

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СИБИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ»
(ФГБОУ ВПО «СГГА»)

VIII Международные научный конгресс и выставка

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2012

Международная научная конференция

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

Т. 1

Сборник материалов

Новосибирск
СГГА
2012

УДК 502:528.7
С26

Ответственные за выпуск:

Доктор технических наук, профессор,
проректор по учебно-методической работе МИИГАиК, Москва

И.Г. Журкин

Доктор физико-математических наук, профессор,
академик РАН, директор Института вычислительной математики
и математической геофизики СО РАН, Новосибирск

Б.Г. Михайленко

Доктор технических наук, профессор,
заведующий лабораторией цифровой обработки изображений Института
вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск

В.П. Пяткин

Доктор технических наук, профессор,
заведующая кафедрой экологии и природопользования СГГА, Новосибирск

Л.К. Трубина

Кандидат технических наук, СГГА, Новосибирск А.В. Комиссаров

Кандидат технических наук, профессор кафедры фотограмметрии
и дистанционного зондирования СГГА, Новосибирск

Т.А. Широкова

Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры фотограмметрии
и дистанционного зондирования СГГА, Новосибирск

А.С. Гордиенко

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр., 10–20
апреля 2012 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы
зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды,
геоэкология» : сб. материалов в 2 т. Т. 1. – Новосибирск : СГГА, 2012. – 180 с.

ISBN 978-5-87693-520-5 (т. 1)

ISBN 978-5-87693-519-9

ISBN 978-5-87693-506-9

В сборнике опубликованы материалы VIII Международного научного
конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012», представленные на
Международной научной конференции «Дистанционные методы зондирования
Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология».

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГГА

Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 502:528.7

ISBN 978-5-87693-520-5 (т. 1)

ISBN 978-5-87693-519-9

ISBN 978-5-87693-506-9

© ФГБОУ ВПО «СГГА», 2012

Сборник включен в систему РИНЦ.

СОДЕРЖАНИЕ

Д.П. Симонов. Анализ методов выделения типов растительных покровов по многозональным космическим снимкам	7
В.Н. Никитин, Д.Н. Раков. Разработка концепции автоматической системы управления беспилотным аэрофотосъемочным комплексом	12
В.С. Коркин. Аппроксимация профиля рельефа, заданного на нерегулярной сетке	18
С.М. Горбенко, Л.А. Головина. Цифровая сенситометрия	21
В.Б. Шлишевский. Некоторые задачи видеоспектральных систем в составе космических комплексов	25
А.С. Костюк, А.Л. Быков, Л.В. Быков. Методика калибровки и предварительной обработки снимков, полученных трехкамерной фотографической системой с беспилотного летательного аппарата ...	28
А.Ю. Чермошенцев. Обновление топографических планов масштаба 1 : 5 000 с использованием космических снимков сверхвысокого разрешения	32
В.Н. Никитин, А.Е. Сидякина. Методика моделирования цифровых реалистичных макетных снимков с использованием машинной графики	37
Т.А. Широкова, А.В. Антипов, С.А. Арбузов. Определение изменений на местности с применением данных лидарной съемки	42
А.Л. Быков, В.Л. Быков, Л.В. Быков. Исследования методики калибровки снимков на равнинном испытательном полигоне	50
В.Н. Никитин, А.В. Семенцов. Определение разрешающей способности фотоаппарата по наклонным снимкам с использованием радиальных мир	56
И.Т. Антипов, Т.А. Хлебникова. Проверка достоверности вероятностной оценки точности фототриангуляции применительно к реальным сетям	62
И.П. Каретина, С.А. Каретин, А.А. Сухарева. Опыт использования данных ГЕОЕУЕ-1 для разработки генерального плана села Бородулиха	68
Н.В. Юркевич. Технология временной синхронизации элементов метода непрерывного сейсмического профилирования	73
В.В. Ковалевский. Исследование характеристик подземной сейсмической группы в районе Эльбрусского вулканического центра	80
А.А. Якименко. Использование гибридных вычислительных систем для численного моделирования волновых полей	85
И.А. Пестунов, С.А. Рылов. Информативность систем текстурных признаков для классификации спутниковых изображений с высоким пространственным разрешением	96
С.А. Ефимов. Исследование особенностей распространения монохроматических вибросейсмических волн по данным мониторинга района озера Байкал	103

Д.А. Караваев, В.В. Ковалевский, Б.М. Глинский, М.С. Хайретдинов. Виброзондирование грязевого вулкана Карабетова гора, эксперимент и математическое моделирование.....	109
Л.П. Брагинская, В.В. Ковалевский, Г.И. Татьков, А.П. Григорюк, Ц.А. Тубанов, А.Д. Базаров. Сезонные изменения вибросейсмического поля вибратора ЦВ-100 Южнобайкальского геодинамического полигона	114
Л.П. Брагинская, А.П. Григорюк. Опыт создания тематического интернет- ресурса «Активная сейсмология».....	120
В.Ф. Рапута. Анализ данных радиационного мониторинга в окрестностях АЭС «Фукусима - 1»	125
В.И. Кузин, Н.А. Лаптева. Математическое моделирование климатического стока из бассейна реки Обь	131
Л.И. Курбацкая, А.Ф. Курбацкий. Вихревое перемешивание импульса и тепла в устойчиво стратифицированных пограничных слоях: численное исследование	137
В.В. Коковкин, В.Ф. Рапута, С.Е. Олькин, С.В. Морозов. Экспериментальное и численное исследование загрязнения снегового покрова в окрестностях Новосибирского электродного завода	142
Т.В. Ярославцева, В.Ф. Рапута, К.О. Шутова. Оценивание полей длительного загрязнения городских территорий по данным мониторинга снегового покрова	148
В.С. Сидорова. Новый гистограммный алгоритм с автоматическим выбором детальности кластеризации по заданной делимости кластеров	154
П.А. Калантаев. Облачные технологии базы данных мониторинга природных явлений	160
В.В. Малахова, Е.Н. Голубева. Моделирование потока метана в атмосферу из вод Восточно-Сибирского шельфа	165
И.Г. Казанцев. О конструктивном вычислении сечений многомерного куба	171
П.А. Ким. Масштабируемая модель гиперрельефа в 4D-пространстве	174

CONTENTS

D.P. Simonov. Analysis method of allocation vegetation types by multispectral images.....	7
V.N. Nikitin, D.N. Rakov. Developing concept of automatic control systems for unmanned aerophotography complex	12
V.S. Korkin. Approximation of the relief profile preset in the irregular grid	18
S.M. Gorbenko, L.A. Golovina. Digital sensitometry	21
V.B. Shlishevsky. Some problems of video spectral systems as a part of space complexes.....	25
A.S. Kostyuk, A.L. Bykov, L.V. Bykov. Calibration technique and preliminary processing images obtained three-chamber photographic systems with unmanned aerial vehicles	28
A.Yu. Chermoshentsev. Updating topographic maps of scale 1 : 5 000 using very high resolution satellite images.....	32
V.N. Nikitin, A.E. Sidyakina. Technique of digital realistic mock-up images modeling by computer graphics	37
T.A. Shirokova, A.V. Antipov, S.A. Arbuzov. Area change detection using laser scanning data	42
A.L. Bykov, V.L. Bykov, L.V. Bykov. Research methodology of calibration images on the flat test site	50
V.N. Nikitin, A.V. Sementsov. Definition of resolution of the camera for oblique images using radial test targets	56
I.T. Antipov, T.A. Khlebnikova. The reliability check of probabilistic estimation of accuracy of phototriangulation with reference to real networks	62
I.P. Karetina, S.A. Karetin, A. Al. Sukhareva. Experience of using data GeoEye-1 for elaboration the Borodulikha village master plan.....	68
N.V. Yurkevich. Continuous seismic profiling method elements time synchronization technology	73
V.V. Kovalevsky. Investigation of seismic characteristics of underground seismic array in the region of Elbrus volcanic center	80
A.A. Yakimenko. Using a hybrid computational systems for solving problems of geophysics	85
I.A. Pestunov, S.A. Rylov. Segmentation of satellite images with high spatial resolution by spectral and textural features	90
I.A. Pestunov, P.V. Melnikov. Informativity of systems of textural features for classification of satellite images with high spatial resolution.....	96
S.A. Efimov. Research of features of distribution monochromatic vibroseismic waves according to monitoring area of lake Baikal.....	103
D.A. Karavaev, V.V. Kovalevsky, B.M. Glinski, M.S. Khairtdinov. Vibroseismic sounding Karabetova gora mud volcano: experiment and mathematical modeling	109
L.P. Braginskaya, V.V. Kovalevsky, G.I. Tat'kov, A.P. Grigoryuk, Ts.A. Tubanov, A.D. Bazarov. Seasonal changes of the vibroseismic field of vibrator CV-100 Southbaykal geodynamic test site	114

L.P. Braginskaya, A.P. Grigoruk. The experience of the thematic web resource «Active seismology»	120
V.F. Raputa. Analysis of radiation monitoring near the NPP «Fukushima - 1»..	125
V.I. Kuzin, N.A. Lapteva. Mathematical modelling of the runoff from the Ob river basin	131
L.I. Kurbatskaya, A.F. Kurbatskiy. Eddy mixing of momentum and heat in stably stratified boundary layers: modelling and simulation.....	137
B.B. Kokovkin, V.F. Raputa, S.E. Olkin, S.V. Morozov. Experimental and numerical investigation of snow cover contamination in the environs of Novosibirsk electrodes-making plant.....	142
T.V. Yaroslavl'tseva, V.F. Raputa, K.Os. Shutova. Estimation of long-term field contamination of urban areas on the snow monitoring data	148
V.S. Sidorova. New histogram algorithm for automatic choice of clusterization detail on given cluster separability.....	154
P.A. Kalantaev. Cloud technologies database monitoring of natural phenomena	160
V.V. Malakhova, E.N. Golubeva. Modelling of a methane emission in atmosphere from waters of the East-Siberian shelf	165
I.G. Kazantsev. On a constructive computation of the section of hypercube ...	171
P.A. Kim. The scaled model of the hyper-relief in 4D-space	174

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВЫДЕЛЕНИЯ ТИПОВ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОКРОВОВ ПО МНОГОЗОНАЛЬНЫМ КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ

Дмитрий Павлович Симонов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. (383) 361-08-66, e-mail: dumkah@gmail.com

В статье проанализированы возможности использования методов дистанционного зондирования для определения таксационных характеристик лесных массивов.

Ключевые слова: таксация, таксационные признаки, дистанционное зондирование, дешифрирование.

ANALYSIS METHOD OF ALLOCATION VEGETATION TYPES BY MULTISPECTRAL IMAGES

Dmitriy P. Simonov

Siberian state academy of geodesy, 10 Plahotnogo, Novosibirsk, 630108, P.G., department of photogrammetry and remote sensing, tel. (383) 361-08-66, e-mail: dumkah@gmail.com

The article describes the analysis of methods of remote sensing for determining taxation characteristics of forests.

Key words: taxation, taxation characteristics, remote sensing, interpretation.

Одной из важнейших задач лесного хозяйства России является государственный учет лесов. Для решения этой задачи необходимо получение достоверной и разносторонней информации о лесном фонде [1].

Для характеристики состояния лесных массивов используется система таксационных признаков насаждений, определяющих их количественную и качественную оценку, биологические и физические особенности их строения и производительность в определенных лесорастительных условиях в пределах занимаемой ими площади.

Таксация – это (от лат. *taxatio* – оценка) учёт леса, его всесторонняя материальная оценка. Таксационные показатели являются базой для составления таксационного описания в процессе таксации лесного фонда [2].

Комплекс таксационных показателей устанавливается лесоустроительной инструкцией и включает: происхождение насаждений (естественное и искусственное); форму – простое (одноярусное) или сложное (многоярусное – кроны деревьев образуют несколько ярусов); состав – соотношение образующих насаждение древесных пород; среднюю высоту и средний диаметр древостоя; возраст древостоя; класс бонитета, полноту; запас древесины; класс товарности; тип леса или группу типов леса; наличие подроста и подлеска; напочвенный покров и др.

В настоящее время таксацию леса проводят наземными средствами и с использованием методов дистанционного зондирования. Наземная таксация леса основана на определении их таксационных показателей с помощью инструментов и приборов или на визуально-глазомерном обследовании лесов. Основными методами таксации – метод массовых наблюдений с использованием среднеарифметических величин.

Дешифровочный метод таксации заключается в определении таксационных показателей древостоев посредством таксационного дешифрирования аэроснимков так как установлена тесная взаимосвязь большинства основных таксационных показателей с дешифровочными признаками, позволяющая по полученным по аэрофотоснимкам высоте, диаметру крон, сомкнутости полога и др. определять основные таксационные характеристики древостоев. [3].

Развитие космического мониторинга и методов дешифрирования космических цифровых снимков создают условия для совершенствования способов таксации и получения мобильной таксационной информации, а также снижения затрат на проведение этих работ, что очень существенно для масштабов лесов России тем более, что стоимость космической съемки ниже стоимости аэрофотосъемки.

Основные преимущества космической съемки перед традиционной аэрофотосъемкой лесов:

- Возможность оперативного получения информации в течение нескольких дней (или даже часов);
- Доступность снимков на разные даты в течение нескольких лет, что обеспечивается автоматическим непрерывным «сбросом» снимков со спутников и их хранением в базе данных.
- Доступность снимков разного масштаба и разного пространственного разрешения сразу в цифровом формате, геопривязанных и приведенных к стандартной картографической проекции. Такие характеристики позволяют быстро «подключать» снимки к лесохозяйственным ГИС и базам данных;
- Возможность бесплатного получения обзорных снимков низкого разрешения и невысокий уровень цен на снимки высокого разрешения вплоть до масштаба 1:25000 [4].

Для использования космических снимков в качестве источника оценки таксационных показателей необходимо использовать особенности конкретных объектов, по которым они могут быть опознаны на аэрокосмических снимках.

Преобладающие породы растений или их группы и группы состава насаждений дешифрируют в основном по цвету, микроструктуре и приуроченности к определенным типам лесорастительных условий. Полноту и группы возраста определяют (по снимкам высокого разрешения) на основе микроструктуры полога насаждений и их статистических характеристик; остальные таксационные показатели – расчетным путем на основе их

взаимосвязей. Использование узких спектральных интервалов позволяет дешифрировать отдельные деревья.

По космическим снимкам с разрешением на местности 10 м и лучше после определения преобладающей и составляющих пород, типа леса или группы типов леса и класса бонитета, дешифрируют группу или класс возраста преобладающей породы. Остальные таксационные признаки при дешифрировании космических снимков определяют на основании различных взаимосвязей: средняя высота - по классу (группе) возраста, классу бонитета и преобладающей породе, средний диаметр - по средней высоте, с учетом возраста и полноты, запас на 1 га - по средней высоте и относительной полноте.

На космических снимках высокого разрешения (1-2м) высота насаждения может быть определена путем измерения длины теней деревьев (особенно при съемке в утренние и вечерние часы). По измеренным диаметрам проекций крон (площадям проекций крон) может быть определен средний диаметр деревьев в насаждениях на высоте 1,3м, а также высота и сомкнутость полога насаждения. Данные снимки позволяют использовать морфологические признаки при дешифрировании состава насаждений, условий местопроизрастания, с большей точностью производить измерения и определять таксационные характеристики насаждений.

