восстанавливают свои обычные свойства.

Тиксотропия в разломных зонах, сложенных во многих случаях скальными породами с более нарушенной структурой, вызывается циклическими короткопериодными геодинамическими движениями и, в силу более низких частот в сравнении с колебаниями при землетрясениях, проявляется в размытой форме на протяжении длительных промежутков времени. Это явление более точно, видимо, можно охарактеризовать термином квазитиксотропия.

Таким образом, причиной квазитиксотропного состояния пород разломной зоны являются короткопериодные современные знакопеременные геодинамические смещения. Вызванные ими знакопеременные циклические нагружения приводят к изменению прочностных и деформационных свойств структурно нарушенных пород разломных зон. В зависимости от конструктивных особенностей сооружений, взаимодействующих с разломными участками массива горных пород, складываются различные механизмы и сценарии развития аварий и катастроф.

Выявленный спектр современных геодинамических движений и обусловленные ими явления в массиве горных пород и на земной поверхности позволяют схематично представить механизм развития катастроф на объектах недропользования в следующем виде:

- при трендовых геодинамических движениях объекты недропользования подвергаются непосредственному нагружению медленно развивающимися смещениями и деформациями и разрушаются при достижении предельных значений;

- при циклических геодинамических движениях объекты недропользования подвергаются непосредственному воздействию циклических смещений и деформаций и негативному влиянию неравномерного деформирования за счет изменения свойств пород, взаимодействующих с объектом.

Синтезированные схемы развития аварийных состояний использованы при решении практических задач по изучению причин нарушения и разработке

рекомендаций по сохранению устойчивости канализационного коллектора в г. Сургуте, по обеспечению устойчивости бортов Коршуновского карьера, магистрального газопровода Бухара-Урал, при выборе площадки под строительство IV энергоблока БАЭС и др.

Выявленная взаимосвязь современных геодинамических движений с механизмом катастроф на объектах недропользования составляет основу в изучении их зарождения и развития, а также позволяет повысить эффективность решения прикладных задач по предупреждению и предотвращению негативных событий.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 03-05-64891, и Совета по грантам Президента РФ и государственной поддержки ведущих научных школ, грант НШ-1258.2003.5.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Николаев Н.И. Новейшая тектоника и геодинамика литосферы. – М.: Недра, 1988.
2. Теркот Д.Л., Шуберт Дж. Геодинамика: Геологические приложения физики сплошных сред. Ч. 1. Пер. с англ. – М.: Мир, 1985.
3. Вегенер А. Происхождение материков и океанов. Современные проблемы естествознания. – М.-Л.: Геоиздат, 1925.
4. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании. – М.: Агентство экологических новостей, 1999.
5. Sashourin A.D., Panzhin A.A., Kostrukova N.K., Kostukov O. M. Field investigation of dynamic displacements in zone of tectonic breaking / Rock mechanics – a challenge for society: Proceedings of the ISRM regional Symposium EUROCK 2001. Espoo, Finland / Balkema / Rotterdam / Brookfield. – 2001.
6. Кострюкова Н.К., Кострюков О.М. Локальные разломы земной коры – фактор природного риска. – М.: Изд-во АГН, 2002.

© А.Д. Сашурин, 2005

УДК 622:681.3

Е.В. Рубцова

ИГД СО РАН, Новосибирск

О СОЗДАНИИ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ СОПРОВОЖДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

Понятие «географическая информационная система» (ГИС) появилось в 80-х годах и первоначально употреблялось для определения информационных систем, связанных с автоматизированной обработкой пространственных данных (геодезия, картография и др.). На сегодняшний день геоинформатика – современный научный метод компьютерной обработки пространственно-распределенной информации, применяемый к любым объектам, независимо от их размеров, структуры, назначения [1]. Общим для объектов приложения геоинформатики является то, что все они в информационном плане могут быть представлены на стадии исходных данных массивом точек в трехмерных координатах, при этом каждая точка имеет определенные идентификаторы качества. Это общее свойство самых разнородных объектов позволяет применить к ним одни и те же принципы сбора, хранения, программной обработки и графической интерпретации информации.

Проведенный обзор выявил следующие подходы к использованию геоинформационных технологий в решении задач горного производства:

- Применение готовых зарубежных геоинформационных систем, ориентированных на горнодобывающую отрасль;
- Разработка отечественных специализированных программных средств с использованием универсальных СУБД и графических пакетов двух- и трехмерной интерпретации данных;
- Создание систем на основе инструментария универсальных ГИС.

Рассмотрим наиболее развитые зарубежные геоинформационные системы для горной промышленности, к которым можно отнести DATAMINE, VULCAN, MINESCAPE, GEMCOM, TECHBASE, SURPAC [1 – 4]. Основным назначением предлагаемых систем является обработка геологических данных, планирование и проектирование открытых и подземных горных работ, геолого-маркшейдерское обслуживание. В состав программного обеспечения входят специфические средства для моделирования и графической интерпретации месторождений, основанные на ГИС-технологиях подготовки и обработки исходных данных. Отличия в большинстве случаев заключаются в объеме и назначении сервисных модулей, перечне поддерживаемых устройств ввода-вывода, совместимости с базами данных определенных форматов, требованиях к минимальной конфигурации компьютера. Приведем краткую характеристику перечисленных систем.

DATAMINE – интегрированная модульная система программных продуктов. Основной математический модуль (оболочка) служит для создания базы данных трехмерной математической модели месторождения на основе первичной геологической информации и, в дальнейшем, для оценки полученных результатов. Встроенный графический редактор GUIDE позволяет получить пространственную графическую модель рудного тела и горных выработок (контур карьера, подземные выработки и т. д.), провести подсчеты запасов и качественных характеристик руд. Средствами DATAMINE достаточно просто получить сечения карьера (горизонтальные планы, продольные и поперечные разрезы).

Программные средства фирмы VULCAN используются в наибольшей степени применительно к пластовым месторождениям. Возможности комплекса VULCAN включают объемное представление сети выработок шахты, разработку планов подготовительных и очистных выработок, проектирование процессов транспортирования и вентиляции.

Система MINESCAPE, ориентированная в основном на использование в угледобывающей отрасли, создает геологическую блочную модель, включающую до 15 показателей качества полезного ископаемого. Для подземных условий добычи MINESCAPE позволяет создавать и проверять проектные схемы фактической и предлагаемой отработки пластовых месторождений.

Отличительной особенностью программного обеспечения системы GEMCOM является наличие модуля, позволяющего выполнять широкий спектр приемов блочного моделирования и интерполирования. Система GEMCOM

осуществляет динамическое моделирование производственного процесса, при этом программы анимации позволяют пользователю наблюдать на экране и анализировать эффективность взаимодействия различных единиц техники и других объектов. Модули проектирования подземных работ предоставляют средства для обработки маркшейдерских инструментальных съемок, детального планирования очистных работ, проектирования буровзрывных работ.

Программное обеспечение TECHBASE выполняет технологическое картирование с использованием таких средств интерполяции, как ближайший район, триангуляция, сплайны, обратные расстояния, крайгинг, анализ вариограмм. В систему введены расчет водопритоков и расчет устойчивости откосов и бортов карьера. Система автоматизированного проектирования TECHBASE обеспечивает среднесрочное и долгосрочное планирование горных работ, оптимизацию границ отработки. При оперативном планировании в интерактивном режиме на дисплее отображаются контуры карьера, текущее положение горных работ, блоки геологической модели и т. д.

SURPAC-2000 обладает мощным модулем подземной и поверхностной топографической съемки, интегрированным с модулем графического изображения и редактирования данных. Цифровое моделирование осуществляется методом триангуляции. Модуль «Сплошное моделирование» позволяет из серии разрезов создавать каркасные геологические модели в ручном или автоматическом режимах. На их основе строятся блочные модели, описывающие подземные выработки, карьеры или любую их комбинацию. Процесс проектирования открытой разработки обеспечен средствами для изменения параметров и оценки устойчивости откосов бортов и уступов. Имеются средства для проектирования сечений подземных выработок, проходческих работ.

Следующая программа — MINESCAPE. Она закуплена четырьмя угледобывающими предприятиями России. Однако она длительное время находится в стадии освоения и введена в эксплуатацию только на шахте «Распадская». Пакет DATAMINE освоен в институте «Уралгипроруда», внедряется в АК «Алроса». Система TECHBASE эксплуатируется на монголо-российском совместном предприятии «Эрдэнэт».

К причинам, сдерживающим применение зарубежных систем, можно отнести высокую стоимость программных средств, недоступную большинству отечественных предприятий; отсутствие достаточно квалифицированного персонала для освоения сложных программных продуктов; необходимость адаптации систем под российские стандарты ведения горных работ.

В отечественной горной науке развитие геоинформационных технологий изначально связано с работами по математическому моделированию месторождений. Простейшая блочная модель месторождения была предложена И. Б. Табакманом в 1964 г.; в 1971 г. А.З. Яшкиным была разработана точечно-цифровая послойная модель месторождения, в которой положение каждого элементарного блока определялось уже не порядковым номером блока, а координатами его центральной точки; в начале 80-х Ю. К. Шкутой и Б. А. Симкиным была предложена гипсометрическая модель месторождения,

имеющая уже все признаки геоинформационной [1]. Различные виды моделей были созданы в 80–90 гг. в целом ряде научных учреждений горного профиля.

Параллельно велись работы по созданию горно-технологических баз данных. Так в ГоИ КНЦ РАН созданы базы данных по основным месторождениям Кольского полуострова, включающие в себя горно-геологические параметры, геомеханические данные и факторы [5]. Созданный в ИУУ СО РАН банк данных «Угли Кузбаса» [6] включает предметные базы данных, ориентированные на описание геологии угленосных отложений Кузбасса, запасов и качественных характеристик углей, производственной деятельности угольных предприятий и т. д. Базы данных о геологическом строении горного массива разрабатывались также в УкрНИМИ, ДонГТУ, ПО «Павлодаруголь» [7].

Отметим, что на сегодняшний день в России и ближнем зарубежье наиболее активно геоинформационные технологии используют в системах проектирования и геолого-маркшейдерского обслуживания при разработке полезных ископаемых открытым способом. Применение геоинформационных технологий при подземной добыче не получило пока широкого практического применения. Работы в этом направлении ведутся в УкрНИМИ, ВНИМИ, ИПКОНе, ГоИ КНЦ РАН, ИУУ СО РАН.

В УкрНИМИ в течение нескольких лет проводились исследования по возможности применения ГИС-технологий для решения задач угледобывающей отрасли [8]. По мнению специалистов УкрНИМИ, ГИС в угледобывающей отрасли должны обеспечивать: работу с объемными трехмерными моделями природных и техногенных объектов горнодобывающего предприятия; построение типовых изображений, используемых в маркшейдерской документации (карт, геологических планов и разрезов); ориентацию на терминологию и символику, непосредственно связанную с работой геологов и маркшейдеров, решение конкретных задач специалистов отрасли. Кроме того, необходимо обеспечить выполнение основных «стандартных» функций ГИС: моделирование данных и изображений по слоям; наличие открытой для изменений и дополнений библиотеки условных обозначений; поддержку распределенных баз данных; возможность создания дополнительных приложений для решения специфических задач конкретного пользователя; импорт-экспорт данных в иные ГИС.

Основу разработанной в УкрНИМИ ГИС «ГеоМарк» составляет база данных, отображающая реальные природные и техногенные объекты горного предприятия. Предусмотрено связывание элементов базы данных в иерархическую структуру, описывающую вложенность и подчиненность объектов конкретного горного предприятия. Реализация программ ведения базы данных выполняется как в локальном, так и в сетевом варианте. Составные части ГИС «ГеоМарк» следующие: модуль вычислительных задач, модуль получения графических материалов, администратор производственных объектов и целевых классификаторов, администратор свойств и параметров объектов, модуль связи с внешними базами данных.

Модуль вычислительных задач предназначен для автоматизации расчетов различными производственными службами. Он представляет собой среду, позволяющую выбирать группы природных и техногенных объектов в толще пород в пределах шахтного поля, отображать двумерную и трехмерные схемы их взаимного расположения и производить вычисления. Основные функции модуля: получение данных по скважинам и результатам горных работ в пределах шахтного поля; моделирование поверхностей практически любой конфигурации с учетом зон нарушений, сложных техногенных и иных областей; построение изолиний распределения различных параметров; построение сечений и разрезов; обработка различных маркшейдерских измерений и решение маркшейдерских задач. Другие модули позволяют корректно использовать карты, полученные иными ГИС («Альбея», «Интелвек»), производить импорт объектов в карты разных форматов, объединять карты разных исходных форматов в единое целое, осуществлять импорт объектов и их параметров из баз данных, созданных иными программными средствами.

Работы по созданию основы ГИС «ГеоМарк» завершены. В настоящее время разрабатывается ряд программных модулей, проводятся мероприятия по внедрению ГИС «ГеоМарк» на производственных объединениях.

Разработкой геоинформационных систем, обеспечивающих решение различных эксплуатационных задач при подземной добыче полезных ископаемых занимаются во ВНИМИ. В основе разрабатываемой маркшейдерско-геологической аналитической информационной системы (МГАИС) для горного предприятия лежат результаты работ различных лабораторий ВНИМИ (геологии, маркшейдерии, геомеханики, геодинамики, гидрогеологии, геофизики и т. д.). Концептуальные основы системы опубликованы в [9].

В [10] описаны структура и принципы построения отдельных модулей МГАИС. В основе структуры – сетевая модель «клиент-сервер». Система включает: программное ядро и объектную трехмерную маркшейдерскую базу данных – маркшейдерский модуль, геологический модуль, графическое программное ядро системы – Microstation, СУБД Access или ORACLE, модули календарного планирования, расчета деформаций земной поверхности, проектирования дорог, рекультивации. Информационная система имеет динамическую объектную структуру данных, что позволяет наращивать ее функциональные возможности в процессе разработки. Используемый в системе трехмерный инженерный геологический редактор ТИГР [35, 36] позволяет автоматизировать труд маркшейдера, обеспечивает трехмерную визуализацию данных и результатов расчетов, отвечает современным отечественным стандартам для горной графической документации.

Во ВНИМИ разрабатывается концепция геодинамического моделирования месторождений [11]. К настоящему времени выполнен большой объем работ по выявлению блочной структуры земной коры и активных разломов территорий горнопромышленных регионов России. Прежде всего, это относится к регионам разработки угольных месторождений (Кузнецкий, Партизанский и Печорский бассейны) и рудных (Североуральские и Южноуральские месторождения

бокситов, апатитов на Кольском полуострове, полиметаллов в Норильске и железных руд в Таштаголе). Информационный комплекс включает данные по геологическому и структурно-тектоническому строению месторождения, результаты выделения активных разрывов и блочной структуры, участков локализации тектонически напряженных зон, оценку техногенного воздействия на напряженно-деформированное состояние массива при разработке месторождений. Концепция геодинамического моделирования предполагает последовательную разработку трех типов моделей: геолого-геометрической, геодинамической и горно-геодинамической.

Комплекс программных средств построения компьютерной геолого-геометрической модели месторождения описан в [12]. Основой для построения модели служит база данных геологических объектов. Предлагаемая технология предусматривает формирование любого геологического объекта (бассейн, месторождение, шахта, пласт, скважина, нарушение и т. д.) на основе базовых таблиц-справочников. Применяемая технология «клиент-сервер» предусматривает возможность одновременной работы группы пользователей с аккумуляцией информации на сервере базы данных. Серверная часть программы создана с использованием продукта фирмы Microsoft SQL SERVER, клиентская – DELPHI, компании Borland. Построение базируется на алгоритмическом описании пластов (рудных тел) в объеме вмещающих пород и тектонических нарушений. Исходными данными для моделирования служат точки геологических наблюдений, расположенные по нерегулярной сети. Предлагается следующий путь геометризации залежей.

1. Формируется информационная модель залежи по точкам геологических наблюдений.

2. Используя стандартные методы моделирования, получают первичную модель геологического тела.

3. Исходная модель подвергается трансформации на основе неформализуемых представлений специалиста.

Для автоматизированного построения геологических поверхностей разработаны и программно реализованы алгоритмы: формирование массива исходных данных по точкам геологических наблюдений; выделение отдельного петрографического типа пород и любой произвольной совокупности типов пород; выбор метода интерполяции/экстраполяции исходных данных; построение моделей геологических поверхностей методами наименьших квадратов, сплайн-функции, ближайшего района, триангуляции, поверхностей Шепарда, полиномиальной регрессии, сглаживания по радиусам влияния исходных точек. В системе реализованы: построение диаграмм трещиноватости, расчет параметров разрывного нарушения, выделение однородных участков, построение геологических разрезов.

Во ВНИМИ разработан специальный аппаратно-программный комплекс «GITS» для контроля геодинамических процессов в массиве горных пород [13]. Комплекс используется в системе мониторинга геомеханических процессов, создаваемой на рудниках Октябрьского месторождения, г. Талнах. В разрабатываемой системе предполагаются ввод и обработка «стационарной»

информации (схемы подземных выработок, планы отработки полезного ископаемого, геологические разрезы, схемы установки контрольных точек наблюдения) и текущей информации (ежедневные карты сейсмической активности, суточные графики акустической активности, замеры с деформационных станций, данные буро-взрывных работ и т. д.). В качестве программной оболочки для создания базовой среды ГИС выбрано программное обеспечение фирмы Autodesk: RastrArts – программа работы с растровыми изображениями; Softdesk – программа построения поверхностей; Vtchanical Desktop – программа твердотельного моделирования.

Работы по созданию геоинформационных систем для горной отрасли на основе универсальных ГИС ведутся в Институте проблем комплексного освоения недр, где на основе Arc View 3.0 разработана «Методика автоматизированного расчета деформаций земной поверхности при эксплуатации и ликвидации угольных шахт» [14]. Инструментарий Arc View 3.0 используется также специалистами Национальной горной академии Украины при создании системы комплексного анализа геолого-геофизических данных. Они считают, что такой подход имеет преимущества по сравнению с разработкой «с нуля» или на основе отдельных стандартных блоков [15].

Проведенный обзор позволил сделать следующие выводы:

- Зарубежные геоинформационные системы для горных предприятий обладают достаточно широким спектром функциональных возможностей, однако их применение в отечественной практике сдерживается высокой стоимостью программных средств и отсутствием на большинстве горных предприятий специалистов, способных их освоить;
- Основным подходом при создании отечественных геоинформационных систем для горного производства следует признать разработку специализированных программных средств на базе универсальных СУБД и стандартных графических пакетов;
- Геоинформационные технологии наиболее активно применяются при разработке месторождений открытым способом; аналогичные системы, ориентированные на условия подземных работ, находятся в стадии концептуального проектирования, обоснования структуры, разработки отдельных программных модулей;
- Расширение возможностей универсальных ГИС позволяет использовать их в качестве основы при создании геоинформационных систем для горной промышленности, однако при этом требуется написание дополнительных программных блоков, реализующих решение специфических горных задач.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Введение в геоинформатику горного производства: Учебное пособие / Под ред. В.С. Хохрякова. – Екатеринбург: УГГГА, 2001.
2. Ворошилов Г.А., Примаков В.С., Осипов М.В. Построение электронной модели месторождения в программе DATAMINE // Итоги и проблемы производства, науки и образования в сфере добычи полезных ископаемых открытым способом. Матер. междунар. научн.-техн. конф. – Екатеринбург: УГГГА, 2002.

3. Авдеев С.Е., Димант Б.И., Чупров В.А., Юрченко А.В. Информационные технологии и автоматизированные системы в АК «АЛРОСА» // Горный журнал. – 2000. – № 7.
4. Бямбадорж Н., Савчук С.К., Свистунов В.В. Компьютерное решение горно-геологических задач на СП «Эрдэнэт» // Горный журнал. – 2001. – № 5.
5. Козырев А.А., Калашник А.И. О применении информационных технологий для решения задач геомеханики при освоении минерально-сырьевых ресурсов Кольского полуострова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: Изд. МГГУ, 1999. – № 4.
6. Потапов В.П. Математическое и информационное моделирование геосистем угольных предприятий. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999.
7. Анциферов А.В., Глухов А.А. Опыт и перспективы применения ГИС в угольной промышленности // Проблемы геоинформатики при комплексном освоении недр // Докл. III Межд. науч.-практ. конф. – Днепропетровск, 2001.
8. Глухов А.А., Омельченко А.А. Особенности проектирования географических информационных систем для применения в горном производстве // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: Изд. МГГУ, 2001. – № 4.
9. Яковлев Д.В., Михалевич Д.С., Смирнов С.П. и др. Географическая информационная система горного предприятия // Проблемы геодинамической безопасности. II Междунар. рабочее совещание. – СПб.: ВНИМИ, 1997.
10. Михалевич Д.С., Голубков С.Н., Пятницкий К.В. и др. Маркшейдерско-геологическая аналитическая информационная система (МГАИС) для горного предприятия // Горная геомеханика и маркшейдерское дело. – СПб.: ВНИМИ, 1999.
11. Шабаров А.Н. Концепция геодинамического моделирования месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: Изд. МГГУ, 2001. – № 6.
12. Морозов К.В. Комплекс программных средств построения геолого-геометрической модели месторождения // Горная геомеханика и маркшейдерское дело. – СПб.: ВНИМИ, 1999.
13. Мулев С.Н. Геоинформационная система мониторинга геодинамических процессов // Горная геомеханика и маркшейдерское дело. – СПб.: ВНИМИ, 1999.
14. Негурица Д.Л. Применение геоинформационных систем для расчета сдвижений и деформаций земной поверхности // Уголь. – 1998. – № 12.
15. Бусыгин Б.С., Никулин С.Л. Инструментарий ГИС как средство создания систем интегрированного анализа геолого-геофизических данных // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: Изд. МГГУ, 1999. – № 7.

© Е.В. Рубцова, 2005

УДК 622.831

Н.А. Мирошниченко

ИГД СО РАН, Новосибирск

О ПЕРСПЕКТИВАХ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ДВИЖЕНИЙ ПОРОДНОГО МАССИВА

За последние десятилетия на рудниках России зарегистрировано множество горных ударов природного и техногенного происхождения, повлекших значительные разрушения горных выработок, подземных коммуникаций, механизмов, повреждения наземных промышленных объектов и жилых зданий. Значительные перегрузки претерпевают подземные хранилища и сооружения вследствие естественной реконфигурации блочной структуры земной коры и возникающих при этом сейсмических явлений.

Важнейшим условием эффективной и безопасной разработки и эксплуатации месторождений, использования сложных наземных и подземных сооружений является непрерывное наблюдение за динамикой деформационных процессов в них с целью оценивания механической устойчивости

контролируемых объектов, выработки превентивных мер по обеспечению устойчивости, а также своевременного оповещения о надвигающейся опасности.

Решение проблемы сохранения и устойчивого развития горнодобывающих предприятий представляется возможным посредством создания систем, построенных на основе комбинированного использования новейших результатов в области геомеханики и информационных технологий и реализующих комплекс задач по контролю НДС массива без прерывания основного технологического процесса на контролируемом объекте. Передовой зарубежный опыт обработки месторождений в условиях сложной геомеханической обстановки показывает, что необходимость применения соответствующих мониторинговых систем не имеет альтернативы.

Анализ действующих в мире систем геомеханического мониторинга позволяет сформулировать перечень требований и рекомендаций к проектированию и построению системы деформационного мониторинга (ДЕМОН), обеспечивающей непрерывное наблюдение за процессами движений породного массива при отработке месторождений. Прежде всего отметим, что она может применяться автономно или совместно с другими автоматизированными системами контроля геофизических, геодинамических, экологических и других процессов в составе интегрированной сети геомеханического мониторинга, вариант которой рассматривается, например, в [1].

Основу концепции построения системы ДЕМОН должна составлять специализированная информационно-вычислительная сеть, компонентами которой являются:

- Центр распределенной обработки данных, оборудованный развитыми средствами их накопления и хранения;
- Сетевые терминальные станции, обеспечивающие регистрацию измерительной информации от локальных групп датчиков деформаций и перемещений, экспресс-обработку данных и подготовку их для передачи в центр обработки;
- Автономные терминальные станции, также оборудованные устройствами накопления и хранения данных, и позволяющие обслуживающему персоналу периодически считывать накопленную информацию с помощью переносного устройства;
- Автоматизированные рабочие места системных программистов, технологов, маркшейдеров и руководителей подразделений различных уровней, обеспечивающие поддержку базы данных системы ДЕМОН в актуальном состоянии и использование ее информационных ресурсов в технологическом процессе;
- Коммуникационная сеть на базе локальных и/или территориально-распределенных вычислительных сетей, обеспечивающая множественный доступ терминальных и рабочих станций к центру обработки.

Вариант структурной схемы системы деформационного мониторинга приведен на рисунке.

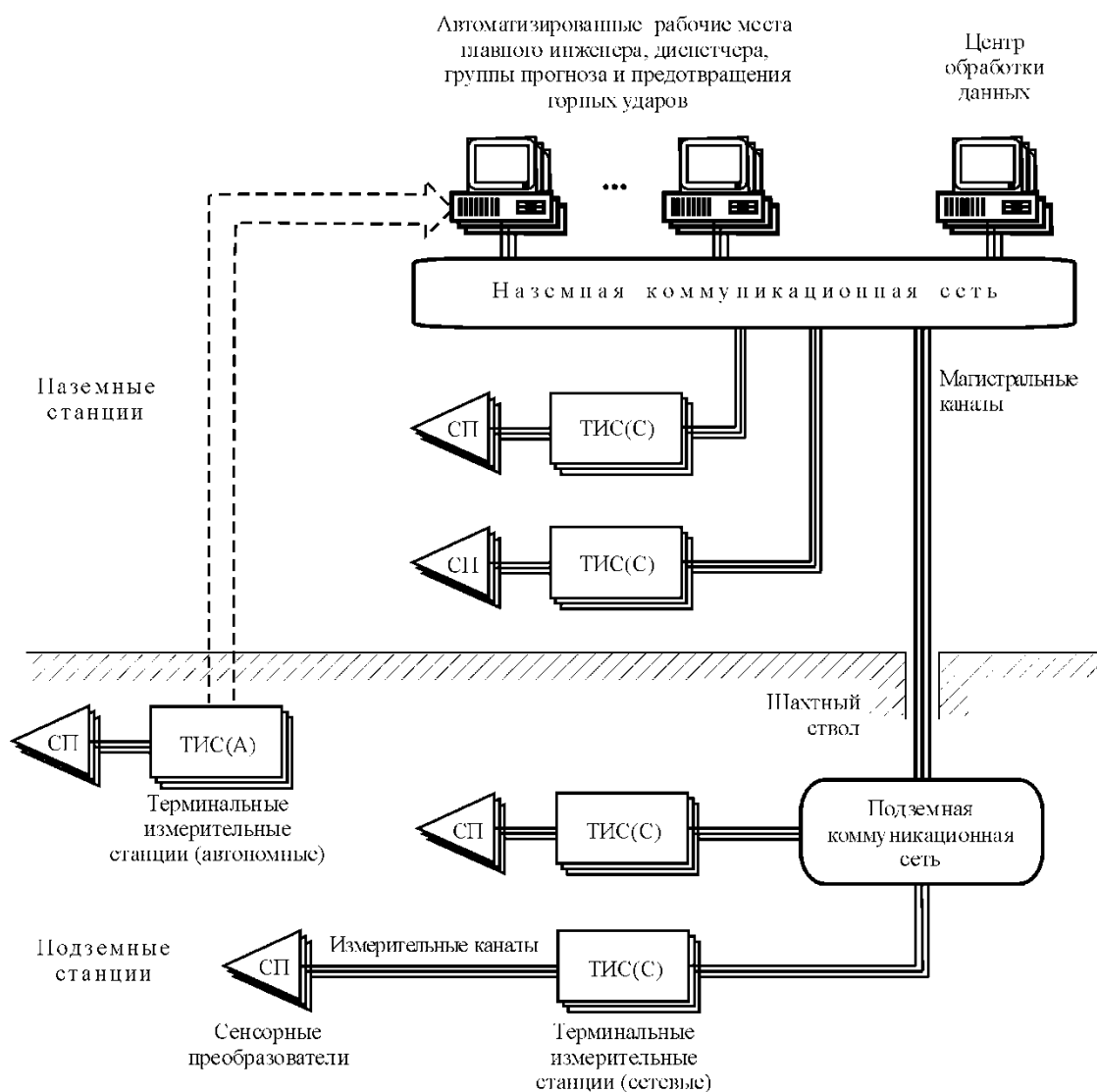


Рис. Структурная схема системы деформационного мониторинга

Предлагаемый подход базируется на учете специфики контролируемых технологических объектов и на использовании мировых достижений в области построения промышленных информационно-измерительных систем [2 – 13].

Технические решения, закладываемые в архитектуру коммуникационной сети, должны обеспечивать гарантированную своевременную и помехоустойчивую передачу данных в условиях реального технологического процесса, промышленных помех, аппаратных и программных сбоев, при ненадежной работе оборудования. Принципиально новым должно стать методологическое наполнение системы, базирующееся на фундаментальных результатах в области геомеханики, данных многолетних натурных наблюдений, а также на анализе представительного экспериментального материала.

Система ДЕМОН должна обеспечивать контроль, диагностику и прогноз деформационных процессов, развивающихся в породной среде, в которой предельные уровни деформаций могут привести к аварийным или

катастрофическим последствиям. В ближайшее время от применения системы представляется возможным получить лишь социальный эффект, связанный с обеспечением безопасности при разработке месторождений полезных ископаемых.

По мере развития, совершенствования и адаптации к реальной геомеханической обстановке система ДЕМОН должна обеспечить предсказание опасных проявлений напряженно-деформированного состояния массива, а также эффективное управление им. Все это непременно повысит рентабельность системы и сократит сроки ее окупаемости, так как наряду с обеспечением безопасности работ следует ожидать улучшения экономических показателей предприятия-пользователя за счет гарантированной ритмичности его работы, сокращения расходов на ремонтно-восстановительные и профилактические мероприятия.

В систему ДЕМОН необходимо заложить перспективные методики контроля, прогноза и управления горным давлением, базирующиеся на обобщении фактического материала многолетних натурных измерений на различных месторождениях страны, что будет определять основной элемент новизны системы и являться залогом ее высокой эффективности. Кроме того, в организацию системы должны быть заложены следующие современные технические решения, гарантирующие длительные сроки ее эксплуатации:

- Возможность наращивания числа и типов измерительных станций в контролируемой промышленной зоне;
- Непрерывное совершенствование показателей эффективности прогноза удароопасности и предотвращения горных ударов по мере накопления учетно-статистического материала и опыта эксплуатации системы;
- Перспектива создания региональной или даже национальной сети геомеханического мониторинга путем интегрирования систем подобного назначения, а также систем геофизического и сейсмологического мониторинга посредством стандартных средств телекоммуникаций (сети Интернет).

Существенным преимуществом сети ДЕМОН по сравнению с известными системами аналогичного назначения должно стать интегрирование в единой информационной среде всех функциональных компонентов сети, обеспечивающих получение оперативных оценок текущего геомеханического состояния контролируемого массива и достоверный прогноз его поведения при планируемом развитии горных работ.

Основными функциональными компонентами системы ДЕМОН являются:

- Подсистема регистрации развивающихся в массиве деформаций и связанных с ними изменений геофизических полей;
- Подсистема интерпретации геофизических данных;
- Подсистема принятия решений и выработки мероприятий по управлению горным давлением.

Подсистема регистрации предусматривает возможность функционирования нескольких сотен измерительных каналов, распределенных по объему контролируемого массива, по которым автоматически и непрерывно

регистрируются величина и интенсивность деформаций, с возможностью варьирования интервалов усреднения в зависимости от динамической активности протекающего процесса. Подсистема должна обеспечивать автоматическую обработку данных, непрерывно регистрируемых в течение 20 лет и содержащих информацию: о результатах натурных измерений параметров НДС, о количественных и качественных характеристиках динамических проявлений горного давления, об используемых способах контроля и прогноза состояния массива, о принятых мерах по управлению горным давлением и их результативности.

Подсистему интерпретации геофизических данных необходимо создавать в виде открытой программной системы, которая развивается и совершенствуется по мере накопления статистического материала о поведении контролируемого массива и опыта эксплуатации системы ДЕМООН в условиях конкретного технологического процесса.

Основным содержанием данной подсистемы должно стать базовое методологическое наполнение системы ДЕМООН, которое следует строить на базе комбинированного использования методов моделирования и прогнозирования геомеханических процессов, вероятностно-статистических методов анализа данных, экспертного оценивания геомеханической обстановки. Реализация подобного подхода гарантирует получение достоверных прогностических оценок НДС конкретного объекта с учетом существующей профессиональной подготовки обслуживающего персонала.

Новизну предлагаемых решений по организации методологического наполнения системы ДЕМООН составляет то, что:

- Данные опорных натурных измерений предполагается использовать при определении граничных условий для двух- и трехмерных статических задач о НДС блочного массива, учитывающих нелинейный характер деформирования контактов между блоками;

- Методом обратного анализа будет осуществляться адаптация двух- и трехмерных геомеханических моделей к реальной обстановке в массиве, которая определяется как по результатам статистического анализа накопленной в системе ДЕМООН измерительной информации, так и по контрольным независимым замерам напряжений с помощью измерительно-вычислительных комплексов типа «УК-Гидрозонд», «Эпсилон» и др.;

- Математические модели геофизической среды должны использоваться совместно с аппроксимативными моделями поведения контролируемого массива, полученными по результатам статистической обработки долговременных наблюдений;

- В базовую структуру методологического наполнения системы предполагается заложить комплекс процедур статистического оперативного прогнозирования поведения массива на основе анализа динамических рядов величин деформаций с учетом параметризованных геофизических моделей и аппроксимативных моделей ретроспективного поведения массива;

– Математические модели объекта, статистические аппроксимативные модели и прогностические модели будут интегрированы в базу знаний экспертной системы ДЕМОН, которая предназначена также аккумулировать неформализованные эмпирические знания о проявлениях горного давления и методах управления им. При этом предполагается разработка программных интерфейсов предложенных формальных моделей, доступных для использования не подготовленным специально персоналом.

Новизну предлагаемых технических решений при создании системы ДЕМОН отражают следующие моменты:

– Система ДЕМОН представляет собой открытую гибкую техническую систему специального назначения, в структуру которой заложены возможности выбора требуемой конфигурации сети терминальных станций, числа, местоположения и типов станций в зависимости от технологических условий и набора регистрируемых параметров состояния геофизической среды, а также возможности развития методов и средств обработки и интерпретации геофизической информации;

– Для достижения требуемой зоны действия (максимальное удаление от центра обработки – для подземных выработок – 10 км, для земной поверхности – 15 км) в организации коммуникационной сети системы ДЕМОН предусмотрены меры, обеспечивающие технически обоснованную пропускную способность и необходимую помехозащищенность;

– Надежность и живучесть системы ДЕМОН обеспечивается путем соблюдения требований международных стандартов на организацию распределенных информационных систем промышленного применения, а также соответствующим конструктивным исполнением технических устройств и кабельных линий связи для шахтных условий.

Изложенное позволяет надеяться, что при практической реализации системы ДЕМОН проявятся основные ее положительные качества, заключающиеся в том, что она:

– Базируется на многоканальных и непрерывных измерениях деформаций – величин, с наибольшей полнотой характеризующих НДС массива;

– Охватывает как подземные выработки, так и наземные сооружения (промышленный образец системы должен иметь несколько сотен измерительных каналов);

– Имеет эксплуатационные характеристики и техническое исполнение, отвечающие условиям работы в подземных рудниках, также учитывает уровень квалификации обслуживающего персонала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курленя М.В., Леонтьев А.В., Беляков В.Г. и др. Фундаментальные и прикладные задачи геомеханического мониторинга. Ч. 2. Структура данных и моделей // ФТПРПИ. – 1996. – № 6.

2. Development of an automated PC-network-based seismic monitoring system / Rockbursts and Seismicity in Mines – RaSiM5, South African Institute of Mining and Metallurgy, 2001.

3. Rock A., Snyder L., Haramy E. Automated geophysical system to evaluate underground structural stability // 3rd Int. Symp. Mine Mech. and Autom., Golden, Colo, June 12–14, 1995: Proc. – Vol. 2.
4. Swanson P. Ground Stability assessment with seismic monitoring // NIOSH Publ. – 2000. – № 109.
5. Monitoring Katse / World Tunnell. and Subsurface Excav. – 1998. – 11. – № 8.
6. Baranowski Z. Zagrozenie tapaniami w kopalniach Rudzkiej Spolki Weglowej S.A. // Prz. Gor. – 1997. – 53. – № 6.
7. Qian Jian-sheng, Liu Fu-quiang, Chen Zhi-guo, Wang En-yuan, He Xue-qiu // Zhongguo kuangye daxue xuebao J. Chin. Univ. Mining and Technol. – 2000. – 29. – № 2.
8. Srinivasan C., Arora S. K., Benady S. Precursory monitoring of impending rockbursts in Kolar gold mines from microseismic emissions at deeper levels // Int. J. Rock Mech. and Mining Sci. – 1999. – 36. – № 7.
9. Redmayne D.W., Richards J.A., Wild P.W. Mining-induced earthquakes monitored during pit closure in the Midlothian Coalfield // Quart. J. Eng. Geol. – 1998. – 31. – № 1.
10. Яковлев Д.В., Норватов Ю.А., Исаев Ю.С. и др. Мониторинг геодинамической и геоэкологической безопасности освоения недр и земной поверхности / Пробл. геодинам. безопас.: II Междунар. раб. совещ. Санкт-Петербург, 24–27 июня, 1997. – СПб., 1997.
11. Тимофеев В.В., Федотова Ю.В., Тузов В.Н., Каган М.М. Геомониторинг процессов в массиве пород при отработке подземных месторождений // Геомеханика при ведении горн. работ в высоконапряжен. массивах / Горн. ин-т Кольск. науч. центра РАН. – Апатиты, 1998.
12. Каспарьян Э.В., Черноусов О.Л., Каткова Л.С., Каспарьян Е.Э. Особенности геодезического мониторинга деформирования массивов пород на рудниках ОАО «Апатит» // Геомеханика при ведении горн. работ в высоконапряжен. массивах / Горн. ин-т Кольск. науч. центра РАН. – Апатиты, 1998.
13. Прангишвили И.В., Пашенко Ф.Ф., Молчанов С.А., Чернышев К.Р. Системы информационной поддержки оперативного персонала для предприятий повышенного риска // Приборы и системы управления. – 1996. – № 4.

© Н.А. Мирошниченко, 2005

УДК 622.83:[528.2:629.78]

А.А. Панжин

ИГД УрО РАН, Екатеринбург

ДИАГНОСТИКА ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

В последние годы актуальными становятся исследования геодинамических процессов, протекающих в верхней части земной коры и имеющих как естественную, так и техногенную природу. В большинстве случаев динамическая активность массива горных пород, так или иначе, связана с его строением, поскольку эти процессы проявляются в виде медленных трендовых подвижек по границам структурных блоков и происходят на фоне короткопериодных знакопеременных колебаний прилегающего массива. Особенно важны эти исследования в расположении капитальных выработок горного предприятия, являющихся жизненно необходимыми для его бесперебойного функционирования.

Существующие в настоящее время геофизические методы и методы дистанционного зондирования горных пород дают довольно четкую информацию о строении массива, о наличии в нем дизъюнктивных нарушений, по которым возможна реализация его потенциальной энергии в виде подвижек.

Однако точно определить степень геодинамической активности того или иного дизъюнктивного нарушения этими методами на сегодняшний день не представляется возможным, поскольку в этом случае интерпретируются косвенные данные об изменении различных физических полей.

Реальную степень геодинамической активности массива горных пород можно оценить только по результатам непосредственного измерения величин деформаций и смещений специально оборудованных реперов наблюдательной станции. При этом высокоточные измерения полных пространственных векторов смещения реперов и деформаций интервалов между ними производятся как в разовом, так и в мониторинговом режимах, с фиксацией короткопериодной и трендовой составляющих.

Жесткие требования к проведению подобного рода геодезических работ – обширные территории, охватываемые измерениями, высокий уровень точности определения величин сдвижений и деформаций, короткие периоды времени между сериями инструментальных измерений, а зачастую и необходимость проведения измерений в режиме непрерывного мониторинга – все это предопределяет необходимость использования современного высокоточного и производительного геодезического оборудования. Первичная обработка и интерпретация больших объемов экспериментального материала, а также представление его в виде изменения полей напряжений и деформаций, требует создания соответствующих методических разработок и программного обеспечения.

Донской горно-обогатительный комбинат в Казахстане – одно из крупнейших в мире предприятий по добыче и обогащению хромовой руды. Сырьевую базу комбината составляют высококачественные хромовые руды Южно-Кемпирсайских месторождений, разработка которых началась в 1938 г. В первые десятилетия их эксплуатации разработка велась открытым способом, однако к настоящему времени запасы, пригодные к отработке открытым способом, уже выработаны, и поэтому основные объемы рудной массы будут добываться подземным способом – шахтами «Молодежная» и «Десятилетие независимости Казахстана» (ДНК).

К настоящему времени уже запущена I очередь шахты ДНК – мощностью около 1 млн т сырой руды в год, которая будет отрабатывать запасы месторождений Миллионное, Алмаз-Жемчужина и залежи № 21. В ближайшее время предполагается строительство и пуск в эксплуатацию II очереди шахты ДНК мощностью около 5 млн т. Разведанные запасы месторождения (категории В + С₁ + С₂) составляют 131.5 млн т. Размеры рудного поля составляют 2.5 км в направлении Север-Юг и 3.1 км в направлении Запад-Восток (рис. 1). Рудные тела располагаются на глубинах 770 – 1100 м.

В геологическом отношении месторождения расположены в южной части Кемпирсайского ультраосновного массива, в структурном – приурочены к Акжарской струйчатой структуре. В строении массива ведущее место занимают ультраосновные породы, слагающие дунитовые тела, контакты слагающих пород – преимущественно тектонические. Довольно интенсивно на месторождении проявляется дизъюнктивная тектоника. Документировано

несколько мощных тектонических структур с вертикальными амплитудами смещений от 50 до 200 м. Тектонические нарушения проявляются в виде мощных зон дробления, милонитизации, интенсивной трещиноватости и рассланцевания. На поверхности тектонические зоны четко идентифицируются как линияменты в ландшафте. При строительстве I очереди шахты ДНК тектонические нарушения были подсечены при проходке стволов «Клетевой» и «Скипо-Клетевой», при этом наблюдались вывалы породы при проходке стволов.

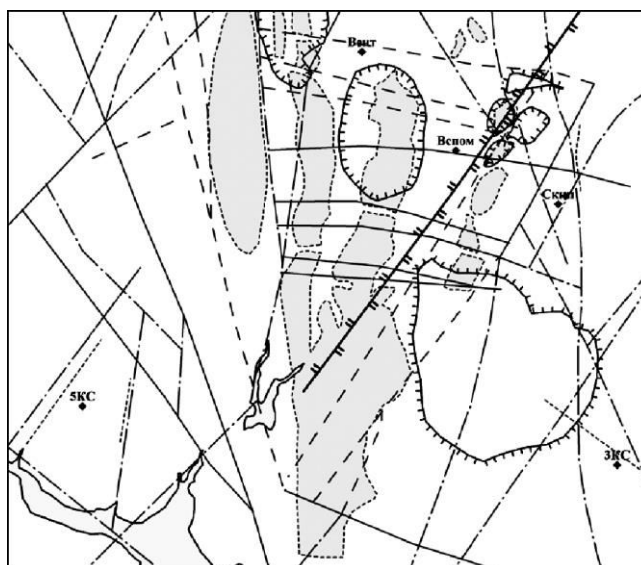


Рис. 1. Общая схема участка наблюдений на шахте ДНК с объектами на поверхности и структурными нарушениями

Строительство II очереди шахты ДНК включает расконсервацию ствола «Клетевого» в интервале глубин 600–1100 м и проходку нового скипового ствола висячем боку месторождения на глубину до 1200 м. При этом серьезную озабоченность вызывает документально установленная подвижность дизъюнктивных нарушений, пересекающих шахтное поле, в том числе и в районе промплощадок шахты ДНК. В связи с этим, геодинамической безопасности при строительстве II очереди шахты ДНК уделяется особое внимание.

Осенью 2002 г. Институтом горного дела УрО РАН были выполнены полевые геодезические измерения с целью диагностики геодинамической активности горного массива в районе промплощадок шахты ДНК (II очередь) с целью мониторинга их состояния и прогноза устойчивости стволов шахты в процессе их проходки и эксплуатации (рис. 2). Измерения были выполнены на 4 площадках шахты – на двух из них уже пройдены вертикальные стволы, а на остальных проходческие работы только проектируются. Наиболее вероятным выбором места заложения стволов является площадка 5КС, массив которой, согласно данным геологоразведочных работ, сложен более устойчивыми породами, чем массив площадки 3КС, которая рассматривается как альтернативная. Предшествующими инженерно-геологическими изысканиями

все дизъюнктивные нарушения, пересекающие предполагаемые площадки, были документированы. Однако степень их геодинамической активности по результатам геологической и геофизической съемок можно установить только весьма приблизительно по косвенным данным. Точные данные о геодинамической активности участка предполагаемого строительства можно получить только в результате прямых высокоточных измерений величин деформаций, которыми сопровождается изменение напряженного состояния массива. При выполнении второго этапа работ определялись амплитуды и периоды короткопериодных деформаций породного массива, которые были использованы при выборе способа крепления вертикальных стволов и расчете несущей способности крепи. На третьем, заключительном, этапе работ были выполнены геодезические измерения на участке борта отработанного карьера «Объединенный», который после отработки был затоплен, а в конце 2001 г. – осушен. Полученные деформации, вызванные осушением прибортового массива карьера, были интерпретированы как ожидаемые, которые, вероятно, будут иметь место при расконсервации ствола «Клетевого», который был законсервирован путем его затопления.

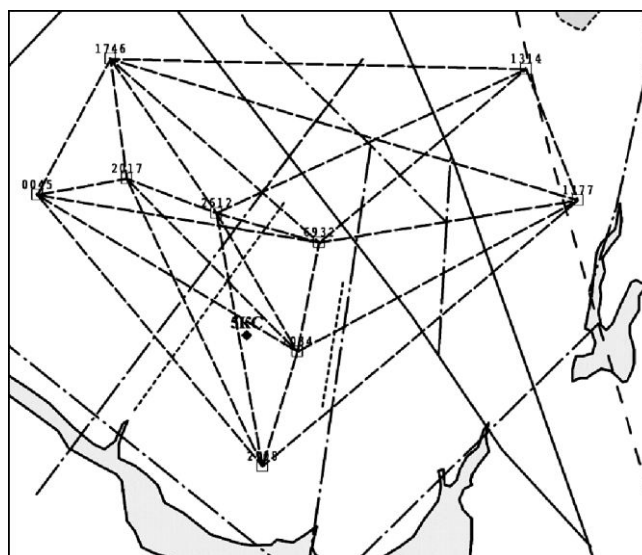


Рис. 2. Схема геодезической сети на экспериментальном участке площадки 5КС

Комплекс работ по геодинамической диагностике включал определение трендовых движений за прошедший период путем переопределения координат пунктов полигонометрии, оборудованных в 1985 г. на территории шахтного поля. Переопределения координат реперов производились с использованием комплексов спутниковой геодезии по специально разработанным методикам. В исследованиях использовался комплект спутниковой геодезии фирмы Trimble Navigation (США), включавший 4 GPS-приемника серии 4600LS и 1 приемник серии 4000SSE, сертифицированные в качестве измерительных приборов. Точность измерений смещений двух точек друг относительно друга зависела от условий приема, от показателя PDOP и колебалась в пределах 2–3 мм. Она обеспечивалась дифференциальной технологией GPS, когда одновременно

работают два приемника, установленных на двух точках, ограничивающих измеряемый отрезок, полностью открытым небосводом, не препятствующим приему спутниковых радиосигналов и ночным графиком выполнения полевых работ, сводящим до минимума влияние ионосферы на результаты измерений. В проводимых исследованиях применялось 4–5 приемников, ведущих одновременную работу на 4–5 точках. При последующей попарной обработке это обеспечивало измерение смещений одновременно по шести и более отрезкам на местности, которые образовывали большое количество замкнутых геометрических построений, позволяющих достаточно точно оценить геодезические наблюдения. Камеральная обработка данных производилась с использованием фирменного программного обеспечения, поставляемого с приемниками, а также дополнительных программ, разработанных в ИГД УрО РАН и значительно расширяющих возможности самого комплекса. В процессе проведения измерений проводился дополнительный контроль за работой всей системы путем оценки точности замыкания треугольников и четырехугольников, образуемых работающими приемниками.

В соответствии с разработанной методикой диагностики геодинамической активности района строительства шахты в сентябре месяце 2002 г. были произведены определения трендовых смещений за последние 17 лет, которые определялись по 9 пунктам полигонометрии на площадке 5КС (рис. 2). В процесс исследования были вовлечены все сохранившиеся на сегодняшний день в этом районе геодезические пункты, которые обеспечили достаточно плотное покрытие изучаемой территории, и оценка геодинамической активности была осуществлена по параметрам деформирования 24 векторов.

Измеренные в ходе проведения полевых работ длины линий и превышения между реперами геодезической сети сравнивались с длинами линий и превышениями, измеренными в 1985 г. при определении исходных координат пунктов геодезической сети. Вертикальные и горизонтальные деформации массива горных пород на исследуемом участке определялись путем соотношения расхождений длин линий и превышений к длине соответствующей линии. Трендовые смещения пунктов полигонометрии в пространстве и изменения деформационного поля, произошедшие за 17 лет с момента их заложения, являются исходными данными к определению множества показателей, характеризующих изменения напряженно-деформированного состояния за этот период. Изменения длин векторов между парными пунктами геодезической сети, объединенными в треугольники, послужили исходными данными для определения изменений горизонтальных тектонических напряжений на отдельных участках, ограниченных этими треугольниками (рис. 3).

Рассматривая результаты проведенных экспериментальных работ, следует отметить, что, с одной стороны, фактический уровень деформаций массива горных пород оказался несколько ниже ожидаемого, а, с другой стороны, уровень вертикальных деформаций в 2.5 раза превысил уровень деформаций горизонтальных. Амплитуда горизонтальных деформаций составила $0.1 \cdot 10^{-3}$ с заметным преобладанием деформаций растяжения. Амплитуда вертикальных деформаций составила $0.25 \cdot 10^{-3}$ с небольшим преобладанием деформаций

вертикального растяжения. Хотя полученные величины деформаций невелики и составляют 10–20 % от критических для сооружений первой категории охраны и сами по себе не могут привести к разрушению конструктивных элементов капитальных горных выработок, их накопление в трендовом режиме за весь период эксплуатации шахты может оказаться существенным.

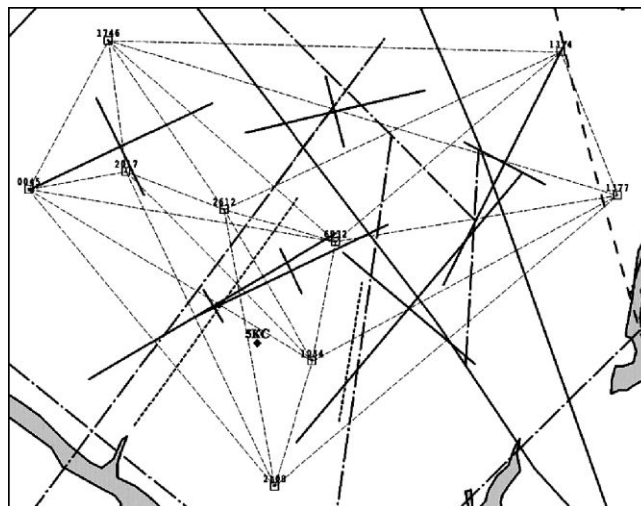


Рис. 3. Приращения горизонтальных тектонических напряжений за 17-ти летний период наблюдений

Распределение приращений напряжений по площадке 5КС, как видно из рис. 3, относительно равномерное, хотя для каждого участка, ограниченного векторным треугольником, есть свои особенности в величинах напряжений и их направлениях, что свидетельствует о дискретном характере деформирования блочного массива горных пород. В среднем, первый инвариант приращения горизонтальных тектонических напряжений за 17 лет, вызванный геодинамическими смещениями трендового характера, составляет 0.5–0.8 МПа.

Таким образом, анализ трендовых смещений за последние 17 лет показал, что уровень изменений параметров напряженно-деформированного состояния существенен и должен учитываться при конструировании и расчете крепи капитальных горных выработок с длительными сроками эксплуатации. На основании выполненных работ для породного массива в районе существующих и проектируемых промплощадок шахты ДНК обоснованно составлен регламент на откачку воды в стволе шахты «Клетевой». Даны рекомендации по контролю напряженного состояния и качественной характеристике бетонной и тюбинговой крепи стволов. Дан прогноз состояния устойчивости крепи стволов с учетом дизъюнктивной тектоники месторождения. Следует также отметить высокую эффективность разработанной методики диагностики динамической активности массива, с помощью которой оказалось возможным определить изменения его напряженно-деформированного состояния за относительно небольшой промежуток времени.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ БАССЕЙНОВ КАЗАХСТАНА

Слабая разработанность вопросов прогнозирования природно-техногенных геодинамических явлений и, как правило, неожиданное возникновение этих событий при разработке месторождений углеводородов может приводить и в ряде случаев приводили к серьезным экономическим последствиям со значительным материальным ущербом.

Все формы проявления опасных современных природно-техногенных геодинамических явлений на разрабатываемых месторождениях углеводородов можно задокументировать на ранней стадии их развития лишь путем постановки и проведения специальных инструментальных наблюдений – сейсмических, геодезических, геофизических и других, т. е. на таких территориях необходим комплексный геодинамический мониторинг.

Большую роль при осуществлении геодинамического мониторинга играет геологическая изученность района. В. Сидоров отмечает, что при разработке месторождений углеводородов имеет место устойчивая совокупность условий способствующих возникновению аномальных деформаций (просадок) и горизонтальных смещений земной поверхности:

- Отбор пластовых флюидов происходит из рыхлых, неконсолидированных, слабосцементированных песков и песчаников, переслаивающихся с глинами. Значения пористости этих пород достигают 30-40%. В этих условиях на поверхность вместе с пластовой жидкостью выносятся, как правило, значительное количество породы;

- Значительная суммарная мощность продуктивных отложений;

- Наличие относительно тонких (несколько десятков метров) регионально выдержанных прослоек глинистого материала, играющего роль «смазки», по которым происходит сдвигание массивов;

- Возможны локальные горизонтальные смещения в массивах соляных куполов и антиклиналях при потере ими механической устойчивости в силу природных или техногенных причин. Эти явления наиболее вероятны при наличии маломощных несолевых пропластков в соленосных отложениях, которые также играют роль «смазки», и т. Д.

Анализ геологического строения нефтегазоносных бассейнов Казахстана показал наличие всех этих факторов на тех или иных месторождениях. Кроме того структура многих месторождений осложнена тектоническими нарушениями.

© Н.Б. Калабаев, Н.Б. Хахулина, 2005

ОБЪЕМНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПОЛЯРИЗУЮЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ ПОВЫШЕННОГО И ПОНИЖЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Опыт применения метода вызванной поляризации для обнаружения объектов пластового типа повышенного сопротивления и повышенной поляризуемости при рассеянной или прожилковой минерализации сульфидов и других типов рудных объектов значителен. Под объектами подразумевается кварцевые и кварц-кальцитовые жилы, пласты угля, углеродистые и рудные зоны. Однако, довольно часто применяемые установки симметричного или дипольно-осевого профилирования, или срединного градиента не давали уверенного результата по определению выходов и особенно наклона рудных объектов. Связано это с тем, что чаще всего использовались установки, в которых количество приемных линий составляло от одной до трех, что не давало возможности отобразить результаты измерения в нижнее полупространство для определения наклона проводящих или непроводящих поляризующихся объектов.

Нами обоснована к применению схема наблюдений способом центрального электрода – ЦЭ. Эта схема, при которой питающий токовый электрод (ЦЭ) перемещается вдоль профилей наблюдения при втором закрепленном питающем электроде, удаленном на большое расстояние, а измерения электрических полей проводятся влево и вправо по профилю от каждой стоянки ЦЭ [1]. Именно взаимовстречные наблюдения на 8-12 точках (разносах) при перемещении ЦЭ с шагом, меньшим длины измеряемых отрезков профиля наблюдения, обеспечивают более достоверное определение наклона рудных объектов по поляризуемости и сопротивлению по сравнению с другими методиками исследования.

Использование многоразностных наблюдений, т.е. исследование разных глубин с увеличением расстояния ЦЭ-MN, позволяет отобразить материалы измерений в нижнее полупространство с отрисовкой положения объектов повышенной поляризуемости и повышенного или пониженного сопротивления в полуплоскостях XZ или YZ, при дальнейшем отображении выходов пластов в плане.

Разработанное нами новое математическое моделирование электрических полей для сложно-построенных сред используется для проектирования методических приемов работ и анализа результата измерений [2].

На рис. 1 приведены изолинии ρ_k и η_k для модели наклонных пластов повышенного сопротивления.

Мощность рыхлых отложений H_1 составляет 10 м, сопротивление $\rho_1 = 20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, поляризуемость $\eta_1 = 1\%$; вмещающие породы обладают сопротивлением $\rho_2 = 200 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и поляризуемостью $\eta_2 = 2\%$; модели объектов имеют сопротивление $\rho = 2000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ($\rho_2 = 20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ для проводящих

объектов), поляризуемость объектов $\eta = 6\%$. Данные объекты имеют разные толщину (от 5 до 12 м) и залегают встречно под углом 45° и 60° .

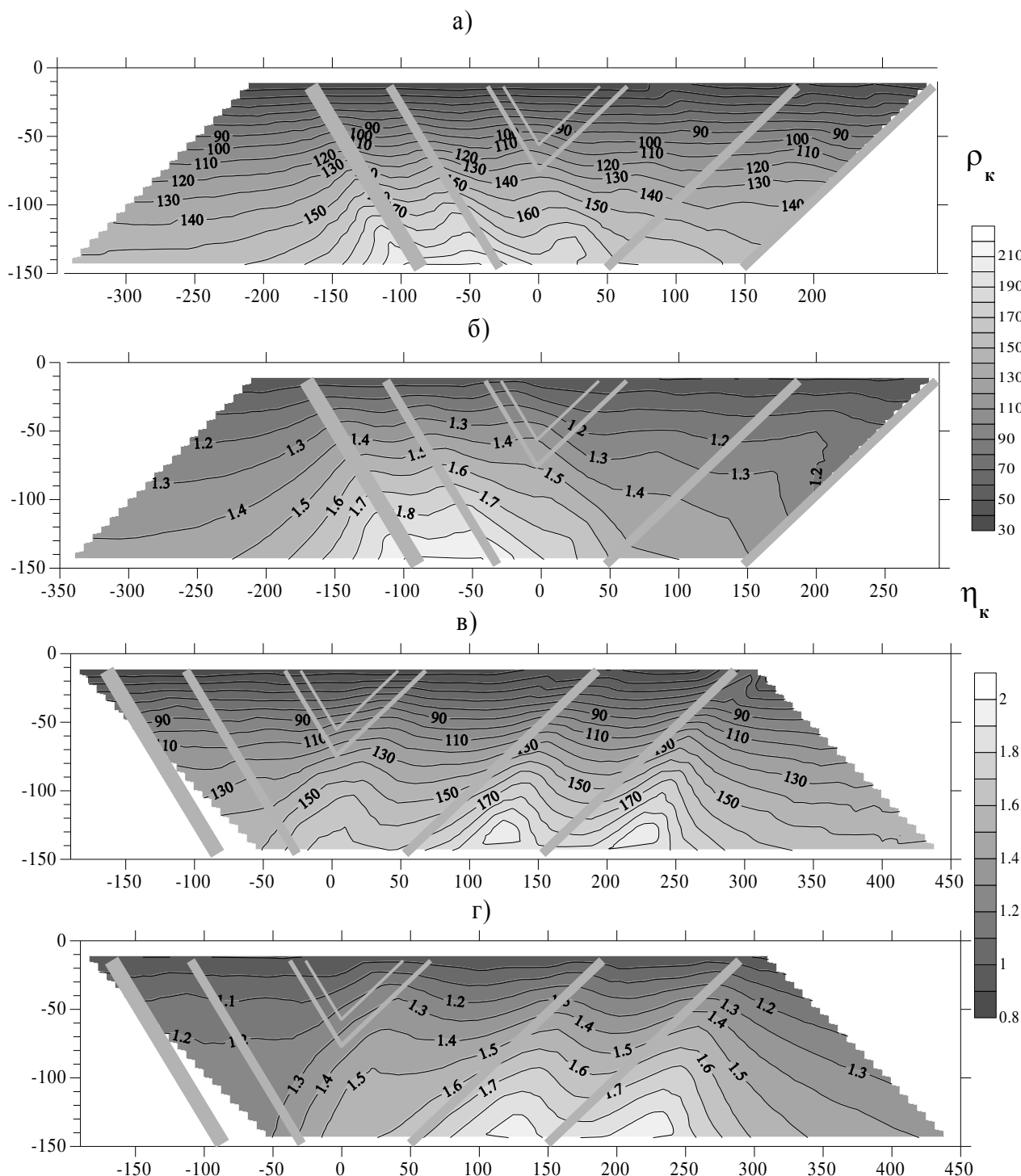


Рис.1. Изолинии кажущегося сопротивления и поля вызванной поляризации для модели пластов залежей повышенного сопротивления:

а) левые разности ρ_k ; б) левые разности η_k ; в) правые разности ρ_k ; г) правые разности η_k .

При расчетах шаг перемещения центрального электрода составлял 50 м, измерения проводились на 12 приемных линиях MN длиной 10 м, расположенных через 10 м вправо и влево от ЦЭ.

Изолинии кажущегося сопротивления и поля ВП представлены отдельно для приемных линий, расположенных слева от ЦЭ (левые разности), и для приемных линий, расположенных справа от ЦЭ (правые разности). На рисунках нанесены проекции моделей. Изолинии электрических полей ρ_k и η_k получены при проецировании результатов расчетов в нижнее полупространство под углами 45° . Угол проецирования выбирается для конкретных условий разреза.

Как видно из рисунка, при построении изолиний ρ_k и η_k в нижнем полупространстве при левом направлении разностей ЦЭ-MN четко выделяются пласты, имеющие правое падение (рис. 1а, 1б), и, наоборот, при правом направлении разностей ЦЭ-MN четко выделяются пласты, имеющие левое падение (рис. 1в, 1г).

Объекты пониженного сопротивления (рис. 2) также выделяются достаточно четко. Объекты малой мощности (6 и 5 м), расположенные на небольшом расстоянии друг от друга (10 м), отражаются как один пласт.

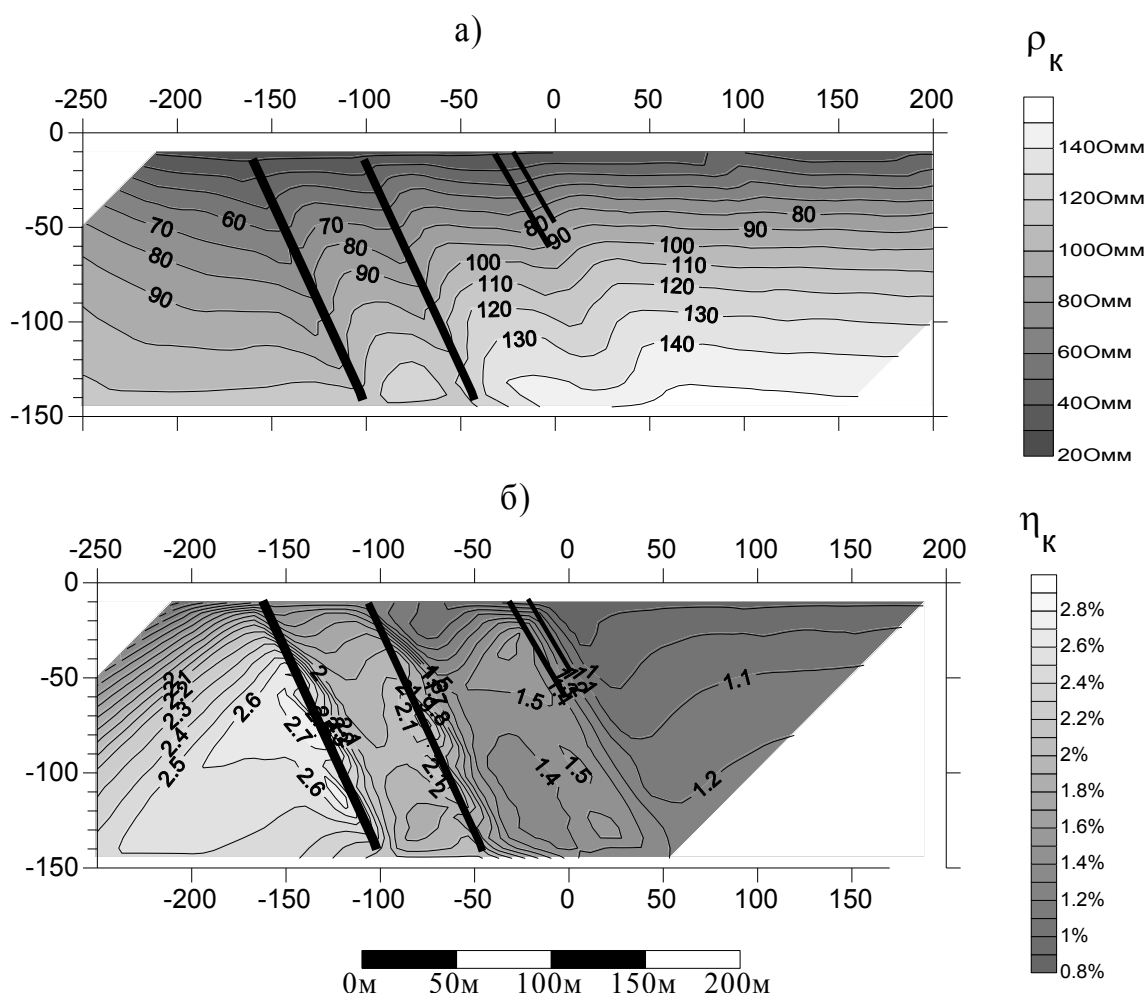


Рис. 2. Изолинии кажущегося сопротивления (а) и поля вызванной поляризации (б) для модели проводящих пластовых залежей

В изолиниях поляризуемости наличие пластов и их наклон определяется повышенным значением η_k и максимальным изменением в области самих

пластов. На картине изолиний η_k появляется дополнительная зона повышенных значений. Для таких обстановок необходимо анализировать графики ρ_k и η_k в строгой последовательности просмотра движения ЦЭ, поскольку незаряженные проводники имеют пониженное значение η_k под проводящим объектом (зона натекания тока).

В изолиниях ρ_k объекты пониженного сопротивления выделяются по резкому изменению значений, направленному по падению пластов, а для непроводящих пластов изолинии вытягиваются вверх.

Данная методика прошла практическое опробование при поисках и прослеживании пластов угля в чередующейся системе антиклинальных и синклинальных складок. Она способствовала рациональному размещению буровых скважин и сокращению объемов бурения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.С. Моисеев, Ю.В. Синдяев, А.С. Талашев. Методика изучения минерализованных зон способом центрального электрода // Геофизические методы поисков и разведки месторождений рудных полезных ископаемых в Сибири. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 1975. – С. 64 – 67.

2. В.С. Моисеев, Рояк М.Э., Соловейчик Ю.Г. Математическое моделирование процессов вызванной поляризации в сложно-построенных средах для токовой линии с заземленными электродами // Сиб. журн. индустр. математики. – 1999. – Т.2, № 2. – С. 135-146.

© В.С. Моисеев, Н.И. Паули, М.Г. Токарева, 2005

УДК 550.837

В.С. Моисеев, Н.И. Паули, М.Г. Токарева

СНИИГГиМС, Новосибирск

МЕТОД ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПРИ НЕФТЕПОИСКОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ В СЛОЖНЫХ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Авторы статьи с рядом производственных организаций уже имеют более, чем 20 двадцатилетний опыт нефтепоисковых работ в основном для территории южной части Сибирской низменности. Эта территория обладает устойчивым геоэлектрическим разрезом без резких изменений электрических сопротивлений отдельных слоев. На данной территории были проведены геофизические работы методом вызванной поляризации. Измерения проводились установкой срединного градиента сначала одноканальной, затем восьмиканальной аппаратурой. При измерениях такой установкой процессы становления поля и вызванной поляризации имеют разный знак измеряемого поля и легко различаемые времена преимущественного влияния одного или другого процесса.