Однако, как показывает опыт, для более широкого применения материалов космических съемок в лесном хозяйстве и повышения эффективности от их применения, необходимо, наряду со снимками с разрешением 10-30-50-150м, иметь снимки с повышенным пространственным разрешением до уровня, которое имеют применяемые в лесном хозяйстве аэрофотоснимки (1-2м). При этом съемка должна быть многозональной и обеспечивать получение стереоскопических изображений, так как важнейшими показателями леса являются его высота и условия местопроизрастания, которые тесно связаны с рельефом местности [5,6].

Спектральная отражательная способность растения часто описывается с помощью вегетационных индексов. Эффективность используемых индексов определяется особенностями отражения. Всего существует около 160 вегетационных индексов, но лишь некоторые из них были систематически тестированы и научно обоснованы. Вегетационные индексы получили довольно широкое применение, однако на получаемые результаты значительное влияние оказывают условия съемки, особенно состояние атмосферы. Таким образом, достоверность результатов обработки данных дистанционного зондирования методами создания индексных изображений не высока, поскольку отсутствует однозначная количественная связь признака с объектом.

Для повышения достоверности результатов дешифрирования были разработаны и продолжают разрабатываться различные спектральные и структурные преобразования. Например, к спектральным преобразованиям относятся различные многозональные индексы, метод главных компонент, методы для повышения контрастности снимков и другие преобразования. К структурным методам относятся Фурье и вейвлет-преобразование [7,8,9].

Сравнительный анализ систем космического мониторинга и возможности определения особенностей растительного покрова приведены в таблице.

Таблица 1. Характеристики съемочных систем и возможность их применения

	Название спутниковой системы	Панхром./ Мультиспектр.	Пространственное разрешение, м	Ширина полосы охвата, км	Возможное применение
Сверхвысокое	WorldView-1	+ / 0	0,45	13	Подлесок, подрост
	QuickBird	+ / 4	0,61 - 2,44		
	WorldView-2	+ / 8	0.45-1.8	16.4	
Высокое	Ресур ДК	+ / 3	1-3	до 28.3	Зоны вырубки, полнота, запас древесины, напочвенный покров, средний диаметр, средняя высота
	OrbView-3	+ / 4	1-4	8	
	IKONOS	+ / 4	1-4	8	
	ALOS	+ / 4	2.5-10	35-70	
	Kompsat-2	+ / 4	1-4	15	
	Formosat-2	+ / 4	2-8	24	
Среднее	SPOT-2	+ / 4	10-20	60	Тип деревьев, тип леса, происхождение
	SPOT-4	+ / 4	10-20	60	
	SPOT-5	+ / 4	5-10	60	
Низкое	Terra(Aster)	- / 6	30		Границы объектов, состав
	EO-1	+ / 9	30	7.7	
	Landsat-7	- / 8	30	185	

Проведенный анализ задач мониторинга лесных территорий, а также средств получения информации (аэро- и космических съёмочных систем) и обработки данных для дешифрирования снимков и выявления изменений растительных покровов показал следующее:

- Для эффективного мониторинга лесных территорий необходимо использовать космические снимки среднего, высокого и сверхвысокого разрешения;

- Для детального мониторинга отдельных объектов или участков территории целесообразно использовать аэросъёмку;

- Современные цифровые методы дешифрирования или выявления изменений недостаточно эффективны при определении таксационных показателей древостоя.

В связи с этим необходимо:

- а) Исследовать возможности существующих методов для дешифрирования лесных территорий;
- б) Разработать методику комплексного использования различных типов дешифровочных признаков для мониторинга лесных угодий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Манович В.Н. Концептуальный подход к созданию системы мониторинга состояния земель лесного фонда РФ [Текст] / В.Н. Манович // Материалы X международной научно-практической конференции «Геоинфокад», Китай. – 2006. – С. 18–21.
2. Анучин Н. П. Лесная таксация [Электронный ресурс] / Н.П. Анучин. – 3 изд. – М. – 1971. [Режим доступа]: <http://bse.sci-lib.com/article108575.html>
3. Дешифровочные признаки насаждений [Электронный ресурс] / [Режим доступа]: <http://www.derev-grad.ru/lesoustroistvo/deshifrovochnye-priznaki-nasazhdenii.html>
4. Космические снимки: решения для лесного хозяйства [Электронный ресурс] / СканЭкс [Режим доступа]: <http://www.scanex.ru/ru/monitoring/default.asp?submenu=forestry&id=index>
5. Гук А.П. Использование структурных признаков изображений типовых участков местности для выявления изменений состояния территорий по космическим снимкам высокого разрешения [Текст] / А.П. Гук, Л.Г. Евстратова, А.С. Алферова // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка, 2009. – №6. – С. 52–56.
6. Исаев А.С. Аэрокосмический мониторинг лесов [Электронный ресурс] / [Режим доступа]: <http://bibliofond.ru/view.aspx?id=434192>.
7. Алтынцев М.А. Вейвлет-анализ для выявления вырубок в лесных массивах по аэрофотоснимкам [Текст] / М.А. Алтынцев, А.С. Гордиенко, А.А. Гук // ГЕО-Сибирь-2010: сб. материалов VI Междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2010», 19 – 23 апр. 2010 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2010. – Т. 4, ч. 1. – С. 3 – 8.
8. Гук А.П. Локализация изменений объектов природно-территориальных комплексов по разновременным космическим снимкам [Текст] / А.П. Гук, Л.Г. Евстратова, М.А. Алтынцев, А.С. Гордиенко // Геодезия и картография, 2010. – №2. – С. 19 – 25.
9. Алферова А.С. Использование вейвлет-анализа для выявления изменений при мониторинге территорий по космическим снимкам [Текст] / А.С. Алферова // ГЕО-Сибирь-2009: сб. материалов V Междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2009», 20 – 24 апр. 2009 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2009. – Т. 4. – ч. 1. – С. 97 – 100.

© Д.П. Симонов, 2012

РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ АЭРОФОТОСЪЕМОЧНЫМ КОМПЛЕКСОМ

Вячеслав Николаевич Никитин

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования СГГА, тел. +7-913-712-37-50, e-mail: vslav.nikitin@gmail.com

Дмитрий Николаевич Раков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования СГГА, тел. +7-952-907-21-08, e-mail: dir142@211.ru

В данной статье представлена концепция системы управления беспилотным аэрофотосъемочным комплексом. Система управления основана на микрокомпьютере Raspberry Pi, работающим под управлением операционной системы семейства Linux. Программная часть построена по модульному принципу с использованием кроссплатформенной среды программирования. Взаимодействие с датчиками и исполнительными механизмами осуществляется через порты GPIO или через USB-интерфейс. Программная архитектура позволяет выполнять имитационное моделирование процесса аэрофотосъемки.

Ключевые слова: автопилот, беспилотный аэрофотосъемочный комплекс, Raspberry Pi, система управления беспилотным летательным аппаратом, беспилотный летательный аппарат.

DEVELOPING CONCEPT OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS FOR UNMANNED AEROPHOTOGRAPHY COMPLEX

Vyacheslav N. Nikitin

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotny St., Ph.D., Assoc. Prof. of department of photogrammetry and remote sensing SSGA, tel. +7-913-712-37-50, e-mail: vslav.nikitin@gmail.com

Dmitry N. Rakov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotny St., a post-graduate student of department of photogrammetry and remote sensing SSGA, tel. +7-952-907-21-08, e-mail: dir142@211.ru

The article introduces the concept of unmanned aerial systems complex management. The control system is based on a microcomputer Raspberry Pi operating by Linux. The software is built in a modular fashion using a cross-platform programming environment. The interaction with sensors and actuators implemented via GPIO ports or via USB-interface. The software architecture allows simulation of the aerial photography process.

Key words: autopilot, unmanned aerophotography complex, Raspberry Pi, control system of unmanned aerial vehicle, unmanned aerial vehicle.

Аэрофотосъёмка малых территорий специализированным самолётом, укомплектованным экипажем и стандартным аэрофотосъёмочным оборудованием, экономически не эффективна. В этом случае целесообразно использовать компактный беспилотный аэрофотосъёмочный комплекс, позволяющий выполнить оперативную аэрофотосъёмку заданного участка территории. Обычно такой комплекс состоит из наземной станции управления и непосредственно беспилотного летательного аппарата (БПЛА).

Неотъемлемой частью БПЛА является система управления. Для БПЛА классов мини- и микро-, где к габаритно-весовым характеристикам полезной нагрузки предъявляются жёсткие требования, система управления летательным аппаратом должна быть компактной, но в тоже время удовлетворять следующим требованиям:

- 1 Обеспечивать движение летательного аппарата по заданному маршруту;
- 2 Стабилизировать положение носителя в пространстве;
- 3 Осуществлять управление фотоаппаратом;
- 4 При потере сигнала с наземной станции управления возвращать летательный аппарат в зону посадки;
- 5 Обеспечивать возможность переключения между ручным и автоматическим режимами управления.

Можно выделить два основных подхода к разработке системы управления. Первый заключается в использовании микроконтроллеров для обработки получаемой от датчиков информации и выработки управляющих сигналов. При этом необходимо иметь хороший опыт работы с микроконтроллерами, уметь проектировать электронные системы и программировать на языках низкого уровня. Существуют затруднения с разработкой и отладкой программного обеспечения для микроконтроллеров, к тому же у них достаточно низкая производительность и имеются ограничения на использования вычислений с плавающей точкой. Несколько упростить процесс разработки может использование популярных аппаратных вычислительных платформ на базе микроконтроллеров (например, Arduino) путём выбора подходящей версии микропроцессорного модуля и плат расширения. Как правило, интегрированные среды разработки таких платформ позволяют разрабатывать программное обеспечение, используя C-подобные языки высокого уровня.

Второй подход к разработке системы управления заключается в использовании микрокомпьютеров (встраиваемых систем), по производительности сравнимых с персональными компьютерами, и обладающих развитой периферией: от последовательных портов ввода/вывода до видеовыходов, USB-хостов и сетевых интерфейсов. Как правило, микрокомпьютеры работают под адаптированными версиями распространённых операционных систем, от Linux до Windows. Это позволяет вести разработку программного обеспечения с использованием различных языков высокого уровня. Разработку и отладку на первоначальном этапе можно производить на обычном персональном компьютере. В отличие от подхода с

использованием микроконтроллеров, здесь объём работ по проектированию электронных устройств значительно снижен, так как необходимо разработать только сравнительно простые аппаратные модули для работы с датчиками и исполнительными механизмами. Существенным недостатком микрокомпьютеров является их высокая стоимость.

Однако в 2011 году английский разработчик игр Дэвид Брабен представил сверхминиатюрный микрокомпьютер Raspberry Pi размером с кредитную карту ($85,6 \times 53,98$ мм). Стоимость Raspberry Pi сравнительно невелика, порядка \$30, в отличие от аналогов, разработанных другими компаниями. Raspberry Pi работает под управлением операционной системы семейства Linux, поддерживает USB 2.0 и порты ввода/вывода общего назначения. Характеристики этого микрокомпьютера соответствуют всем требованиям, предъявляемым к аппаратному обеспечению системы управления, что позволяет разработать многопоточное программное ядро системы с использованием языка программирования высокого уровня, а с помощью портов ввода/вывода подключить датчики и органы управления.

Любая система управления беспилотным летательным аппаратом для обеспечения безопасности полётов, а также для осуществления аварийной посадки, должна предусматривать возможность вмешательства оператора в процесс управления полётом, таким образом, система управления должна иметь как минимум два режима работы: автоматический и ручной. Автоматический – это режим, в котором летательный аппарат управляется автопилотом, обрабатывающим получаемые от датчиков (акселерометра, гироскопа, магнитного компаса, приёмника данных ГНСС систем, барометрического высотомера и т. д.) данные. Ручной режим позволяет оператору БПЛА предотвратить нештатную ситуацию при отказе или неправильной работе автопилота, а также осуществлять взлет и посадку летательного аппарата.

Для повышения фотограмметрического качества получаемых фотоматериалов система управления должна точно выдерживать заданные маршрут и высоту движения, уменьшать продольные и поперечные углы наклона, а также компенсировать угол сноса носителя.

В системе управления можно выделить аппаратную и программную составляющие (рис. 1, 2).

Как видно из рис. 1, аппаратная часть системы управления состоит из:

- Микрокомпьютера;
- Коммутатора - устройства для переключения между ручным и автоматическим вариантами управления;
- Блока датчиков;
- Бортового радиомодема для взаимодействия с наземной станцией управления;
- Приёмника радиоуправления;
- Устройства управления фотоаппаратом;
- Исполнительных механизмов органов управления летательным аппаратом.

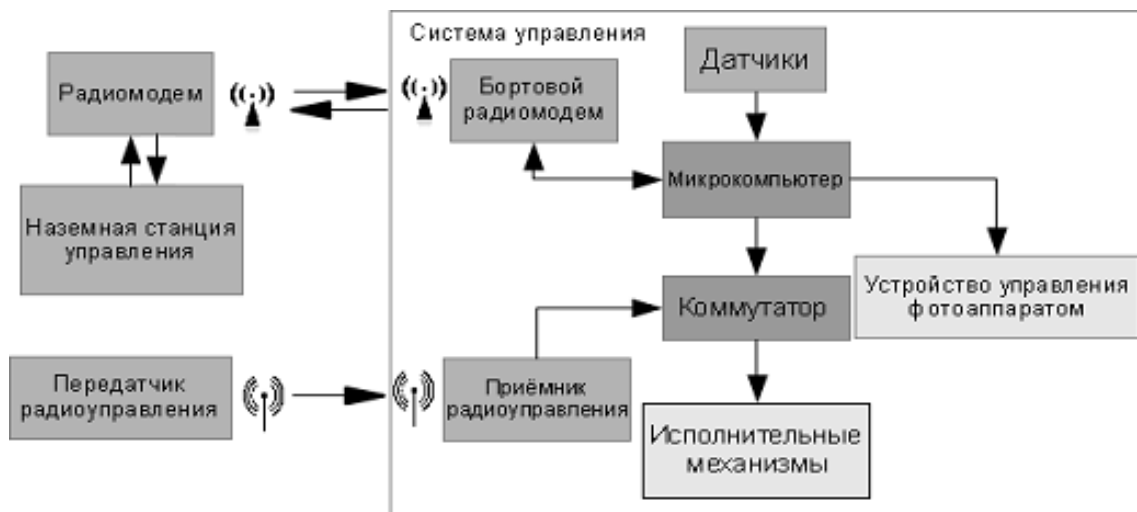


Рис. 1. Блок-схема аппаратной части системы управления БПЛА

Функциональным ядром аппаратной части автопилота является микрокомпьютер, который обрабатывает данные, получаемые от навигационных датчиков, и передаёт команды на исполнительные механизмы органов управления.

Коммутатор — устройство, при помощи которого осуществляется выбор одного из нескольких вариантов управления, например, автоматическое управление с использованием автопилота или ручное при помощи пульта радиоуправления. Данное устройство позволит оператору в любой момент переключить управление летательным аппаратом в ручной режим, что позволит избежать возможных нештатных ситуаций или осуществить аварийную посадку.

В качестве навигационных датчиков предусмотрено совместное использование магнитного компаса, барометрического высотомера, твердотельного трёхосного гироскопа и трёхосного акселерометра, приёмника данных ГНСС систем.