Уровень повышенных значений поляризуемости над нефтегазовыми залежами по сравнению с нормальным полем составлял 1.0 - 0.2% в диапазоне времен измерения 0.1 – 2.0 с соответственно. В этом временном диапазоне знак измеряемого поля определялся преимущественным влиянием эффектов ВП. Разнос питающей линии АВ составлял 1500 м, поскольку такой разнос позволяет обнаружить ореол повышенной поляризуемости, образующийся над

залежами углеводородов с глубины 2 - 3 км в наиболее плотных глинах на глубине 500 – 800 м. На этом уровне находится региональный водоупор.

Эффективность метода ВП на выявленных участках работ при общей площади исследований в 3000 кв. км. составила более 70% по последующему бурению 100 скважин. При этом все известные месторождения, включенные в площадь опоискования, а их было более 20, в том числе неструктурного типа, нашли отражения в площадных аномалиях ВП. Только в нескольких случаях аномалии отсутствовали над залежами углеводородов в зоне дезинтеграции палеозойских отложений, что объясняется их малыми размерами по сравнению с сетью полевых работ или очень малым дебитом.

Однако при исследованиях в Западной Сибири нами отмечалась связь значений ρ_k и η_k с рельефом местности даже при перепаде высот всего на 20 м на временах измерения до 200 мс. В этом случае рассматривались результаты измерений на более поздних временах.

В таких условиях необходимо учитывать влияние перепадов сопротивлений и связанных с ними изменениями эффектов становления поля и на более поздних временах. Это повысит достоверность выявленных аномалий параметра поляризуемости.

Для повышения достоверности поиска нефтеперспективных площадей предлагается использовать измерения на одни и те же приемные линии, когда по отношению к питающей линии они последовательно являются внутренними, т.е. измерения проводятся установкой срединного градиента (СГ), а потом внешними, т.е. установкой внешнего градиента (ВГ). При этом должно сохраняться положение приемных линий относительно ближайшего питающего электрода при перемещении питающей линии. При измерениях с начального положения питающей линией A_1B_1 следующие измерения осуществляются с питающей линией, перемещенной на расстояние $A_1B_1/2$ влево и вправо от закрепленных электродов A_1 и B_1 . Таким образом, на одних и тех же приемных линиях обеспечиваются наблюдения установками СГ и ВГ. При этом на данных приемных линиях для установок СГ и ВГ сохраняется знак и уровень становления поля, а поле ВП для этих установок имеет противоположное направление. Вычитание измеряемого вторичного поля установок СГ и ВГ для каждой приемной линии позволяет избавиться от влияния СП при двойном уровне ВП. Далее вдоль профиля измерения процесс переноса питающих и приемных линий повторяется.

Такая схема измерений является вполне технологичной, поскольку положение приемных и питающих линий имеет строгую закономерность, и такие установки могут быть подготовлены заранее.

Остается проанализировать обеспечивается ли равенство эффектов СП установок СГ и ВГ для каждой точки измерения и происходит ли полная компенсация СП. Связано это с тем, что для многослойных сред глубинность установок СГ и ВГ немного отличается, и поэтому возможна разность в эффектах СП для установок СГ и ВГ.

На рис. 1 представлены результаты расчетов эффектов СП и ВП для модели нормального поля одного из самых восточных участков Западной

Сибири и практические данные в нормальном поле и над поляризующемся объектом. $(\Delta V_{\text{вп}} - \Delta V_{\text{сп}}) * 100\% / \Delta V_{\text{пр}}$ (установки СГ или $(\eta_k - \delta)$) и (установки ВГ или $(\eta_k + \delta)$).

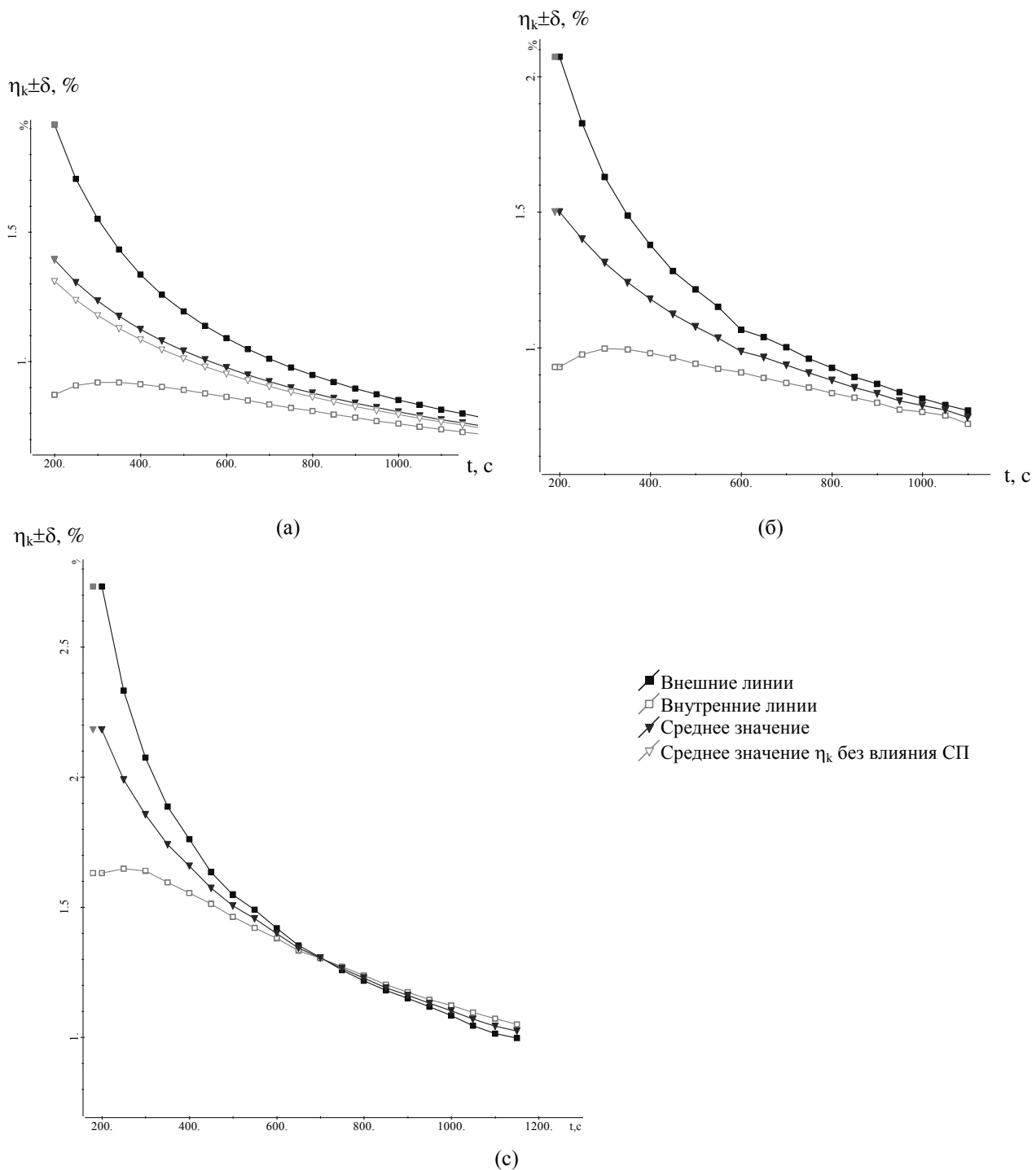


Рис. 1. Графики нормированных параметров $(\eta_k \pm \delta)$ для внутренних и внешних точек наблюдения и средних значений η_k :

а) теоретическое нормальное поле; б) практическое нормальное поле; в) практические результаты (над объектом)

AB = 1500 м. $r = 625$ м

Модель нормального поля: $H_1 = 200$ м, $\rho_1 = 50$ Ом·м, $\eta_1 = 1\%$; $H_2 = 400$ м, $\rho_2 = 15$ Ом·м, $\eta_2 = 1\%$; $H_3 = 450$ м, $\rho_2 = 3$ Ом·м, $\eta_3 = 1\%$; $H_4 = \infty$, $\rho_4 = 200$ Ом·м, $\eta_4 = 2\%$.

Расчеты проведены в диапазоне времен 20-1200 мс при установке ВГ и СГ для $AB = 1500$ м и расстоянии от центра MN до ближайшего электрода $r = 625$ м. Для сравнения приведен график η_k без влияния эффектов СП. Из сопоставления графиков установок СГ и ВГ очевиден факт заметного влияния процессов СП на изучаемое поле ВП даже на поздних временах измерения. Однако суммарное поле установок СГ и ВГ фактически полностью компенсирует СП, поскольку η_k в чистом виде мало отличается из полученного из расчетов для двух установок. Недокомпенсация СП на времени 500 мс составляет 0.02%, а далее еще меньше.

Практические данные измерений в нормальном поле отвечают расчетным. Область повышенных значений поля ВП существенно отличается от нормального поля. Но уверенность в достоверности выделения зоны повышенных значений η_k появилось только при измерениях совместными СГ и ВГ установками, поскольку на участке наблюдались значительные изменения электрического сопротивления пород, следовательно, и СП.

Необходимость измерений установками СГ и ВГ становится очевидной для многих регионов.

В разрезах, содержащих чередование пластов разного электрического сопротивления, возможно достаточно сложное сочетание процессов становления поля (СП) и поляризуемости (ВП) по времени измерения и удаленности от питающих электродов для внешних и внутренних точек наблюдения.

На рис. 2 представлены результаты расчетов ($\eta_k \pm \delta$) для модели нормального поля ($H_1 = 200$ м, $H_2 = 250$ м, $H_3 = 300$ м, $H_4 = 250$ м, $H_5 = 100$ м, $H_6 = 150$ м, $H_7 = 100$ м, $H_8 = 150$ м, $H_9 = \infty$; $\rho_1 = 50$ Ом·м, $\rho_2 = 25$ Ом·м, $\rho_3 = 10$ Ом·м, $\rho_4 = 60$ Ом·м, $\rho_5 = 3$ Ом·м, $\rho_6 = 20$ Ом·м, $\rho_7 = 3$ Ом·м, $\rho_8 = 50$ Ом·м, при начальной поляризуемости всех слоев 1%).

В модели 2 изменено электрическое сопротивление пятого и седьмого слоев на 0.3 Ом·м, а в модели 3 введена повышенная поляризуемость (3%) на глубине 250-500м. Из рис. 2 очевидно, что совместное применение установок СГ и ВГ позволило скомпенсировать влияние изменения сопротивления глубокозалегающих слоев (модель 1 и модель 2), а горизонт обладающий повышенной поляризуемостью (модель 3) нашел четкое отражение.

Практические данные по двум установкам в нормальном поле в диапазоне времен 0,1-1,5 с выявили очень примечательную особенность – устойчивые значения параметра поляризуемости на разных глубинах исследований карбонатного разреза до глубины 800-1000 м (рис. 2в). Достаточно изменчивые негладкие графики ($\eta_k + \delta$) и ($\eta_k - \delta$) установок ВГ и СГ превратились в прямые графики η_k .

В целом можно отметить, что предлагаемая технология измерений встречными установками СГ и ВГ существенно повышают достоверность

выделяемых аномалий поляризуемости при оценке нефтеперспективности площадей в сложных геоэлектрических условиях.

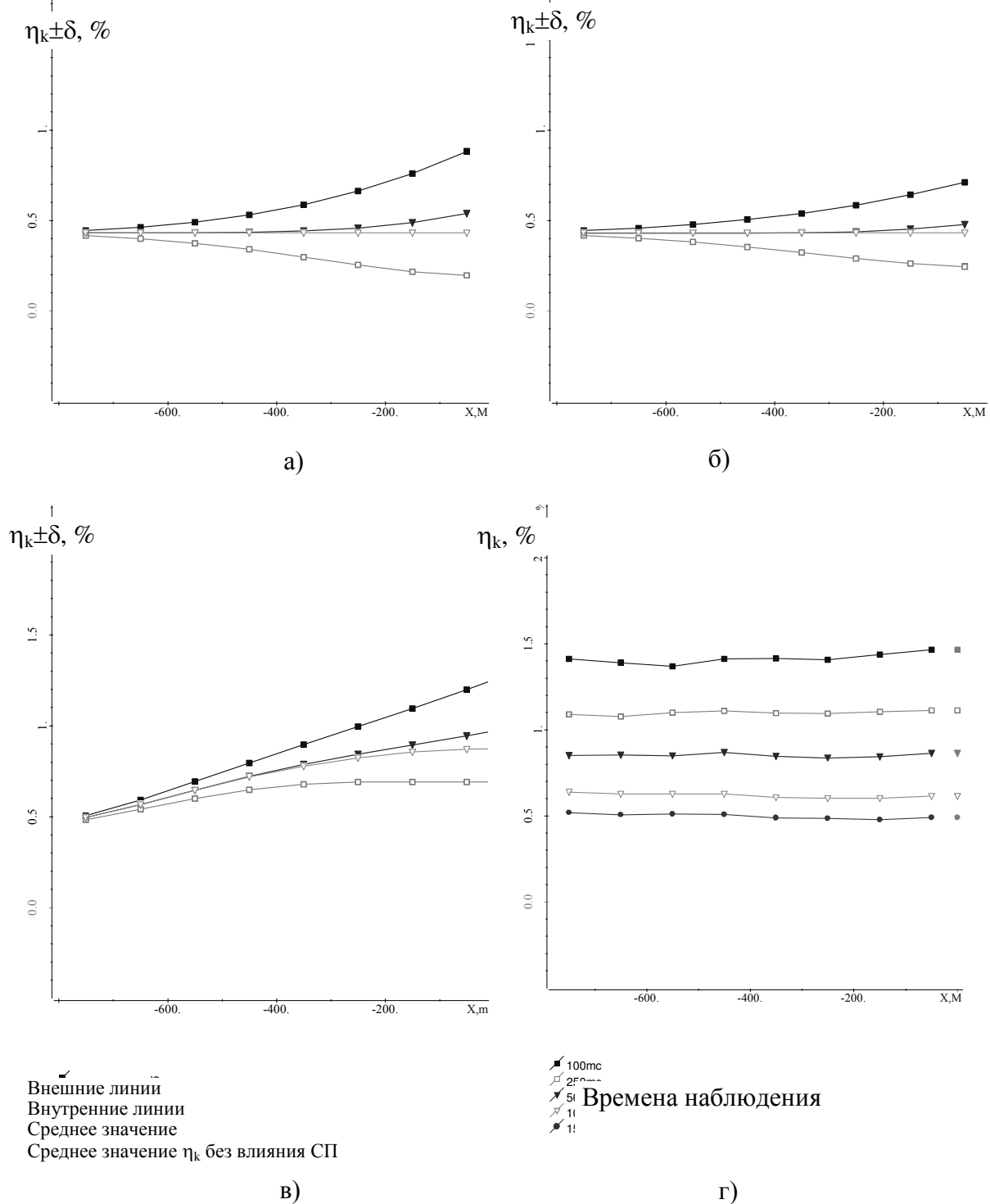


Рис. 2. Графики нормированных параметров ($\eta_k \pm \delta$) для внутренних и внешних точек наблюдения и средних значений η_k :

а) модель 1 – нормальное поле;

б) модель 2 – горизонт на глубине 1050-1150 м и 1300-1400 м с сопротивлением 0.3 Ом·м;

в) модель 3 – с повышенной поляризуемостью на глубине 250-500м

AB = 2000 м, t = 500 мс.

г) практические результаты: средние значения η_k для нормального поля

© В.С. Моисеев, Н.И. Паули, М.Г. Токарева, 2005

О ДОПУСТИМЫХ РАСХОЖДЕНИЯХ МЕСТНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НА ПУТЯХ СООБЩЕНИЯ

На путях сообщения по мере необходимости создаются местные сети, измерения ведутся спутниковыми приборами, электронными тахеометрами и комбинациями этих приборов. Эти сети точнее государственных, построенных по старым технологиям. Уравнивание новых сетей внутри жесткого каркаса понизит их точности за счет влияния погрешностей исходных данных.

Рекомендуется уравнивать сети как свободные, затем перемещать по осям координат и поворачивать так, чтобы суммы квадратов отклонений координат общих для двух сетей пунктов были минимальными. Для облегчения практического применения местных смежных систем рекомендуется устанавливать зону их перекрытия, где координаты пунктов приводятся в двух системах. Величина перекрытия зависит от местных условий.



Рис. Утолщенной линией показана зона перекрытия смежных систем координат

Отметим, что зоны перекрытия успешно практикуются в системе шестиградусных зон проекции Гаусса – Крюгера.

Приводятся критерии, когда расхождения координат общих пунктов можно не принимать во внимание. Доказывается соотношение, вытекающее из того, что расхождения носят случайный характер.

$$\Delta^2 = M_1^2 - M^2,$$

где Δ – ср. квадратическое расхождение какой-либо координаты в двух системах,

M_1 и M – средние квадратические погрешности в строгом и приближенном уравнивании. Строгим считается, когда новая сеть уравнивается совместно с частью прилегающих пунктов государственных сетей.

Теоретически нельзя обосновать на сколько можно допустить увеличение M_1 по сравнению с M . Допустим $M_1 = 1,1 M$. Тогда имеем

$$\Delta = 0,45 M.$$

Предельное расхождение с вероятностью 0,95 будет $= 0,9 M_m \approx M$.

При расхождениях координат в этих пределах с ними можно не считаться и использовать обе системы как единое целое. В зоне перекрытия перейти к средним значениям координат.

О ФРАКТАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ СИСТЕМ ЛИНЕАМЕНТОВ

В последнее десятилетие понятие фрактала приобрело широкую популярность благодаря высокой эффективности его использования при изучении свойств различных гетерогенных систем. Сейчас несомненно, что фракталы встречаются в огромном множестве физических процессов и явлений, в том числе, и горных породах.

Отметим, что регулярные фрактальные структуры в природе практически не реализуются. Именно поэтому мы рассматриваем в качестве определяющего свойства фракталов – свойство самоподобия. Сущность идеи самоподобия заключается в следующем: если рассмотреть фрактал при одном масштабе (или под одним увеличением некоего микроскопа), а затем при другом масштабе (увеличении), то различие между изображениями не обнаруживается.

Фрактальность реальных геологических сред подсказывает новые методы обработки и интерпретации результатов измерений. Диапазон возможного применения фракталов очень широк, начиная с относительно простой задачи выделения аномальных зон, которые очень часто и являются объектом исследования, и, заканчивая задачей изучения особенностей поведения геофизических полей во фрактальных средах.

В частности, геодинамика занимается изучением Земли как динамической системы, в которой на протяжении всей её эволюции непрерывно шли, и продолжают в настоящее время процессы создания и уничтожения на самых различных уровнях. Исходя из этого, строились различные математические модели динамических систем. Например, известная модель динамической системы с сухим трением, предложенная Барриджем и Кноповым в 1967 г. [1] и впоследствии развивавшаяся многими исследователями.

Даже в этой простой модели можно увидеть, что поведение системы, связанное с появлением скачков скорости изменения системы представляется непредсказуемым. Амплитуды скачков и временной интервал между скачками распределены хаотически. Никаких предвестников скачков не обнаруживается, причем это относится к скачкам любой амплитуды. Но необходимо отметить два характерных свойства такого рода моделей.

1. Графическое отображение практически всех моделируемых процессов обладают одной особенностью. Если бы отсутствовали указатели диапазона изменения параметра, практически невозможно было бы сказать, с каким масштабом мы имеем дело в данный момент. Другими словами, что данное отображение процесса обладает свойством фрактальности в том смысле, в каком мы определили его выше.

2. Фрактальность среды, как правило, приводит к уравнениям в дробных производных [2, 3], которые могут совершенно изменить традиционные представления о динамике процесса.

Наглядно изменение характера процесса во фрактальной среде можно увидеть на примере волновых полей.

Рассмотрим модель, в которой связь напряжений и деформации носит запаздывающий характер, и закон Гука имеет вид свертки.

В результате такого представления уравнение для вектора смещений преобразуется к виду:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t_0^2} = L \int_t \bar{G}(t - \tau) \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \tau} + \mathbf{F}, \quad (1)$$

где L дифференциальный оператор

$$L \equiv \frac{m}{m-2} \text{grad div} - \text{rot rot}$$

Рассмотрим два предельных случая функции $\bar{G}$. В случае, когда $\bar{G}$ равняется постоянной G , уравнение (1) превращается в обычное уравнение Ламе. В случае, когда $\bar{G} = a \delta(t)$, уравнение (1) превращается в уравнение параболического типа

$$\frac{\rho}{a} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = L \mathbf{v} + \mathbf{F}$$

относительно функции $\mathbf{v} = \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}$. При этом теряется волновой характер процесса, и он превращается в чисто диссипативный.

В простейшем случае, когда в качестве источника упругих колебаний берется источник типа центра вращения, в горизонтально-слоистой среде существует только одна составляющая вектора смещений u , уравнение для которой можно записать в форме

$$\rho \frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial \tau^2} = L \frac{2G}{m-2} u_\varphi \quad (2)$$

В случае среды с «памятью» уравнение (2) трансформируется к виду:

$$\rho \frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial \tau^2} = \frac{2}{m-2} L \int \bar{G}(t - \tau) \frac{\partial u_\varphi}{\partial \tau} d\tau \quad (3)$$

Для фрактальной среды функция $\bar{G}$ будет являться характеристической функцией некоторого фрактального множества и уравнение (3) может быть сведено к уравнению с дробными производными:

$$\frac{\partial^{1+D} v_\varphi}{\partial \tau^{1+D}} = \frac{2G_0}{(m-2)\rho} L v_\varphi, \quad (4)$$

$$\text{где } v_\varphi = \frac{\partial^{1-D} u_\varphi}{\partial \tau^{1-D}}.$$

Уравнение (4) описывает процесс, занимающий промежуточное положение между волновым и диффузионным, что дает еще одну возможную трактовку феномена медленной волны, наблюдаемой в эксперименте [4].

Отметим, что к подобному уравнению мы приходим и при анализе поведения электромагнитного поля во фрактальной среде. И точно так же это дает возможность попытаться объяснить экспериментальные данные, не укладывающиеся в рамки классической теории электродинамики.

Аналогичные результаты имеют место и при анализе процессов геодинамики. Рассмотрим один из аспектов этой проблемы. Геодинамические процессы сопровождаются разрушением гонных пород. При этом известно, что процесс образования трещин как классический вариант броуновского случайного блуждания, может быть описан уравнением диффузии. Обычно, это уравнение и рассматривается в качестве базового при анализе процессов разрушения. Однако, в случае фрактальной среды уравнение для функции, выражающей плотность вероятности нахождения броуновской частицы в точке с координатами (r,t) , имеет вид [5], [6]

$$\frac{1}{(1-\gamma)} \frac{d}{dt} \int_0^1 \frac{p(r,t)}{(t-\tau)^\gamma} d\tau = \frac{1}{r^{D-1}} \frac{\partial}{\partial r} (r^{D-1-\theta} \frac{\partial p(r,t)}{\partial r}), \quad (5)$$

где D – евклидова размерность пространства, γ , θ – величины, зависящие от фрактальной размерности.

При этом мы получаем, так называемое, уравнение сверхмедленной диффузии, которое в отличие от обычного уравнения диффузии зависит от дополнительного параметра, связанного с фрактальностью среды и, соответственно, позволяет моделировать более широкий класс объектов и процессов.

Задача такого моделирования лежит далеко за рамками данной работы, тем более, что адекватное сопоставление модели с реальностью требует длительного наблюдения во времени геодинамических процессов представляет собой достаточно сложную задачу.

Мы рассмотрим существенно более узкую задачу. Попытаемся выявить соотношение между системой поверхностных линеаментов, характеризующихся небольшими размерами с геологическими объектами другого масштаба.

Задача, безусловно, не новая, но мы будем решать ее исходя из двух. основных положений.

1. Фрактальности системы линеаментов.
2. Связи процессов, результате которых образовались объекты, выражаемой уравнением (5).

То есть, мы будем предполагать, что система линеаментов в своих фрактальных характеристиках наследует особенности, присущие более протяженным структурным образованиям, и на основе фрактального анализа попытаемся восстановить эти образования.

И первая проблема, которая при этом возникает – проблема выделения и прослеживания в разрезе объектов, характеризующихся определенным масштабом. Обычно говорят о задаче выделения объектов с определенными спектральными характеристиками и используют для этого преобразование Фурье. Однако, использование частотной фильтрации приводит к существенному искажению сигнала во временной (или пространственной) области, в то время как требуется, по возможности, сохранить частотное наполнение полезного сигнала, соответствующего объекту.

Гораздо лучше к анализу фрактальных объектов (по своей сути) приспособлен аппарат вейвлет-преобразований, который возник при обработке записей сейсмодатчиков в нефтеразведке и с самого начала был ориентирован как раз на локализацию разномасштабных деталей.

Если резкие отличающиеся объекты во многих случаях можно заметить невооруженным глазом, то взаимодействие событий на мелких масштабах, перерастающее в крупномасштабные явления, увидеть очень сложно. Например, фрактальная структура системы объектов бывает связана с (статистической) однородностью их строения на различных пространственных масштабах. Многомасштабный анализ помогает количественно охарактеризовать эту однородность.

Именно этот аппарат мы и использовали при анализе системы линеаментов. На рис. 1а представлена карта исходной системы линеаментов. Рис. 1б, 1в показывают, как при разномасштабных вейвлет-преобразованиях на этой системе выделяются объекты соответствующего масштаба.

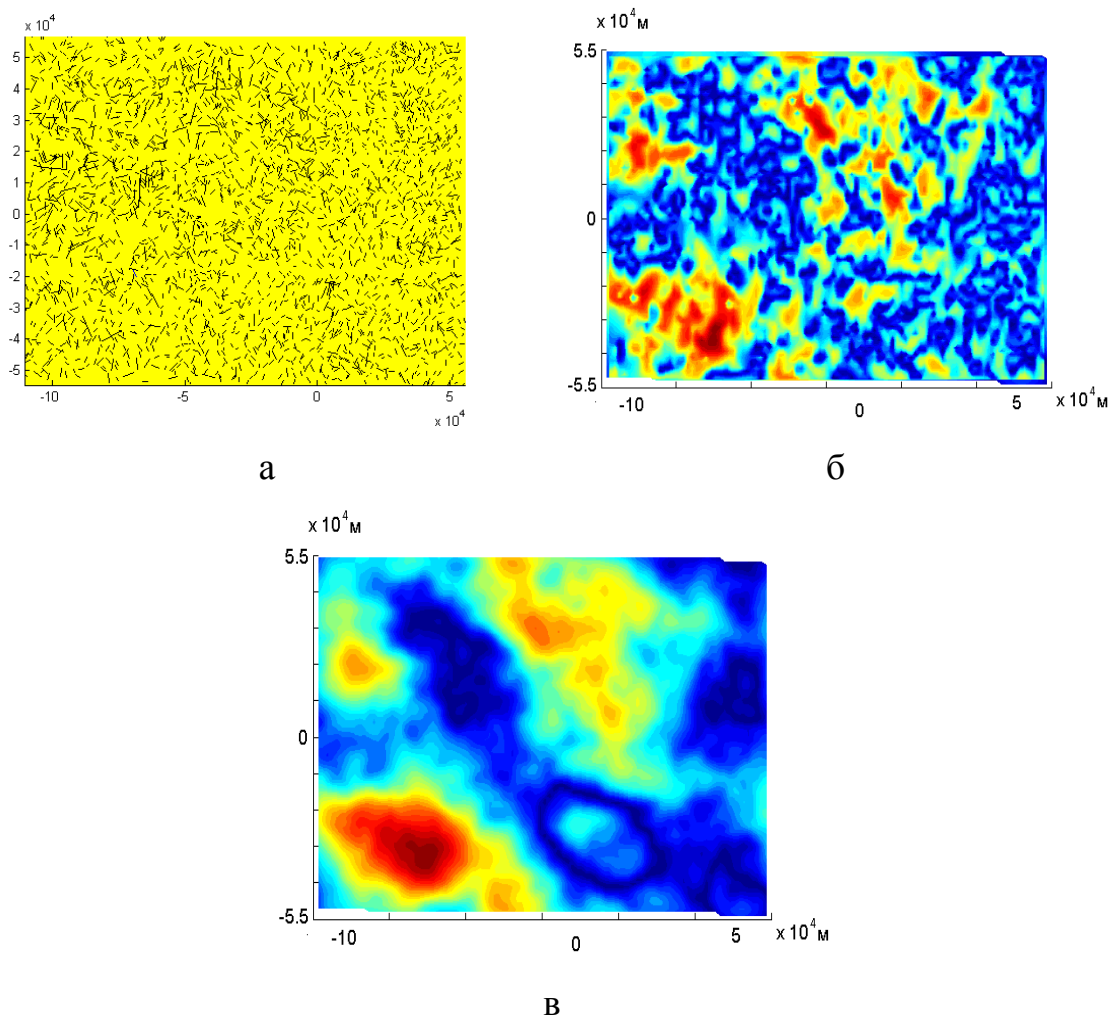


Рис. 1. Выделение аномальных зон (б, в) на основе вейвлет-анализа системы линеаментов (а)

На рис. 2, 3 показаны результаты сопоставления полученных с помощью вейвлет-анализа структур с реальными геологическими данными. Выделенные структуры хорошо согласуются со структурой горизонта Б, построенного по

данным сейсморазведки. Кроме того, зоны с повышенной проницаемостью, выявленные по результатам бурения, выкладываются в своеобразную ложбину, отмечаемую по рассчитанным данным.

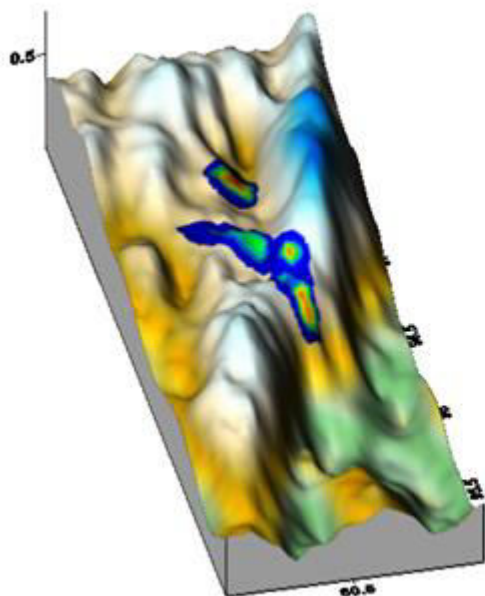


Рис. 2. Наложение зон с наибольшей проницаемостью на структуры, выделенные на основе вейвлет-анализа системы линеаментов.

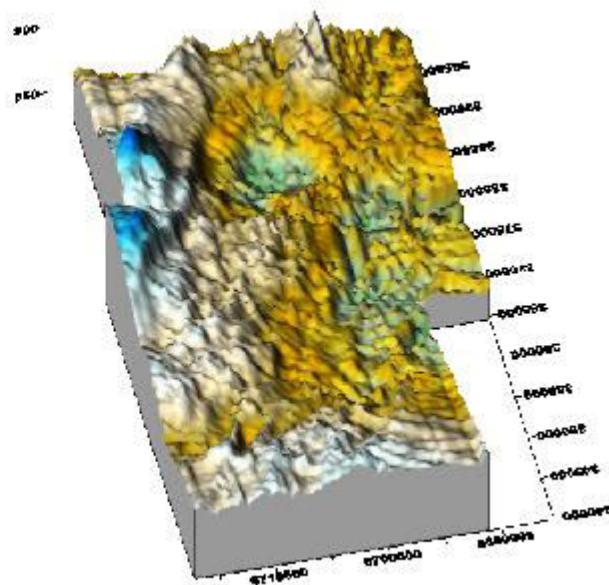


Рис. 3. Структура горизонта Б по данным сейсморазведки.

Таким образом, предложенная схема анализа систем линеаментов позволяет на основе анализа фрактальных характеристик и последующих преобразований выделять существенно отличающиеся по масштабу от линеаментов структуры, которые могут быть соотнесены с реальными геологическими объектами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Burridge R., L. Knopoff., Model and theoretical seismicity, Bull. Seism. Soc. Am. 1967. V.57, p. 341–371.
2. Nigmatullin R.R. On the theory of relaxation with "remnant" memory., Phys. Stat. Sol(b). - 1984. - V.124, -p 389-393.
3. Нигматуллин Р.Р. Дробный интеграл и его физическая интерпретация, ТМФ, 1992, т. 90, № 3, с. 354-309.
4. Голошубин Г.М., Крауклис П.В., Молотков. Новые возможности летального изучения нефтенасыщенных слоев в межскважинном пространстве на основе феномена медленной волны. Международная геофизическая конференция и выставка, С-Петербург, 1995. Тезисы докладов 3, с. 11.6.
5. Giona M., Roman H.E. Fractional diffusion equation on fractals: one-dimentional case and asymptotic behavior. Jornal of Physics A: Math. Gen. 1992. V.25, p. 2093-105.
6. Metzler R.,Glockle W.G., Nonnenmacher T.F. Fractioal model equation for anomalous diffusion / Physica A 1994.V.211, p.13-24.

ТЕОРИЯ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА ГЕТЕРОГЕННЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СРЕД В РАМКАХ ИЕРАРХИЧЕСКИХ ДИСКРЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ

В настоящее время имеется много экспериментальных фактов, свидетельствующих о существовании зон гетерогенности в массиве горных пород, расположенных на разных глубинах [1–4]. Они, как правило, ассоциируются с рудопроявлением, отражают палео и современную геодинамику, являются областями потенциальной неустойчивости массива. Нестационарность зон наблюдается как по пространственному расположению, так и по структуре. Структура гетерогенных зон адекватно описывается иерархической моделью среды с дискретными неоднородностями [5–7]. Чтобы получить в рамках комплексной геофизической и геомеханической методики объемное представление о напряженно-деформированном состоянии (НДС) массива и его структуре необходима разработка теоретических подходов при формулировке критериев подобия между измеряемыми геофизическими и геомеханическими параметрами.

В [8] изложены результаты теоретических исследований распространения электромагнитного поля во фрактальных структурах, которые являются одной из разновидностей иерархических моделей. В Институте геофизики УрО РАН на основе концепции единой трехэтапной интерпретации [9–11] разработана методика электромагнитных индукционных и динамических сейсмических исследований в частотно-геометрическом варианте, которая используется для картирования и мониторинга сложно построенных геологических сред в наземном и подземном (шахтном) вариантах. Эта методика ориентирована на использование сосредоточенных источников возбуждения определенного типа, для которых существует морфологическое подобие как нормальных, так и аномальных полей. Созданная теория и методика позволяют осуществить картирование и мониторинг распределенных упругих и геоэлектрических неоднородностей в рамках двухранговой иерархической модели с оценкой влияния третьего ранга. Полученные данные подтверждаются результатами моделирования и натурными исследованиями [12].

Рассмотрим несколько примеров использования разработанной методики. В ней в качестве возбуждающего используется поле вертикального магнитного диполя на ряде частот от 5 до 80 кГц. Измерения модуля трех компонент магнитного поля (вертикальной $|H_z|$ и двух горизонтальных (в шахтном варианте): вдоль $|H_r|$ и поперек $|H_\phi|$ выработки) проводятся в рамках планшета (в профильном варианте расстановки) с шагом 5 м длиной 60–80 м (в зависимости от геоэлектрических свойств изучаемого массива). Источник возбуждения находится в начале расстановки и перемещается вместе с ней через 15 м вдоль выработки. В наземном варианте геометрические параметры системы наблюдений меняются в зависимости от детальности и глубинности изучения строения массива. Для каждой расстановки и фиксированной частоты

ω определяются два параметра: $\rho_{эфф.}(r) = \omega r^2 (|H_z| / |H_r|) / \pi$ и $\delta(r) = (|H_\varphi| / |H_r|) \cdot 100\%$. Эти данные составляют информационную базу для дальнейшей интерпретации, которая осуществляется в три этапа [9]. На первом этапе определяются геоэлектрические параметры одномерного разреза для каждой расстановки после предварительной фильтрации данных $\rho_{эфф.}(r)$ с учетом условия: $\delta(r) < A$, где A – уровень фильтрации [13]. В случае подземных наблюдений интерпретация производится в рамках слоистой модели: n слоев над выработкой, n слоев под ней. Далее производится вычисление геоэлектрических параметров для среднего разреза. В результате получаем распределение удельного сопротивления в пространстве вверх и вниз от выработки для каждой точки наблюдения. Выбирается максимальная мощность слоистой пачки, связанная с глубиной проникновения поля. В пределах этой мощности производится осреднение удельного сопротивления по вертикали. Затем используется алгоритм определения горизонтальных границ блоков из условия: $\rho_{\max} / \rho_{\min} = 1.55$, $\rho_{\max}$, $\rho_{\min}$ – соответствуют левой или правой границам блока.

Далее в рамках алгоритма на втором этапе интерпретации определяются геометрические характеристики проводящих включений и их суммарные эквивалентные моменты, которые пропорциональны отношению разности проводимостей во вмещающей среде и во включении. Здесь, следуя [14], используется принцип аппроксимации для переменных электромагнитных полей. Исходная модель включения выбирается в виде токовой линии конечной длины. Полем такого типа источников аппроксимируется распределение среднего параметра геоэлектрической неоднородности, определяемого как среднее значение δ в каждой точке профиля, расположенного вдоль выработки. Решается задача минимизации среднеквадратического отклонения (невязки) экспериментальной кривой распределения среднего параметра геоэлектрической неоднородности от теоретической [15]. Положение источников возбуждения сохраняется таким же, как и при реализации первого этапа. Токовые линии располагаются непосредственно либо под профилем вниз от выработки, либо над профилем вверх. При этом определяются описанные выше параметры этих токовых линий, подбор ведется в полуавтоматическом режиме: изменение искомых параметров в процессе подбора назначается интерактивно. Процедура заканчивается, когда невязка становится меньше заданного значения. Абсолютная величина невязки контролируется заданной точностью подбора среднего значения параметра геоэлектрической неоднородности в экстремальных точках. Математически эта процедура реализована на ПК [16]. Таким образом, по результатам первого и второго этапов интерпретации строится трехмерная геоэлектрическая модель изучаемого участка геологической среды.

Рассмотрим результаты, полученные при изучении массива медно-колчеданных пород на Узельгинском руднике. В рамках описанной методики было проведено восемь циклов измерений по профилю в выработке вкрест

простираения рудного тела. Измерения проводились следующим образом. Три – в ноябре 1999 г. (между первым и вторым циклом измерений на том же горизонте – 550 м на расстоянии 100 м от начала профиля в его створе был проведен массовый взрыв). Следующие три – в марте 2000 г. Здесь в отличие от 1999 г. массовый взрыв произведен на расстоянии 200 м под углом 60° к началу профиля наблюдения. Далее два цикла наблюдений проведены после массового взрыва на горизонте – 610 м в марте 2001 г.

В таблице приведены результаты изменения относительных удельных сопротивлений в выделенных по описанному выше алгоритму блоках в пределах околосамоугольного пространства во время всех циклов измерений на пяти частотах. Они относятся к пространству около выработки ДСШ-4 Узельгинского подземного рудника. Из полученных результатов следует, что геоэлектрическое строение выделенных блоков изменялось за более продолжительный срок, чем два дня после сильного техногенного воздействия. Эта характеристика отражает значительную потенциальную объемную перестройку массива, и если она происходит в течение короткого промежутка, то это может привести к неустойчивости выработки в целом, чего не происходило в реальности.

Таблица. Динамика относительных удельных сопротивлений $\rho_{j,l}^{n,m} / \bar{\rho}_j^{n,1999}$

n	Частота, кГц										
	5		10		20			40		80	
m = 1999 г.											
1	l = 1		l = 1		l = 1	l = 2	l = 3	l = 1		l = 1	
	1.0		1.0		0.84	0.98	1.2	1		1	
2	l = 1	l = 2	l = 1	l = 2	l = 1			l = 1		l = 1	
	1.1	0.87	1.2	0.83	1.0			1.0		1.0	
3	l = 1	l = 2	l = 1	l = 2	l = 1	l = 2	l = 3	l = 1	l = 2	l = 1	l = 2
	1.4	0.56	1.3	0.68	1.5	1.0	0.46	1.3	0.71	1.2	0.85
4	l = 1		l = 1		l = 1			l = 1		l = 1	
	1.0		1.0		1.0			1.0		1.0	
m = 2000 г.											
1	l = 1		l = 1		l = 1			l = 1		l = 1	
	1.0		1.0		1.1			1.0		1.0	
2	1.0		1.0		1.1			1.1		0.96	
3	1.3		1.3		1.2			1.2		1.2	
4	1.0		1.0		1.0			1.0		1.0	
m = 2001 г.											
1	l = 1		l = 1		l = 1			l = 1		l = 1	
	0.88		0.88		0.88			0.88		0.88	
2	1.0		1.0		1.1			1.1		0.87	
3	1.0		0.90		0.97			1.0		1.2	
4	1.0		1.0		1.0			1.0		1.0	

Примечание: черная черта означает слой, соответствующий выработке.

На рис. 1 изображен фрагмент интерпретации данных мониторинга за три цикла наблюдений в 1999 г. на частоте 5 кГц. Очевидно, что в так называемой

зоне дезинтеграции, примыкающей к выработке, происходит перемещение и изменение интенсивности аномальных зон неоднородности. До взрыва и на второй день после взрыва конфигурация расположения аномальных зон возвращается к состоянию, имевшему место до техногенного воздействия. На следующий же день после взрыва мы видим по возрастанию интенсивности $\tilde{M}_0$, имеющую место активизацию зон неоднородности, как над выработкой, так и под ней, кроме того, есть выделенное направление усиленной трещиноватости. Интересно отметить, что на второй день после массового взрыва выделились более четко две конфигурации треугольного вида зон неоднородностей, сходящиеся одной из вершин к середине выработки. Пространственная морфология этих зон может быть определена только в рамках методики, ориентированной на иерархичную модель исследования.

Представляет интерес анализ интегральных параметров вдоль выработки, характеризующих изменение степени неоднородности массива горных пород при воздействиях массовых взрывов. Результаты, изображенные на рис. 2а, свидетельствуют о том, что среднее вдоль выработки значение среднего параметра геоэлектрической неоднородности в 1999 г. и 2000 г. изменилось незначительно, несмотря на интенсивное техногенное воздействие (в 2001 г. в окрестности выработки ДСШ-4 начались работы по влажной закладке отработанных камер). Параметры I1–I5 изменяются тем сильнее, чем ближе к контуру выработки находятся локальные неоднородности массива (рис. 2б–е), при этом зависимость I1(N) практически повторяет зависимость $\delta(N)$. Анализ распределений I1(N)–I5(N) позволяет, с одной стороны, интегрально оценить глубину техногенного воздействия на массив, с другой стороны, определить степень фоновой возмущенности массива как функции времени.

Для сопоставления строения дунитового массива одного из коренных месторождений платины (Кытлымского) приводим разрезы Косьвинского плеча, построенные по данным попланшетной электромагнитной съемки на частоте 10 кГц.

Зоны трещиноватости, выделенные в разрезе, хорошо совпадают с зонами серпентинизации дунитового ультраосновного массива, а по пространственной морфологии совпадают с зонами аномальной неоднородности (рис. 1).

Проведенный анализ и сопоставление геофизических методов для осуществления комплекса геомеханических, геологических и геофизических исследований при мониторинге НДС массива с целью прогноза показали, что наилучшее согласование разнородных данных достигается в рамках иерархической модели среды. Следует отметить, что назрела необходимость в разработке общей теории интерпретации геофизических полей в рамках иерархических моделей, которая явилась бы базисом для создания новых комплексных методик мониторинга гетерогенных сред. Дальнейшее продвижение видится в обосновании критериев подобия не только геофизических, но и геолого-геомеханических систем наблюдения.

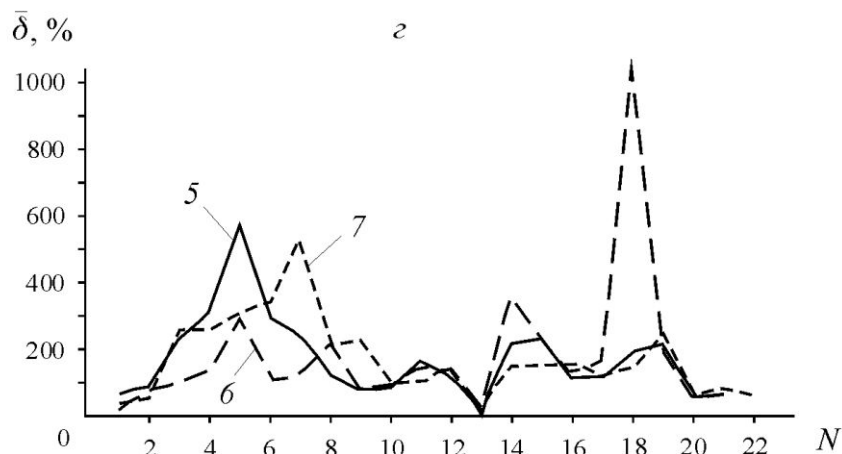
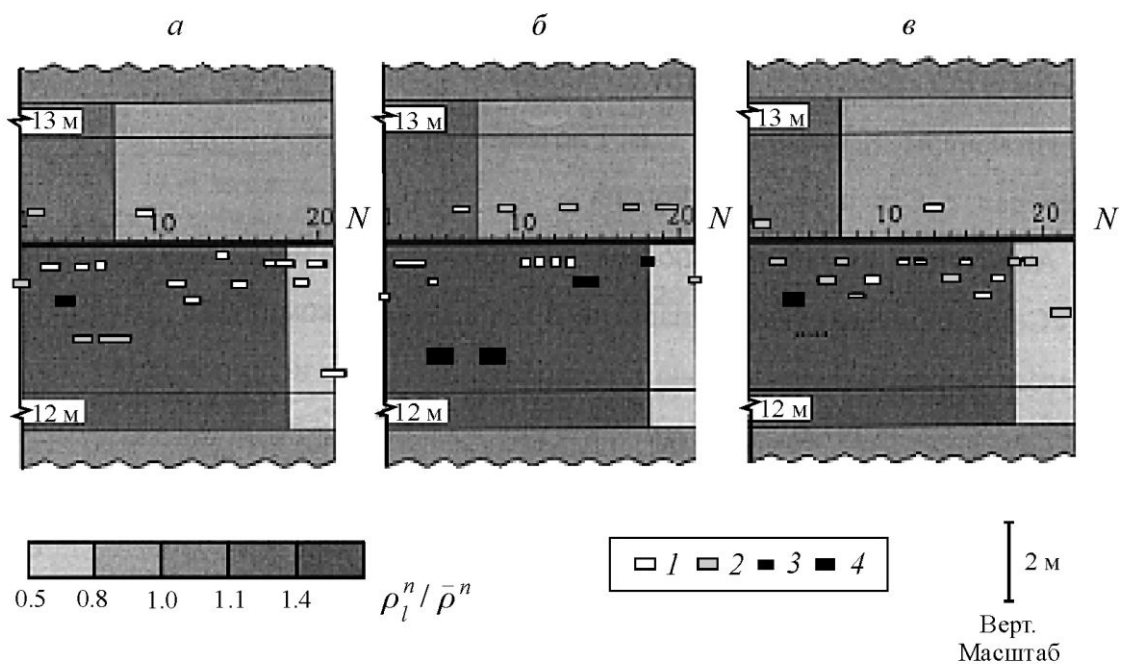


Рис. 1. Геоэлектрические разрезы, построенные по данным электромагнитного индукционного мониторинга массива вблизи выработки ДСШ-4, находящейся в зоне техногенного воздействия

Горизонт – 550 м, 1999 г., частота 5 кГц: *а* – 11 ноября (день до массового взрыва); *б* – 16 ноября (день после массового взрыва); *в* – 18 ноября (два дня после массового взрыва); *г* — распределение среднего параметра геоэлектрической неоднородности (5 – 11 ноября, 6 – 16 ноября, 7 – 18 ноября). Условные обозначения: ρ_l^n – удельное сопротивление; n – номер слоя (два слоя расположены над выработкой, два слоя – под выработкой, выработка обозначена сплошной черной линией); ρ^{-n} – среднее значение удельного сопротивления для каждого слоя. Цифрами обозначены мощности слоев, прилегающих к выработке; в той части слоя, где мощность не указана, следует пользоваться вертикальным масштабом: N – номера пикетов; 1 ÷ 4 — локальные зоны геоэлектрической неоднородности с различной контрастностью по проводимости с вмещающей средой. 1 – $0.01 < \tilde{M}_0 \leq 0.5$; 2 – $0.5 < \tilde{M}_0 \leq 2$; 3 – $2 < \tilde{M}_0 \leq 4$; 4 – $\tilde{M}_0 > 4$; где $\tilde{M}_0$ – коэффициент, пропорциональный контрастности проводимости и длине зоны неоднородности.

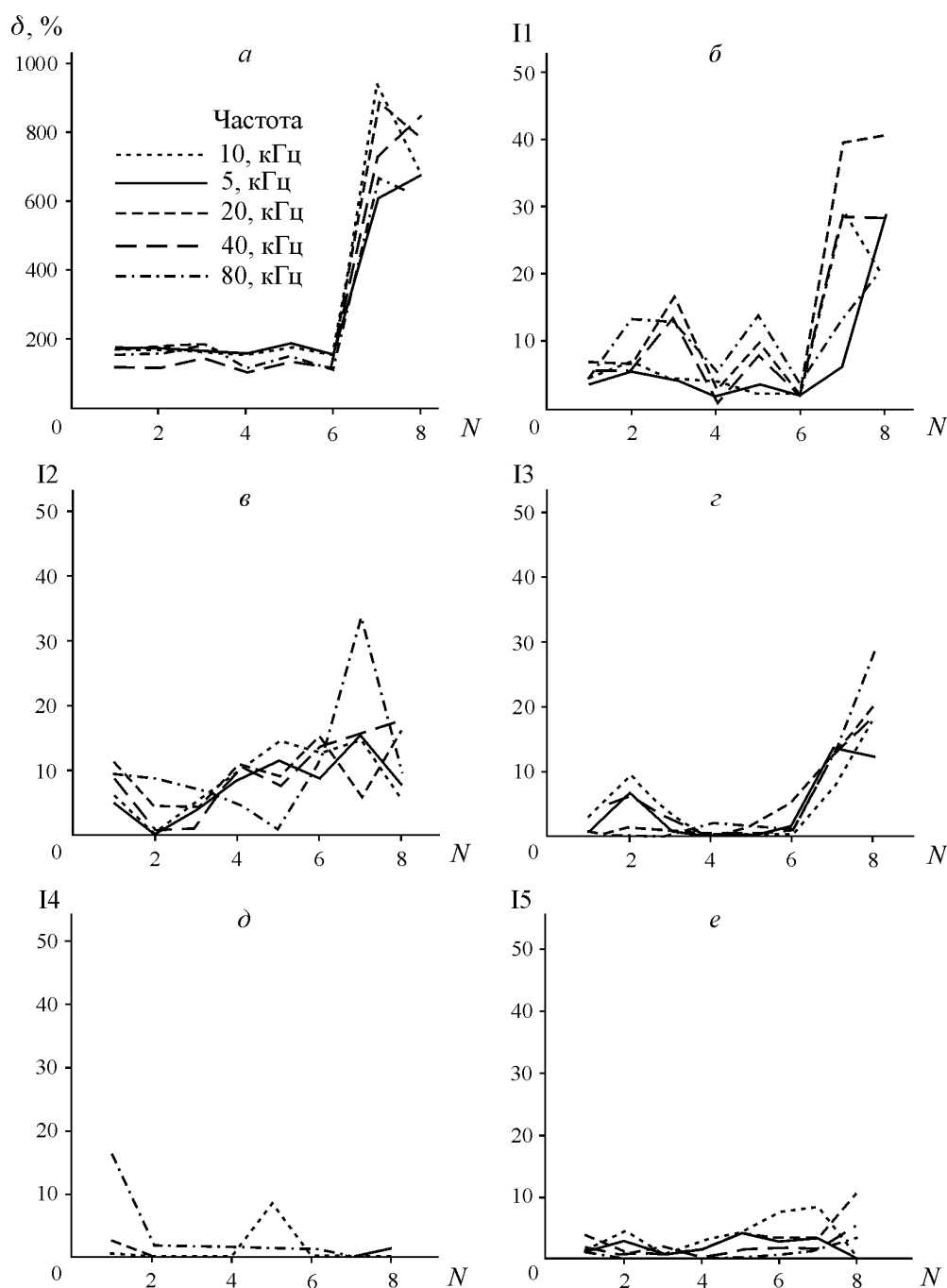


Рис. 2. Результаты обработки данных электромагнитного мониторинга (Узельгинский подземный рудник, горизонт – 550 м, ДСШ-4)

Условные обозначения: *a* – среднее вдоль выработки значение среднего параметра геоэлектрической неоднородности на пяти частотах (легенда, изображенная на этом рисунке, справедлива для рис. 2б–е); N – номер цикла мониторинга – 1 – 11 ноября 1999 г., 2 – 16 ноября 1999 г., 3 – 18 ноября 1999 г., 4 – 14 марта 2000 г., 5 – 19 марта 2000 г., 6 – 20 марта 2000 г., 7 – 26 марта 2001 г., 8 – 28 марта 2001 г.; *б* – I_1 – суммарное значение $\tilde{M}_0$ для аномальных источников, расположенных до глубины 1 м от контура выработки; *в* – I_2 – суммарное значение M_0 для аномальных источников, расположенных на интервале 1–2 м от контура выработки; *г* – I_3 – суммарное значение M_0 для аномальных источников, расположенных на интервале 2–3 м от контура выработки; *д* – I_4 – суммарное значение M_0 для аномальных источников, расположенных на интервале 3–4 м от контура выработки; *е* – I_5 – суммарное значение $\tilde{M}_0$ для аномальных источников, расположенных на глубине более 4 м от контура выработки.

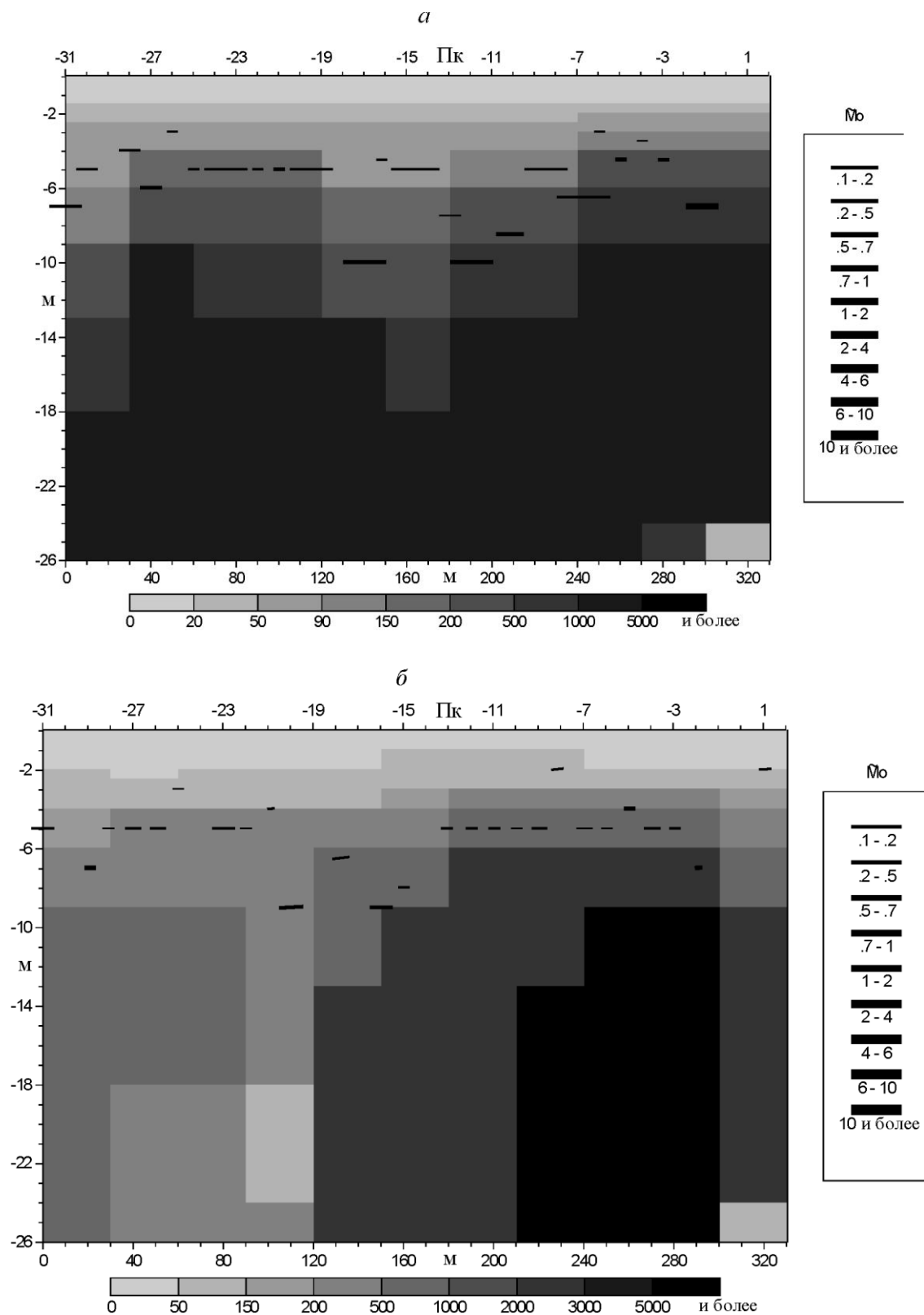


Рис. 3. Продольные геоэлектрические разрезы Косьвинского плеча, построенные по данным попланшетной электромагнитной съемки на частоте 10 кГц:

а — западная часть; *б* — восточная часть

Условные обозначения: блоковый разрез приведен в удельных сопротивлениях (ом·м), $\tilde{M}_0$ — совпадает с обозначением, приведенным на рис. 1.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 02-05-64229, 02-05-96433.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Караев Н.А. Сейсмическая гетерогенность земной коры и проблемы интерпретации результатов региональных наблюдений в «ближней» зоне // Неклассическая геофизика. Материалы Международной конференции. — Саратов: ОИФЗ РАН, 2000.
2. Кашубин С.Н. Сейсмическая анизотропия и эксперименты по ее изучению на Урале и Восточно-Европейской платформе. — Екатеринбург: Институт геофизики УрО РАН, 2001.
3. Оболенцева И.Р., Чичина Т.И. Пространственная дисперсия и ее проявления в сейсмических волновых полях // Неклассическая геофизика, материалы Международной конференции. — Саратов: ОИФЗ РАН, 2000.
4. Шемякин Е.И., Фисенко Г.Л., Курленя М.В. и др. Эффект зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок // ДАН СССР. — 1986. — Т. 289. — № 5.
5. Родионов В.Н., Сизов И.А., Кочарян Г.Г. О моделировании природных объектов в геомеханике // Дискретные свойства геофизической среды. — М.: Наука, 1989.
6. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. — М.: Наука, 1987.
7. Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни деформации твердых тел. — Новосибирск: Наука, 1985.
8. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации. — М.: Логос, 2002.
9. Хачай О.А., Новгородова Е.Н. Использование трехмерной методики индукционных электромагнитных исследований строения горных массивов // Физика Земли. — 1999. — № 6.
10. Хачай О.А., Дружинин В.С. Комплексирование трехмерных методов сейсмических и электромагнитных исследований для решения задач мониторинга // Разведка и охрана недр. — 2000. — № 2.
11. Хачай О.А. Комплексные геофизические исследования (теория и практические результаты) // Уральский геофизический вестник. — Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2000. — № 1.
12. Хачай О.А., Дружинин В.С., Каретин Ю.С. и др. Комплексирование профильных и поплатшетных сейсмических и электромагнитных методик исследования приповерхностных сложно построенных сред // Геофизика XXI в. Мат. симпозиума. — Екатеринбург: УГГА, ЕАГО, ИГФ УрО РАН, 2001.
13. Хачай О.А., Новгородова Е.Н. Опыт площадных индукционных исследований резко неоднородных геоэлектрических сред // Физика Земли. — 1997. — № 5.
14. Страхов В.Н. Научное мировоззрение I, II // Геофизика. — 1993. — № 1. — 1994. — № 1.
15. Хачай О.А., Влох Н.П., Новгородова Е.Н. и др. Трехмерный электромагнитный мониторинг состояния массива горных пород // Физика Земли. — 2001. — № 2.
16. Новгородова Е.Н. Итерационный рекуррентный алгоритм подбора источниками гальванического типа среднего параметра геоэлектрической неоднородности в рамках поплатшетной электромагнитной методики // Вторые научные чтения Ю.П. Булашевича. — Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2003.

© О.А. Хачай, 2005

ДЕФОРМАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ПРОЦЕССОВ НАКОПЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ УДАРООПАСНОСТИ МАССИВА ПРИ ОТРАБОТКЕ ТАШТАГОЛЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Деформационный мониторинг в условиях Таштагольского рудника осуществляется на комплексной наблюдательной станции, представленной контурными и глубинными реперами в горных выработках и скважинах, грунтовыми реперами на поверхности.

Деформационный метод оценки удароопасности основан на прямом измерении деформаций, поэтому в отличие от многих применяемых геофизических методов свободен от влияния влажности, работы механизмов и машин и других факторов. При наблюдениях за развитием деформационных процессов методом глубинных и контурных реперов имеется возможность как общей оценки состояния больших участков массива, соизмеримых с шахтными полями, так и локальной оценки состояния отдельных выработок и их участков. При этом проводимые измерения могут являться основой для разработки и уточнения критериев геофизических методов прогноза удароопасности.

Деформационный мониторинг напряженности массива Таштагольского месторождения проводится около 25 лет. В этот период в выработках шахты произошло 13 горных ударов, среди которых выделялись горно-тектонические удары большой разрушительной силы. Представительные данные наблюдений позволили установить прогностические признаки формирования очагов горных ударов и определить критерии оценки удароопасности, на основе которых разработан метод прогноза степени удароопасности массива горных пород [1], применяемый участком ППГУ Таштагольской шахты для оценки состояния горного массива на отрабатываемых горизонтах.

В процессе деформационного мониторинга с регламентированной периодичностью определяются величины сдвижений и деформаций, скоростей сдвижений и деформаций, которые сравниваются с критериальными значениями. В системе деформационного мониторинга более широко используются инструментальные наблюдения по станциям глубинных реперов, замеры по которым в период подготовки блоков к очистной выемке приурочиваются к технологическим циклам, а в остальные периоды производятся не реже одного раза в месяц. После крупных динамических проявлений горного давления производятся специальные измерения по станциям глубинных и контурных реперов для определения размеров области массива, участвовавшей в формировании энергии горного удара.

Прогностическими признаками накопления напряжений в горном массиве являются:

– Деформации сжатия породного и рудного массивов в направлениях вкрест простирания и по простиранию рудных тел, превышение которых над

критериальными значениями [1] соответствует категории удароопасности «Опасно»;

- Скорости сдвижений 20 – 40 мм в месяц;
- Скорости деформаций 0,6 – 1,2 мм/м в месяц, в районах тектонических разломов – 0,3 мм/м в месяц;
- Обратные сдвигения (сдвигения в направлении нетронутого массива) более 10 мм, в районах разломов – более 5 мм;
- Поднятия более 15 – 50 мм на участках горного массива протяженностью более 100 м.

Для анализа развития процессов деформирования горных пород применяются:

- Карты изолиний деформаций, совмещенные с планами горных выработок и тектонической нарушенностью массива, что позволяет определять зоны концентрации деформаций сжатия и потенциально опасные участки горных выработок (рис. 1). Построение приращений деформаций за определенные периоды времени (рис. 2) показывает миграцию зон сжатия – растяжения и изменение напряженности массива во времени.

Сопоставление карты деформаций (рис. 1) и карты приращения деформаций (рис. 2) одного и того же участка показывает, что со временем нарастание напряженности массива происходит не только в зонах сжатия, а и в зонах растяжения (зона максимальных растяжений в районе сгущения системы тектонических нарушений между ортами 16 – 18). Рост деформаций сжатия выразился в проявлении толчков с энергией до 5 класса и микроударом в блоке 17 гор. – 350 м 13.04.2004 г. с энергией $6,93 \times 10^6$ Дж;

- Графики изменения сдвижений реперов (рис. 3) и деформаций интервалов между реперами (рис. 4) во времени, позволяющие оценивать периоды появления обратных сдвижений и их изменение во времени, пригрузку (рост деформаций сжатия) и разгрузку (рост деформаций растяжения) как в целом массива горных пород, так и отдельных его участков. При этом накопление напряжений на больших участках массива свидетельствует о возможности площадных проявлений крупных динамических явлений, а в отдельных интервалах, соответствующих двадцатиметровой базе измерений, – о локальном проявлении.

На рис. 3 приведены графики сдвижения глубинных реперов, отражающие поведение боковых пород (репер 02) и вмещающих пород и рудного тела (репер 1) на участке наблюдательной станции протяженностью около 180 м. Период наблюдения по станции можно разбить на характерные интервалы, когда в массиве происходит накопление обратных сдвижений (понижение ординат графиков), мелко амплитудные сдвигения (колебание ординат графиков около среднего положения) и прямые сдвигения массива в направлении рудного тела (повышение ординат графиков). Характерно накопление напряжений в породах лежащего бока рудного тела перед горным ударом 28.11.1987 г. в стволе шахты «Западная» и горными ударами 1992 г. в блоках 9, 10 и складе ВВ гор. – 210 м, когда обратные сдвигения наблюдались по

станциям глубинных реперов на участке 11 – 19 ортов на площади около 36 тыс. м² и достигали 30 мм.