Также микрокомпьютер задаёт режим аэрофотосъёмки посредством специализированного устройства для управления фотоаппаратом.

Бортовой радиомодем предназначен для приёма и передачи различной информации, например, команд на изменение маршрута движения летательного аппарата, и отправки данных телеметрии, показывающих положение и скорость летательного аппарата, уровень заряда батареи, выбранный режим полёта, состояние бортового оборудования и др.

Приёмник радиоуправления получает управляющие сигналы от пульта радиоуправления и через коммутатор передает их на исполнительные механизмы.

Для взаимодействия всех узлов системы управления на микрокомпьютер устанавливается специализированное программное обеспечение, разработанное с использованием языков высокого уровня. Как видно из рис. 2, программное обеспечение построено по модульному принципу, где каждый модуль несет определённую функциональную нагрузку. Четыре модуля

сопряжения осуществляют непосредственное взаимодействие с оборудованием: радиомодемом, навигационными датчиками, исполнительными механизмами и фотоаппаратом.

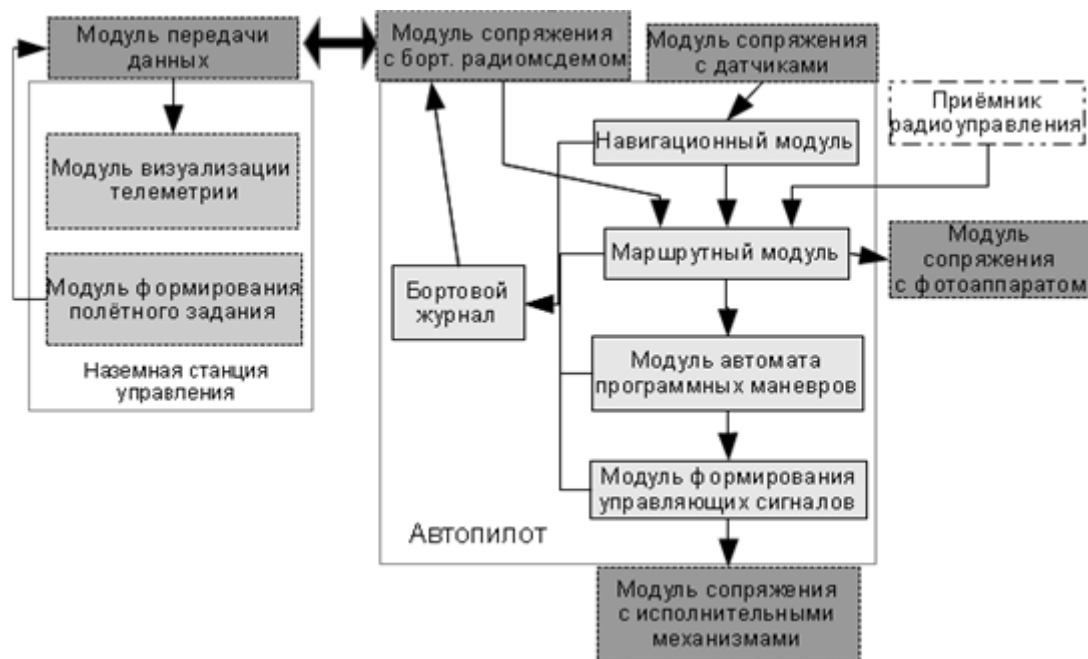


Рис. 2. Блок-схема программной части системы управления БПЛА

Модуль, осуществляющий связь с датчиками, передает информацию в навигационный модуль. Навигационный модуль, в свою очередь, производит обработку полученных данных, что позволяет определить положение носителя и его ориентацию в пространстве. Получив данные от навигационного модуля, маршрутный модуль просчитывает дальнейшее направление полёта в зависимости от заданного маршрута и текущего положения, после чего формирует команды для автомата программных манёвров. Также маршрутный модуль управляет процессом аэрофотосъемки. Автомат программных манёвров предназначен для выработки команд общего вида для модуля формирования управляющих сигналов, который корректирует команды с учётом схемы управления летательного аппарата. Также в автопилоте имеется функция записи всех параметров, передаваемых между модулями. Данная информация используется в качестве дополнительных геометрических условий при фотограмметрической обработке результатов аэрофотосъемки.

Архитектура системы управления предусматривает использование имитационного моделирования полетов БПЛА для анализа алгоритмов работы автопилота в камеральных условиях и отладки системы управления, что позволит избежать многих нештатных ситуаций в ходе эксплуатации БПЛА (рис. 3).

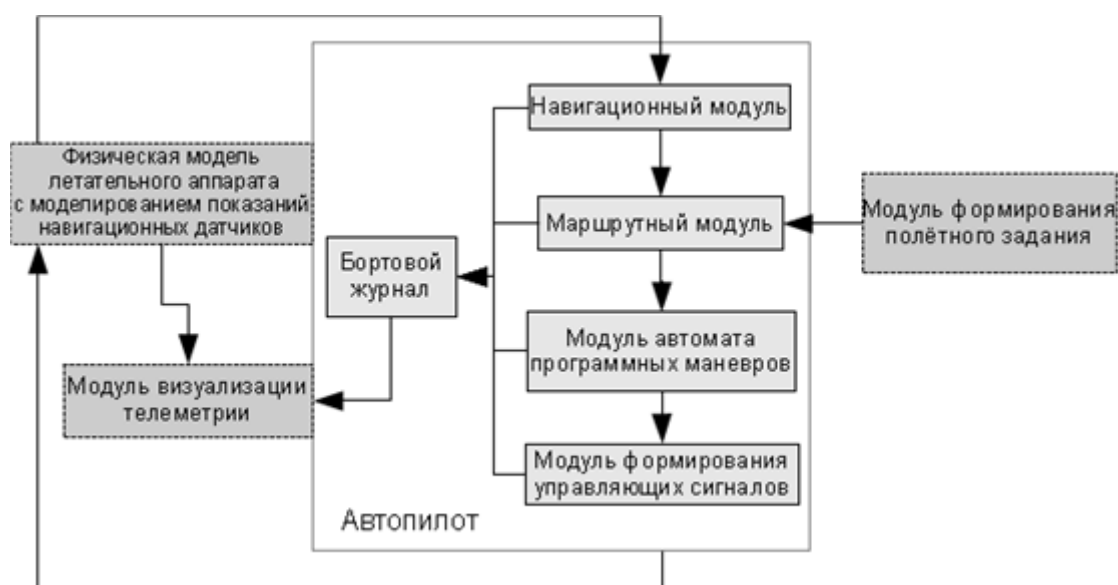


Рис. 3. Блок-схема имитационного моделирования полётов БПЛА

Таким образом, создание системы управления для БПЛА на базе микрокомпьютера Raspberry Pi позволит снизить стоимость аппаратной части системы и эффективно разработать и отладить её программную часть. Применение операционной системы семейства Linux позволяет использовать все преимущества кросс-платформенного программирования с использованием языков Qt или Java и выполнить значительную часть работ на персональном компьютере, а возможности имитационного моделирования помогут изучить в камеральных условиях все особенности использования системы управления.

АППРОКСИМАЦИЯ ПРОФИЛЯ РЕЛЬЕФА, ЗАДАННОГО НА НЕРЕГУЛЯРНОЙ СЕТКЕ

Вадим Сергеевич Коркин

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент, тел. (383) 236-12-66

В статье рассматривается математический алгоритм построения цифровой модели профиля рельефа по нерегулярной сетке исходных данных.

Ключевые слова: ортонормированный полином, профиль рельефа, цифровая модель рельефа, аппроксимация.

APPROXIMATION OF THE RELIEF PROFILE PRESET IN THE IRREGULAR GRID

Vadim S. Korkin

Ph.D., Assoc. Prof., Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo, 630108 Novosibirsk, phone: (383) 236-12-66

The author presents the mathematical algorithm for constructing DTM by the irregular grid of initial data.

Key words: orthonormal polynom, relief profile, DTM, approximation.

Одним из методов моделирования рельефа является профиль или система параллельных профилей. Исходными данными для построения профиля служат отметки рельефа, заданные на нерегулярной сетке. В данной статье предлагается следующий алгоритм аппроксимации функции рельефа.

Предположим, что на некотором участке моделирования $[a, b]$ вдоль профиля измерена функция рельефа $f(X)$ в N точках с координатами $X_N \in [a, b]$, расположенных хаотично. Разобьем область моделирования $[a, b]$ на элементарные участки ΔX :

$\Delta X: a = d_1 < d_2 < \dots < d_c < \dots < d_m = b$.

На каждом элементарном участке $[d_l, d_{l+1}]$ будем аппроксимировать функцию рельефа полиномом вида

$$P(X) = \sum_{i=0}^3 a_i^l \tilde{T}_i(X), \quad (1)$$

где a_i^l – неизвестные коэффициенты; $\tilde{T}_i(X)$ ($i = 0, \dots, 3$) – ортонормированные полиномы, которые получены путем нормирования ортогональных полиномов Чебышева 1-го рода

$$T_0(X) = 1; T_1(X) = X; T_2(X) = 2X^2 - 1; T_3(X) = 4X^3 - 3X. \quad (2)$$

Совокупность N значений функции $f^l(X_N)$ представляет собой вектор $f^l = (f_1, f_2, \dots, f_N)$ N - мерного евклидова пространства E_N . Тогда аппроксимирующий полином также образует вектор $P^l = (a_0, a_1, a_2, a_3)$ в

пространстве E_k пространства E_N . $\{\tilde{T}_i(X)\}$ – элементы ортонормированного базиса E_k , т.к.

$$\int_{-1}^1 (\tilde{T}_i(X), \tilde{T}_j(X)) dX = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ 1, & i = j \end{cases}. \quad (3)$$

Задачу будем решать по методу наименьших квадратов. Запишем минимизируемый функционал:

$$\Phi = \sum_{k=1}^N (f^l(X_k) - \sum_{i=0}^3 a_i^l \tilde{T}_i(X_k))^2 = \min. \quad (4)$$

Дифференцируя выражение (4) по неизвестным получим систему нормальных уравнений

$$\frac{\partial \Phi}{\partial a_i} = 0, \quad (5)$$

решая которую найдем коэффициенты a_i^l . На каждом элементарном участке $[d_l, d_{l+1}]$ функция рельефа аппроксимируется независимо. В результате на каждом элементарном участке будем иметь коэффициенты a_i^l ($l = 1, \dots, m - 1$).

Однако, полученная модель рельефа будет иметь на концах элементарных участков $[d_l, d_{l+1}]$ разрывы. Для обеспечения непрерывности моделируемой функции рельефа выполним вторичную аппроксимацию непрерывных функций вида (1) на отрезках $[d_l, d_{l+1}]$.

Запишем минимизируемый функционал:

$$\Phi = \int_{-1}^1 \left(\sum_{i=0}^3 a_i^l \tilde{T}_i(X) - \sum_{i=0}^3 \bar{a}_i^l \tilde{T}_i(X) \right)^2 dX = \min \quad (6)$$

и условия непрерывности на границах элементарных участков $[d_l, d_{l+1}]$:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=0}^3 \bar{a}_i^l \tilde{T}_i(-1) - P(d_l) &= 0 \\ \sum_{i=0}^3 \bar{a}_i^l \tilde{T}_i(1) - P(d_{l+1}) &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

В выражениях (6) и (7) a_i^l – коэффициенты полинома (1), полученные из первичной аппроксимации; $\bar{a}_i^l$ – новые искомые коэффициенты полинома вида (1); $\tilde{T}_i(-1), \tilde{T}_i(1)$ – значения полиномов Чебышева на границах элементарного участка $[-1, 1]$; $P(d_l), P(d_{l+1})$ – усредненные значения полиномов (слева и справа) на концах элементарных участков $[d_l, d_{l+1}]$.

После интегрирования (6), получим:

$$\sum_{i=0}^3 (a_i^l - \bar{a}_i^l)^2 = \min. \quad (8)$$

Для решения (8) и (7) составим функцию Лагранжа:

$$L(\bar{a}_i^l, \mu_1^l, \mu_2^l) = \sum_{i=0}^3 (a_i^l - \bar{a}_i^l)^2 + \mu_1^l \left(\sum_{i=0}^3 \bar{a}_i \tilde{T}_i(-1) - P(d_l) \right) + \mu_2^l \left(\sum_{i=0}^3 \bar{a}_i \tilde{T}_i(1) - P(d_{l+1}) \right). \quad (9)$$

Найдем частные производные функции L по неизвестным $\bar{a}_i^l, \mu_1^l, \mu_2^l$ и приравняем их нулю. В результате получим систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dL}{d\bar{a}_i^l} &= -2a_i^l + 2\bar{a}_i^l + \mu_1^l \tilde{T}_i(-1) + \mu_2^l \tilde{T}_i(1) = 0 \\ \frac{dL}{d\mu_1^l} &= \sum_{i=0}^3 \bar{a}_i \tilde{T}_i(-1) - P(d_l) = 0 \\ \frac{dL}{d\mu_2^l} &= \sum_{i=0}^3 \bar{a}_i \tilde{T}_i(1) - P(d_{l+1}) = 0 \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

Выразим из первого уравнения системы (10) $\bar{a}_i^l$:

$$\bar{a}_i^l = a_i^l - \frac{\mu_1^l \tilde{T}_i(-1) + \mu_2^l \tilde{T}_i(1)}{2}. \quad (11)$$

Подставим (11) во второе и третье уравнения (10), получим систему из двух уравнений:

$$\left. \begin{aligned} d\mu_1^l + e\mu_2^l &= l^l \\ e\mu_1^l + d\mu_2^l &= l^{l+1} \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} d &= \sum_{i=0}^3 \tilde{T}_i(1) \tilde{T}_i(1); \\ e &= \sum_{i=0}^3 \tilde{T}_i(-1) \tilde{T}_i(1); \\ l^l &= 2 \left(\sum_{i=0}^3 a_i \tilde{T}_i(-1) - P(d_l) \right); \\ l^{l+1} &= 2 \left(\sum_{i=0}^3 a_i \tilde{T}_i(1) - P(d_{l+1}) \right); \end{aligned}$$

l^l и l^{l+1} - свободные члены.

Решая (12) найдем:

$$\left. \begin{aligned} \mu_1^l &= (dl^l - el^{l+1}) / (dd - ee) \\ \mu_2^l &= (dl^{l+1} - el^l) / (dd - ee) \end{aligned} \right\}. \quad (13)$$

Далее вычисляются значения $\bar{a}_i^l$ по формуле (11).

Таким образом, получаем цифровую модель профиля рельефа непрерывную на всем отрезке [a,b].

Данный алгоритм позволяет моделировать рельеф в виде системы непрерывных параллельных профилей. Расстояние между профилями выбирается таким, чтобы обеспечить линейную интерполяцию между ними. Этим обеспечивается требуемая точность определения отметок рельефа на всем участке моделирования. Это подтверждено рядом экспериментальных данных, полученных по составленной программе.

ЦИФРОВАЯ СЕНСИТОМЕТРИЯ

Сергей Миронович Горбенко

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. (383) 361-07-26, e-mail: gorbenkos@ngs.ru

Лариса Александровна Головина

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доцент кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. (383) 361-08-66, e-mail: lar.golowina@ya.ru

В статье рассматриваются подходы при исследовании цифровых изображений и предлагаются новые характеристики для их оценки.

Ключевые слова: сенситометрические испытания, цифровое изображение.