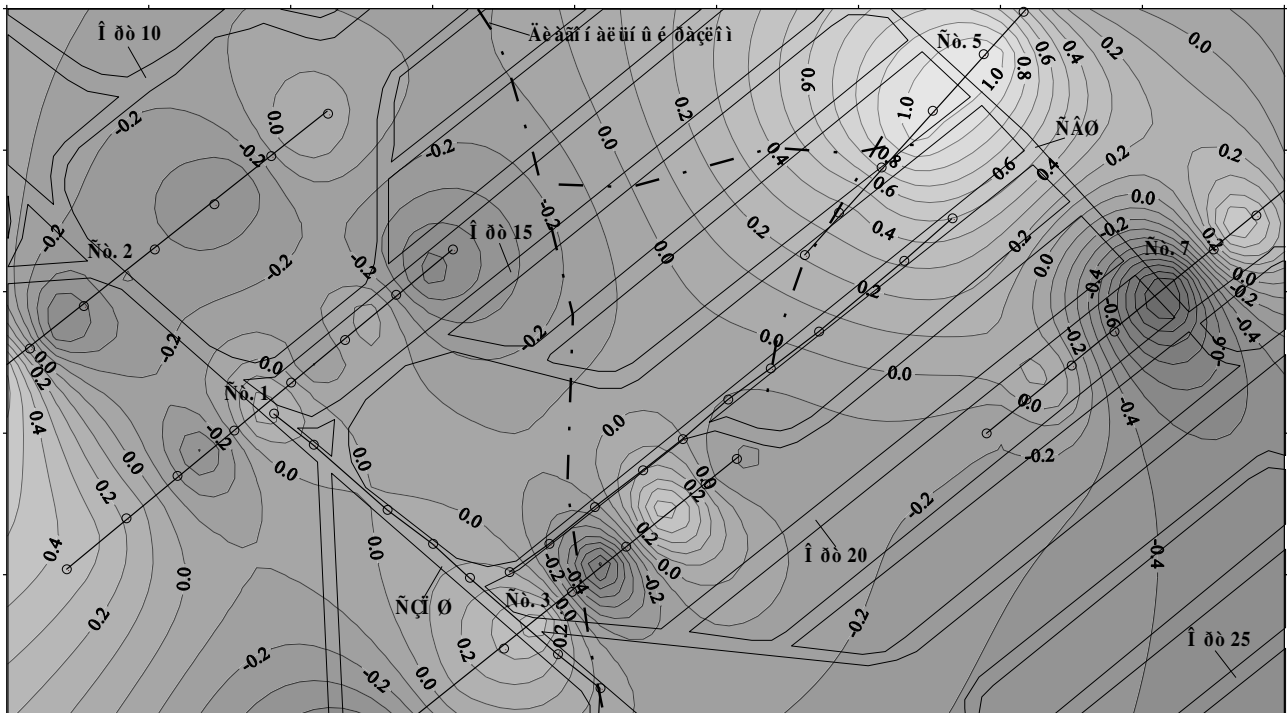


Рис. 1. Распределение деформаций горного массива центральной части рудной зоны гор. – 280 м перед взрывом подсечки блока 17 (Орт 17)

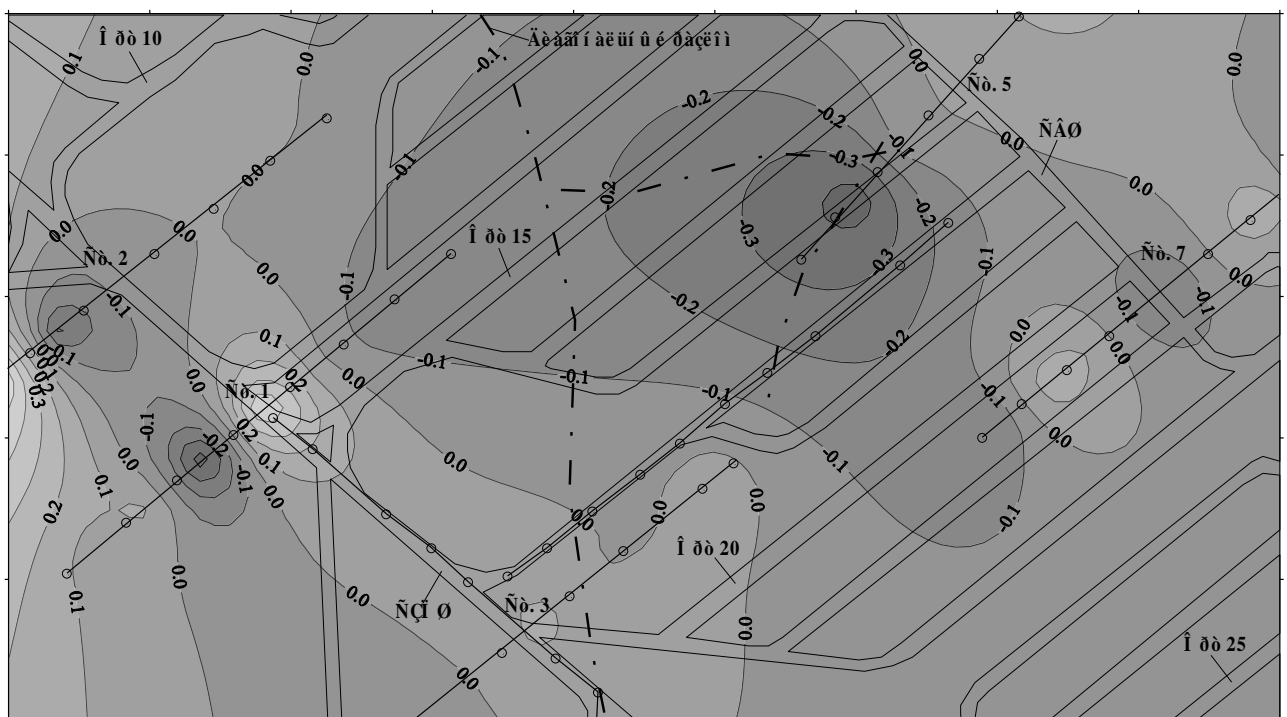


Рис. 2. Приращение деформаций горного массива центральной части рудной зоны гор. – 280 м за период с последнего горного удара 24.10.1999 г. до взрыва подсечки блока 17 (Орт 17)

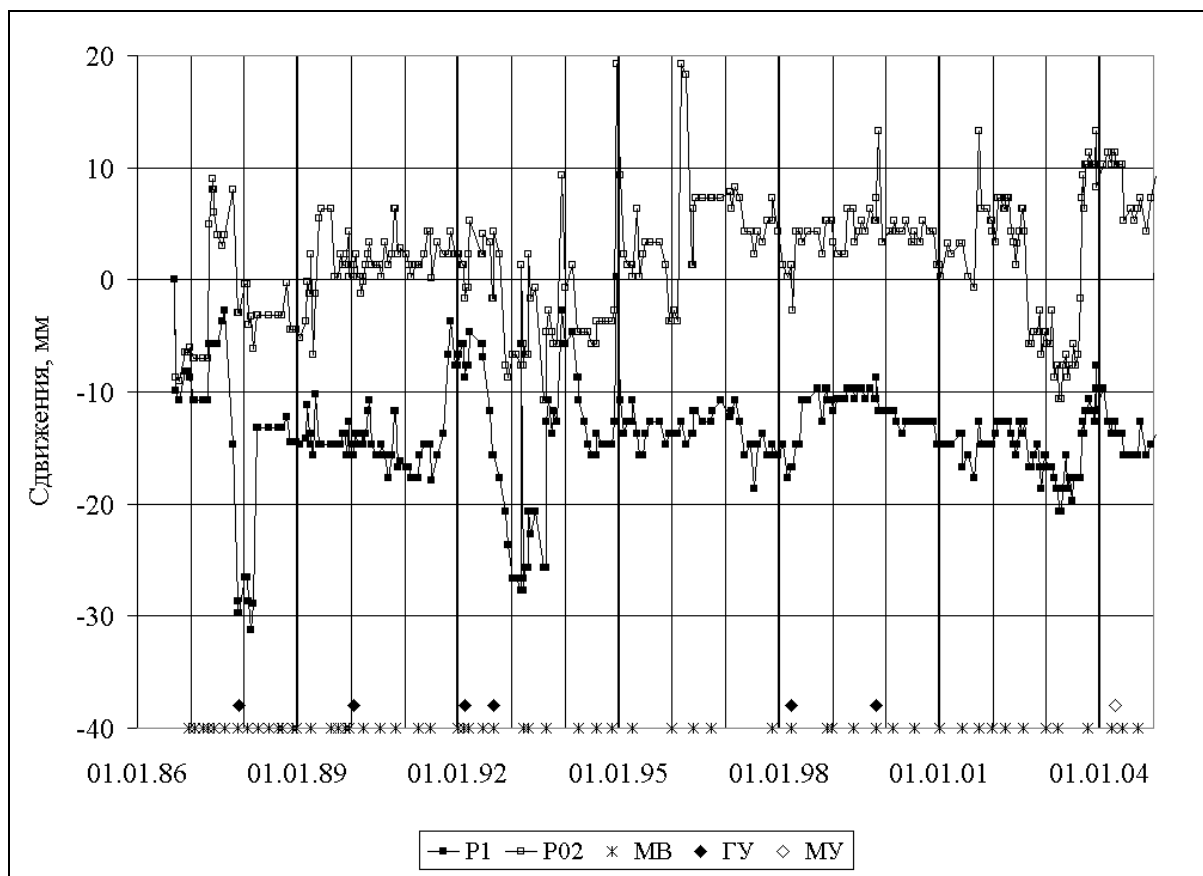


Рис. 3. Графики сдвижения глубинных реперов в центральной части лежачего бока рудного тела гор. – 280 м

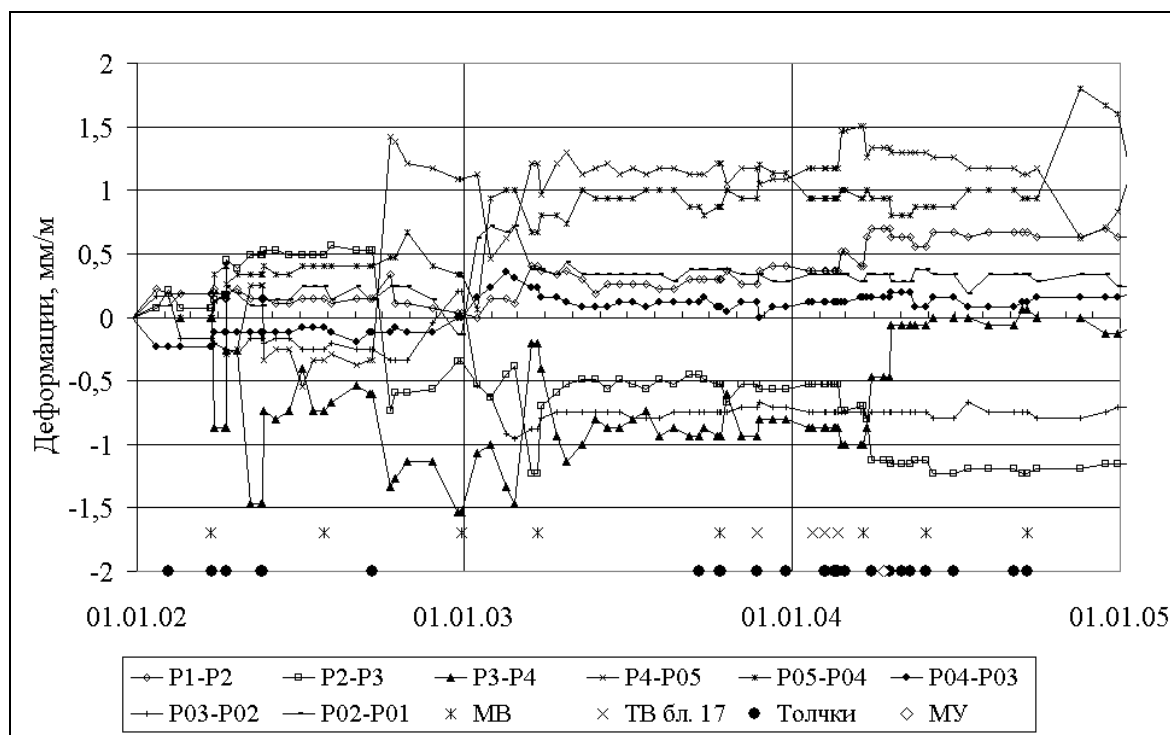


Рис. 4. Графики деформаций глубинных реперов в висячем боку в районе разрезного блока 17 в этаже (-350) – (-280) м

– Графики деформаций глубинных реперов (рис. 4) позволяют отслеживать процессы деформирования горного массива: уровень деформаций сжатия и растяжения, характер их изменения во времени, определять пригруженные и разгруженные участки массива, а в сопоставлении с проводимыми взрывами и динамическими проявлениями горного давления определять причины изменения деформированного состояния и напряженности массива. Как правило, рост деформаций наблюдается при проведении взрывных работ и проявлении крупных толчков и горных ударов. Однако скачкообразное сдвижение реперов происходит и без влияния отмеченных факторов. Так в период с 22.04. по 08.05.2004 г. произошла подвижка вмещающих пород до 13 мм без влияния взрывных работ и динамических явлений. В результате этого вблизи Восточного вентиляционного штрека (ВВШ) сжатие увеличилось в 5,5 раза и достигло 1,47 мм/м (45 % удароопасного уровня), после чего в висячем боку рудной зоны в этаже (-350) – (-280) м произошло 3 толчка класса 3.1 – 3.6. По данным геологического отдела рудника в районе ВВШ картируется система трещин и микродиоритовая дайка, деформирование по которой отражает процессы пригрузки – разгрузки месторождения;

– Графики изменения скоростей сдвижений и деформаций (рис. 5) во времени. Данный тип графиков позволяет оценивать характер и величины изменения параметров деформирования массива во времени и опасность динамических пригрузок. В рассматриваемый период максимальные скорости деформаций, превышающие критериальные значения, наблюдались во время толчков 3 – 4 класса, проявившихся в районах Диагонального и Восточного разломов в отметках (-284) – (-367) м. Перед микроударом 13.04.2004 г. в разрезном блоке 17 в этаже (-350) – (-280) м в рудном теле и вмещающих породах после массового взрыва блока 6 в этаже (-210) – (-140) м наблюдалось скачкообразное сдвижение и деформирование горного массива, при котором скорости деформаций достигали 2 мм/м в месяц, что вызвало пригрузку района блока 17 и последующее динамическое явление, классифицированное как микроудар.

Таким образом, в результате деформационного мониторинга определяются потенциальные очаги удароопасности, категория удароопасности, прогностические признаки формирования очагов горных ударов. Наиболее надежные оценки накопления напряжений в горном массиве соответствуют состоянию, при котором наблюдается наличие всех прогностических признаков: деформаций сжатия, скоростей сдвижений и деформаций, обратных сдвижений и поднятий, достигающих или превышающих критерии удароопасности и проявляющиеся на больших участках массива, соизмеримых с шахтными полями.

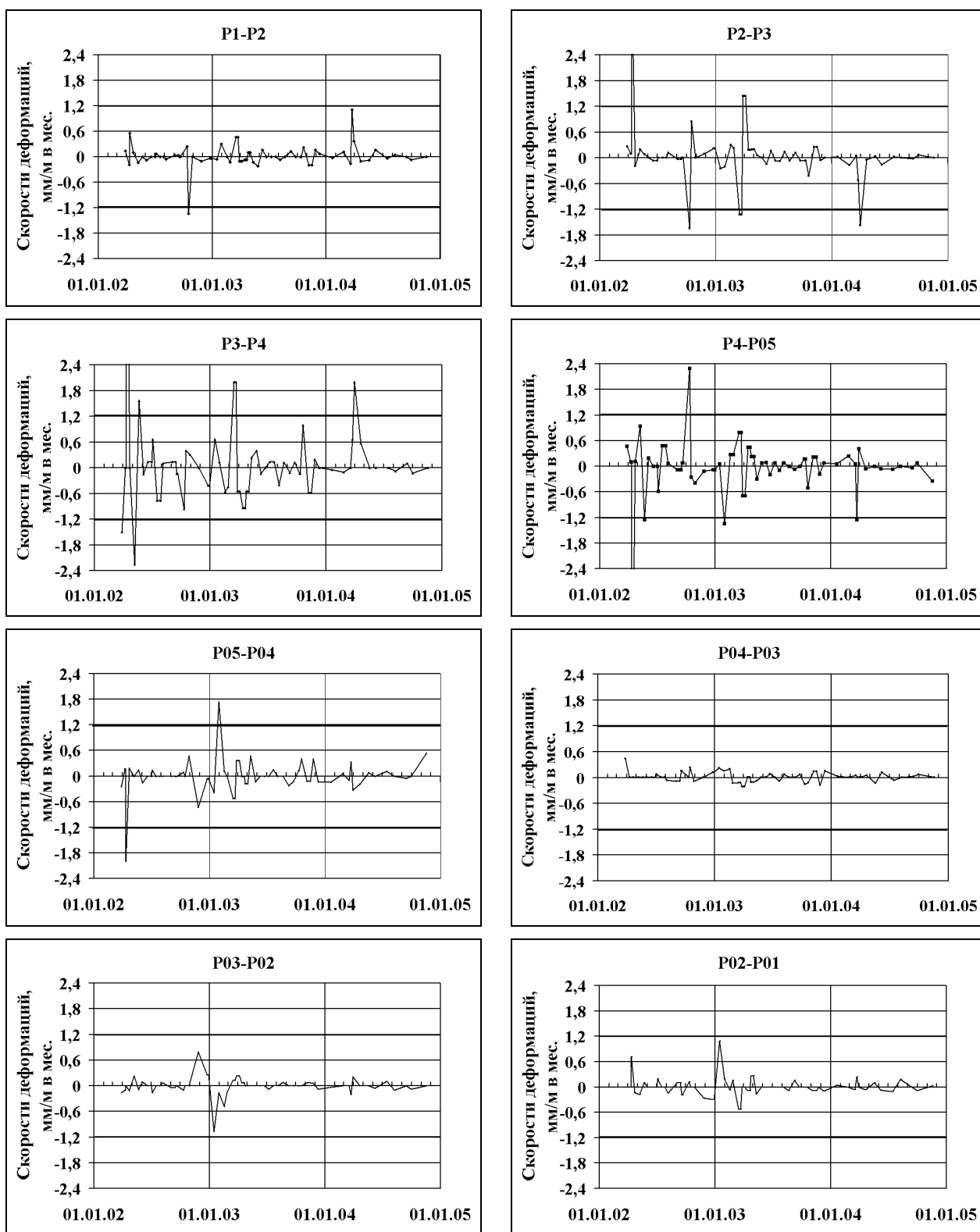


Рис. 5. Изменение во времени скоростей деформаций вмещающих пород и рудной зоны висячего бока гор. – 350 м в центральной части месторождения

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях Горной Шории, склонных и опасных по горным ударам / Колл. авторов; Согл. Кузнецким

управлением Госгортехнадзора России 20.10.2001 г.; Введ. 01.11.2001 г. взамен Указаний 1991 г. – Новокузнецк, 2001. – 75 с.

© Т.В. Лобанова, В.А. Квочин, В.К. Климко, 2005

УДК 550.34 + 622.831

В.Ф. Юшкин, В.Н. Опарин, В.М. Жигалкин, В.Н. Семенов, О.М. Усольцева, А.В. Бабичев
ИГД СО РАН, Новосибирск

В.Н. Федоринин

Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники СО РАН,
Новосибирск

А.К. Потапшиников

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,
Новосибирск

АППАРАТУРА И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД

1. Основные принципы разработки лабораторного приборного комплекса для геомеханических исследований

Важность разработки лабораторного приборного комплекса для геомеханических исследований блочных геосред тесно связана с вопросами практического применения современных достижений геомеханики в горном деле [1 – 4].

Разрабатываемый комплекс, структурная схема которого показана на рис. 1, представляет собой многоканальный анализатор виброакустических сигналов, смещений и деформаций (МАВС), предназначенный для сбора и обработки данных, получаемых от разнотипных датчиков в процессе геомеханического эксперимента на стендовом оборудовании [5, 6]. В его состав входят акселерометры для измерения механических колебаний, тензометрические и оптико-поляризационные датчики для измерения силовых нагрузок и деформаций, оптоэлектронные датчики для измерения линейных перемещений в модельных структурах блочных геосред и породных образцах в условиях длительного одно- и двухосного нагружения как при импульсных, так и вибрационных воздействиях различной интенсивности. Комплекс создается в рамках развития Центра коллективного пользования ИГД СО РАН.

При разработке геомеханических приборов можно выделить два аспекта. Первый связан с необходимостью сформулировать требования к комплексу, исходя из потребности проведения конкретных геомеханических экспериментов. Здесь, по существу, имеет место некоторая неопределенность, обусловленная быстрым развитием новых геомеханических методов и подходов к исследованиям, а также различной степенью их эффективности в рамках отдельного эксперимента.

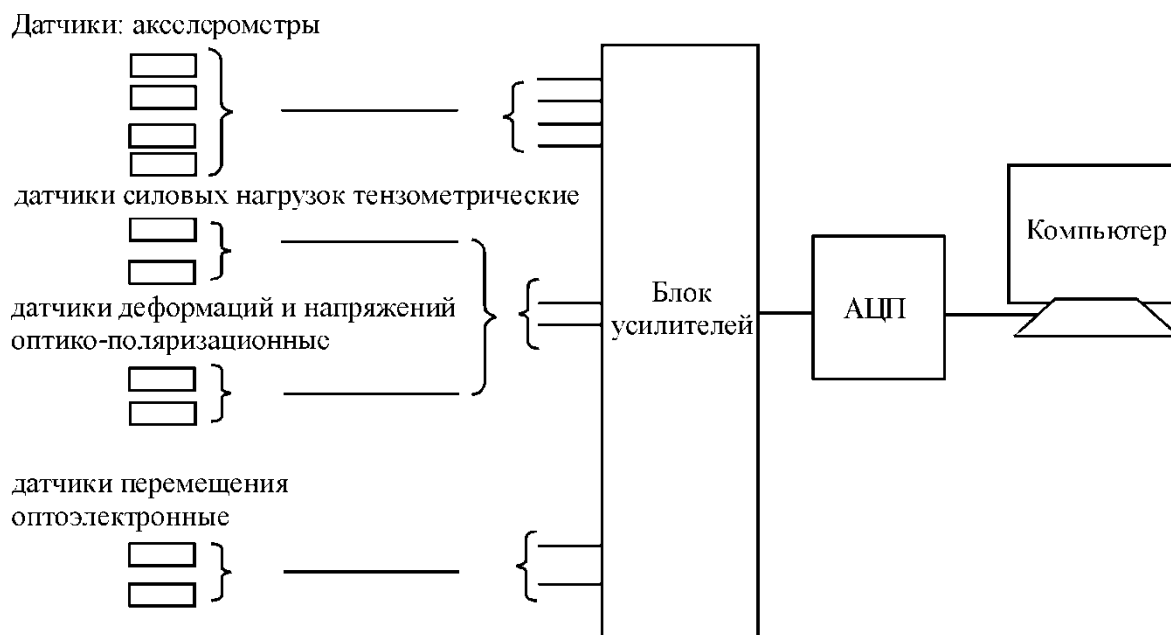


Рис. 1. Структурная схема лабораторного приборного комплекса МАВС с подключением разнотипных датчиков при многоканальной регистрации данных в процессе геомеханических экспериментов

Другой аспект заключается в подборе аппаратурных средств. Общие цели, которые при этом преследуются, состоят в унификации отдельных модулей и разработке универсального геомеханического оборудования, способного решать широкий круг задач и производить оценку качества получаемых в процессе проведения экспериментов данных.

Далее представляется целесообразным разделить все функции комплекса на 2 класса.

1. Функции, выполняемые в реальном масштабе времени. Это работы по обслуживанию многоканальной системы сбора и предварительной обработки данных в процессе эксперимента, сжатие и сохранение в запоминающих устройствах достаточного объема информации для анализа и передачи по каналам связи.

2. Функции, задержка выполнения которых не приводит к срыву эксперимента. Это функции по обеспечению взаимодействия с оператором стенда, а также по обработке данных и отображению результатов.

Очевидно, что анализ функций первого класса дает оценку эффективности комплекса в условиях тех или иных экспериментов. Функции второго класса относятся к синтезу вычислительных систем и в данном случае не рассматриваются.

2. Методические аспекты разработки приборных комплексов с использованием современных компьютеров

Важнейшим условием работоспособности лабораторного приборного комплекса является обеспечение взаимодействия и необходимой производительности каждого структурного блока при обработке информации. В стационарном режиме работы N -канального приборного комплекса за единицу

времени в него поступает Q_1 единиц входной информации. В процессе предварительной обработки этот объем преобразуется в Q_2 единиц выходных данных, которые должны быть зафиксированы на внешнем носителе. Коэффициент сжатия информации определяется следующим образом:

$$G = Q_1 / Q_2. \quad (1)$$

Анализ работы блоков показывает, что во время аналого-цифрового преобразования исходных сигналов блок мультиплексирования каналов должен находиться в стационарном состоянии. Переключение каналов может начинаться одновременно с передачей сформированного аналого-цифровым преобразователем (АЦП) кода в блок предварительной обработки. Отсюда максимальная пропускная способность АЦП зависит от времени аналого-цифрового преобразования $T_{\text{ацп}}$ и времени коммутации каналов $T_{\text{ком}}$ в мультиплексоре, которое включает длительность переходных процессов. На максимально допустимую частоту дискретизации сигналов в каждом из N каналов $f_{\text{дискр.}}$ накладывается ограничение:

$$f_{\text{дискр.}} < \frac{1}{N(T_{\text{ацп.}} + T_{\text{ком.}})}. \quad (2)$$

Все процессы приема информации от АЦП, ее предварительной обработки и накопления обслуживаются сигнальным процессором. Для эффективного распределения вычислительных ресурсов между процессами ввода данных, их предварительной обработки и вывода на устройство накопления (выполняемыми одновременно) используется система прерываний. При этом вводимая информация разбивается на блоки, а драйвер приема обеспечивает непрерывность ввода. Процесс обработки данных одного блока многократно прерывается для приема данных в следующий блок и вывода данных на устройство накопления из блока, предварительная обработка которого проведена на предыдущем шаге.

На рис. 1 показана структурная схема однопроцессорной системы сбора, обработки и накопления данных на восьми каналах [6], выбранная для создаваемого комплекса МАВС. Вместе с тем современный уровень развития компьютеров позволяет создавать мощные многопроцессорные системы, которые способны обеспечить многоканальную обработку информации, поступающую с высокой частотой. При этом для увеличения числа регистрирующих каналов, частоты дискретизации и повышения производительности приема и обработки исходных сигналов можно использовать параллельную работу группы АЦП.

Таким образом, необходимая конфигурация аппаратуры для решения каждой отдельной задачи комплектуется из программируемых модулей универсального многопроцессорного комплекса.

3. Техническая характеристика многоканального анализатора

Многоканальный анализатор виброакустических и тензометрических сигналов (рис. 1) имеет встроенные программные средства для реализации алгоритмов аналого-цифрового преобразования и накопления данных. Он обеспечивает измерение и регистрацию временных зависимостей таких

величин, как сила, ускорение, частота, смещение. Временные зависимости разделяются на:

- Периодические, возбуждаемые синусоидальными генераторами;
- Аперiodические (скачки, удары и т. п.), возбуждаемые импульсными генераторами;
- Многофункциональные, характеризующие воздействие на рассматриваемую систему ряда не зависящих друг от друга процессов.

Анализатор обеспечивает выполнение следующих функций:

- Измерение механических колебаний с помощью акселерометров;
- Измерение силовых нагрузок, механических напряжений и деформаций с помощью электронных динамометров и оптико-поляризационных датчиков;
- Измерение смещений с помощью оптоэлектронных датчиков;
- Коммутацию выходных сигналов датчиков;
- Прием, усиление, аналого-цифровое преобразование и накопление сигналов.

Основные параметры, измеряемые в модельных экспериментах с блочными структурами геосред, могут изменяться в определенных диапазонах.

Для механических колебаний:

- Частота от 0.1 Гц до 20 кГц;
- Амплитуда ускорения от 0.001 до 1000 g, где $g = 9.81 \text{ м/с}^2$.

Для силовых нагрузок:

- При двухосном квазистатическом сжатии блочной модели – до 1800 кН;
- При одноосном динамическом воздействии на блочную модель – до 270 кН;
- Период изменения силы сжатия от 10^{-2} до 10^9 с и более.

Для смещений и деформаций:

- Диапазон базовых расстояний для определения деформаций от 10 до 900 мм;
- Диапазон линейных смещений от 5 мкм до 30 мм.

В комплект анализатора входят: датчик механических колебаний (акселерометр) – 4 шт.; датчик тензорезисторный для измерения силы (электронный динамометр) – 2 шт.; датчик оптико-поляризационный для регистрации деформаций и напряжений – 2 шт.; датчик перемещений оптоэлектронный – 2 шт.; блок усилителей с источником питания; модуль аналого-цифровой обработки сигналов; персональный компьютер; программное обеспечение.

В составе анализатора могут использоваться акселерометры, паспортные данные которых соответствуют техническим характеристикам каналов усилителя. Для измерения смещений и деформаций разработаны специализированные оптоэлектронные и оптико-поляризационные датчики. Оптоэлектронные датчики предназначены для измерения линейных перемещений блоков модели относительно друг друга и определения деформаций в отдельных блоках. Они изготовлены совместимыми с

индикаторными головками часового типа, работают на аналоговом принципе и имеют следующие характеристики:

- Диапазон измеряемых смещений – ± 15 мм от нулевого положения;
- Разрешение – ± 0.005 мм;
- Быстродействие – не менее 10 измерений/сек;
- Диапазон изменения аналогового сигнала – от -5 до $+5$ В.

Для измерения силовых нагрузок по рядам блоков модели используются электронные динамометры на основе тензорезисторных датчиков. Для измерения напряжений и деформаций используются оптико-поляризационные датчики, принцип работы которых рассмотрен ниже. Они выполнены взаимозаменяемыми с тензорезисторными датчиками по каналам усиления.

Усилитель сигналов имеет 8 независимых каналов, 4 из которых предназначены для акселерометров и обеспечивают усиление по ступеням 0.1; 1 и 10. Модуль аналого-цифровой создан на базе сигнального процессора ADSP2181 с учетом положений п. 2. Он обеспечивает прием первичных сигналов, их двоичное преобразование путем последовательного опроса по восьми каналам с частотой дискретизации 500 кГц и запись данных на жесткий диск персонального компьютера в непрерывном режиме.

Анализатор имеет модульную конструкцию, укомплектован персональным компьютером и соединяется с ним по кабельной линии. Модули анализатора разработаны с применением серийно выпускаемых изделий и современной электронной элементной базы. Корпус имеет шасси для установки плат и разъемов, съемную крышку и переднюю панель с элементами индикации и управления.

4. Датчики деформаций на основе пьезооптического эффекта

Пьезооптический эффект или фотоупругость в оптических материалах, обнаруженный Брюстером в конце XVIII в., связан с изменением диэлектрической проницаемости вещества в зависимости от величины деформации и проявляется в виде индуцированного двойного лучепреломления. Для малых одноосных сжатий выполняется соотношение:

$$\Delta n = KP, \quad (3)$$

где Δn – разность показателей преломления между двумя ортогональными направлениями; P – величина давления; K – коэффициент преобразования, который для ряда оптических материалов лежит в диапазоне $10^{11} \div 10^{12}$ м²/Н.

На основе пьезооптического эффекта в КТИ ПМ СО РАН разрабатываются датчики напряжений и деформаций. В качестве чувствительного элемента применяется кварцевое стекло марки КВ. Оптическая схема датчика представлена на рис. 2 и состоит из источника излучения (1), поляроида (2), фазовой пластины $\lambda/4$ (3), чувствительного элемента (4), поляризаторов (5, 6) и фотоприемного устройства (7, 8); A_1 и A_2 обозначают азимут ориентации поляризационных элементов в пространстве. Измерение величины двойного преломления осуществляется по схеме (патент РФ № 2157513), эквивалентной мостовой. Датчик обеспечивает регистрацию фазовых изменений индуцированным одноосным напряжением на уровне $10^{-5} \lambda$ (длины волны).

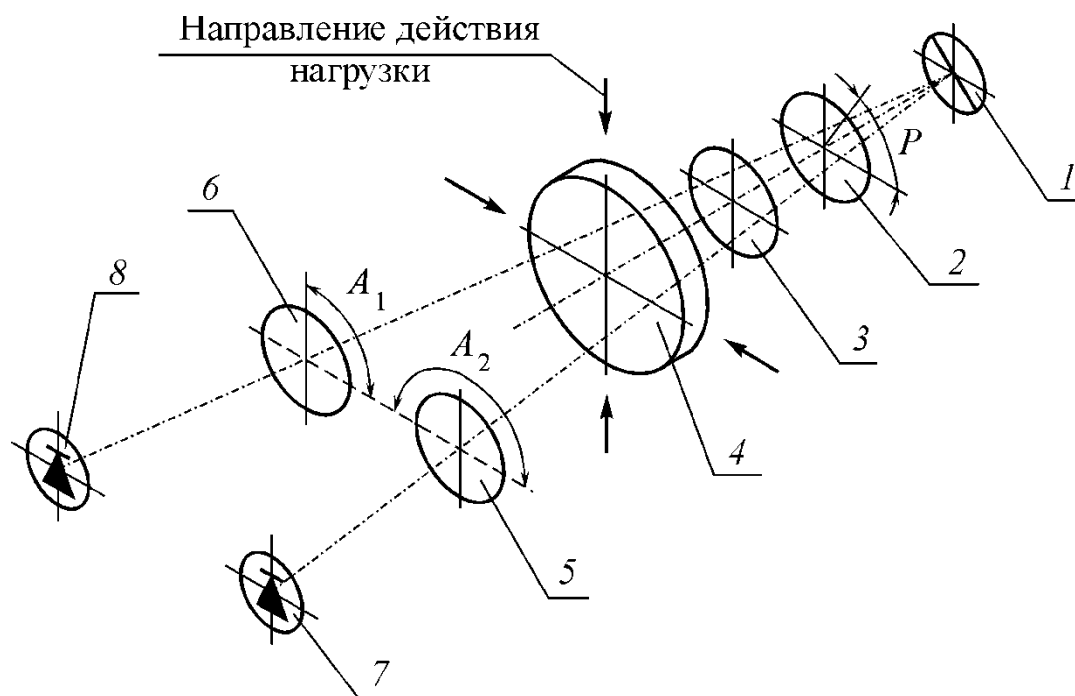


Рис. 2. Схема опико-поляризационного датчика (пояснения в тексте)

Работа датчика осуществляется следующим образом. Посредством рычажного механизма на чувствительный элемент передается силовая нагрузка. При этом возникает оптическая анизотропия $\Delta n = n_1 - n_2$. При прохождении излучения через чувствительный элемент толщиной $d \cong 3 \div 5$ мм одна из компонент световой волны испытывает фазовую задержку на величину $S = (\pi \Delta n d) / \lambda$ или $S = (\pi K P d) / \lambda$.

В КТИ ПМ СО РАН на этом принципе для приборного комплекса МАВС разработан датчик ТД-16оп с ножевой системой крепления на образец. Этот датчик предназначен для замера продольной и поперечной деформации и представляет собой конструкцию в виде стальной рамы с ножевыми поперечными опорами. Его технические характеристики:

База датчика, мм	12;
Диапазон измерения линейных перемещений, мм	10;
Точность измерения, мм	0.001;
Чувствительность к изменениям относительных деформаций	1×10^{-7} ;
Температурная нестабильность, град.	4×10^{-7} ;
Питание, В	5;
Потребляемая мощность, Вт	0.5.

Таблица

Наименование оборудования	Условия нагружения	Режим нагружения	Параметры номинального нагружения	Дополнительное оборудование
1. Универсальная испытательная машина INSTRON-8802	Статическое и динамическое нагружение в условиях: – Одноосное растяжение-сжатие; – Чистый изгиб.	1. «Мягкий». 2. «Жесткий».	1. В статике – 300 кН. 2. В динамике – 250 кН.	Две температурные камеры с регулированием в диапазоне от –80°C до +250°C, от 20°C до +1000°C.
2. Сервогидравлический пресс СН-10	Статическое и квазистатическое нагружение в условиях: – Одноосное растяжение-сжатие; – Крутящий момент; – Давление внутри образца.	1. «Мягкий».	1. В статике – 100 кН. 2. Давление внутри образца – 700 МПа. 3. Варьирование скорости нагружения в диапазоне от 0.1 до 3000 кГ/с.	Температурная камера с регулированием в диапазоне от –195°C до +700°C.
3. Сервогидравлический пресс СГВП-800	Статическое нагружение в условиях трехосного неравнокомпонентного сжатия образца по методике «плавающий поршень–цилиндр–поршень».	1. «Мягкий». 2. «Жесткий».	1. Осевое сжатие – 1000 кН. 2. Давление – 700 МПа.	Камера внешнего давления – 700 МПа; температурная камера с регулированием в диапазоне от 20°C до +1000°C.
4. Сервогидравлический пресс БР-7 (конструкция ВНИМИ А.Н. Ставрогина)	Статическое нагружение в условиях трехосного сжатия.	1. «Мягкий». 2. «Жесткий».	1. Осевое сжатие – 400 кН. 2. Боковое давление – 240 МПа.	Камера внешнего давления – 240 МПа.
5. Сервогидравлический пресс БР-8 (конструкция ВНИМИ А.Н. Ставрогина)	Динамическое нагружение в условиях трехосного сжатия.	1. «Мягкий». 2. «Жесткий».	1. Осевое сжатие – 400 кН. 2. Боковое давление – 240 МПа.	Камера внешнего давления – 240 МПа.
6. Стандартный испытательный пресс УМЭ-10ТМ	1. Одноосное растяжение-сжатие. 2. Продольный изгиб. 3. Поперечный изгиб. 4. Усталостные испытания при циклическом нагружении.	1. «Мягкий». 2. «Жесткий».	1. Осевое растяжение-сжатие – 100 кН.	
7. Стандартный испытательный пресс МР-5000	1. Одноосное растяжение-сжатие. 2. Продольный изгиб. 3. Поперечный изгиб. 4. Усталостные испытания при циклическом нагружении.	1. «Мягкий». 2. «Жесткий».	1. Осевое растяжение-сжатие – 100 кН.	

5. Силовое оборудование для модельных экспериментов

Для проведения модельных экспериментов с блочными структурами [7, 8] и образцами горных пород с использованием комплекса МАВС в ЦКП СО РАН имеются испытательные установки, основные характеристики которых представлены в таблице. Оборудование позволяет изучать:

- Поведение блочных геосред при различных видах напряженного состояния (сжатие, трехосное неравнокомпонентное сжатие типа $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$, растяжение);
- То же с учетом влияния истории нагружения и деформирования в условиях пропорционального (при $\sigma_2 / \sigma_1 = \text{const}$) и сложного нагружений;
- Деформированное состояние сред при нагрузках до предела прочности и в запредельной области;
- То же с учетом влияния скорости деформирования в широком диапазоне.

Эксперименты могут выполняться на образцах цилиндрической формы диаметром 30–40 мм, длиной 80 мм, а также на образцах прямоугольной формы. Перед опытом проводится подготовка поверхности образцов. Обработка торцов осуществляется в специальных оправках на прецизионной шлифовально-полировальной установке РМ2А, что позволяет получить отклонение от параллельности не более 0.015 мм на базе 80 мм. Высокие требования к параллельности торцов важны при испытании на сжатие без применения промежуточных сферических шарниров. Подготовка к испытаниям включает крепление на поверхности образца датчиков продольной и поперечной деформации.

В зависимости от условий эксперимента можно использовать различные способы регистрации деформационных характеристик. Один из способов заключается в механическом креплении датчиков на образец при помощи ножевых опор. Он является надежным при изучении деформаций как в упругой, так и в пластической области, а также медленных деформационно-волновых процессов.

Таким образом, предложенный комплекс приборов и оборудования позволяет производить многоплановые испытания образцов горных пород с регистрацией деформационных, акустических и других геомеханических параметров в широком диапазоне статических и динамических нагрузок.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты №№ 01-05-65062, 01-05-65463, 03-05-79156, РАН, № 13.12, СО РАН, проект №№ 73, 129, 134.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курленя М.В., Опарин В.Н., Акинин А.А. и др. О расклинивающем эффекте зон опорного давления // ФТПРПИ. – 1995. – № 4.
2. Курленя М.В., Опарин В.Н., Акинин А.А. и др. Многоканальный оптоэлектронный деформометр продольного типа // ФТПРПИ. – 1997. – № 3.
3. Опарин В.Н., Акинин А.А., Балмашнова Е.Г., Юшкин В.Ф. О новой шкале структурно-иерархических представлений как паспортной характеристике объектов геосреды // ФТПРПИ. – 1998. – № 5.

4. Курленя М.В., Опарин В.Н., Акинин А.А. и др. О некоторых особенностях эволюции гармонических акустических сигналов при нагружении блочных сред с цилиндрической полостью // ФТПРПИ. – 1999. – № 6.

5. Опарин В.Н., Жигалкин В.М., Канискин Н.А. и др. Автоматизированная система физического моделирования напряженно-деформированного состояния блочных структур геосреды // ФТПРПИ. – 2001. – № 2.

6. Курленя М.В., Опарин В.Н., Акинин А.А. и др. К проблеме создания комплексов прецизионных приборов для регистрации нелинейных деформационных волн // Тр. Междунар. конф. «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли» (2–4 октября 2001 г.). – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2001.

7. Опарин В.Н., Аршавский В.В., Жигалкин В.М. и др. О разрушении одномерной модели блочных сред в условиях длительного одноосного нагружения // Физическая мезомеханика. – 2002. – Т. 5. – № 5.

8. Аннин Б.Д., Жигалкин В.М. Поведение материалов при сложном нагружении. – Новосибирск: Наука, 1999.

© В.Ф. Юшкин, В.Н. Опарин, В.М. Жигалкин, В.Н. Семенов, О.М. Усольцева,
А.В. Бабичев, В.Н. Федоринин, А.К. Потапников, 2005

УДК 622.83:550.372

В.Л. Шкуратник

МГГУ, Москва

Ю.Л. Филимонов

ООО «Подземгазпром», Москва

О ВЗАИМОСВЯЗИ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ С ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ И ПРОЦЕССАМИ РАЗРУШЕНИЯ СОЛЯНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Необходимым условием эффективного и безопасного ведения горных работ, строительства и эксплуатации подземных сооружений является их надежное информационное обеспечение. Важнейшую часть такого обеспечения составляет оценка механических свойств и напряженно-деформированного состояния горных пород в массиве. Особенно актуальна указанная оценка при разработке соляных горных пород и строительстве в них подземных объектов различного назначения, прежде всего, бесшахтных резервуаров, имеющих значительные геометрические размеры и глубину заложения [1]. Из-за высокой пластичности и ярко выраженных реологических свойств соляных пород их изучение с использованием традиционных методов, основанных на измерении деформаций при нагружении (разгрузке), характеризуется низкой надежностью и значительной трудоемкостью.

Опыт, накопленный за последние десятилетия, убедительно свидетельствует, что для решения задач геоконтроля перспективными являются геофизические методы, в частности, метод акустической эмиссии (АЭ). Он позволяет определять механические свойства и напряженно-деформированное состояние различных типов горных пород, в том числе пластичных. Метод технологичен в использовании, а получаемые с его помощью количественные оценки свойств и состояния объектов контроля отличаются высокой точностью и надежностью.

В то же время практическое применение метода АЭ при исследовании соляных горных пород до настоящего времени было ограниченным, а реально

получаемые результаты измерений по своей информативности во многом не соответствовали потенциальным возможностям метода. Это связано, прежде всего, с недостаточной изученностью закономерностей проявления АЭ в соляных породах при различных режимах их деформирования (в условиях ползучести и релаксации напряжений) и взаимосвязей параметров эмиссии с механическими свойствами и состоянием объекта исследования.

Ниже представлены результаты экспериментов, проведенных для целей геомеханического обеспечения строительства в Подмосковном соляном бассейне подземных резервуаров. Опыты проводились на отобранных с глубины 800–900 м образцах каменной соли, ангидритов, доломитов и сильно засоленных кварцевых песчаников девонского возраста. Одновременная регистрация создаваемого в ходе экспериментов в образцах напряжения, возникающих при этом продольной и поперечной деформаций, а также параметров акустической эмиссии осуществлялась с помощью автоматизированного измерительного комплекса.

В группу соляных пород в данной работе объединены различные по составу и структуре, но общие по генезису породы. Это образовавшиеся за один цикл осадконакопления типичные для эвапоритовых формаций осадочные галогенные, сульфатные и карбонатные породы, представляющие собой практически чистую среднезернистую каменную соль, микрозернистый ангидрит, пелитоморфный доломит, а также характерные для данного соляного бассейна терригенные среднезернистые кварцевые песчаники с галитовым цементом (содержание NaCl до 30 %).

Полученные по стандартным методикам средние значения физико-механических и деформационных свойств этих пород приведены в табл. 1.

Таблица 1. Средние значения физико-механических и деформационных свойств соляных пород

Порода	Плотность ρ , кг/м ³	Скорости ультразвуковых волн, км/с		Предел прочности при одноосном сжатии σ_c , МПа	Модуль упругости E , МПа	Модуль деформации E_0 , МПа
		продольн ых	поперечн ых			
Каменная соль	2170	4.47	2.44	27.7	11600	5400
Песчаник галитовый	2370	4.83	—	52.4	14000	5700
Доломит	2500	5.52	2.00	98.3	20800	18500
Ангидрит	2890	5.99	3.15	125	25000	23800

Измерение параметров акустической эмиссии в образцах соляных горных пород осуществлялось в ходе экспериментов по их одноосному деформированию в двух различных режимах:

- С постоянной скоростью нагружения $\dot{\sigma}_1 = \text{const} = 0.05 \text{ МПа/с}$;
- С постоянной скоростью продольной деформации $\dot{\varepsilon}_1 = \text{const} = 10^{-5} \cdot \text{с}^{-1}$.

В качестве информативных параметров АЭ регистрировались скорость счета $\dot{N}$, амплитуда, длительность, частота сигналов. В данной работе приводятся и анализируются полученные в ходе этих экспериментов взаимосвязи между напряжением σ_1 , продольной и объемной деформациями ε_1 , ε_v и таким наиболее доступным для измерений параметром, как скорость счета акустической эмиссии $\dot{N}$.

Анализ экспериментальных данных показал, что в ряду пород каменная соль – галитовый песчаник – доломит – ангидрит существует постепенный переход от пород пластичных средней прочности ($\sigma_c = 25 - 50$ МПа) к прочным и очень прочным хрупким породам ($\sigma_c = 80 - 120$ МПа), и что в этом ряду наблюдается также постепенное изменение проявления АЭ. Важно отметить, что АЭ во всех породах носит далеко не монотонный характер. На графиках зависимостей $(\sigma_1 - \dot{N})$, $(\varepsilon_1 - \dot{N})$, также как и на традиционных $(\sigma_1 - \varepsilon_1)$, $(\sigma_1 - \varepsilon_v)$, по которым, как правило, определяются пределы упругости σ_e (по отклонению от линейности), пределы длительной прочности σ_1^∞ (по началу перехода в разрыхление), пределы прочности σ_c , имеются определенные минимумы, максимумы $\dot{N}$ и характерные переходы между ними. Наличие аномалий параметров АЭ при деформировании пород, отражающих изменения их структуры, трещиноватости, интенсивности процессов разрушения делает необходимым их учет при проведении исследований на основе акустоэмиссионных эффектов памяти [2, 3], а также позволяет определять переходы между стадиями деформирования пород, которым соответствуют такие механические характеристики как σ_e , σ_1^∞ и σ_c .

На рис. 1 – 3 представлены зависимости $(\sigma_1 - \varepsilon_1)$, $(\sigma_1 - \varepsilon_v)$ и $(\sigma_1 - \dot{N})$ при нагружении с постоянной скоростью ($\dot{\sigma}_1 = \text{const}$) каменной соли, галитовых песчаников, а также доломитов и ангидритов соответственно. Анализ этих зависимостей показывает, что, несмотря на существенное отличие характера проявления АЭ в этих типах пород, по виду зависимостей $(\sigma_1 - \varepsilon_1)$, $(\sigma_1 - \varepsilon_v)$, характеру изменения $d\sigma/d\varepsilon$, и $\dot{N}$ выделяются общие для них стадии деформирования, комплексное описание которых нашло отражение в табл. 2.

Результаты экспериментов по деформированию соляных пород с постоянной скоростью продольной деформации ($\dot{\varepsilon}_1 = \text{const}$) показали существенно иной характер их поведения и проявления АЭ по сравнению с режимом нагружения с постоянной скоростью ($\dot{\sigma}_1 = \text{const}$). При этом поведение пластичных и хрупких пород значительно отличается.

В частности, на графиках зависимостей $(\varepsilon_1 - \sigma_1)$ и $(\varepsilon_1 - \dot{N})$, характерных для каменной соли (рис. 4), отчетливо видна полная картина деформирования пластичных пород и гораздо более сложное проявление АЭ. Так максимальные значения $\dot{N}$ достигаются после максимальных значений напряжений, максимальному уплотнению соответствуют минимальные значения $\dot{N}$. Анализ

характерных аномалий на графиках зависимостей $(\varepsilon_1 - \sigma_1)$, $(\sigma_1 - \varepsilon_v)$ и $(\sigma_1 - \dot{N})$, позволил определить стадии деформирования, детально описанные в табл. 3.

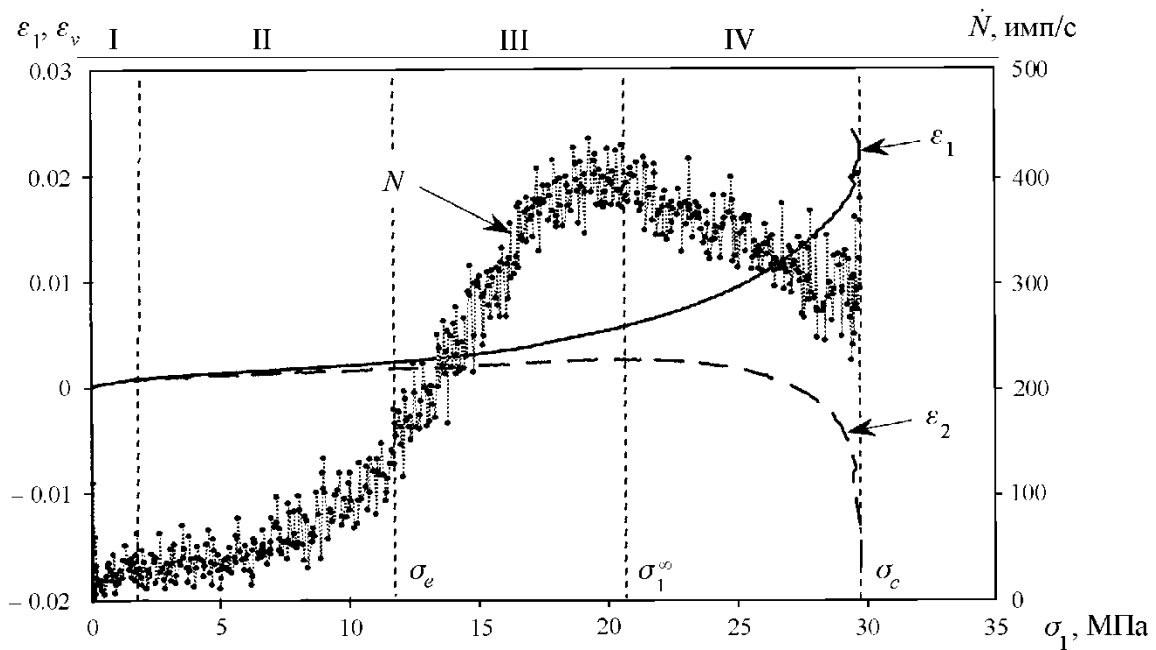


Рис. 1. Деформационные характеристики и АЭ при нагружении образцов каменной соли ($\dot{\sigma}_1 = \text{const}$): I, II, III, IV — стадии деформирования (табл. 2)

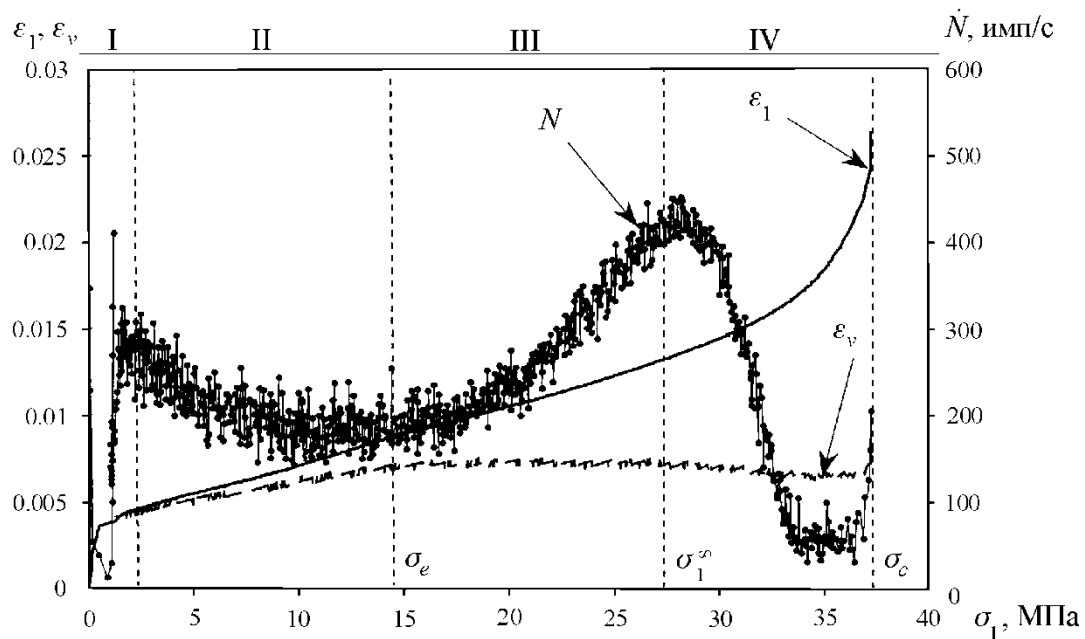


Рис. 2. Деформационные характеристики и АЭ при нагружении образцов песчаника ($\dot{\sigma}_1 = \text{const}$)

Таблица 2. Характеристика стадий деформирования соляных пород при постоянной скорости нагружения

Стадии деформирования	I – начальная (пригрузки)	II – линейно-упругая	III – упруго-пластическая	IV – разрушения
Действующие напряжения	от 0 до $(0.1 \div 0.2) \sigma_c$	$(0.1 \div 0.35) \sigma_c$	$(0.35 \div 0.7) \sigma_c$	$(0.7 \div 1.0) \sigma_c$
Зависимость $(\varepsilon_1 - \sigma_1)$; изменение $\varepsilon_1, d\sigma/d\varepsilon$	Нелинейная; значительное увеличение значений $d\sigma/d\varepsilon$ и ε_1	Линейная; $d\sigma/d\varepsilon$ максимально и почти постоянно, слабый прирост ε_1	Нелинейная; постепенное увеличение ε_1 , плавное снижение значений $d\sigma/d\varepsilon$	Нелинейная; быстрое снижение значений $d\sigma/d\varepsilon$ до нуля, интенсивный рост ε_1
Изменение объема (объёмной деформации ε_v)	Заметное уплотнение, связанное с закрытием открытых пор и трещин	Постепенное уплотнение, упругое сжатие скелета и закрытие пор	Постепенное увеличение ε_v до максимального значения – наибольшее уплотнение	Переход к уменьшению ε_v : плавный – у пластичных, резкий – у хрупких; разуплотнение ($\varepsilon_v < 0$) и полная дезинтеграция
Проявление акустической эмиссии (изменение $\dot{N}$)	Значения $\dot{N}$ невысоки, после всплеска при начальном нагружении снижаются до стабильных уровней ($0.1 \dot{N}^{\max}$)	Значения $\dot{N}$ постоянно низкие – $(0.1 \div 0.15) \dot{N}^{\max}$	Заметное возрастание $\dot{N}$ до $\dot{N}^{\max}$	Спад высоких значений $\dot{N}$ от $\dot{N}^{\max}$ до быстрого полного исчезновения: постепенный – у пластичных, резкий – у хрупких
Качественная характеристика изменений в образцах	Локальные разрушения на контактах, вызванные несовершенством поверхности и формы образца	Линейно-упругое слабое деформирование без заметного изменения структуры образца	Начало разрушения, образование отдельных микротрещин	Увеличение микротрещиноватости, связанное с ускоренным трещинообразованием, проращение макротрещин

Таблица 3. Характеристика стадий деформирования пластичных соляных пород при постоянной скорости продольной деформации

Стадии деформирования	I – начальная (пригрузки)	II – линейно-упругая	III – упруго-пластическая	IV – пластическая предельная	V – пластическая запредельная	VI – запредельная разрушения
Напряжения	$(0 \div 0.2)\sigma_c$	$(0.2 \div 0.35)\sigma_c$	$(0.35 \div 0.7)\sigma_c$	$(0.7 \div 1.0)\sigma_c$	$(1.0 \div 0.7)\sigma_c$	$(0.7 \div 0.1)\sigma_c$
Зависимость ($\varepsilon_1 - \sigma_1$); изменение значений $d\sigma/d\varepsilon$	Нелинейная; быстрое возрастание $d\sigma/d\varepsilon$ до максимальных уровней	Линейная; $d\sigma/d\varepsilon$ максимальны и постоянны	Нелинейная; плавное снижение $d\sigma/d\varepsilon$	Нелинейная; быстрое плавное снижение $d\sigma/d\varepsilon$ до нуля	Нелинейная; $d\sigma/d\varepsilon$ отрицательны и стремятся к минимуму	Нелинейная; $d\sigma/d\varepsilon$ отрицательны и приближаются к нулю
Изменение объема (объёмной деформации ε_v)	Резкое уплотнение, закрытие пор и трещин	Постепенное уплотнение	Дальнейшее уплотнение до значения $\varepsilon_v^{\max}$	Плавный переход в разуплотнение, значения ε_v снижаются	Интенсивное разрыхление, увеличение объема	Дальнейшая дезинтеграция образца
Проявление акустической эмиссии (изменение $\dot{N}$)	После всплеска при пригрузке $\dot{N}$ снижается до $0.1 \dot{N}^{\max}$	Значения $\dot{N}$ постоянно низкие $0.1 \dot{N}^{\max}$	Постепенное слабое возрастание $\dot{N}$ до $0.2 \dot{N}^{\max}$	Заметный рост значений $\dot{N}$ до $0.5 \dot{N}^{\max}$	Постоянное интенсивное увеличение $\dot{N}$ до $\dot{N}^{\max}$	Постепенное снижение $\dot{N}$ до $(0.3 \div 0.4) \dot{N}^{\max}$
Качественная характеристика процессов и изменений в образце	Локальные разрушения, вызванные несовершенством поверхности и формы образца	Упругое деформирование без заметного изменения формы	Упруго-пластическое деформирование, начало роста микротрещин	Преимущественно пластическое деформирование, заметное увеличение микротрещиноватости	Начало запредельного деформирования, интенсивный рост микро- и макротрещин	Увеличение трещиноватости, интенсивное раскрытие макротрещин

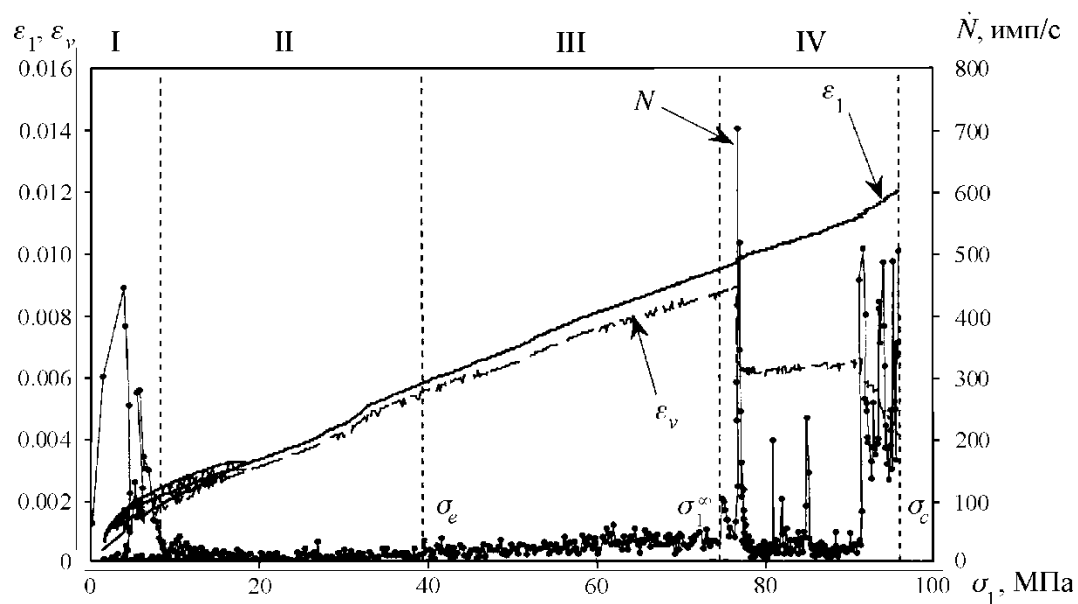


Рис. 3. Деформационные характеристики и АЭ при нагружении образцов доломита ($\dot{\sigma}_1 = \text{const}$)

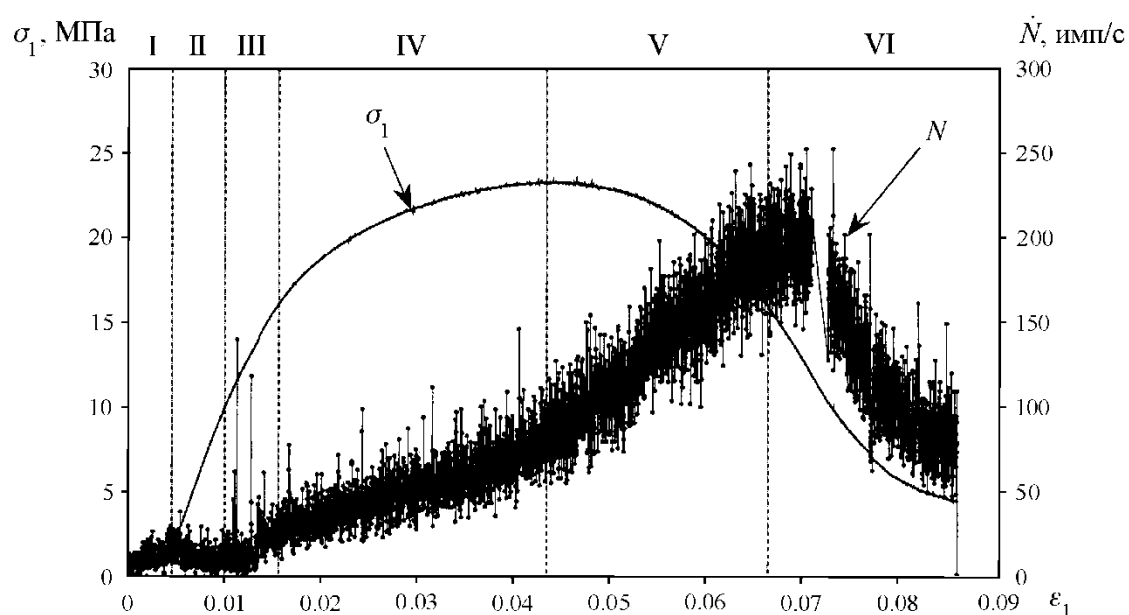


Рис. 4. Деформационные характеристики и АЭ при испытании образцов каменной соли ($\dot{\varepsilon}_1 = \text{const}$). I, II, III, IV, V, VI — стадии деформирования (табл. 3)

У хрупких прочных пород при этом режиме деформирования ($\dot{\varepsilon}_1 = \text{const}$) по характерным перегибам, максимумам и минимумам на соответствующих графиках (рис. 5) выделяются следующие стадии деформирования:

– Начальная стадия (стадия пригрузки), сопровождающаяся значительным количеством импульсов АЭ и связанная с началом нагружения (до $0.2\sigma_c$), при котором происходит закрытие пор и трещин, а также локальные разрушения, вызванные несовершенством поверхности и формы образца;

- Стадия линейно-упругого деформирования (от $0.2\sigma_c$ до $0.6\sigma_c$), на которой происходит упругое сжатие скелета и уплотнение и наблюдается минимальное количество импульсов АЭ;
- Стадия упруго-пластического деформирования – предразрушения (от $0.6\sigma_c$ до $0.9\sigma_c$), сопровождающаяся микрорастрескиванием и появлением резких всплесков импульсов АЭ;
- Стадия разрушения (от $0.9\sigma_c$ до σ_c), сопровождающаяся большим количеством импульсов АЭ и свидетельствующая о неуправляемом росте трещин;
- Стадия запредельного деформирования (от σ_c до $0.2\sigma_c$), при которой происходит дезинтеграция материала и $\dot{N}$ снижается до фоновых значений.

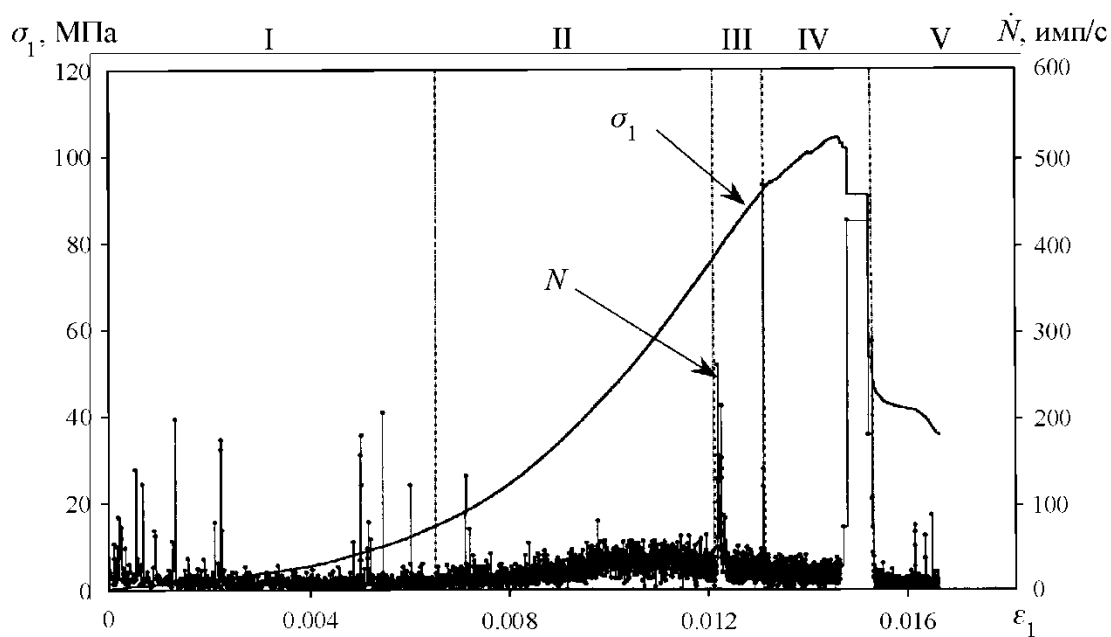


Рис. 5. Деформационные характеристики и АЭ при испытании образцов ангидрита ($\dot{\epsilon}_1 = \text{const}$)

Характерным точкам на графиках зависимостей и переходам между стадиями деформирования у этих пород, также как у пластичных, соответствуют важные механические характеристики. Так минимуму $\dot{N}$ соответствует предел упругости σ_e , устойчивому росту количества импульсов АЭ с началом стадии нелинейного деформирования и переходом к разрыхлению – предел длительной прочности σ_1^∞ , а максимальным значениям $\dot{N}$ – предел прочности σ_c .

Сравнение двух режимов нагружения соляных пород показало значительное сходство характера их деформирования и проявления акустической эмиссии при $\dot{\sigma}_1 = \text{const}$ и при $\dot{\epsilon}_1 = \text{const}$. В обоих случаях по характеру изменения и абсолютным значениям скорости счета АЭ можно достаточно уверенно определить очень важные в практическом плане для

диагностики состояния пород стадии деформирования: упругую, упруго-пластическую, хрупкого разрушения, запредельного деформирования, а также соответствующие переходам между ними такие механические характеристики как предел упругости, предел длительной прочности и предел прочности.

Таким образом, каждому режиму и каждой стадии деформирования соляных горных пород соответствуют вполне определенные особенности акустической эмиссии, информативные параметры которой на границах между стадиями претерпевают характерные аномальные изменения, позволяющие идентифицировать каждую из стадий деформирования, определять механические свойства соляных пород и диагностировать их приближающееся разрушение.

Работа выполнена в рамках гранта НШ1467.2003.5 государственной поддержки ведущих научных школ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смирнов В.И. Строительство подземных газонефтехранилищ: Учебн. пособие для вузов. – М.: Газоил пресс, 2000.
2. Шкуратник В.Л., Лавров А.В. Эффекты памяти в горных породах. Физические закономерности, теоретические модели. – М.: Изд-во Академии горных наук, 1997.
3. Filimonov Y.L., Lavrov A.V., Shafarenko Y.M., Shkuratnik V.L. Memory effects in rock salt under triaxial stress state and their use for stress measurement in a rock mass // Rock Mechanics and Rock Engenering, 2001. – Vol. 34. – № 4.

© В.Л. Шкуратник, Ю.Л. Филимонов, 2005

УДК 550.837

Г.М. Тригубович

СНИИГГиМС, Новосибирск

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПОИСКОВО-ОЦЕНОЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ НА ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

В настоящее время особую актуальность приобрела проблема оптимизации геологоразведочных работ, что тесно связано с уменьшением запасов полезных ископаемых, осложненными условиями проведения поисково-оценочных работ, необходимости наращивания ресурсов в новых перспективных, слабо изученных и зачастую труднодоступных районах. В современных экономических условиях массовое применение традиционного сейсморазведочно-бурового комплекса исследований при поисках полезных ископаемых приводит к весьма высоким затратам и требует пересмотра стратегии геофизических исследований в плане расширения комплекса используемых методов, ускорения разработки и внедрения в отрасли ресурсосберегающих прогнозно-поисковых технологий.

Заметной тенденцией развития геофизических технологий в России и за рубежом является переход на площадные системы наблюдений и объемные интерпретационные модели. Реконструкция данных площадных исследований в объемное распределение физических параметров с установлением корреляционных связей между структурно-литологическими комплексами и физическими полями на основе многофакторного анализа полей позволяет

существенно повышать разрешающую способность и достоверность геофизического прогноза. Для этого в настоящее время создается мощный сейсмический поисково-оценочный комплекс, включающий современные аэро-, наземные, наземно-скважинные и скважинные технологии, обеспеченные передовой аппаратурой и методикой проведения полевых исследований. С помощью этого комплекса может быть решен широкий спектр задач на нефть, газ, источники питьевой воды, твердые полезные ископаемые и обеспечено проведение инженерных и экологических исследований.

Весьма интенсивно развиваются электромагнитные технологии на основе изучения распространения нестационарных ЭМ-полей. Индуктивные методы электроразведки хорошо зарекомендовали себя как при решении нефтепоисковых задач с выделением аномалий типа «залежь» в условиях развития трапповых формаций Восточной Сибири, так и при поисках рудных объектов в традиционных рудных провинциях и в уникальном Норильском рудном районе, с учетом специфики которого была создана методика картирования рудоконтролирующего горизонта до глубин 4000 м.

Последними теоретическими и экспериментальными исследованиями показано, что в индуктивных методах электроразведки система наблюдений с закрепленным источником существенно превосходит традиционно применяемые системы глубинных зондирований с контролируемыми источниками. Проблемы, связанные с телеметрической синхронизацией пространственно разнесенных источника и приемников и трудности интерпретации сложнопостроенных объемных ЭМ-полей в присутствии поисковых объектов, сегодня имеют техническое решение.