DIGITAL SENSITOMETRY

Sergey M. Gorbenko

Ph.D., Assoc. Prof., department of photogrammetry and remote sensing. Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo, 630108 Novosibirsk, phone: (383) 361-07-26, e-mail: gorbenkos@ngs.ru

Larisa A. Golovina

Assoc. Prof., department of photogrammetry and remote sensing. Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo, 630108 Novosibirsk, phone: (383) 361-08-66, e-mail: lar.golowina@ya.ru

The approaches to the research of digital images are considered, new characteristics for their assessment are offered.

Key words: sensitometric tests, digital image.

Сенситометрия, как измерительный метод в фотографии, возникла в конце прошлого столетия в первую очередь применительно к задаче измерения градационных характеристик светочувствительных материалов. Благодаря этому методу стал возможен контроль процессов производства и химико-фотографической обработки фотоматериалов.

При использовании обычных фотоаппаратов изображение фокусируется на фотографической плёнке со светочувствительным покрытием, содержащим кристаллы галоидного серебра. Во время химико-фотографической обработки изображение проявляется и фиксируется в эмульсионном слое. В цифровых фотоаппаратах и сканерах изображение фокусируется также на светочувствительный материал - полупроводниковую матрицу. Записывается и хранится изображение на картах памяти.

Основными сенситометрическими характеристиками в классической фотографии являются величина плотности вуали, светочувствительность, фотографическая широта, коэффициент контрастности. От учёта данных параметров при экспонировании и обработке отснятого материала напрямую зависит фотографическое качество полученного изображения.

Для цифровой матрицы также существуют оценочные критерии её фотографического качества. Во-первых, сенсор обладает определённой чувствительностью, которая, как и светочувствительность плёнки выражается в единицах ISO : 50, 100, 200, 400, 800, 1600. Чем выше чувствительность, тем меньшее количество света требуется для реакции на него регистрирующего устройства, но при этом повышается температура сенсора из-за перемещения свободных электронов и появляется «цифровой шум». При использовании фотографической плёнки с увеличением значения светочувствительности (увеличения размеров кристаллов галоидного серебра) уменьшается разрешающая способность изображения.

Чувствительность ПЗС-матрицы складывается из чувствительности всех ее пикселей и в целом зависит от двух параметров. Первый параметр — интегральная чувствительность, — представляющий собой отношение величины фототока (в миллиамперах) к световому потоку (в люменах) от источника излучения, спектральный состав которого соответствует вольфрамовой лампе накаливания. Этот параметр позволяет оценить чувствительность сенсора в целом.

Второй параметр — монохроматическая чувствительность, то есть отношение величины фототока (в миллиамперах) к величине световой энергии излучения (в миллиэлектронвольтах), соответствующей определенной длине волны. Набор всех значений монохроматической чувствительности для интересующей части спектра составляет спектральную чувствительность — зависимость чувствительности от длины волны света. Таким образом, спектральная чувствительность показывает возможности сенсора по регистрации оттенков определенного цвета.

Чувствительность пикселя матрицы зависит, во-первых, от площади светочувствительной области, а во-вторых, от квантовой эффективности, то есть отношения числа зарегистрированных электронов к числу упавших на поверхность сенсора фотонов.

Важной характеристикой матрицы является порог чувствительности — параметр регистрирующего свет устройства, характеризующий минимальную величину светового сигнала, который может быть зарегистрирован. Чем меньше этот сигнал, тем выше порог чувствительности. Главным фактором, ограничивающим порог чувствительности, является темновой ток и складывается он из электронов, попавших в яму при полном отсутствии светового потока. Если световой поток слаб, то величина фототока близка, а порой и меньше, чем величина темнового тока. Существует зависимость темнового тока от температуры сенсора — при нагревании матрицы на 9 градусов по Цельсию ее темновой ток возрастает в два раза. Аналогом порога

чувствительности матрицы в классической фотографии является плотность вуали галогенсеребряной эмульсии светочувствительного материала.

Как известно, светочувствительность пленки в пределах одной кассеты остается постоянной, иными словами — не может изменяться от кадра к кадру. Цифровая камера позволяет для каждого снимка устанавливать самое оптимальное значение эквивалентной чувствительности. Достигается это посредством усиления видеосигнала, исходящего с матрицы, — в чем-то такая процедура, называемая повышением эквивалентной чувствительности, напоминает вращение регулятора громкости проигрывателя.

Возможность сенсора формировать хороший снимок при разной освещенности и высокой контрастности определяется параметром динамический диапазон, характеризующим способность матрицы различать в изображении, проецируемом на ее регистрирующую поверхность, самые темные тона от самых светлых. При расширении динамического диапазона количество оттенков снимка будет увеличиваться, а переходы между ними будут максимально соответствовать изображению, формируемому объективом. Динамический диапазон может быть оценен по гистограмме — графику, показывающему распределение пикселей изображения по уровням яркости. На графике гистограммы по горизонтальной оси откладываются значения градации яркости по шкале серого цвета от 0 (чёрный) до 255 (белый), по вертикали — количество пикселей изображения, значения которых соответствуют каждой из градаций. По левой и правой границе гистограммы можно судить о минимальной и максимальной яркости изображения и таким образом определить динамический диапазон, охватывающий основную информацию изображения, и сделать вывод о его зауженности.

Для оценки градационных характеристик галогенсеребряных эмульсий существует отработанная методика, базирующаяся на объективных методах оценки и использующая измерение оптических плотностей на денситометре. Для цифровой фотографии таковой пока нет, а используемая субъективная оценка, описывает изображение терминами "светло", "темно", "неясно" или "неровно". Эти субъективные термины не всегда согласуются с объективными измерениями, такими яркость, интервал яркости, контраст.

Для объективности оценки тоновоспроизведения предлагается ввести три новых понятия- тоновая ширина, тоновый коэффициент контрастности и коэффициент цветовой устойчивости (рис. 1).

Тоновый контраст аналогичен фотографической широте, используемой для оценки традиционных фотоматериалов, тоновый коэффициент контрастности- коэффициенту контрастности. Под понятием коэффициент тоновой устойчивости предлагается ввести величину, показывающую соотношение между полезным и паразитическим действием света на светочувствительную матрицу.

На схеме (рис.1) по оси X откладываются идеальные значения цветовых составляющих, используемые при создании тест-объекта, по оси Y- реальные значения цветовых составляющих.

Для определения первых двух параметров на графике выделяется прямолинейный участок кривой (рис.1), затем определяются точки на оси X и Y, соответствующие концу и началу прямолинейного участка и определяются разности величин, соответствующих этим точкам.

Величина ΔT_1 условно соответствует классической разности оптических плотностей, величина ΔT_2 – фотографической широте. Величину ΔT_2 назовем тоновой широтой L_T , а отношение $\Delta T_1 / \Delta T_2$ – коэффициентом тоновой контрастности γ_T .

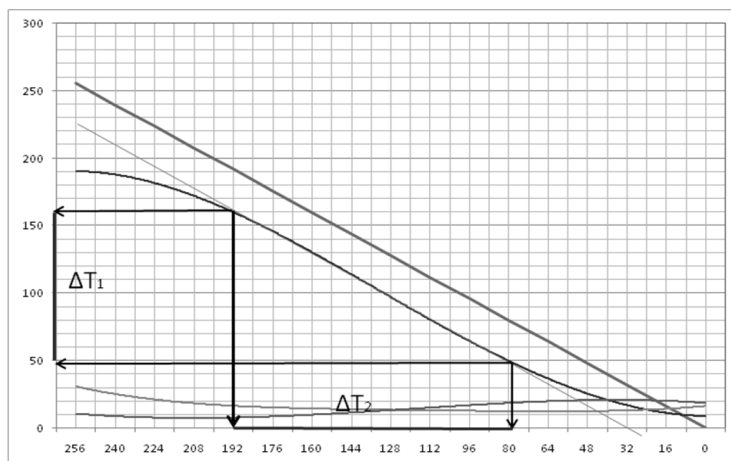


Рис. 1. Схема определения тоновой широты и коэффициента тоновой контрастности

Коэффициент устойчивости K_y предлагается определять по формуле

$$K_y = \frac{\Delta T_{\text{осн}}}{T_{\text{ср.пар.}}},$$

$\Delta T_{\text{осн}}$ – диапазон тонов, воспроизводимых матрицей, соответствующих основному цвету;

$T_{\text{ср.пар.}}$ – среднее значение двух оставшихся цветов (паразитических).

В таблице 1 представлены результаты исследований двух типов матриц по представленным выше параметрам.

Таблица 1. Результаты сенситометрических исследований

Тип матрицы		L_T	γ_T	K_y
ПЗС-матрица	R	78	0,96	29,69
	G	112	1,03	18,46
	B	44	0,36	51,17
КМОП-матрица	R	84	1,19	66,98
	G	114	1,1	12,34
	B	112	1,16	13,18

В дальнейшем планируется продолжить исследование цифровых аэрофотоаппаратов.

НЕКОТОРЫЕ ЗАДАЧИ ВИДЕОСПЕКТРАЛЬНЫХ СИСТЕМ В СОСТАВЕ КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Виктор Брунович Шлишевский

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, д. 10, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. (383) 361-08-66, e-mail: svb_dom@ngs.ru

Обсуждаются возможности применения видеоспектральных систем в составе космических комплексов с целью выделения дополнительных информативных признаков фоноцелевой обстановки.

Ключевые слова: спектр, видеоспектрометр, система космического базирования.

SOME PROBLEMS OF VIDEO SPECTRAL SYSTEMS AS A PART OF SPACE COMPLEXES

Viktor B. Shlishevsky

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo Str., 630108, Novosibirsk, Russia Federation Department of Photogrammetry and Remote Sensing, tel. (383) 361-08-66, e-mail: svb_dom@ngs.ru

The possibilities of applying video spectral systems as a part of space complexes for additional informative feature extraction of target environment are discussed.

Key words: spectrum, imaging spectrometer, space-based system.

Условия выполнения экспериментальных работ по созданию новых систем дистанционного зондирования для специальных задач, их полнота, качество и, особенно, сроки в значительной степени определяются и ограничиваются экономическими возможностями Заказчика. Следовательно, подход к методам экспериментальных исследований и выбор разрабатываемой аппаратуры должны быть направлены на решение наиболее принципиальных проблем в достаточно короткие сроки и в разумных рамках затрат на их реализацию. При этом должны учитываться как имеющийся опыт экспериментальных исследований фоноцелевой обстановки, так и достигнутые, хотя бы самые незначительные, успехи в приборных разработках.

В настоящее время одной из важнейших задач оптико-электронных систем является обнаружение и идентификация замаскированных объектов. Для успешного решения этой задачи необходима разработка новых высокоэффективных средств разведки, использующих нетрадиционные демаскирующие признаки. К таким средствам относятся, в частности, видеоспектральные системы, обеспечивающие одновременную поэлементную регистрацию и структуры, и спектров (в сотнях и тысячах элементарных спектральных интервалов) рассматриваемых удаленных объектов.

Укажем на принципиальные и перспективные задачи космических систем разведки, в которых могут быть эффективно использованы видеоспектральные средства: получение многоспектральных изображений для уточнения характеристик театра военных действий при планировании операций; определение районов повышенного интереса; целеуказание средствам поражения и оперативное определение нанесения ракетно-бомбовых ударов; слежение за деятельностью группировок войск вероятного противника; мониторинг прибрежных зон, измерение глубин; исследование взаимовлияния систем «океан–атмосфера» в возможных зонах ведения морских операций; исследование и контроль перемещений маскировочных аэрозольных облаков, дымов и т. п.; обнаружение крупномасштабных изменений, таких как расширение железнодорожных сетей; метеообеспечение деятельности Вооруженных Сил России.

Одним из важнейших применений видеоспектральных средств разведки может стать также их использование в системах раннего обнаружения пусков баллистических ракет. Новые видеоспектральные данные позволят улучшить обнаружение и обеспечить распознавание и сопровождение целей в интересах национальной противоракетной обороны и противоракетной обороны на театре военных действий.

В настоящее время натурные измерения характеристик излучения факелов баллистических ракет в России практически не ведутся. Но именно данные натурных экспериментов измерения спектроэнергетических характеристик факельной струи могут помочь получить более точные представления о химических процессах в камере сгорания и струе, уточнить методы расчетов ее газодинамических и излучательных параметров. Кроме того, дополнительные стендовые исследования особенностей спектра излучения факельной струи позволят улучшить характеристики двигательной установки, понять причины износа и поломки двигателя.

Как известно, сигнатуры факела баллистических ракет с жидкостным ракетным двигателем и ракетным двигателем на твердом топливе существенно различаются по характеру излучения. Спектр сверхзвуковой струи жидкостного двигателя носит селективный характер, тогда как излучение факела твердого топлива имеет сплошной спектр из-за излучения конденсированных частиц окиси алюминия. Кроме того, сигнатуры факела отличаются для данного типа баллистических ракет от пуска к пуску (даже в случае залповой стрельбы) вследствие разброса конструктивных параметров, исполнения комплектов топливных шашек, траекторных параметров, метеоусловий и локальных атмосферных параметров. В этой связи комплексное использование ультрафиолетового, видимого и инфракрасного диапазонов спектра сможет дать полезную информацию о типе ракеты, виде топлива и т. д. Задача особенно важна для контроля баллистических ракет на пассивном участке траектории. До настоящего времени этот контроль осуществляется только с помощью радиолокационных методов. Однако применение специальных покрытий постепенно сводит на нет такие возможности, поэтому использование видеоспектральных датчиков в оптико-электронных системах обнаружения и

сопровождения баллистических ракет может существенно улучшить их тактико-технические параметры.

© В.Б. Шлишевский, 2012

МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СНИМКОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ТРЕХКАМЕРНОЙ ФОТОГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ С БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Александр Сергеевич Костюк

ООО “ЛАГ”, 644008, г. Омск, ул. Сibaковская, 4, инженер-геодезист, тел. (913) 9762937, e-mail: kas-55@yandex.ru

Андрей Леонидович Быков

ООО “ЛАГ”, 644008, г. Омск, ул. Сibaковская, 4, инженер-геодезист, тел. (913) 9798280, e-mail: abu-ll@yandex.ru

Леонид Васильевич Быков

ООО “ЛАГ”, 644008, г. Омск, ул. Сibaковская, 4, зам. директора, кандидат технических наук, доцент, тел. (913) 9709701, e-mail: blv-55@yandex.ru

Представлена конструкция трехкамерной фотоплатформы, установленной на специально разработанном беспилотном летательном аппарате ПП-45. Рассматриваются вопросы калибровки снимков и сшивки изображений. Представлены результаты калибровки камер, оценки производительности и качества экспериментальной аэрофотосъемки.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, трехкамерная фотоплатформа, калибровка снимков, сшивка изображений.

CALIBRATION TECHNIQUE AND PRELIMINARY PROCESSING IMAGES OBTAINED THREE-CHAMBER PHOTOGRAPHIC SYSTEMS WITH UNMANNED AERIAL VEHICLES

Alexandr S. Kostyuk

ООО “LAG”, Omsk, 644008 Sibakovskaya st. 4, engineer, tel. (913)9762937, e-mail: kas-55@yandex.ru

Andrey L. Bykov

ООО “LAG”, Omsk, 644008 Sibakovskaya st. 4, engineer, tel. (913)9798280, e-mail: abu-ll@yandex.ru

Leonid V. Bykov

ООО “LAG”, Omsk, 644008 Sibakovskaya st. 4, vice director, PhD, lecturer, tel. (913)9709701, e-mail:blv-55@yandex.ru

In article describes three-chamber photoplatform mounted on a specially developed unmanned aircraft PP-45. Report results of calibration cameras. Consider problems of cross-linking images and the joint photogrammetric image processing. The results of evaluation performance and quality of experimental aerial photography.