Разработан новый подход к трехмерной электроразведке в области методики сбора информации, который заключается в использовании контролируемого источника ЭМ-поля с произвольным количеством пространственно разнесенных, асинхронно работающих приемников, синхронизированных спутниковым временем. Система интерпретации зарегистрированных данных позволяет получать объемные изображения поисковых объектов.

Для исследования верхней части разреза до глубин 100 м разработана (Сибгеотех, СНИИГГиМС, СГУПС, 2001) сканирующая ЭМ-технология с цифровой телеметрической аппаратурой серии «Импульс», по эффективности и производительности в десятки раз превышающая известные аналоги.

Информация по исследуемой геологической среде, в зависимости от условий проведения электроразведочного эксперимента, может формироваться от закрепленного, либо перемещаемого вместе с измерителем источника. При этом, вне зависимости от системы наблюдений, приемник во время измерения перемещается по заданной траектории в режиме сканирования. Понятие сканирования введено для наземных приемно-генераторных систем в диффузионно-волновой области становления поля, в которых хотя бы один элемент во время измерения находится в движении. Наиболее простыми системами являются коаксиальная приемно-генераторная конструкция и конструкция с фиксированным разномом, когда генератор и измеритель при

измерении перемещаются совместно. Такие системы обладают высокой разрешающей способностью за счет высокой пространственно-временной плотности наблюдений. Анализ пространственно-временного распределения поля дает надежную основу, в рамках существующих электрофизических предпосылок, для локализации поисковых объектов.

При поисках и оконтуривании залежей углеводородов в Западной Сибири широкое применение нашли методы электроразведки, базирующиеся на гальваническом возбуждении электрического поля. Физической предпосылкой использования метода вызванной поляризации (ВП) при решении нефтепоисковых задач в этом регионе явилось наличие над залежами углеводородов ореолов повышенной поляризуемости в плотных глинах березовской и кузнецовской свит (глубины 500-800 м) ниже уровня регионального водоупора. Методика проведения полевых работ и интерпретации базируется на результатах математического моделирования электрических полей в сложно-построенных средах с использованием методики раздельного вычисления осисимметричной части задачи и поля влияния трехмерных неоднородностей. Этот способ позволяет также учитывать различные характеристики спада процесса поляризации во времени.

Разработаны и прошли испытания в полевых условиях многоканальные станции для наземно-скважинной электроразведки и ВП, обеспечивающие надежное измерение сигнала в режиме пропускания тока и в паузе. Постоянный контроль измеряемого сигнала позволяет проводить оперативную оценку помех и погрешности измерений во время накопления сигнала. Важным элементом нефтепоисковой технологии является одновременная регистрация переходных характеристик ВП и становления поля в площадном и профильном вариантах от общей питающей линии. Система площадных наблюдений от закрепленного источника с мобильными сканерами-приемниками «Импульс-Д» (ПЗС-ЗИ) разработана для исследования геологического разреза сложно-построенных сред до глубин 3-4 км.

В качестве иллюстрации эффективности комплексирования сейсморазведки с электроразведочными исследованиями можно привести результаты работ на Новоютымской площади Тюменской области, где скважины, пробуренные в сводовой части Новоютымской структуры оказались частично продуктивными (скв. 40 и 46), а частично непродуктивными (скв. 43 и 47). Для уточнения дальнейшего направления бурения были проведены электроразведочные работы по редкой сети сейсморазведочных профилей, позволившие выделить на западном фланге сейсмической структуры зону повышенной поляризуемости. Последующее бурение показало, что практически все продуктивные скважины размещаются внутри контура повышенной поляризуемости или вблизи него. На основании опытно-методических и производственных работ, проведенных методом ВП на площади около 3000 км² было установлено, что вне зависимости от типа ловушек, стратиграфических условий залегания над всеми известными месторождениями углеводородов (около 20), расположенными на глубине (2.5-3.0) км наблюдались зоны повышенной поляризуемости и измененного сопротивления.

Результативность метода при последующем бурении около 100 скважин составила более 0.7.

Эффективным средством оконтуривания залежей углеводородов является наземно-скважинная электроразведка. Методика измерений, предусматривающая использование зарядов в обсадной колонне труб, является технологически удобным вариантом, поскольку практически не сдерживает бурение. Последовательное размещение источника тока в обсадных колоннах труб на устье скважины, над и под залежью обеспечивает получение информации, сопоставимой с результатами работ в открытом стволе скважины. При этом установлено, что ток стекает в исследуемую среду с ближайших 200 – 250-метровых отрезков трубы в каждую сторону от точечных зарядов, образуя распределенное заземление.

Для решения задачи прямых поисков подземных пресных вод в СНИИГГиМСе разработан комплекс методов ядерно-магнитного резонанса (ЯМР) и метода переходных процессов (МПП). В результате теоретических и экспериментальных исследований создана технология, включающая в себя аппаратуру для измерения эффектов становления поля и ядерно-магнитного резонанса, методику измерений и пакет интерпретационных программ. Технология позволяет определять не только суммарную водонасыщенность пласта-коллектора, но и проводимость флюида, и, следовательно, уровень минерализации воды. Основное отличие предложенных технических решений заключается в возможности использования при измерении эффектов ЯМР независимой петли, позволяющей проводить измерения вне генераторного контура, что повышает разрешающую способность метода.

В последнее время в мировой геофизической практике четко прослеживается тенденция перехода к широкомасштабному использованию высокопроизводительных и относительно малозатратных аэрогеофизических методов, которые являются эффективным средством изучения верхней части геологического разреза. Экологичные и бесконфликтные по отношению к земельному законодательству аэрогеофизические методы становятся серьезной альтернативой наземных исследований до глубин 500 м. Наземные методы, очевидно, будут существовать на этапе детальной разведки и, в эксклюзивном варианте, на этапе поисков. Следует отметить, что более половины прироста разведанных запасов никеля, меди, свинца в Северной Америке получены за счет месторождений, прогнозируемых с помощью аэрогеофизики.

Разработка аэрогеофизических систем на мировом рынке является прерогативой специализированных контрагентов вследствие высокой стоимости и сложности аэродинамических решений и проблем измерения слабых вторично индуцируемых электромагнитных полей в исследуемой среде. Видимо поэтому, за последние 20 лет в России не было разработано ни одной новой аэроэлектромагнитной системы. Этот недостаток компенсировался закупкой дорогостоящей техники из Канады. В 1999 году СНИИГГиМС, Сибгеотех, НТГУ совместно разработали новый вертолетный вариант аэрогеофизической платформы «Импульс-аэро» (модель-А1), которая по своим техническим характеристикам превосходила отечественные и зарубежные

аналоги. На рис. 1, 2 представлен внешний вид и основные технические и конструкторские решения платформы А1. Основной отличительной особенностью являлся переход на новый вид индуктора вихревого поля – типа «летающая тарелка» (Патент РФ на изобретение № 2201603, приоритет от 27.05.2002). Аэрогеофизическая платформа «Импульс-А1» была предназначена для проведения высокоразрешающих низкопрофильных аэрогеофизических исследований методами становления поля на этапах геокартирования и поиска минерально-сырьевых объектов на глубинах до 200-300 метров. Способ перемещения – под фюзеляжем вертолета типа Ми-8 на трос-кабеле длиной до 50 метров, на высоте 30-50 метров от поверхности исследования при скорости полета 100-140 км/час.



Рис 1. Платформа "Импульс-А1" на этапах сборки и подъёма

Рис. 1. Платформа «Импульс-А1» на этапах сборки и подъёма

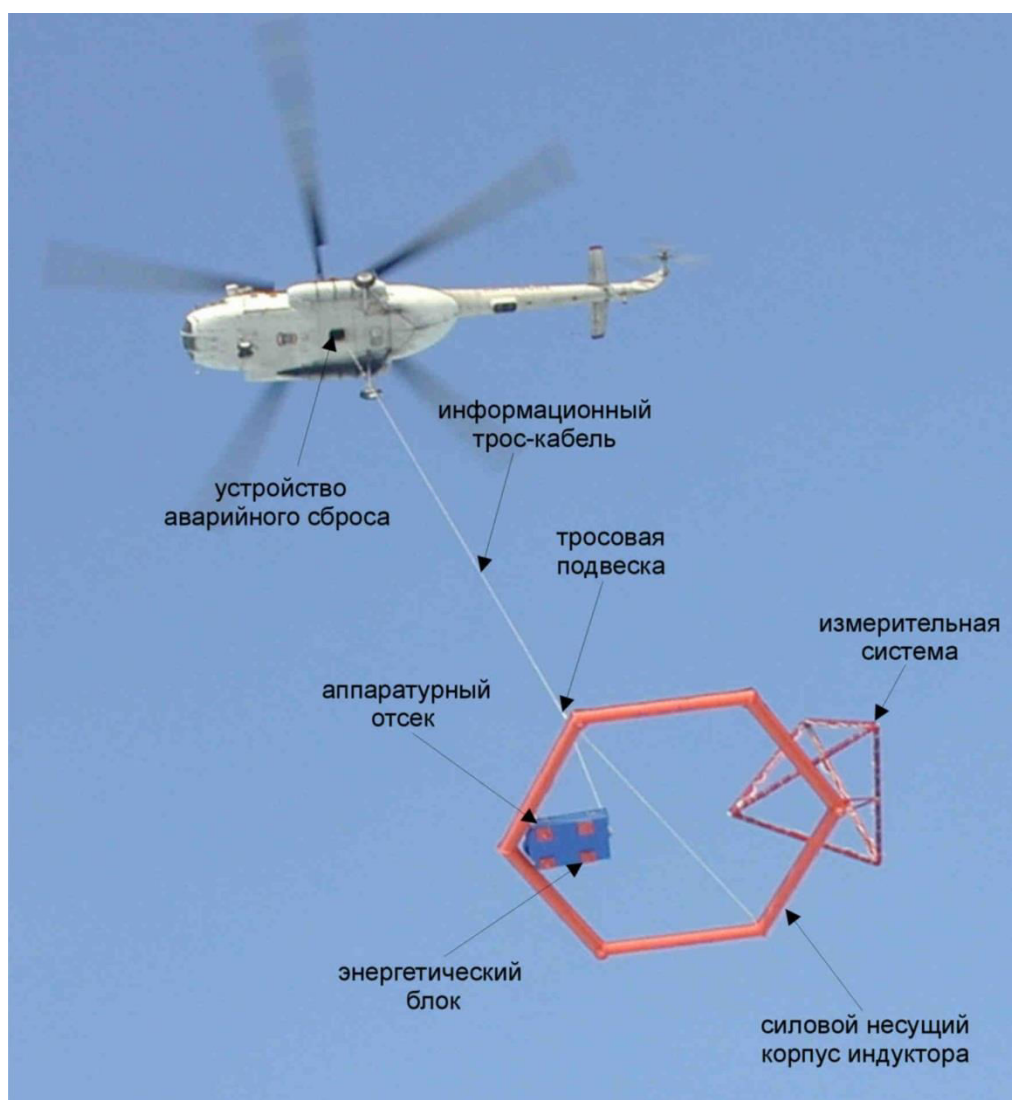


Рис 2. Платформа "Импульс-А1"

Рис. 2. Платформа «Импульс-А1»

Отличительными особенностями системы являлись: работа в высокочастотном широкополосном режиме становления поля; повышенная по сравнению с известными аналогами мощность электромагнитного излучателя за счет использования оригинальной конструкции зонда с площадью проекции на исследуемую поверхность до 40 м^2 ; максимальный магнитный момент $5 \cdot 10^5 \text{ А} \cdot \text{м}^2$; оптимизированные токовые импульсы с возможностью широкополосного излучения поля и приема вторичных сигналов от поисковых объектов; возможность настройки системы на поиск слабоконтрастных объектов; возможность работы в двух системах наблюдений «воздух-воздух» и «земля-воздух».

Аэрогеофизический зонд мог быть эффективно использован для прогнозно-поисковых работ на дефицитные полезные ископаемые. Однако экспериментальный образец платформы по результатам проведенных испытаний нуждался в существенной реконструкции. Из-за отсутствия достаточных средств в СНИИГГиМСе эта работа была отложена на 3 года. За это время авторский коллектив по частной инициативе изготовил вторую версию системы. Аэрогеофизическая платформа «Импульс-А2» (СибГеотех,

2002 г.) отличалась двухпозиционной конструкцией с удаленными приемными контурами (рис. 3), что обеспечивало большую чувствительность ЭМ–системы.



Рис 3. Платформа "Импульс-А2"

Рис. 3. Платформа «Импульс-А2»

Платформа «Импульс-А2» была опробована для локализации залежей углеводородов. Электрофизические предпосылки поиска УВ, как было упомянуто ранее, заключаются в изменении электрических свойств пород в зоне эпигенеза над залежью вследствие миграции легких фракций. Эти изменения охватывают значительные объемы перекрывающих пород и фиксируются с воздуха по комплексу параметров. Как правило, аномальные зоны тяготеют к проекции водонефтяного контакта на поверхность наблюдения. На рис. 4 представлен пример локализации залежи УВ по изменению электрического сопротивления в верхней части разреза до глубины 200 м для условий Западной Сибири.

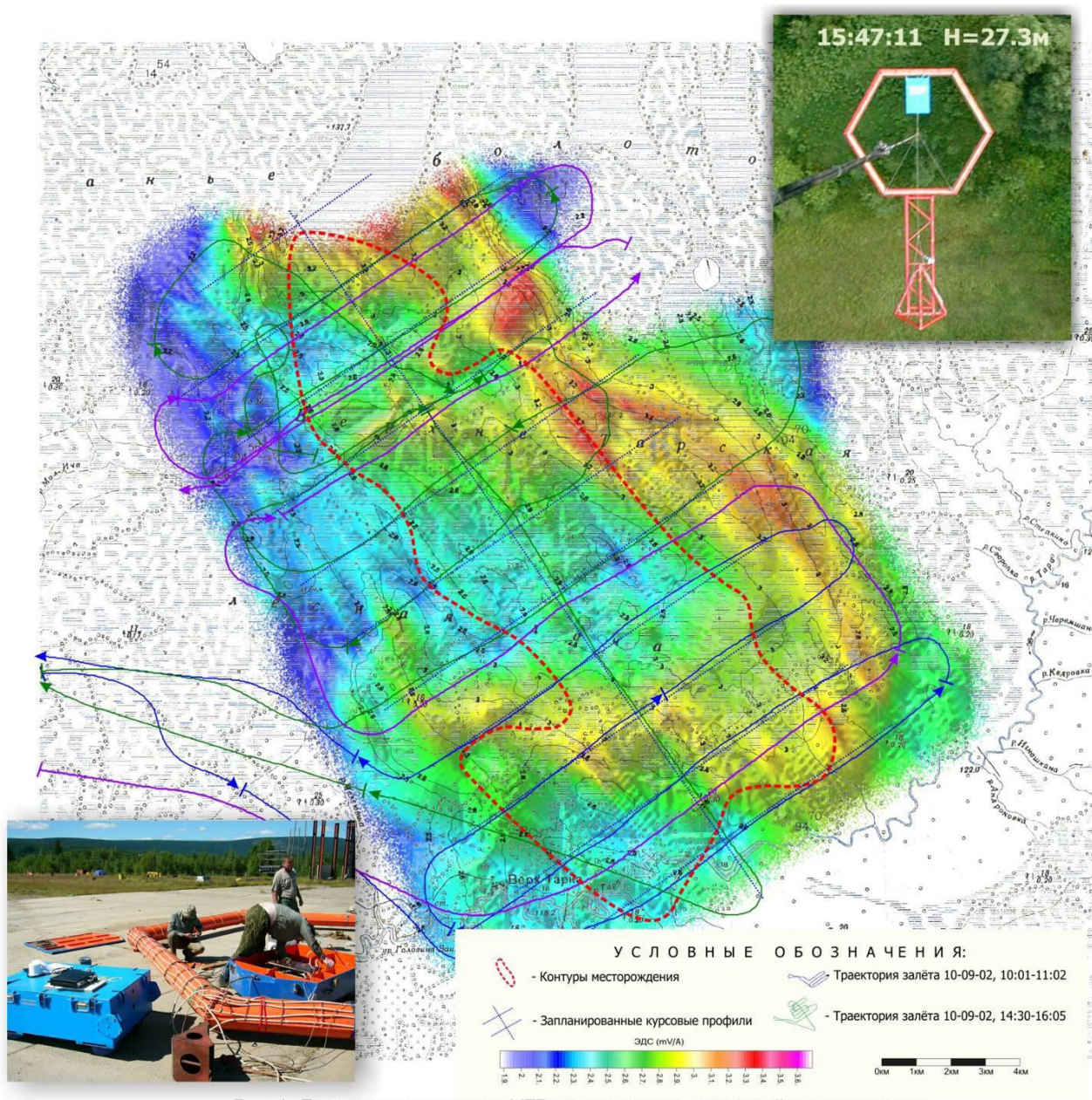


Рис 4. Локализация залежи УГВ по эпигенезу в верхней части разреза (платформа "Импульс-А2")

Рис. 4. Локализация залежи УГВ по эпигенезу в верхней части разреза (платформа «Импульс-А2»)

Аэрогеофизическая платформа «Импульс-А3» (СНИИГГиМС, Сибгеотех, НГТУ, Кулик, 2004 г.) была выполнена в виде пневматической конструкции высокого давления с площадью проекции около 200 м² (рис. 5). Проведенные испытания показали возможность развития этого направления. Однако технологические недостатки при изготовлении конструкции не позволили продолжить исследования эксплуатационных характеристик этого конструктива.

Неоднократные обращения в МПР РФ поставить НИОКР на комплексную аэрогеофизическую вертолетную систему на базе платформы серии «Импульс» не нашли поддержки и понимания важности этой проблемы. Тем не менее эта идея нашла широкое применение в Канаде, где в настоящее время быстрыми темпами осуществляется переход на вертолетные платформы типа «летающая

тарелка». Мировые лидеры в области создания аэрогеофизических систем использовали это техническое решение, доведя глубинность исследований до 700 м (VTEM Geotech Ltd., Aeroquest Limited, McPhar Geosurveys Ltd., Sander Geophysics, Canada) (рис. 6, 7).



Рис 5. Испытания пневматической платформы "Импульс-А3"

Рис. 5. Испытания пневматической платформы «Импульс-А3»

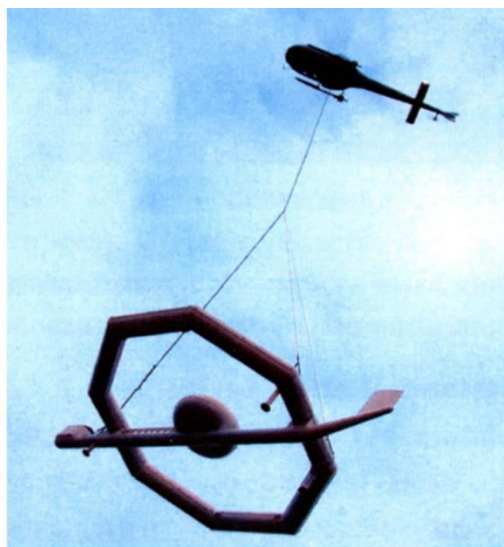


Рис.6 Разведочная платформа "AEROQUEST", Canada

Рис. 6. Разведочная платформа «AEROQUEST», Canada



Рис. 7. Разведочная платформа VTEM «GEOTECH»

Уже сейчас в Северной Америке интенсивно работают более 10 аналогичных вертолетных платформ, продолжаются активные НИОКР по совершенствованию систем, поиску новых технических решений. В то же время в России существует лишь один экспериментальный образец, не доведенный до промышленного использования. А успех в этом направлении определяет технический уровень и эффективность геофизики уже сегодня.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Моделирование нестационарных электромагнитных полей в трехмерных средах методом конечных элементов / Ю.Г. Соловейчик, М.Э. Рояк, В.С. Моисеев, Г.М. Тригубович // Физика Земли. 1998. № 10. С. 78-84.
2. Технология импульсной индуктивной электроразведки на плотных сетях наблюдений / Г.М. Тригубович, А.Г. Наумов, С.А. Харитонов, Т.Н. Яруллин // Направление геологоразведочных работ на никель, медь и платиноиды в Таймырском автономном округе в 2000-2005 гг.: Тез. докл. регион. совещания. 18-23 окт. 1999 г. Норильск, 1999. С. 106-108.

3. Технология электромагнитного сканирования приповерхностного слоя для решения инженерно-геологических задач / Г.М. Тригубович, М.И. Эпов, В.В. Воевода и др. // Тез. докл. междунар. геофиз. конф. и выставки EAGE. 15-18 сентября 1997. М., 1997.

4. Тригубович Г.М. Возможность дифференциального зондирования МПП при решении структурных задач нефтяной электроразведки в районе Байкитской антеклизы // Повышение эффективности геофизических методов поисков и оценки месторождений полезных ископаемых на основе математического моделирования. Новосибирск: СНИИГГиМС, 1986. С. 32 - 41.

5. Тригубович Г.М., Захаркин А.К., Могилатов В.С. Технологический комплекс для метода переходных процессов // Электромагнитная индукция в верхней части земной коры. М.: Наука, 1990. С. 155 - 156.

6. Патент РФ № 2201603 Устройство для аэрогеофизической разведки / Тригубович Г.М., Саленко С.Д., Обуховский А.Д., Шатилов К.А.

7. Захаркин А.К., Тарло Н.Н. Проблемы метрологического обеспечения структурной импульсной электроразведки // Геофизика, 1999, № 6, с. 34 - 39.

8. Могилатов В.С. Импульсная электроразведка. Новосибирск, изд-во НГУ, 2002.

9. Моисеев В.С. Метод вызванной поляризации при поисках нефтеперспективных площадей. Новосибирск, Наука, 2002.

10. Эпов М.И., Ельцов И.Н. Прямые и обратные задачи индуктивной геоэлектрики в одномерных средах. Новосибирск, изд-во ОГГиМС СО РАН, 1992.

© Г.М. Тригубович, 2005

Jean-Pierre Barriot

International Gravimetric Bureau, France

THE DATABASE OF THE INTERNATIONAL GRAVIMETRIC BUREAU AND ITS SERVICES ([HTTP://BGI.CNES.FR](http://BGI.CNES.FR))

БАЗА ДАННЫХ И УСЛУГИ МЕЖДУНАРОДНОГО ГРАВИМЕТРИЧЕСКОГО БЮРО

J.-P. Barriot, M. Sarrailh, B. Langellier, S. Pecquerie and T. Fayard

Key Words: gravimetry, database, validation

Summary: The International Gravimetric Bureau is a non-profit organization that is collecting, validating and redistributing gravimetric data all over the world, for academic and business purposes. We give in this paper a detailed account of all the Services provided by BGI.

THE INTERNATIONAL GRAVIMETRIC BUREAU: AN OVERVIEW

The International Association of Geodesy established the International Gravimetric Bureau (BGI) in 1951. It is one of the Bureaus of the Federation of Astronomical and Geophysical data Analysis Services.

The main task of BGI is to collect, on a world-wide basis, all gravity measurements and pertinent information about the gravity field of the Earth, to compile them and store them in a computerized data base in order to redistribute them on request to a large variety of users for scientific purposes. Its functional diagram is given in Figure 1. The data consists of: gravimeter observations (mainly location – three co-ordinates, gravity value, corrections, anomalies...), mean free air gravity values, gravity maps, reference station descriptions, publications dealing with the Earth's gravity field. Other data types are sometimes used for data validation and geophysical analysis, such as satellite altimetry derived geoid height and gravity anomalies, digital terrain models, and spherical harmonic coefficients of current

global geopotential models. The coverage of the current gravity database is given in Figure 2.

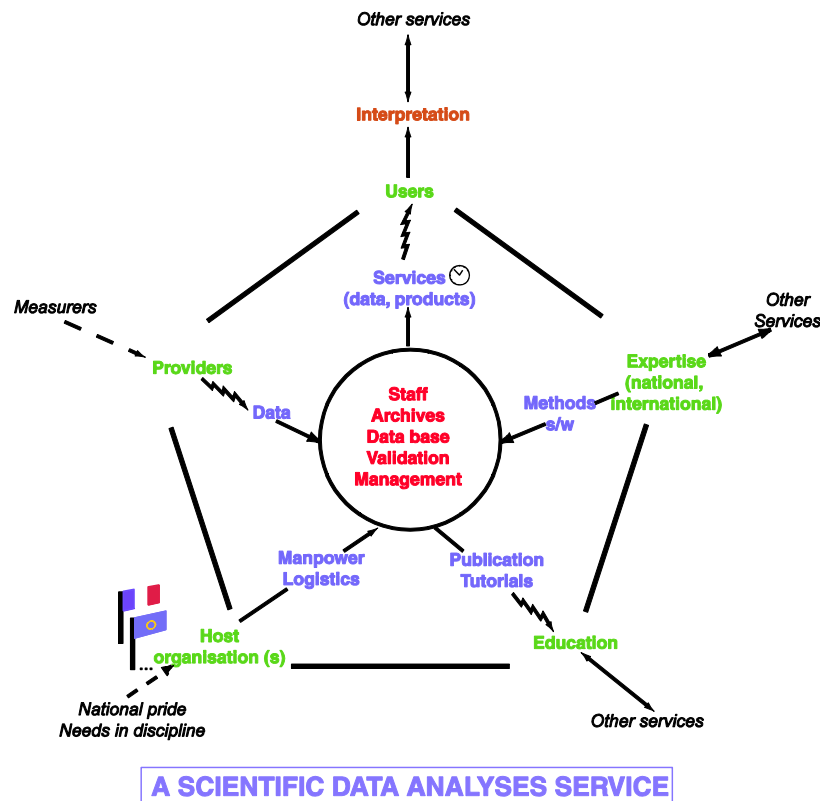


Figure 1: The functional diagram of BGI

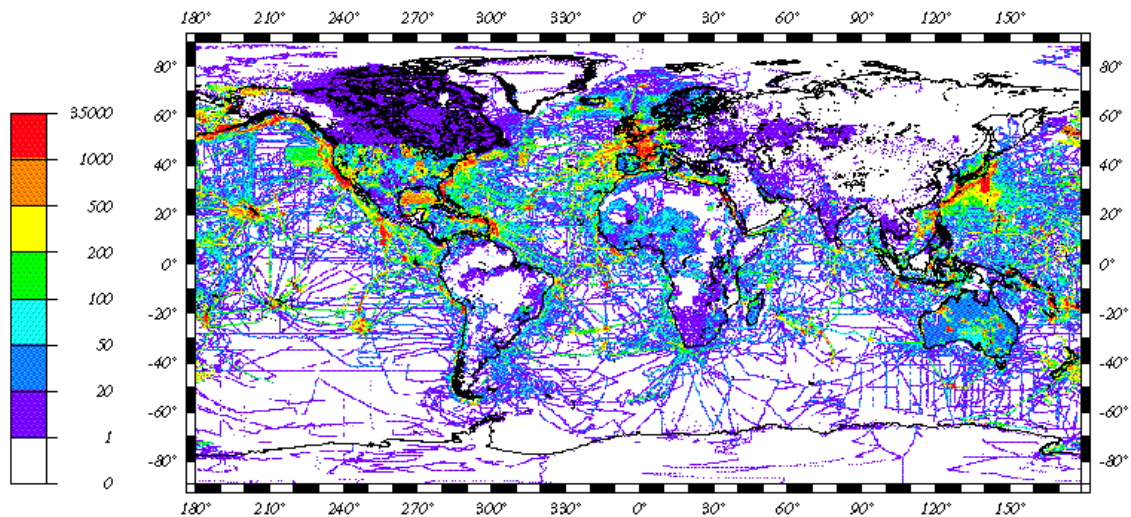


Figure 2: Coverage of the current BGI gravimetric database (around 12 millions data points)

BGI has been developing various algorithms and software for data validation (see Figure 3) and analysis, as well as its own data management system under Oracle.

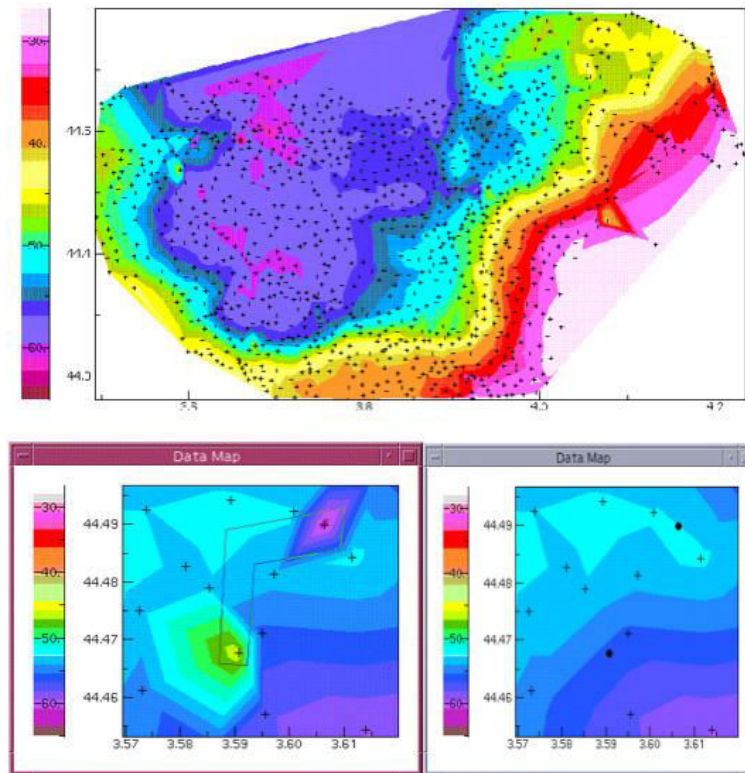


Figure 3: Data validation and outliers identification at BGI (DIVA software)

All kinds of gravity data can be sent to BGI, with or without restrictions of redistribution to be specified by the contributors, sometimes in the form of a protocol of usage.

MAIN SERVICES PROVIDED BY BGI

The most frequent service BGI can provide is data retrieval over a limited area (see Figure 4). For security reasons, direct online electronic download is not allowed. Data are transferred electronically by ftp or sent on CDs. Data coverage plots may also be provided, usually over $20^\circ \times 20^\circ$ areas. Cases of massive data retrieval requests may be considered; they are studied and may be processed in a specific way. The simplest way for users is to acquire the open files of the BGI database, which are on two CDs.

Other services include:

- Data screening.
- Provision of gravity base station information.
- Data evaluation and gridding.
- Computation of mean values.
- Contouring.
- Supply of, or information on existing maps.

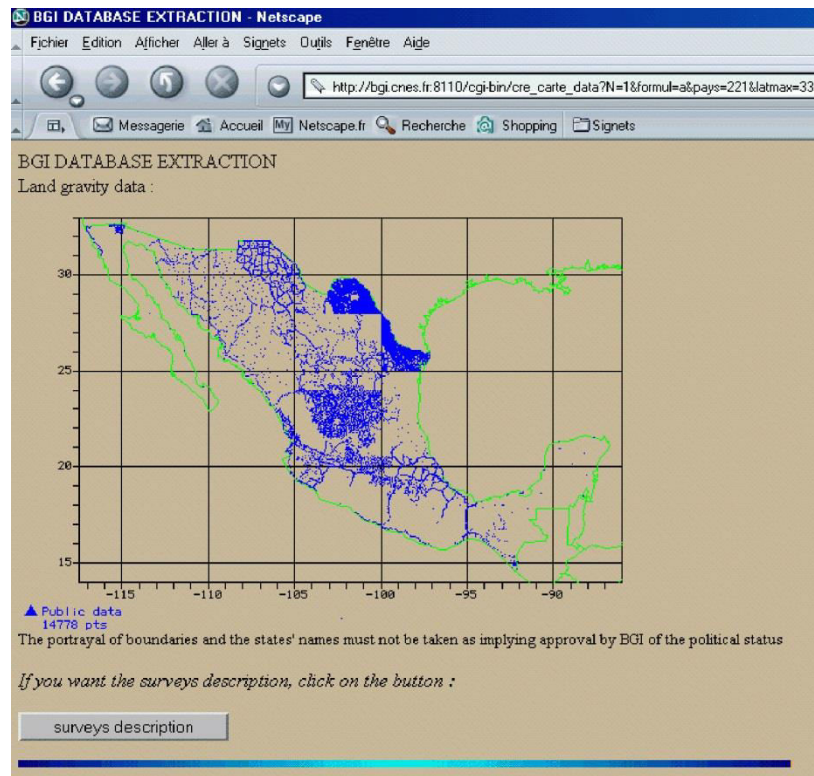


Figure 4: Gravity data coverage visualized on the BGI server

The costs of the services have been established in view of the categories of users—mostly contributors of measurements and scientists, and also considering the large amount of our host organizations. The charging policy is explained online in detail on the BGI server.

Some of the services may be provided free of charge upon request, to data contributors, individuals working in universities, such as students, and generally to any person who can contribute to the BGI activities on a data or documentation exchange basis.

ANCILLARY SERVICES PROVIDED BY BGI

- Publication of the Newton's Bulletin, a reviewed joint publication of BGI and of the International Geoid Service, available free of charge on the Web site.
- Computation of gravity maps (free-air or Bouguer anomalies). Satellite altimetry derived free-air anomalies are to be more and more frequently used to validate sea measurements.
- Set up of archiving formats (relative and absolute gravity measurements).
- Help to the International Gravity Field Service of IAG in data preparation in view of geoid model computations and geoid model evaluations.
- Promotion of satellites techniques to improve our global knowledge of the Earth's gravity field: satellite-to-satellite tracking, satellite gradiometry, etc.
- Bibliographic database (technical reports, grey literature).
- Gravimetric measurements (small surveys).
- Relative gravimeters data acquisition cards.

- Summer Schools on gravimetry.

PROVIDING DATA TO BGI

Essential quantities and information for gravity data submission are:

Position of the site with datum references:

- Latitude, longitude (to the best possible accuracy).
- Elevation or depth.
- For land data: elevation of the site (on the physical surface of the Earth).
- For water stations: water depth.

Measured (observed) gravity, corrected to eliminate the periodic gravitational effects of the Sun and Moon, and the instrument drift.

Reference (base) station(s) used. For each reference station (a site occupied in the survey where a previously determined gravity value is available and used to help establish datum and scale for the survey), give name, reference station number (if known), brief description of location of site, and the reference gravity value used for that station. Give the datum of the reference value; example: IGSN 71.

Give supplementary elevation data for measurements made on towers, on upper floor of buildings, inside of mines or tunnels, atop glacial ice. When applicable, specify whether gravity value applied to actual measurement site or it has been reduced to the Earth's physical surface (surface topography or water surface). Also give depth of actual measurement site below the water surface for underwater measurements.

For marine gravity stations, gravity value should be corrected to eliminate effects of ship motion, or this effect should be provided and clearly explained.

BGI is also collecting all available information about reference gravity stations, including photos and sketches.

BIBLIOGRAPHICAL NOTE

Jean-Pierre Barriot is the Director of BGI. He is currently working as a Senior Researcher at the Observatoire Midi-Pyrénées in France. He authored or co-authored more than fifty papers in the frame of Geodesy and Radio-Sciences. He is also Scientific Investigator in several space missions, and the General Secretary of the French Branch of the International Union of Geodesy and Geophysics. He is fellow of the International Association of Geodesy.

CONTACT

Bureau Gravimétrique International, Observatoire Midi-Pyrénées, 14, Av. E. Belin, 31400 Toulouse, France, Tel: 33561332894, Fax: 33561253098, email: bgi@cnes.fr, web site: <http://bgi.cnes.fr>

© *Jean-Pierre Barriot, 2005*

**НЕОБХОДИМОСТЬ ИНТЕГРАЦИИ НАУК В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ГЕОДИНАМИКИ
ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ**

Человеческое общество обеспокоено происходящими на Земле природными катаклизмами (землетрясениями, извержением вулканов, цунами, ураганами). Они наносят огромный моральный и материальный урон, приводят к гибели людей, разрушениям поселений и различных сооружений. Все в большей степени на стихийные бедствия налагаются негативные проявления техногенного характера, вызванные внедрением интенсивных технологий освоения и переработки природных ресурсов Земли, часто без объективной оценки последствий для живой природы, растительности и населения. Уже становится ясным, что антропогенные факторы становятся соизмеримыми с природными, а иногда и превышают их по вредному воздействию на систему: человек – природа.

Все острее ощущается необходимость в определенной степени оперативном, но объективно-эффективном комплексном изучении и анализе ситуации с целью принятия соответствующих упреждающих решений на различных уровнях управления, хозяйствования и ориентации населения по предотвращению последствий негативных процессов, нарушающих или осложняющих экологическую обстановку, устойчивость развития территорий и сложных инженерно-технических систем.

Речь, таким образом, идет о необходимости формирования новой модели развития цивилизации, гарантирующей устойчивость развития территорий, природно-технических систем на основе регулируемого управления процессами, происходящими в ландшафтной оболочке Земли, объединяющей литосферу, атмосферу, гидросферу и биосферу [1, 2, 3].

Наблюдения за состоянием ландшафтной оболочки Земли осуществляются в ходе проведения мониторинга окружающей среды. При этом изучением механизма проявления сейсмотектонических процессов, их отражения в изменении пространственного положения поверхности Земли и объектов на ней, а также (гео) физических полей призвана заниматься **геодинамика**.

Известно, что геодинамика возникла как наука междисциплинарная. Ее развитие, по крайней мере, в СССР, а затем – в России осуществлялось и финансировалось в основном, по отраслевому принципу. Координация усилий, обобщение результатов исследований в определенной степени проводились в институтах АН СССР (в настоящее время – РАН). Но при этом ведомственный принцип, по сути, оставался преобладающим. Геология и геофизика, геодезия, геомеханика, геоморфология, геоэкология и другие науки о Земле интерпретировали и интерпретируют получаемые результаты со своих позиций с “вялым” привлечением результатов и выводов смежников. Это в определенной степени сказывается на снижении эффективности прогнозов проявления и оценки последствий стихийных и техногенных воздействий. Вместе с тем, комплексирование методов исследований всегда эффективнее,

чем применение одного, признаваемого ведущим. Например, сейсмология надежно регистрирует положение очага напряженной деформации в земной коре, когда в нем начинается “треск”, проявляемый в виде сейсмических волн. Но это происходит относительно незадолго до разгрузки напряжения, выражаемой разломом слоев земной коры, или их сдвигом. Задолго до этого начинает происходить перемещение огромных масс в подкоровом пространстве, нарушается изостатическое равновесие земной коры. Все это должно находить отражение в различных геофизических полях, в том числе в гравитационном (возможно – в магнитном, тепловом, радиационном) и может повлиять на изменение положения земной поверхности. Комплексное применение геолого-геофизических, геодезических и других методов, совместная обработка и интерпретация результатов может и должна, в конечном результате, обеспечить выявление признаков приближения гидравлического удара, извержения вулкана, деформации земной поверхности и других угрожающих явлений. Очевидно, что при этом должна быть обеспечена общая координация работ.

Геодинамика как научный комплекс претерпевает в последнее время существенные изменения в методологическом обосновании и технологическом обеспечении в связи с интенсивным внедрением спутниковых методов пространственно-координатных определений, дистанционного зондирования Земли, ГИС-технологий, 3D-компьютерного моделирования среды изучения по результатам пространственного координирования поверхности и геофизического зондирования земных недр и так далее. Однако при этом возникает ряд проблем, особенно в части, касающейся интерпретации результатов с привлечением полученных ранее производных материалов и данных, когда первичная исходная информация не может быть восстановлена в связи с утилизацией или из-за применения устаревших технологий обработки с потерей точности на выходе. По нашему мнению, накопился огромный объем устаревшей информации, которая не соответствует современным требованиям как по точности первичных данных, так и, особенно, по производным результатам. Эта информация содержится в различных базах данных и знаний. Рано или поздно ее придется или переобработать или утилизировать.

Особого внимания заслуживает вопрос о необходимости пересмотра процедуры подготовки содержания и порядка доведения до исполнителей нормативных документов. Они должны оперативно обновляться и содержать в основном ключевые положения конечных результатов, давая исполнителям в тесном взаимодействии с наукой возможность творческой реализации программ исследований.

Рассмотрим в связи с этим некоторые примеры, касающиеся применения гравиметрии как одного из основных методов в физической, динамической геодезии и в прикладной геофизике применительно к решению задач глобальной, региональной и локальной геодинамики.

Геодезия как научный и производственный комплекс призвана обеспечивать все виды творческой и хозяйственной деятельности человеческого общества надежной пространственно-координатной основой, соответствующей по точности и полноте содержания запросам любых потребителей. Кроме того,

основной научной задачей геодезии изначально являлась и является определение (с последующим уточнением) параметров фигуры Земли и ее гравитационного поля. При этом важность ее решения постоянно возрастает в связи с необходимостью оценки степени стабильности взаимного пространственного положения материковых плит (глобальная проблема), массивов суши и островов в океане (глобально-региональная проблема), поверхности платформенных и складчатых образований, равнин, отдельных сейсмоактивных территорий (региональная проблема), районов и участков, интенсивно осваиваемых в связи с добычей и переработкой природных ресурсов, строительством крупных промышленно-энергетических комплексов и инженерных коммуникаций (локальная проблема).

Повсеместное внедрение спутниковых методов координатных определений, введение новой референцной системы координат СК-95 открыло широкие возможности для совершенствования геодезических технологий, повышения точности определения пространственного положения поверхности Земли и различных объектов на ней применительно к решению любых задач глобального, регионального и локального характера [4, 5, 6].

Спутниковые координатные определения позволяют получать теперь пространственное положение любой определяемой точки (M) непосредственно относительно центра масс Земли и в геодезической системе координат (B, L, H_M). H_M – геодезическая высота определяемой точки M над принятым за нормальную Землю эллипсоидом (референчным или общим), отсчитываемая по нормали к нему [7].

Проблема состоит в том, что большинство потребителей не испытывает потребности в геодезических высотах. Необходимо, строго говоря, обеспечивать их **ортометрическими** высотами местности, отсчитываемыми от поверхности геоида (поверхности гидростатического равновесия) по силовым линиям силы тяжести (отвесным линиям),

$$H_M^g = \frac{1}{g_m} \int_O^M g \, dh, \quad (1)$$

где g – текущее значение силы тяжести вдоль силовой линии, начиная от отсчетного геоида (точка O) до определяемой точки M ;

g_m – среднее интегральное значение силы тяжести на отрезке OM .

До настоящего времени из-за невозможности определения положения геоида внутри топографических масс, слагающих рельеф местности, по результатам высокоточного нивелирования определяются и используются в основном **нормальные** высоты, отсчитываемые от близкой к геоиду поверхности квазигеоида. При этом в (1) величина g_m заменяется величиной γ_m – среднего значения нормальной силы тяжести на отрезке $O'M$, где O' – положение точки на эллипсоиде (референчном или общем), образуемой пересечением с ним нормали, проходящей через определяемую точку M .

Разница между геодезической и нормальной высотой определяет аномалию высот квазигеоида над эллипсоидом относимости нормальной силы тяжести (γ_0)

$$\zeta_M = H_M - H_M^\gamma. \quad (2)$$

Квазигеоид, в отличие от геоида, не является, строго говоря, уровенной поверхностью, характеризуемой возмущающим гравитационным потенциалом как интегральной (вторичной) функцией силы тяжести. Его отличие ($\Delta\zeta$) от геоида оценивается в идеальном случае для равнинных районов в несколько сантиметров, в горных 2 – 3 м.. Фактически эти величины на практике могут отличаться в большую сторону в несколько раз.

До последнего времени аномалия высоты определялась через возмущающий потенциал

$$\zeta_M = T_M / \gamma_N, \quad (3)$$

где γ_N – значение нормальной силы тяжести в какой-то точке N , отличающейся по высоте от точки M на величину $\Delta\zeta$;

T_M – разность потенциала силы тяжести в точке M и пересчитанного в нее (с ошибкой в высоте, равной $\Delta\zeta$) потенциала нормальной Земли в виде или референц-эллипсоида, или общеземного.

Заметим, что для решения самых различных хозяйственных задач нормальные высоты отвечают предъявленным требованиям, так как изменение величины $\Delta\zeta$ на ограниченных территориях незначительно. Все топографические карты отражают рельеф земной поверхности в нормальных высотах.

При мониторинге геодинамических процессов, особенно в глобальном, а во многих случаях – и в региональном плане сейчас, несомненно, выгоднее использовать геодезические высоты, определяемые не по гравиметрическим данным (что весьма сложно и не всегда корректно), а непосредственно спутниковым методом. Сложность и некорректность связаны с тем, что значения T_M определяются интегрально вокруг точки M по смешанным аномалиям силы тяжести, когда используются нормальные высоты (нужно было бы геодезические), а пересчет в них нормального гравитационного поля должен был бы производиться с поверхности эллипсоида относимости, а не с квазигеоида. При этом интегрирование аномалий, как правило, осуществляется уже вообще без учета высот результативных точек и пунктов, в которых производилось измерение силы тяжести. В конечном итоге возникает очевидная неопределенность: к какому же уровню относить значение T ?

Положение усугубляется еще и тем, что при расчетах использовались и используются аномалии силы тяжести в различных редукциях. При этом априори полагается что, например, аномалии силы тяжести в редукции Буге по точности соответствуют сечению изоаномал отчетных и изданных карт. Однако такое мнение во многих случаях не соответствует реальному положению. Это неоднократно доказывалось и показывалось [8, 9, 10]. Внедрение новой высокопроизводительной технологии редуцирования [8] задержалось в силу ряда причин объективного и субъективного характера. В частности, завершалось издание гравиметрической карты страны в масштабе 1:200000. Номенклатурные листы карты, изданные ранее, не “сводились” бы с новыми, причем существенно; требовала пересмотра нормативно-техническая база

гравиметрических работ. В период перестройки вопросы гравиметрии на определенный срок отошли на второй план. Далее сказалась инерция: нормативная база осталась “старой”, учебные программы в ВУЗах и техникумах геологоразведочного и геодезического профиля – тоже. Однако реалии современной действительности все настойчивее требуют приведения результатов гравиметрии в соответствие с современными требованиями. Остановимся, в связи с этим, на основных, принципиальных позициях, которые необходимо учитывать при обработке и интерпретации результатов гравиметрии, как в геодезии, так и в приложении к разведочной геофизике и геодинамике.

1. Поправки за гравитационное влияние рельефа местности которые учитываются практически во любых редукциях исходного гравитационного поля, изменяются как в плане, так и по высоте **нелинейно**, а значит – не могут интерполироваться. В операторном выражении их величина может быть представлена в виде

$$\delta g_p^{cf}(r_n, r_k) = \delta g_p^{пл}(r_n, r_k) + \Delta \delta g_p^{cf}, \quad (4)$$

где r_n, r_k – соответственно внутренний и внешний радиусы внешней учитываемой области;

$\delta g_p^{пл}$ – оператор вычисления поправок за рельеф в плоском варианте при исправлении плоско-параллельного слоя Буге на реальный объем топографических масс;

$\Delta \delta g_p^{cf}$ – оператор приведения величины “плоской” поправки к сферическому виду.

В свою очередь, значения $\delta g_p^{пл}$ и $\Delta \delta g_p^{cf}$ выражаются в виде

$$\left. \begin{aligned} \delta g_p^{пл}(r_n, r_k, H_{ij}) &= a \left(H_u^2 + \overline{\overline{H}}^2 - 2H_u \cdot H_0 \right), \\ \Delta \delta g_p^{cf} &= F(H_u - \tilde{H}), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где a и F – соответственно постоянные коэффициенты, характеризующие геометрию учитываемой области в плоском и сферическом представлении;

H_u – высота точки вычисления поправок (результативной точки),

$\overline{\overline{H}}^2$ и $\tilde{H}, H_0$ – соответственно среднее весовое квадратическое значение и средние весовые значения высот рельефа местности вокруг результативной точки в пределах учитываемой области;

H_{ij} – отметка рельефа в центре элементарной площадки, на которые разделяется учитываемая область в радиальном и угловом направлениях ($i = 1, 2, \dots, n_i, j = 1, 2, \dots, m_i$).

В качестве весовых функций для определения H_0 и $\overline{\overline{H}}^2$ используются соотношения плановых размеров зон, на которые разделяется учитываемая область, а для определения $\tilde{H}$ – соотношения коэффициента F для каждой зоны.

Оператор для поправки за влияние промежуточного слоя топографических масс имеет вид

$$\delta g^{\text{сф.пр.сл}}(r_n, r_k, H_{ij}) = a \left(2H_u H_0 - \overline{\overline{H}}^2 \right) + F \cdot \tilde{H}. \quad (6)$$

Вместе с тем выражение (5) для плоской поправки за рельеф можно представить в виде двух слагаемых

$$\delta g_p^{\text{пл}}(r_n, r_k, H_{ij}) = \delta g_0 + \delta g' = a \left(\overline{\overline{H}}^2 - H_0^2 \right) + a (H_u - H_0)^2. \quad (7)$$

Первое слагаемое не зависит от величины H_u , но зависит от степени изрезанности окружающего рельефа, второе меняется по параболическому закону, равняясь нулю при $H_u = H_0$ и возрастает по мере увеличения абсолютной разности $|H_u - H_0|$. Другими словами поверхность H_0 – эта поверхность минимальных (но не нулевых, если рельеф – не плоскость) значений поправок.

На основе приведенных выражений можно сделать ряд важных выводов.

– Сферическая составляющая в (6) общей поправки за влияния топографических масс промежуточного слоя не зависит от высоты результирующей точки. Вычисленные один раз значения $\tilde{H}$ однозначно позволяют для любой территории перейти от редукции Буге к неполной топографической, особенно важной для геодезии, и, наоборот – от неполной топографической редукции к редукции Буге, используемой в прикладной гравиметрии.

– Имеется возможность определения значений $H_0(r_n, r_k)$, $\overline{\overline{H}}(r_n, r_k)$, и $\delta g_0(r_n, r_k)$ на конкретную территорию всего **один раз**, если рельеф на ней не претерпел существенных изменений, для гравиметровых работ самого разного масштаба. Величины H_0 и δg_0 интегральны по сути и могут интерполироваться в плане, то есть изображаться в виде планов и карт в электронном и, при необходимости, в графическом представлении. Значения $\delta g'$ могут быть также заранее представлены в виде электронной таблицы или аналитически. В результате, по мере получения пространственных координат точек гравиметровых измерений, для них сразу же можно определять поправки за рельеф во всей внешней учитываемой области согласно (7).

Приведенные операторные соотношения для круговой учитываемой области полностью соответствуют квадратной, когда цифровая модель рельефа (ЦМР) определяется массивом отметок высот в узлах квадратной сетки или тригональной.

– Отпадает как **ненужная**, и даже **вредная** трудоемкая операция осреднения высот рельефа в элементарных ячейках палеточного поля учитываемой области. Другими словами, генерализация снижает величину δg_0 и в целом всей поправки на значение, переменное в каждой результирующей точке. Вместе с тем дискретность шага (Δr или Δx , Δy) задания ЦМР также обуславливает генерализацию и искажение поправок за рельеф и, как следствие

– за промежуточный слой топографических масс. В связи с этим были выявлены информативные характеристики изрезанности рельефа, разработан математический аппарат автоматизированного определения оптимальных условий задания ЦМР и редуцирования гравитационного поля с условием определения поправок за рельеф, влияние промежуточного слоя и аномалий силы тяжести с необходимой точностью [8].

2. В гравитационных аномалиях Буге, представляемых на изданных картах различного масштаба, как правило, отмечается сложная картина корреляции поля силы тяжести с высотами рельефа местности. Детальный анализ показал [9], что физико-геологических причин наблюдаемой картины может быть, в основном, две: 1 – унаследованность земной поверхностью формы границ раздела геоструктур с различной плотностью (складок, тектонических блоков, изостатической поверхности основания земной коры и других), 2 – глобальные плотностные неоднородности за пределами территории гравиметровых измерений (водные массы крупных озер, водохранилищ, морей и океанов, горных блоковых массивов), отличающихся по плотности от горных пород в районе работ. В отличие от бытующего еще мнения такие массы обуславливают не только региональный гравитационный фон, но и сугубо локальную составляющую, прямо зависящую от высоты точек гравиметровых измерений. Следует отметить, что учет и исключение гравитационного влияния таких масс должен тщательно выполняться и учитываться **только после** редуцирования измеряемого гравитационного поля – на этапе интерпретации аномалий силы тяжести, **но до** выделения локальных аномалий. В связи с этим особо подчеркнем, что в наблюдаемые значения силы тяжести на поверхности моря нельзя вводить никакие редукции поправки за влияния водных масс (или рельефа морского дна), за исключением поправок, связанных с волнением водной поверхности. **Измеренные значения силы тяжести здесь после прямого вычитания из них величины $\gamma(H_0)$ являются одновременно и аномалиями в полной топографической редукции, и в свободном воздухе,** так как морская поверхность – уровенная, то есть геоид.

К искажающим факторам, обусловленным несовершенством методики редуцирования измеряемого гравитационного поля, относятся: 1 – использование переменной величины плотности промежуточного слоя топографических масс или поправок за рельеф, тогда как она должна считаться постоянной ($\sigma_0 = \text{const}$); 2 – учет сферичности Земли при определении поправок за рельеф для “плоской” редукции Буге; 3 – различие размера учитываемой области в редукции Буге, когда плоско-параллельный слой полагается бесконечным, а учет поправок за рельеф осуществляется в области, ограниченной радиусом r_k , – создается искусственно ложный эффект “боковых” масс; 4 – необоснованное произвольное или директивное (нормативное) установление величины r_k ; 5 – замена геодезических высот точек гравиметровых измерений на нормальные.

Без исключения влияния первых четырех факторов в процессе редуцирования гравитационного поля (выделения аномалий) не может быть и

речи о точной гравиметрии при разведочных работ и мониторинге геодинамических процессов на локальных территориях. При проведении геодинамических исследований в региональном и, особенно – в глобальном масштабе, надо стремиться исключать влияние пятого фактора.

3. Важнейшее теоретическое и методологическое значение на современном этапе имеет необходимость учета разновысотности точек гравиметровых измерений и соответствующих им аномальных значений силы тяжести в процессе математического и геоинформационного моделирования объектов исследований в аномальном гравитационном поле. Должно учитываться и время измерений силы тяжести. Пространственная фиксация аномального поля и его вариаций во времени не только не осложняют, а наоборот, обеспечивают повышение качества прогнозных оценок в геодинамике и при разведке недр, изучения фигуры Земли и формы ее поверхности.

4. Принципиальное методологическое, методическое и практическое значение для геодезической и прикладной гравиметрии имеет решение двух вопросов.

Первый относится к процедурам: а – редуцирования исходного гравитационного поля при его разделении на нормальную и аномальную составляющую, б – редуцирования гравитационных аномалий (разделяя их на региональную и локальные составляющие). Требования к выполнению процедуры “а” сформулированы ранее в п.2. Подчеркнем только еще раз, что на этапе выполнения этой процедуры плотность промежуточного слоя (σ_0) должна полагаться постоянной и равной даже при раздельном учете влияния параллельного слоя и поправки за рельеф.

Второй связан с определением последовательности учета и исключения гравитационного влияния известных аномалеобразующих факторов – при геологическом редуцировании (термин впервые введен Э.Э. Фотиади). При этом сразу же следует подчеркнуть, как также отмечалось в п.2, что геологическое редуцирование, включая учет и исключение гравитационного эффекта геоструктур, в том числе “боковых” масс, **должно выполняться после процедуры “а”, но до процедуры “б”**. Это позволяет получить остаточное поле гравитационных аномалий, которое при его разделении (редуцировании) на региональную и локальную составляющие обеспечивает **количественную** (а не качественную, как при разделении “полного” аномального поля силы тяжести) сопоставимость локальных аномалий с модельными гравитационными эффектом объекта исследований. Степень их соответствия является критерием качества моделирования исследуемого объекта [10].

Требование к постоянству величины σ_0 **не относится** к случаю учета поправок ($\Delta\xi$ и $\Delta\eta$) в отклонения отвеса за влияние топографических масс в центральной зоне (до радиуса 48.5 км) [7]. Более того, она должна быть **переменной**, так как на изменение положения отвеса влияют не только превышения рельефа относительно уровня результирующей точки, но и дифференциация топографических масс по плотности, что и отражает аномальное гравитационное поле во внешней учитываемой области (от 48.5 до 1000 км), используемое при определении возмущающего потенциала (T),

уклонений отвеса и аномалий высот в геодезии. И это соответствует отмеченным в п.2 требованиям, так как процедура определения значений T является процессом моделирования гравитационного поля. Следует в связи с этим отметить, что в геодезии, к сожалению, часто выполняется математическое моделирование оценочное (приближенное), как предварительное в прикладной гравиметрии. Поэтому на территориях сопряжения осадочных бассейнов с образованиями платформенного или складчато-орогенного типа ошибки вычисленных поправок в уклонения отвеса и высоту квазигеоида над эллипсоидом возрастают, искажая конечные результаты (в триангуляции, нивелировании).

Вместе с тем предварительное моделирование допустимо в случае оценки требований к точности топографо-геодезического обеспечения высокоточной гравиметрии при изучении геодинамических процессов, особенно в локальном плане, когда ведется мониторинг техногенной геодинамики. В этом случае нормативные требования, основанные на точности определения **нормальной** силы тяжести и ее вертикального и горизонтального градиентов, становятся неприемлемыми. Требуется оценка по **аномальным** градиентам [11].

5. Вышеизложенное показывает, что методология и технология обработки и интерпретации результатов гравиметрии требуют коренной корректировки. По большому счету, карты гравитационных аномалий для территорий с рельефом средней и высокой степенью изрезанности, перепадом высот от 200 м и более должны быть исправлены с исключением проявления методических факторов, указанных в п.2.

По-видимому настало время пересмотреть систему определения нормальных высот на основе переориентации некорректной в некоторой степени технологии определения положения уровня квазигеоида внутри топографических масс на однозначную и корректную концепцию объемного представления поля ортометрических (нормальных) и геодезических высот во внешнем относительно земной поверхности пространстве. **Вычисление** высот ниже этой поверхности не требуется. Предпосылки для перехода к такой концепции имеются: 1 – прямое определение геодезических высот точек местности спутниковым методом, 2 – совмещение точек спутниковых определений с реперами нивелирования, 3 – возможность совмещения нивелирных ходов с гравиметрическими и спутниковыми, что при имеющихся сейчас высокопроизводительных, портативных гравиметрах несложно, в том числе по затратам, а математическое обеспечение возможности определения ортометрических (нормальных) высот достигается (при оптимизации дискретности шага измерений) численным интегрированием согласно выражению (1); 4 – возможность определения возмущающего потенциала на **земной поверхности**, его аппроксимации и пересчета вверх. Аппроксимация может производиться методом подбора подсобной модели, например, точечных масс или тонкого слоя. Гармоническая аппроксимация на неровной поверхности может дать загробление результатов.

Базовыми опорными площадками (площадными реперами) для дальнейших построений полей высот могут служить геодинамические, в том

числе локальные техногенные полигоны, где регулярно проводится комплекс геодезическо-гравиметрических измерений и построений картосхем локальных (квази) геоидов и в пределах которых затем может осуществляться **спутниковое нивелирование** для нужд потребителей. Вместе с комплексом ФАГС и ВГС они, в конечном итоге, позволят обеспечить решение задач глобального, регионального и локального значения.

В заключение отметим, что один из основных этапов сложного процесса геодинамических исследований является интерпретация полученных результатов. Ключевым процессом при этом является математическое объемно-геоинформационное моделирование. Важнейшее место при этом отводится сбору **всех** имеющихся данных о физических и механических свойствах горных пород, слагающих геологический разрез района работ, а также данные о его геологическом строении и тектонике. Вся эта информация, будучи систематизированной и обработанной с выявлением различных особенностей изменения физических и механических свойств в плане и по глубине, их связи с отражением в физических полях, в том числе гравитационном, используется при пространственных модельных построениях. На основе установленных связей выполняется комплексная интерпретация результатов геодезических и геофизических определений. По мере проведения повторных циклов геодинамических исследований, позволяющих перейти к построению пространственно-временных вариаций, в том числе земной поверхности и гравитационных аномалий, выявляются на основе комплексирования с данными других методов закономерности развития геодинамики, в том числе осложнения в сейсмотектонической обстановке. При региональных комплексных исследованиях устанавливается идентификация движений и напряженно-деформированного состояния геодинамических систем [12].

Таким образом, практика работ показывает, что комплексирование геодезических и геолого-физических исследований геодинамических процессов, комплексная интерпретация результатов обеспечивает повышение качества прогнозных построений, способствуя своевременному принятию мер по предотвращению негативных последствий воздействия природных и техногенных факторов. Это подтверждает необходимость координации и интеграции наук о Земле при решении задач геодинамики с целью обеспечения устойчивого развития территорий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Конференция ООН по окружающей среде и развитию (Рио-де Жанейро, июнь-1992) [Текст]: Иформ.обз. / В.А. Коптюг. - Новосибирск: СО РАН, 1992. – 69 с.
2. Устойчивое развитие: ресурсы России [Текст]/Под.общ.ред. акад. РАН Н.П. Лаверова. - М.: Издат. центр РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2004. – 212 с.
3. Карпик А.П. Методические и технологические основы геоинформационного обеспечения территорий [Текст]: Монография. - Новосибирск: СГГА, 2004. – 250 с.
4. Бородко, А.В. Развитие системы геодезического обеспечения в современных условиях [Текст] / А.В. Бородко, Н.Л. Макаренко, Г.В. Демьянов // Геодезия и картография. - 2003. - № 10. - с. 7 - 13.
5. Хабаров В.Ф. О развитии ФАГС и ВГС и постоянно действующих спутниковых станций [Текст] / В.Ф. Хабаров // Геодезия и картография. - 2004. - № 10. - С. 15 - 19.

6. Единая государственная система геодезических координат 1995 года (СК-95) [Текст] / Н.Л. Макаренко и др.; под ред. А.А. Дразнюка. - М.: Федеральная служба геодезии и картографии России, 2000. – 34 с.
7. Шимбирев Б.П., Теория фигуры Земли [Текст]. - М.: Недра, 1975. – 432 с.
8. Методические рекомендации по учету влияния рельефа местности в гравirazведке [Текст]: Практическое руководство МинГео СССР / А.И. Каленицкий, В.П.Смирнов; Отв. за выпуск А.И. Каленицкий. - Новосибирск: СНИИГГиМС, 1981. – 171 с.
9. Каленицкий А.И. К проблеме повышения качества редуцирования гравитационного поля для геологической интерпретации [Текст] / А.И. Каленицкий. - Новосибирск: СНИИГГиМС, 1987. – 28 с. - Деп. в ВИНТИ, № 6404-В.87.
10. Каленицкий А.И. Геодезическо-гравиметрический мониторинг техногенной геодинамики инженерных сооружений [Текст] / А.И. Каленицкий // Геодезия и картография. - № 8. - 2000. - С. 24 - 27.
11. Каленицкий А.И. О требованиях к топографо-геодезическому обеспечению инженерно-гравиметрических исследований [Текст]/А.И.Каленицкий//Геодезия и картография.-№ 7.-1995.-с.12-14.
12. Середович В.А. Идентификация движений и напряженно-деформированного состояния самоорганизующихся геодинамических систем по комплексным геодезическим и геофизическим наблюдениям [Текст]: Монография / В.А. Середович, В.К. Панкрушин, Ю.И. Кузнецов, Б.Т. Мазуров, В.Ф. Ловягин; под общей редакцией В.К. Панкрушина.- Новосибирск: СГГА, 2004. – 356 с.

© А.И. Каленицкий, А.П. Картик, В.С. Середович, 2005

СОДЕРЖАНИЕ

Кузнецов Ю.И., Панкрушин В.К. Математическое моделирование и рекуррентная идентификация геодинамических систем на основе механики Гамильтона – Лагранжа.....	3
Бычков С.Г., Симанов А.А. Повышение точности и эффективности гравиметрических работ с использованием современного гравиметрического и геодезического оборудования	14
Костин Д.А. Палеогеография антропогена северо-восточной части шельфа Баренцева моря	19
Сурков В.С., Липилин А.В., Фельдман Л.Л., Кузнецов В.Л., Сальников А.С., Марков В.М., Титаренко В.В. Сейсмотомографический метод прогнозирования рудных узлов (на примере профиля 2-ДВ на Северо-Востоке России).....	24
Сальников А.С., Кузнецов В.Л., Марков В.М., Канарейкин Б.А. Сейсмическая томография при прогнозировании нефтегазоперспективных карбонатных отложений в верхней части складчатого фундамента Западной Сибири (на примере Томской области)	28
Бычков С.Г., Долгаль А.С., Кирплюк П.В., Новоселицкий В.М., Простолупов Г.В. Интерпретация гравитационного поля попигайской астроблемы с использованием векторного сканирования	32
Базылев А.П., Конюхов В.Г., Сагайдачная О.М., Стариков Н.В., Табаков А.А. Сейсмические исследования углеводородных объектов в Западной Сибири по технологии совмещённых наземно-скважинных наблюдений	37
Швецов А.Я., Осьмушкин В.С. Мониторинг загрязнённости нефтепродуктами природной среды Барнаульской нефтебазы	41
Швецов А.Я., Осьмушкин В.С. Мониторинг геотехнической системы «Обской мост – природная среда».....	47
Крамаренко А.А., Мазуров Б.Т., Панкрушин В.К. Настройка модели движений и напряженно-деформированного состояния сооружений и объектов инженерной геодинамики по геодезическим наблюдениям. 51	
Мазуров Б.Т., Панкрушин В.К. Идентификационный эксперимент: построение физико-математической модели динамики земной поверхности и гравитационного поля в вулканической области	56
Мазуров Б.Т., Панкрушин В.К. Идентификационный эксперимент: моделирование системы наблюдений за динамикой земной поверхности и гравитационного поля в вулканической области	62
Мазуров Б.Т., Панкрушин В.К. Вычислительный идентификационный эксперимент: совместная математическая обработка и интерпретация нивелирных и гравиметрических наблюдений за динамикой земной поверхности и гравитационного поля в вулканической области	67
Глазунов А.С., Каленицкий А.И. Возможности повышения точности передачи высот квазигеоида.....	74

Глазунов А.С. О повышении точности полевых астрономических определений	79
Хасенов К.Б., Гета Р.И., Хахулина Н.Б., Калеева К.М. Анализ деформаций каменно-набросной плотины Малоульбинского водохранилища и возможные последствия ее катастрофического разрушения.....	84
Аубакирова А.К. Методы определения радиус-векторов основной уровенной поверхности Земли	88
Колмогоров В.Г., Канушин В.Ф., Ганагина И.Г., Голдобин Д.Н. Решение краевой задачи динамической геодезии на территории Западной Сибири.....	93
Осьмушкин В.С., Швецов А.Я., Барышников Г.Я. Сейсмичность русского Алтая и степной зоны Алтайского края.....	97
Сашурин А.Д. Современная геодинамика и развитие катастроф на объектах недропользования.....	103
Рубцова Е.В. О создании геоинформационных систем сопровождения подземных горных работ	107
Мирошниченко Н.А. О перспективах построения системы мониторинга движений породного массива	114
Панжин А.А. Диагностика геодинамической активности массива горных пород геодезическим методом	120
Калабаев Н.Б., Хахулина Н.Б. Геологическое строение нефтегазоносных бассейнов Казахстана.....	126
Моисеев В.С., Паули Н.И., Токарева М.Г. Объемное изучение поляризующихся объектов повышенного и пониженного сопротивления	127
Моисеев В.С., Паули Н.И., Токарева М.Г. Метод вызванной поляризации при нефтепоисковых исследованиях в сложных геоэлектрических условиях	130
Визгин А.А., Ковалева О.В. О допустимых расхождениях местных геодезических сетей на путях сообщения	135
Филатов В.В., Хилько А.П. О фрактальных характеристиках систем линеаментов	136
Хачай О.А. Теория и практические результаты мониторинга гетерогенных нестационарных сред в рамках иерархических дискретных моделей	141
Лобанова Т.В., Квочин В.А., Климко В.К. Деформационный мониторинг процессов накопления напряжений для контроля удароопасности массива при отработке Таштагольского месторождения	149
Юшкин В.Ф., Опарин В.Н., Жигалкин В.М., Семенов В.Н., Усольцева О.М., Бабичев А.В., Федоринин В.Н., Поташников А.К. Аппаратура и оборудование для определения деформаций образцов горных пород	155
Шкуратник В.Л., Филимонов Ю.Л. О взаимосвязи параметров акустической эмиссии с физико-механическими свойствами и процессами разрушения соляных горных пород	163

Тригубович Г.М. Тенденции развития геофизических технологий при поисково-оценочных исследованиях на основные виды полезных ископаемых	171
Jean-Pierre Barriot. The database of the international gravimetric bureau and its services (http://bgi.cnes.fr).....	180
Каленицкий А.И., Карпик А.П., Середович В.С. Необходимость интеграции наук в решении задач геодинамики для обеспечения устойчивого развития территорий.....	185