Key words: unmanned aerial vehicle, three-chamber photoplatform, the calibration images, image stitching.

Вопрос повышения производительности и качества аэрофотосъемки, выполненной с беспилотного летательного аппарата (БПЛА), является актуальным. Сверхлегкий летательный аппарат, весовой категории до 5 кг, невозможно удержать на маршруте с необходимой точностью даже при незначительном ветре. Лучшие образцы автопилотов гарантируют приемлемое качество съемки при скорости ветра до 4 м/сек. Реальная аэросъемка выполняется при скорости ветра 5 - 15 м/сек. В этих условиях выдержать заданные параметры фотографирования невозможно. Одним из вариантов решения проблемы является увеличение поля зрения фотографической системы. Исходя из этого предположения, нами разработана трехкамерная фотоплатформа, обеспечивающая значительное увеличение захвата территории одним кадром. Для установки фотоплатформы разработан новый многоцелевой БПЛА ПП-45 [1]. Конструкция фотоплатформы представлена на рис. 1.

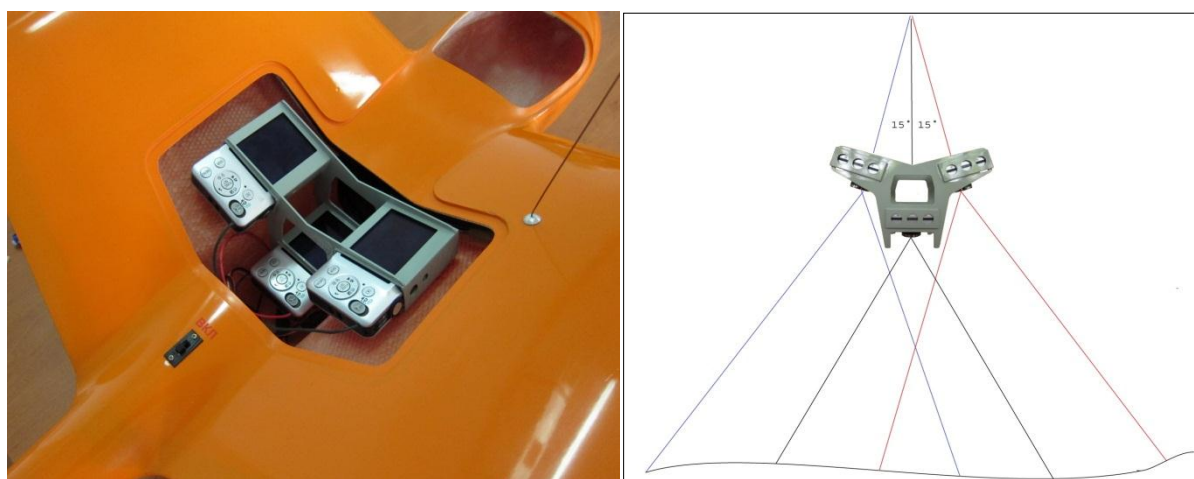


Рис. 1. Трехкамерная фотоплатформа

При такой аэросъемке существенно увеличивается захват территории с одного маршрута, продольное ориентирование кадра вдоль маршрута создает благоприятные условия для выдерживания продольного перекрытия снимков, а перспективные снимки гарантируют обеспечение поперечного перекрытия между маршрутами.

Одной из ключевых проблем является калибровка камер и учет ее результатов при фотограмметрической обработке снимков. Калибровка камер выполняется с использованием плоского тест-объекта по методике, разработанной авторами [2]. Для полной калибровки камер координаты узловой точки объектива определяются с помощью электронного тахеометра. Методикой предусматривается трехкратное фотографирование тест-объекта каждой съемочной камерой. По результатам обработки всех снимков определяются усредненные параметры калибровки. Результаты калибровки трехкамерной фотографической системы с использованием разработанной методики представлены в таблице.

Таблица. Результаты калибровки трех камер фотоплатформы

Левая камера	Элементы внутреннего ориентирования	
	f , мм	5,086
	x_0 , мм	-0,008
	y_0 , мм	0,015
Центральная камера	f , мм	5,080
	x_0 , мм	0,006
	y_0 , мм	0,007
Правая камера	f , мм	5,080
	x_0 , мм	-0,004
	y_0 , мм	0,008

Результатом калибровки являются элементы внутреннего ориентирования и снимки, приведенные к центральной проекции или параметры калибровки в виде элементов внутреннего ориентирования и коэффициентов полинома, описывающего дисторсию изображения.

При аэрофотосъемке любительскими камерами приходится обрабатывать большое количество изображений, что снижает скорость фотограмметрической обработки снимков. Существенно повысить производительность такой обработки можно за счет предварительного объединения снимков в единый псевдопанорамный кадр. Для этого калиброванные снимки, полученные одновременно с помощью фотоплатформы, сшиваются в единый растр. Затем фототриангуляционная сеть строится по сшитым растрам. Исследования, выполненные нами ранее, показывают, что методические ошибки, возникающие при сшивке снимков, не превышают случайных погрешностей измерений. На рис. 2 показан сшитый растр, для сравнения приведен центральный снимок триплета.



Рис. 2. Центральный снимок и сшитый растр из трех изображений

Сравнение площади территории, отобразившейся на снимках (рис.2), показывает, что сшитый кадр охватывает на 80% большую площадь местности, чем один исходный снимок. За счет перспективных снимков достигается жесткость межмаршрутных связей, что повышает точность фотограмметрических построений.

Широкий захват территории за счет дополнительных перспективных снимков, оперативная калибровка камер, объединение трех одновременно полученных снимков в единый растр обеспечивают существенное повышение производительности и качества аэросъемки, а также фотограмметрической обработки снимков, полученных с БПЛА.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Погарский, П.М. Научно-исследовательская лаборатория «Малые беспилотные аппараты» [http://www.omgtu.ru/scientific activities/innovative structure/research_laboratories/njl quot small unmanned vehicles quot/](http://www.omgtu.ru/scientific_activities/innovative_structure/research_laboratories/njl quot small unmanned vehicles quot/) Научно-исследовательская
2. Быков, В.Л. Полевая калибровка снимков с использованием средств спутникового позиционирования/ В Л. Быков // Геодезия и картография — 2007 — №9.-С 39-43

© А.С. Костюк, А.Л. Быков, Л.В. Быков, 2012

ОБНОВЛЕНИЕ ТОПОГРАФИЧЕСКИХ ПЛАНОВ МАСШТАБА 1 : 5 000 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Александр Юрьевич Чермошенцев

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. (960)798-55-06, e-mail: fdz2004@bk.ru

В статье рассмотрены особенности использования космических снимков сверхвысокого разрешения для обновления крупномасштабных топографических планов.

Ключевые слова: космические снимки сверхвысокого разрешения, топографические планы, обновление.

UPDATING TOPOGRAPHIC MAPS OF SCALE 1 : 5 000 USING VERY HIGH RESOLUTION SATELLITE IMAGES

Aleksandr Yu. Chermoshentsev

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo St., Russia, Novosibirsk, 630108, a post-graduate student, department of photogrammetry and remote sensing, tel. (960)798-55-06, e-mail: fdz2004@bk.ru

The article describes features of using very high resolution satellite images for the purpose of large-scale maps updating.

Key words: very high resolution satellite images, topographic maps, updating.

В настоящее время покрытие планами крупного масштаба межселённой территории остаётся недостаточным. Имеющиеся в наличии топографические планы требуют обновления, поскольку утратили актуальность. Производить топографическую съёмку местности не всегда является целесообразным, особенно это касается залесённых территорий. С экономической точки зрения выполнение 1 кв. км топографической съёмки обходится на порядок дороже, чем космическая съёмка с последующей векторизацией, и несравнимо с ней по временным и трудовым затратам.

Плановое положение объектов ситуации на топографической карте может быть получено по космическим снимкам сверхвысокого разрешения с погрешностью 0,36 - 0,70 м [1], что соответствует требованиям, предъявляемым к топографическим планам масштаба 1: 5 000. В связи с этим можно сделать вывод о возможности обновления контурной части планов масштаба 1: 5 000 по космическим снимкам. Высотная часть плана может быть получена с существующей карты или плана, если рельеф данной территории не был подвержен значительным изменениям. В случае его существенных изменений высоты точек местности можно отобразить на плане с использованием стереопар космических снимков [2]. Таким образом, актуальной задачей

является проведение практических исследований целесообразности применения космических снимков сверхвысокого разрешения для обновления планов крупного масштаба.

В качестве эксперимента было выполнено обновление плана масштаба 1:5 000 с использованием архивных картографических материалов и космического снимка сверхвысокого разрешения. Исходными материалами являлись топографические карты масштаба 1:10 000 и космический снимок WorldView-2 (дата съёмки 28.04.2010) с пространственным разрешением 0,5 м на территорию Новосибирского района площадью 25 кв. км. Рельеф объекта съёмки всхолмленный с абсолютными отметками точек местности от 130 до 230 м.

Координаты опорных точек, схема расположения которых представлена на рис. 1, получены с помощью GNSS-оборудования с точностью 0,1 м.

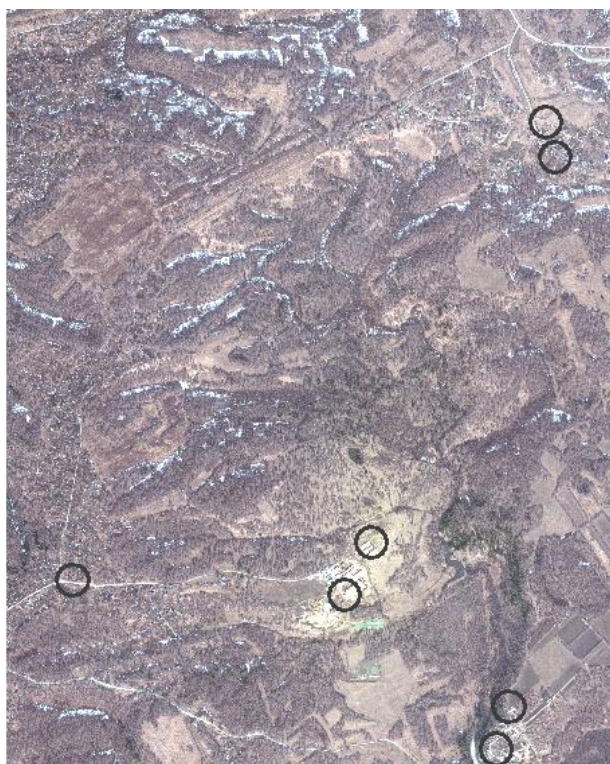


Рис. 1. Схема расположения опорных точек

Обработка снимка выполнена в программном продукте PHOTOMOD с использованием коэффициентов RPC, предоставленных вместе с изображением. Как показали исследования [2,3], для привязки космических снимков сверхвысокого разрешения с помощью метода RPC достаточно 3-4 опорных точек в пределах снимка. В данном случае для обработки снимка WorldView-2 использованы координаты 3 опорных точек. Четыре точки приняты за контрольные.

Для оценки точности выполнения привязки снимка с помощью RPC-модели вычислены расхождения геодезических координат опорных и

контрольных точек, полученных после привязки снимков и известных из полевых измерений (табл. 1).

Таблица 1. Ошибки планового положения опорных и контрольных точек

Номер точки	Ошибки планового положения, м
Опорные точки	
1	0,42
2	0,54
3	0,11
Контрольные точки	
4	0,32
5	0,60
6	0,10
7	0,54

Перепад высот точек местности в пределах обрабатываемого снимка составлял 100 м, что свидетельствовало о необходимости выполнения ортотрансформирования.

Цифровая модель рельефа, использованная для ортотрансформирования, построена по горизонталям, векторизованным через 5 м по топографической карте ($h_{сеч} = 1$ м). Для оценки точности ортотрансформирования космического снимка WorldView-2 вычислены ошибки планового положения опорных и контрольных точек (табл. 2), анализ которых показал, что полученный ортофотоплан соответствует требованиям, предъявляемым к планам масштаба 1: 5 000 [4].

Таблица 2. Результаты оценки точности ортотрансформирования космического снимка WorldView-2

Номер точки	Ошибки планового положения, м
Опорные точки	
1	0,43
2	0,54
3	0,12
Контрольные точки	
4	0,28
5	0,64
6	0,19
7	0,54

Дешифровочные свойства космических снимков сверхвысокого разрешения позволяют надёжно распознавать большинство объектов местности, которые подлежат отображению на топографических планах вплоть до масштаба 1: 2 000 [2]. Однако в процессе выполнения экспериментальных работ установлено, что достоверность дешифрирования некоторых объектов зависит от того, в какой период года получены используемые снимки. Так, на обрабатываемом снимке WorldView-2 весеннего сезона съёмки межселённой территории, где основными видами объектов являются лесные массивы и

элементы гидрографии, чётко отображаются контуры растительности, но плохо распознаются границы водных объектов, покрытые льдом, что затрудняет их нанесение на план (рис. 2).



Рис. 2. Изображение одной и той же территории на космических снимках сверхвысокого разрешения весеннего (а) и летнего (б) периодов

Для решения данной проблемы можно использовать многозональные космические снимки, имеющие не менее четырёх спектральных каналов, включая инфракрасный. Однако стоимость таких снимков несколько выше, чем панхроматических, либо полученных в естественных цветах. Поэтому в качестве альтернативы могут быть рекомендованы спутниковые изображения, предоставляемые такими картографическими сервисами, как Google Earth, Bing Maps, Яндекс Карты, Космоснимки, Геопортал Роскосмоса и др. Космические снимки, размещаемые на данных ресурсах, различаются датой и сезоном съёмки, вследствие чего появляется возможность выбора изображений, наиболее информативных для дешифрирования объектов определенного класса.

В данном эксперименте кроме снимка WorldView-2 (рис.2 а) было использовано изображение аналогичного разрешения летнего периода съёмки 2010 года с картографического сервиса Яндекс Карты (рис.2 б). Для дальнейшей совместной обработки снимков выполнена привязка изображения, полученного с помощью картографического сервиса, к ортотрансформированному космическому снимку WorldView-2. Точность привязки, характеризуемая средней квадратической ошибкой планового положения точек трансформированного снимка с сервиса Яндекс Карты, составила 0,5 размера пикселя изображения.

На следующем этапе производилась векторизация контуров лесных массивов по космическому снимку WorldView-2. Объекты гидрографии, распознавание которых было затруднительно, векторизованы по второму изображению. На рис. 3 представлен фрагмент топографического плана, полученного в результате обновления по предлагаемой методике.

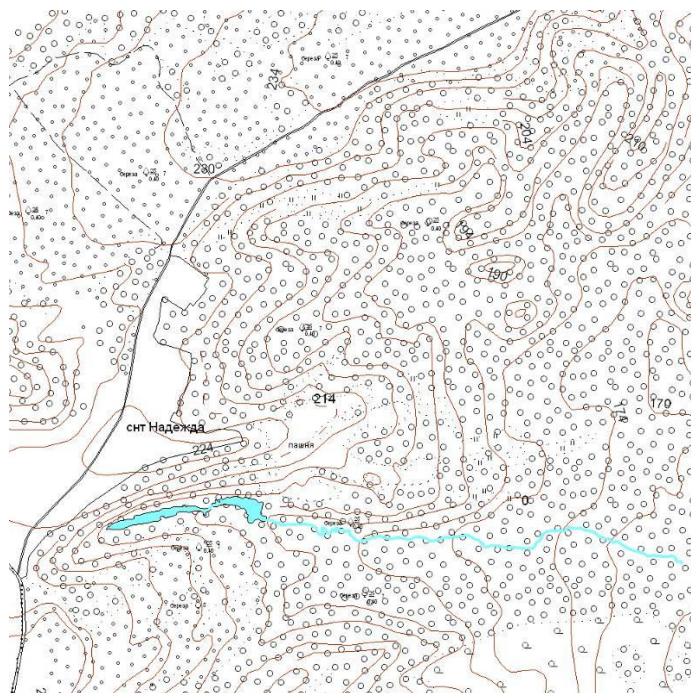


Рис. 3. Фрагмент обновленного топографического плана масштаба 1 : 5 000

Таким образом, результаты проведенных работ показали, что обновление топографических планов межселенной территории масштаба 1: 5 000 может быть выполнено по космическим снимкам сверхвысокого разрешения. Для повышения достоверности дешифрирования объектов, распознавание которых затруднено, рекомендуется использовать изображения аналогичного разрешения и года съемки, предоставляемые популярными картографическими сервисами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шавук, В.С. Теоретическое обоснование цифровой фотограмметрической системы обработки космических снимков высокого разрешения [Текст] / В.С. Шавук // Автореферат на соискание ученой степени канд. техн. наук. М.: МИИГАиК, 2009.
2. Кобзева, Е.А. Создание топографических планов масштаба 1: 2000 для разработки градостроительной документации средних и малых населенных пунктов [Текст] / Е.А. Кобзева // Геоматика. – 2010. – №3. – С. 76-79.
3. Широкова, Т.А., Чермошенцев А.Ю. Исследование точности обработки космических снимков сверхвысокого разрешения с использованием рациональных функций [Текст] / Т.А. Широкова, А.Ю. Чермошенцев // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2011. – №2. – С.99-103.
4. ГКИНП (ГНТА)-02-036-02. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов [Текст] – М.: ЦНИИГАиК, 2003. – 80 с.

© А.Ю. Чермошенцев, 2012

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ РЕАЛИСТИЧНЫХ МАКЕТНЫХ СНИМКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОЙ ГРАФИКИ

Вячеслав Николаевич Никитин

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. +7-(913)-712-37-50, e-mail vslav.nikitin@gmail.com

Анастасия Евгеньевна Сидякина

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, аспирант кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. +7-(923)-249-14-10, e-mail Anastliss@mail.ru

В статье рассмотрена методика моделирования цифровых реалистичных макетных снимков с использованием методов машинной графики.

Ключевые слова: макетные снимки, трехмерная цифровая модель местности (ЦММ), прямое трассирование лучей, методы машинной графики.

TECHNIQUE OF DIGITAL REALISTIC MOCK-UP IMAGES MODELING BY COMPUTER GRAPHICS

Vyacheslav N. Nikitin

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA) 630108, Novosibirsk, Plakhotnogo 10, PhD, associate professor of Department of Photogrammetry and Remote Sensing, tel. +7-(913)-712-37-50, e-mail: vslav.nikitin@gmail.com

Anastasia E. Sidiyakina

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA) 630108, Novosibirsk, Plakhotnogo 10, postgraduate student of Department of Photogrammetry and Remote Sensing, tel. +7-(923)-249-14-10, e-mail: Anastliss@mail.ru

The article deals technique of digital realistic mock-up images modeling by computer graphics.

Key words: mock-up images, three-dimensional digital terrain model, direct ray tracing, methods of computer graphics.

В современной фотограмметрии существует ряд вопросов, для решения которых целесообразно применять реалистичные цифровые макетные снимки: тестирование и отладка работы цифровых фотограмметрических станций (ЦФС), обучение операторов работе на цифровом стереоплоттере, оценка точности приближенных формул и т.д. К сожалению, вопросу создания таких тест-объектов в последнее время уделяется недостаточно внимания и в настоящее время не существует цифровых макетных снимков, доступных широкому кругу

пользователей, с помощью которых можно решить вышеперечисленные проблемы.

Задачу построения цифровых реалистичных макетных снимков можно решить несколькими способами:

- Используя современные геоинформационные системы (ГИС) с модулем трехмерной визуализации;
- Используя методы машинной графики.

Моделирование реалистичных изображений с помощью ГИС – это достаточно простой и доступный вариант решения задачи. Примером реализации программной части метода являются ГИС ArcGis с модулем 3D Analyst, ERDAS Imagine с модулем VirtualGIS, ГИС Панорама и др. К достоинствам данного метода можно отнести:

- Большой выбор ГИС-пакетов;
- Широкое распространение ГИС-пакетов и их доступность;
- Достаточно простая технология создания макетных снимков.

У данного метода можно выделить следующие недостатки:

- Для ускорения работы ГИС-пакетов как правило 3D модели подвергаются упрощению;
- Существуют сложности при построении 3D модели на основе земного эллипсоида (частично это проблему можно решить с помощью модуля ArcGis – ArcGlobe);
- Размер формируемого изображения ограничен техническими характеристиками используемого ПК.

Использование методов машинной графики – это более сложная методика построения реалистичных макетных снимков. Она требует от пользователя не только четкого представления всего процесса моделирования в целом, но и глубоких знаний языков программирования, что является главным недостатком методики. К достоинствам можно отнести работу в строгом соответствии с реализованным алгоритмом, что позволит создать реалистичную 3D модель с учетом всех необходимых факторов.

В данной работе предложена методика моделирования цифровых реалистичных макетных снимков методами машинной графики. По результатам планируется разработка специализированного программного продукта, реализующего данную методику.

Конечный результат (вид макетного снимка) будет зависеть от использованных исходных данных. Схема методики построения макетных снимков в общем виде представлена на рис. 1.

Факторами, определяющими сложность моделирования 3D сцены, являются:

1. Требования к реалистичности.
2. Требования к точности.

Реалистичность обеспечивается использованием ортофотоснимков высокого и сверхвысокого разрешения, моделированием теней и использованием 3D моделей объектов. Высокая точность построения 3D сцены обеспечивается учетом кривизны земной поверхности путем перехода от системы координат картографической проекции (выбор картографической проекции обуславливается исходными данными) к геоцентрической системе координат. Геометрическая модель формирования макетных снимков представлена на рис. 2.

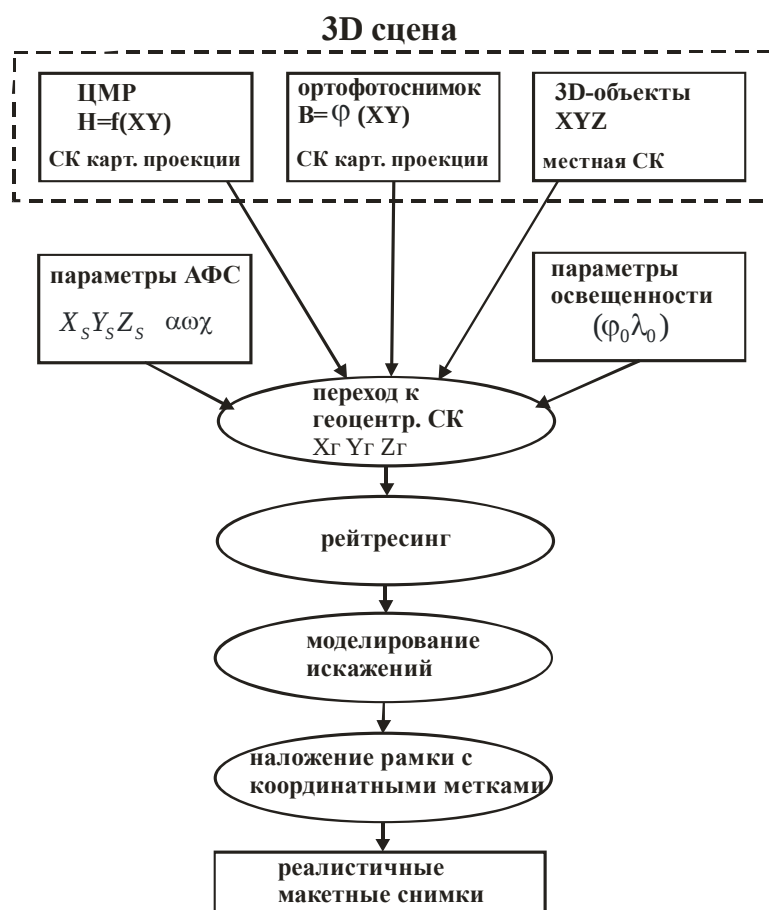


Рис. 1. Методика построения макетных снимков

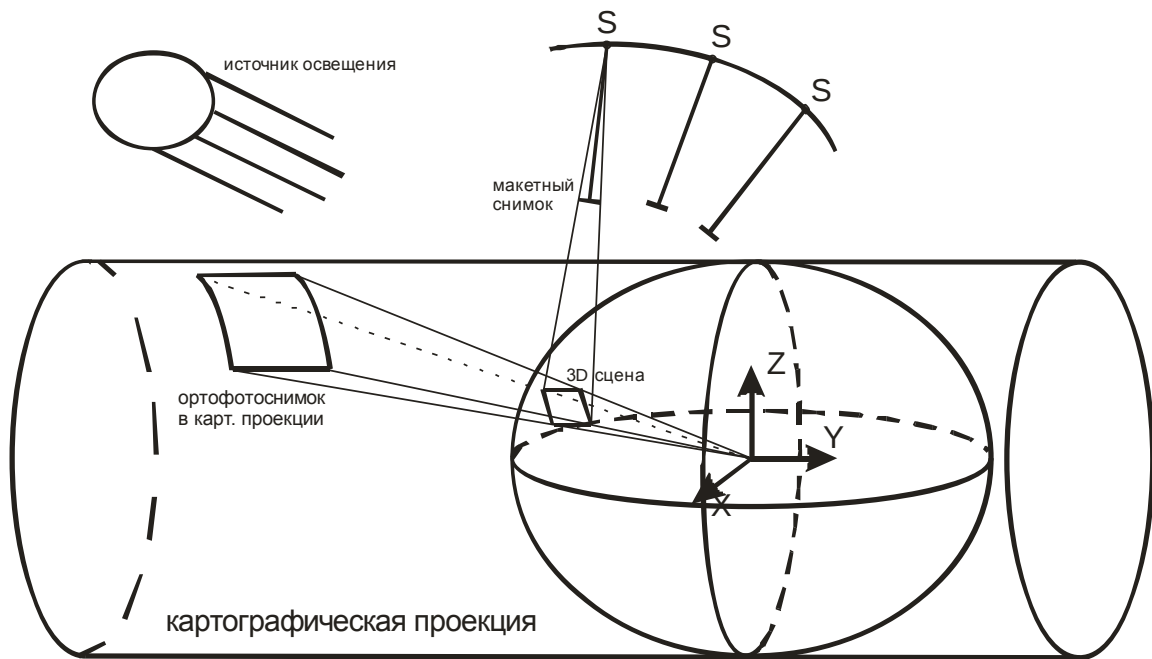


Рис. 2. Геометрическая модель формирования макетных снимков

Космические снимки и ЦМР чаще всего поставляются в системе координат какой-либо картографической проекции. Для дальнейшего использования этих данных необходимо перевести их сначала в геодезическую, а затем в геоцентрическую систему координат. Математически эта задача решается через формулы связи системы координат картографической проекции и геодезической системы координат:

$$\left. \begin{array}{l} B = f_B(XY) \\ L = f_L(XY) \end{array} \right\}, \quad (1)$$

где B - геодезическая широта

L - геодезическая долгота

Затем осуществляется переход из геодезической системы координат в геоцентрическую [1]:

$$\left. \begin{array}{l} X_{\text{геоц}} = (N + H) \cos B \cos L \\ Y_{\text{геоц}} = (N + H) \cos B \sin L \\ Z_{\text{геоц}} = [(1 - e^2)N + H] \sin L \end{array} \right\}, \quad (2)$$

где $N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}$ - малый радиус кривизны нормального сечения;

$e = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2}$ - первый эксцентриситет;

a, b - большая и малая полуоси земного эллипсоида.

Затем космический снимок необходимо наложить на ЦМР. В результате будет получена трехмерная цифровая модель местности, представляющая собой ЦМР, текстурированную ортофототрансформированным космическим снимком. Также, при необходимости, в эту сцену можно включить искусственно

смоделированные 3D объекты. Данная 3D сцена представлена в геоцентрической системе координат.

При решении задачи формирования макетных снимка (рендеринга) необходимо использовать условие коллинеарности для связи координат x , y точек на моделируемом (макетном) снимке и точек 3D сцены:

$$\left. \begin{aligned} x - x_0 &= -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y - y_0 &= -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

Также необходимо отметить, что для получения макетного снимка целесообразно использовать метод прямого трассирования лучей, т.е. последовательное проецирование 3D объектов на плоскость с использованием буфера глубины. Известно, что прямое трассирование ведет к появлению ряда ошибок (пропущенные пиксели, появление муара и резких границ) и на практике чаще применяется обратное трассирование. В нашем случае метод обратного трассирования применить невозможно в связи с тем, что ЦМР и ортофотоснимки описаны с помощью параметрических функций. Поэтому для решения поставленной задачи необходимо использовать методику борьбы с дефектами изображения, возникающими при использовании методов прямого трассирования лучей.

В процессе тестирования программного обеспечения ЦФС требуется исследовать как идеальные макетные снимки, так и макетные снимки с различного вида искажениями. Следовательно, по заданной математической модели необходимо внести требуемые искажения в создаваемые макетные снимки.

Рамку с координатными метками, имитирующую рамку реальных аэрофотоснимков можно смоделировать или создать в каком-либо графическом редакторе. Таким образом можно моделировать снимки с различным количеством, видом и расположением координатных меток.

Данная методика позволяет создавать макетные снимки с различными параметрами, для их последующего применения для решения различных фотограмметрических задач.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 51794-2008 Национальный стандарт РФ. Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек, М.: Стандартинформ, 2009.

© В.Н. Никитин, А.Е. Сидякина, 2012

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ НА МЕСТНОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДАННЫХ ЛИДАРНОЙ СЪЕМКИ

Тамара Антоновна Широкова

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, профессор кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования СГГА, тел.(913) 922-76-06

Андрей Викторович Антипов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, аспирант кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования СГГА, тел.(913) 899-77-44, e-mail: brothersa@mail.ru

Станислав Андреевич Арбузов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, инженер кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования СГГА, тел.(923) 188-42-49, e-mail: Stan_i_slav84@mail.ru

В статье представлена методика определения изменений, произошедших на местности, с использованием данных воздушного лазерного сканирования. Выполнены экспериментальные исследования предложенной методики и приведены их результаты.

Ключевые слова: точки лазерных отражений, цифровая модель поверхности территории, выявление изменений.

AREA CHANGE DETECTION USING LASER SCANNING DATA

Tamara A. Shirokova

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., a professor, department of photogrammetry and remote sensing SSGA, tel. (913)922-76-06

Andrei V. Antipov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., a postgraduate student, department of photogrammetry and remote sensing SSGA, tel.(913)899-77-44, e-mail: brothersa@mail.ru

Stanislav A. Arbuzov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., an engineer, department of photogrammetry and remote sensing SSGA, tel.(923)188-42-49, e-mail: Stan_i_slav84@mail.ru

Method change detection using airborne laser scan data is presented in the article. Experimental investigations of the method are fulfilled and the results set out.

Key words: points laser reflection, digital surface model, change detection.

Современный город это динамически развивающаяся система. На его территории постоянно строятся новые дома, заводы и другие объекты, сносятся старые постройки, изменяется количество зеленых насаждений и т. д.

Среди многих задач, связанных с управлением территориями, можно выделить обновление генерального плана, мониторинг застройки и зеленых насаждений. Для их решения необходимо использовать методы и алгоритмы, позволяющие оперативно и достоверно выявить изменения, происходящие на местности.

В настоящее время для определения изменений на местности используются алгоритмы, в основе которых лежит анализ спектральных яркостей объектов на разновременных изображениях [1,2]. На достоверность результатов, полученных с помощью таких алгоритмов, влияет изменение отражательных свойств объектов в зависимости от влажности, освещенности, модели сенсора, а также от особенностей эксплуатации антропогенных объектов. Этим недостатком лишена методика выявления изменений на основе цифровых моделей поверхностей (ЦМП) территории.

Сущность предлагаемой методики определения изменений на местности заключается в следующем. На разные даты строятся две цифровые модели поверхностей одной и той же территории. Изменения определяются как разности высот (ΔZ) соответственных точек моделей. В данном случае соответственными будут являться точки разновременных моделей поверхностей, имеющие одинаковые плановые координаты X и Y .

Цифровые модели поверхностей можно создать по данным наземного и воздушного лазерного сканирования, аэрофото и космической съемок. Первый способ является дорогостоящим и требует больших временных затрат, если речь идет о мониторинге больших территорий. Использование материалов аэрофотосъемки связано с необходимостью выполнения трудоёмкого процесса фототриангуляции. Кроме того, для построения ЦМП по аэрофотоснимкам, как и космическим снимкам, требуется определение координат большого числа пикетов, принадлежащих земной поверхности и объектам ситуации.

Воздушное лазерное сканирование (ВЛС) является наиболее перспективным методом сбора пространственной информации для создания цифровых моделей поверхности больших территорий, поскольку лидары обеспечивают получение лазерно-локационных данных с плотностью около 25 точек / м² и точностью определения высот порядка 10 см [3], что является ключевым фактором для признания этого метода наиболее эффективным для построения ЦМП с высокой детальностью, точностью и оперативностью. Главной особенностью лидарных данных является то, что они представляют собой трехмерное точечное изображение местности (рис. 1), поэтому точки лазерных отражений (ТЛО) могут быть использованы в качестве узлов создаваемой цифровой модели поверхности.

Для выявления изменений территории с использованием данных воздушного лазерного сканирования разработана методика, основные этапы которой представлены на рис. 2.



Рис. 1. Точечная модель, полученная в результате лидарной съемки

При определении изменений на местности на основе разностной ЦМП, построенной по материалам повторных лазерно-локационных съемок, следует анализировать расхождения ΔZ соответственных точек объектов, превышающие двойные ошибки определения высот лазерных точек, так как только они однозначно несут в себе полезную информацию.

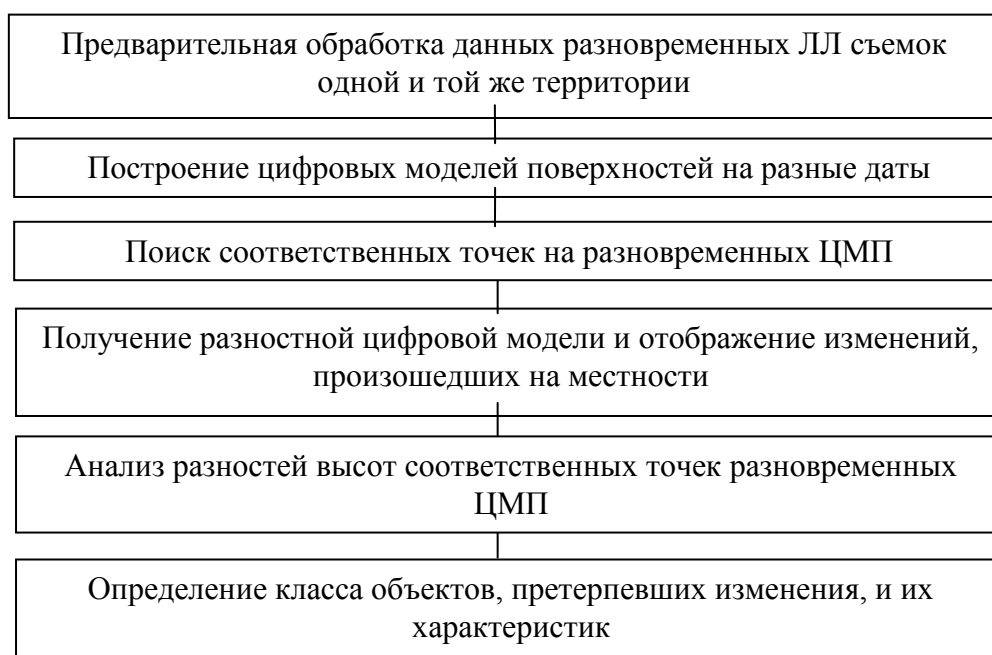


Рис. 2. Методика выявления изменений на основе данных лидарной съемки

Данные лидарной съемки, полученные на разные даты, могут отличаться плотностью точек и точностью определения их координат (рис. 3), поэтому узлы создаваемых разновременных ЦМП не будут совпадать. Высоты соответственных точек двух поверхностей могут быть определены на основе интерполирующих или аппроксимирующих функций, реализованных в большинстве современных программных продуктов для обработки данных воздушного лазерного сканирования.

Также для выявления изменений можно использовать цифровые модели поверхностей территории, построенные на разные даты, в виде матриц высот, что в значительной мере упрощает процесс получения и анализа разностной ЦМП.

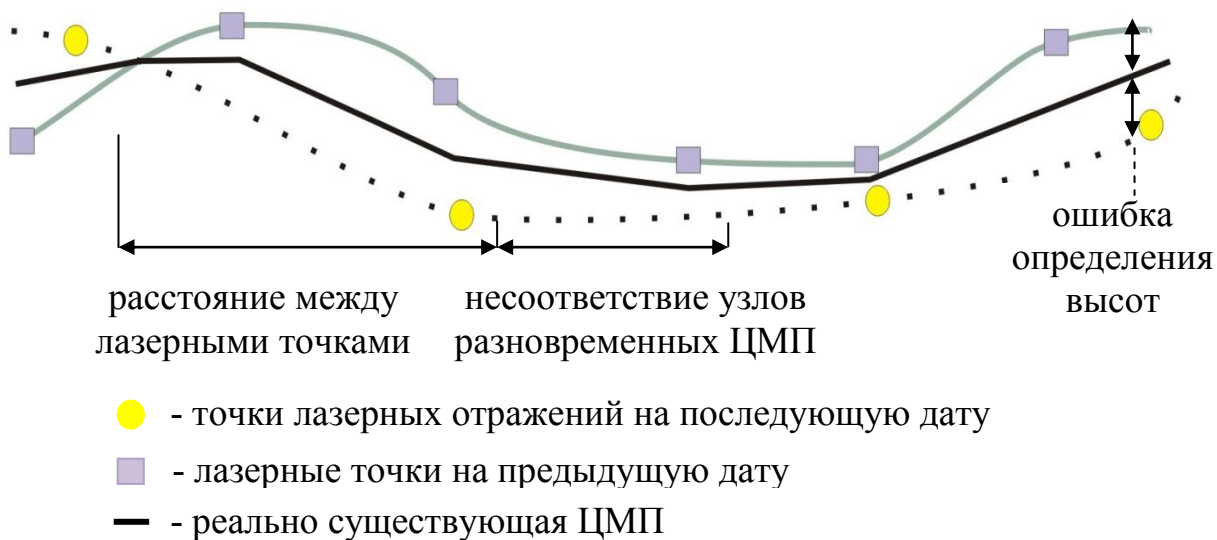


Рис. 3. Особенности разновременных лидарных данных

Для проведения экспериментальных исследований предложенной методики использовались данные воздушного лазерного сканирования территорий г. Омска и г. Ниагара-Фолс. Площадь участков каждого объекта съемки, на которых выявлялись изменения, составляла 1 км². Для обработки данных лидарной съемки использовался программный продукт TerraSolid.

Поскольку данные воздушного лазерного сканирования исследуемых территорий городов на разные даты отсутствовали, для каждого участка съемки были смоделированы: снос 3 зданий и вырубку 10 одиночных деревьев, отличающихся размерами и конфигурацией. Для этого из массива точек лазерных отражений исключены точки, принадлежащие отдельно стоящим деревьям и зданиям (рис. 4).

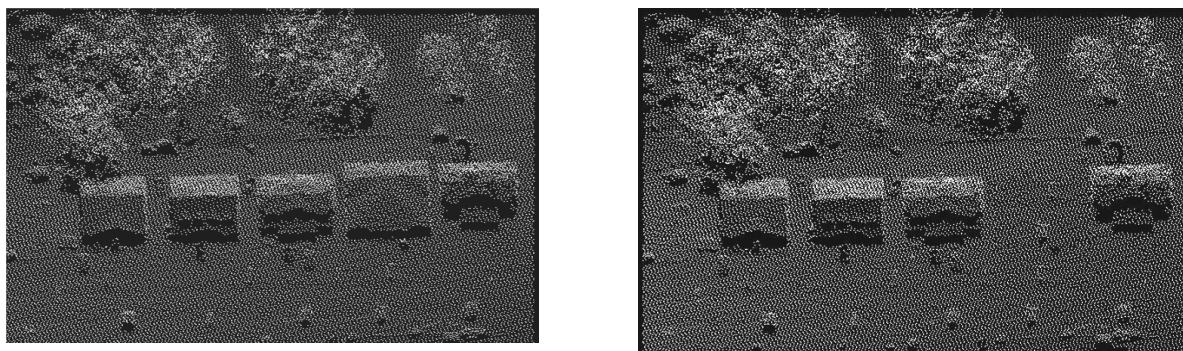


Рис. 4. Результат моделирования сноса здания:

а) исходный массив лазерных точек; б) массив лазерно-локационных точек после моделирования удаления дома

Для определения изменений на местности на этапе предварительной обработки разновременных данных ВЛС исключались грубые ошибки измерений. В процессе этой операции из массивов ТЛО были удалены лазерные точки, находящиеся значительно выше и значительно ниже территории съемки (рис. 5). Затем исключены отдельные точки, отстоящие от объектов ситуации и земной поверхности на расстоянии более 1 м (данные точки образуются в результате переотражения зондирующего сигнала) и точки, принадлежащие «временным» объектам (машинам, пешеходам и др.).

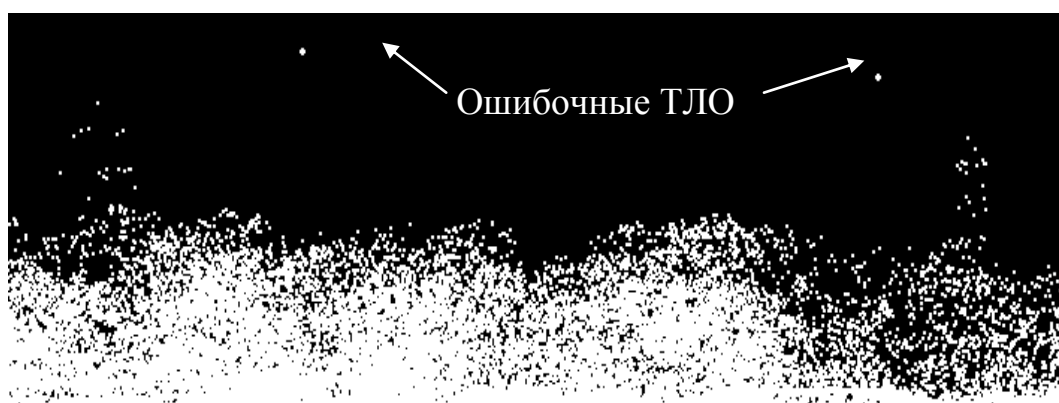
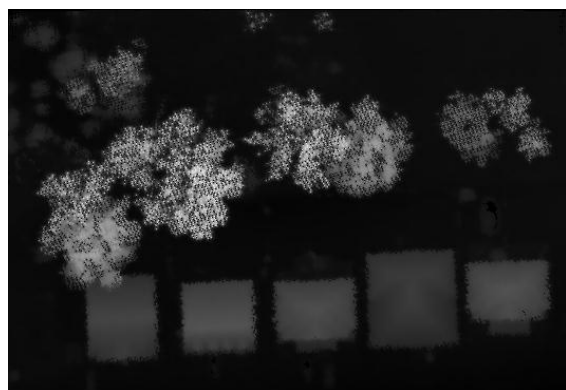
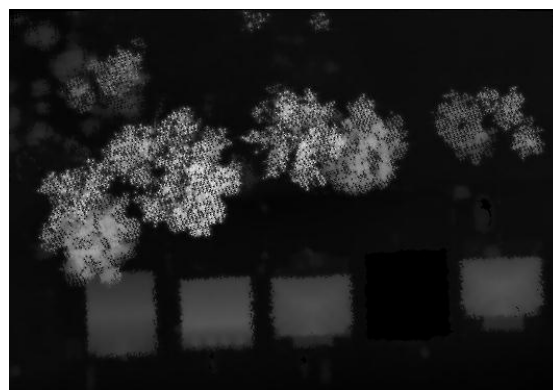


Рис. 5. Массив лазерных точек с наличием ошибочных измерений

На втором этапе на основе ТЛО были построены по две модели поверхностей каждого участка съемки, отражающие ситуацию на разные даты (рис. 6), и сохранены в виде растра в формате GEOTIFF (Gray Scale).



a)



b)

Рис. 6. Цифровые модели поверхностей территории, построенные:

a) по исходному массиву лазерных точек; b) по массиву лазерных точек после моделирования сноса здания

Для установления факта наличия изменений на местности на следующем этапе разработанной методики производилось вычитание ЦМП, созданной на предыдущую дату, из ЦМП, построенной на последующую дату, и

автоматическое выделение планового положения объектов, претерпевших изменения, в виде контуров. Затем выполнялся анализ полученных разностей высот (ΔZ) соответственных точек с целью определения вида изменений (исчезновение объекта, появление нового или изменение высоты существующего). Если разность высот будет больше нуля, это свидетельствует о появлении нового объекта, если ΔZ меньше нуля, значит существовавший ранее объект был удален. При мониторинге территорий могут встречаться случаи бурного роста растительности или надстройки дополнительного этажа строения. В данной ситуации разность высот соответственных точек полученных разновременных моделей поверхностей будет положительна, однако это не означает появление нового объекта, а указывает на изменение (увеличение высоты) имеющегося на предыдущую дату. Если лидарная съемка выполнялась при наличии сильного ветра, то величины ΔZ , вычисленные по разновременным данным ВЛС, из-за наклона деревьев могут быть как больше нуля, так и меньше нуля. Для разрешения сложившихся неопределенностей в выявлении изменений на местности осуществляется переход к следующему этапу методики.

На последнем этапе с помощью выделенных контуров, разностей высот соответственных точек и разновременных точечных моделей устанавливался вид изменений на местности и определялся класс интересующих объектов (растительность, сооружение и др.). Для этого контуры подгружались к данным воздушного лазерного сканирования, полученным на различные даты, и в пределах отмеченных областей выполнялось сечение массива лазерных точек вертикальными плоскостями. Затем производился визуальный анализ разновременных данных, на основе которого установлено, что объекты (здания и деревья), претерпевшие изменения, были снесены.

В настоящее время зачастую одновременно с воздушным лазерным сканированием производится аэрофотосъемка. Наличие цифровых снимков и возможность их совместной обработки с лидарными данными в ПП TerraSolid позволит упростить и ускорить процессы установления вида изменений, произошедших на местности, и определения класса объектов, претерпевших изменения.

Таким образом, в результате экспериментальных исследований, выполненных на основе данных ВЛС, были выявлены все изменения на местности (удаленные объекты), что свидетельствует о работоспособности разработанной методики. Кроме того, установлен тип этих объектов и определены площадь строений, высота зданий и растительности, а также диаметр крон деревьев на средней высоте ствола (таблица).

Новые модели воздушных лазерных сканеров позволяют получать массив лазерных точек с плотностью не менее 1 точки на м^2 , которой достаточно для установления факта наличия изменений на местности в пределах площади не менее 1 м^2 . Достоверность определения количественных характеристик объектов, претерпевших изменения, зависит от плотности точек лазерных отражений, которая, как показывает практический опыт обработки лидарных

данных, должна составлять не менее 5 лазерно-локационных точек в пределах 1 м².

Таблица. Характеристики объектов, претерпевших изменения

Характеристики объектов	г. Омск	г. Ниагара-Фолс
Здания (высота, м / площадь, м ²)	17,42 / 848,45	5,91 / 311,54
	17,65 / 1290,37	5,05 / 119,91
	13,00 / 1323,65	4,67 / 126,72
Деревья (высота, м / диаметр кроны, м)	17,91 / 5,15	26,75 / 15,08
	14,55 / 6,14	16,06 / 7,11
	8,64 / 3,72	19,80 / 15,19
	14,52 / 3,67	9,44 / 3,24
	16,83 / 5,99	18,42 / 12,25
	15,94 / 6,36	17,98 / 13,14
	6,92 / 3,71	10,69 / 8,98
	11,86 / 6,80	9,21 / 8,65
	18,17 / 4,04	15,46 / 7,10
	14,22 / 5,28	9,51 / 4,84

Оценка точности определения площадей зданий на территории г. Омска выполнена по координатам 12 контрольных точек, полученным из полевых геодезических работ. Средняя ошибка не превышает 3% от площади строений.

Таким образом, использование разновременных лидарных данных, полученных с высокой точностью, плотностью и оперативностью, позволяет эффективно выявлять изменения, произошедшие на территории, определять количественные характеристики объектов, претерпевших изменения (положение, высоту, площадь, объем), а также устанавливать тип этих объектов.

Достоинствами предложенной методики являются:

- Использование детальной трёхмерной точечной модели;
- Отсутствие трудоемких камеральных процессов благодаря высокой степени автоматизации выполнения всех этапов обработки данных воздушного лазерного сканирования в одном программном продукте;
- Возможность определения количественных характеристик объектов, претерпевших изменения, в том числе динамики роста зеленых насаждений при их мониторинге;
- Использование цифровых снимков, получаемых при лидарной съемке, позволит повысить достоверность и производительность определения качественных характеристик объектов, изменение которых выявлено по данным воздушного лазерного сканирования.

Таким образом, использование разновременных цифровых моделей поверхностей территорий, созданных по данным лазерно-локационной съемки, является одним из наиболее перспективных методов решения задач оперативного мониторинга, связанных с выявлением изменений, произошедших на местности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. P. Coppin, I. Jonckheere, K. Nackaerts, B. Muys Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review / P. Coppin, I. Jonckheere, K. Nackaerts, B. Muys // Int. J. Remote Sensing. – 2004. – Vol. 25. – № 9. – PP. 1565–1596.
2. D. Lu, P. Mausel, E. Brondi'Zio, E. Moran Change detection techniques / D. Lu, P. Mausel, E. Brondi'Zio, E. Moran // Int. J. Remote Sensing. – 2003. – Vol. 25. – №12. – PP. 2365–2407.
3. Airborne LIDAR [Электронный ресурс] / Официальный сайт компании Leica Geosystems - Режим доступа:http://www.leica-geosystems.com/en/Airborne-LIDAR_86814.htm Загл. с экрана.

© Т.А. Широкова, А.В. Антипов, С.А. Арбузов, 2012

ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДИКИ КАЛИБРОВКИ СНИМКОВ НА РАВНИННОМ ИСПЫТАТЕЛЬНОМ ПОЛИГОНЕ

Андрей Леонидович Быков

ООО “ЛАГ”, 644008, г. Омск, ул. Сибакловская, 4, инженер-геодезист, тел. (913) 9798280, e-mail: abu-ll@yandex.ru

Василий Леонидович Быков

ООО “ЛАГ”, 644008, г. Омск, ул. Сибакловская, 4, директор, кандидат технических наук, доцент, тел. (913) 9798288, e-mail: bvl55@yandex.ru

Леонид Васильевич Быков

ООО “ЛАГ”, 644008, г. Омск, ул. Сибакловская, 4, заместитель директора, кандидат технических наук, доцент, тел. (913) 9709701, e-mail: blv-55@yandex.ru

Известно, что для полной полевой калибровки аэрофотоаппаратов необходим горный полигон со значительными превышениями между опорными точками. Калибровка на равнинном полигоне возможна, если известны координаты центра фотографирования снимка. Существует, по крайней мере, два способа такой калибровки. Они получили названия: «двухъярусный способ» и «однойярусный способ» [2].

Ключевые слова: калибровка, равнинный испытательный полигон, координаты центров фотографирования, элементы внутреннего ориентирования (ЭВО), дисторсия, масштаб, снимок.

RESEARCH METHODOLOGY OF CALIBRATION IMAGES ON THE FLAT TEST SITE

Andrey L. Bykov

ООО “ЛАГ”, Omsk, 644008 Sibakovskaya st. 4, engineer-geodesist, tel. (913)9798280, e-mail: abu-ll@yandex.ru

Vasiliy L. Bykov

ООО “ЛАГ”, Omsk, 644008 Sibakovskaya st. 4, director, c.t.s., lecturer, tel. (913)9798288, e-mail:bvl55@yandex.ru

Leonid V. Bykov

ООО “ЛАГ”, Omsk, 644008 Sibakovskaya st. 4, vice director, c.t.s., lecturer, tel. (913)9709701, e-mail:blv-55@yandex.ru

It is known, that for a full field calibration of aerial cameras need a mountain range with a significant excess between reference points. Calibration on the flat range is possible if we know coordinates of centers photographing images. There are two ways of calibration. They were called "one-tier method" and "two-tier method"[2].

Key words: flat test site, coordinates of centers photographing images, elements of interior orientation (EIO), distortion, scale image.

Наиболее строгим является однорусный способ, сущность которого заключается в решении обратных пространственных фотограмметрических засечек с вычислением угловых элементов внешнего ориентирования, элементов внутреннего ориентирования снимков и параметров фотограмметрической дисторсии. Координаты центров фотографирования должны быть определены независимо, например, по результатам спутникового позиционирования.

В 2007 – 2011 году было выполнено исследование однорусного способа калибровки камер по снимкам равнинного испытательного полигона. Целью исследования было:

Оценить точность определения элементов внутреннего ориентирования по снимкам нескольких маршрутов и различных масштабов.

Оценить эффективность калибровки по результатам фототриангуляционных построений.

Полигон расположен на юго-западе центральной части Омской области, в Марьяновском районе на территории аэродрома Омского аэроклуба РОСТО. Участок имеет квадратную форму размером 1 кв. км. Через каждые 50 м на полигоне закреплены маркированные опорные точки. Для определения координат центров фотографирования и координат опорных точек созданы две базовые станции, положение которых определено в геоцентрической системе координат WGS – 84. Для тестирования спутниковых приемников на территории полигона разбит эталонный базис. Поверкам приборов уделяется особое внимание, поскольку от точности спутниковых определений во многом зависит успех калибровки съемочных камер на равнинном полигоне.

Калибровочный полигон состоит из 441 точки, каждая из которых закреплена металлическим штырем длиной 1 метр и замаркирована бетонной площадкой диаметром 25 см. Среднее превышение между точками полигона составляет 2 метра. Такие параметры полигона позволяют калибровать широкоформатные АФА типа RC-30, DMC, UltraCam. В то же время, обеспечивается достаточная густота опорных точек для исследования малоформатных и среднеформатных цифровых фотоаппаратов.

Экспериментальная аэрофотосъемка полигона производилась с самолета АН-30 аналоговой камерой RC-30, с фокусным расстоянием 150 мм, на черно - белую фото пленку. Съемка выполнялась в масштабах 1:3000 и 1:6000. Маршруты прокладывались в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Схема расположения маршрутов показана на рис. 1.



Рис. 1. Схема аэрофотосъемки полигона

Аэрофотоснимки сканировались на фотограмметрическом сканере с разрешающей способностью 12 мкм. Фотограмметрическая обработка снимков выполнялась по специальной составленной программе, реализующей одноярусный способ калибровки снимков.

В таблице 2 приведены результаты определения элементов внутреннего ориентирования и оценки точности отдельно по всем снимкам каждого масштаба. Оценка точности выполнялась по отклонениям значений элементов внутреннего ориентирования от среднего значения.

Таблица 1. Результаты определения элементов внутреннего ориентирования по снимкам

Номер снимка	f	x_0	y_0
Масштаб 1:3000			
6473	153.811	-0.122	0.017
6474	153.822	-0.094	0.044
6475	153.827	-0.068	0.058
6478	153.832	-0.084	0.024
6479	153.828	-0.068	0.031
6480	153.829	-0.083	0.038
Средние значения	153.825	-0.087	0.035
СКО	0.007	0.018	0.013
Масштаб 1:6000			
Номер снимка	f	x_0	y_0
2934	153.874	-0.123	0.128
2935	153.856	-0.110	0.147
2936	153.880	-0.101	0.145
2940	153.867	-0.139	0.075
2941	153.852	-0.158	0.072
2942	153.826	-0.189	0.093
Средние значения	153.859	-0.137	0.110
СКО	0.018	0.030	0.031

Анализ данных, приведенных в таблице 1, показывает, что результаты вычислений для снимков разных масштабов существенно отличаются. Наблюдается сходимость результатов по снимкам одного маршрута. Существует мнение, что при калибровке следует использовать снимки с одинаковым

расположением опорных точек. Так проф. И.Т. Антипов подчеркивал, что в реальных условиях съемки испытательного полигона маловероятна полная идентичность схем обратных засечек для всех участвующих в калибровке снимков. При переходе от маршрута к маршруту изображение полигона на аэроснимках меняет свое положение и, соответственно, на каждом снимке возникает своя, уникальная, отличная от остальных, связка проектирующих лучей. Отличие это, хоть и незначительное, может оказывать определенное влияние на результаты калибровки, поскольку решение системы уравнений для таких неодинаковых схем обратной засечки будет неустойчивым, меняющимся при переходе от одной группы снимков к другой [1]. Подтверждение этих слов можно видеть в таблице 2, где приводятся погрешности определения элементов внутреннего ориентирования по маршрутам одного масштаба и одного направления, а также по снимкам с приблизительно одинаковым расположением опорных точек.

Таблица 2. Погрешности определения элементов внутреннего ориентирования по маршрутам одного масштаба и одного направления

Условия съемки	Mf	Mx_0	My_0
Масштаб 1:3000			
Снимки первого маршрута	0.002	0.007	0.006
Снимки второго маршрута	0.007	0.022	0.017
Крайние снимки	0.008	0.020	0.016
Средние снимки	0.003	0.013	0.038
Масштаб 1:6000			
Снимки первого маршрута	0.010	0.009	0.009
Снимки второго маршрута	0.017	0.021	0.009
Крайние снимки	0.021	0.032	0.028
Средние снимки	0.002	0.024	0.038

По снимкам одного маршрута показатели несколько лучше, но в целом погрешности элементов внутреннего ориентирования остаются значительными.

Причиной существенных расхождений параметров внутреннего ориентирования могла быть дисторсия объектива, а именно неравномерное ее распределение по полю снимка. Построение функции, описывающей дисторсию, выполнялось по модели Брауна-Конради, используемой в ЦФС «РНОТОМОД» (1), и по полиному третьей степени общего вида (2).

$$\left. \begin{aligned} x' &= x + K_1 x r^2 + K_2 x r^4 + K_3 x r^6 + P_1 (2x^2 + r^2) + 2P_2 xy \\ y' &= y + K_1 y r^2 + K_2 y r^4 + K_3 y r^6 + P_2 (2y^2 + r^2) + 2P_1 xy \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где x', y' - исправленные координаты, $\bar{x}, \bar{y}$ – измеренные координаты, r – удаление точки от главной точки снимка, K_1, K_2, K_3, P_1, P_2 – коэффициенты полинома.

$$\left. \begin{aligned} \delta_x &= a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 xy + a_5 y^2 + a_6 x^3 + a_7 x^2 y + a_8 xy^2 + a_9 y^3 \\ \delta_y &= b_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 x^2 + b_4 xy + b_5 y^2 + b_6 x^3 + b_7 x^2 y + b_8 xy^2 + b_9 y^3 \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9$ - коэффициенты полинома, δ_x, δ_y - поправки в координаты точек, учитывающие влияние дисторсии на снимке.

Сравнение остаточных расхождений координат опорных точек на снимке после определения элементов внешнего и внутреннего ориентирования снимков с учетом и без учета влияния дисторсии дает основание утверждать, что дисторсия на исследуемых снимках практически отсутствует. Средние квадратические отклонения координат опорных точек на снимке с построением и без построения модели дисторсии отличаются на 0.5 – 1.0 мкм.

Оценка эффективности калибровки снимков выполнялась путем построения маршрутов фототриангуляции по снимкам испытательного полигона в ЦФС «PHOTOMOD». В качестве опорных точек выбиралось девять точек и координаты центров фотографирования. Остальные точки полигона использовались для контроля. В качестве элементов внутреннего ориентирования использовались паспортные значения и элементы, полученные при калибровке камеры по снимкам. Построение сети выполнялось способом связок. Сравнивались остаточные расхождения координат опорных, связующих и контрольных точек и центров фотографирования. Априорные погрешности опорных точек и координат центров фотографирования, используемые для вычисления весовых коэффициентов, выбирались, соответственно, 0.05 и 0.10 м. Результаты оценки точности приведены в таблице 3.

Таблица 3. Оценка точности построения фототриангуляционных сетей

Оценка точности	Масштаб 1 : 6000	
	По паспортным данным	По калибровочным данным
По опорным точкам. в плане (м)	0.061	0.029
по высоте (м)	0.049	0.018
По связующим точкам. в плане (м)	0.072	0.029
по высоте (м)	0.086	0.039
По контрольным точкам в плане (м)	0.085	0.041
по высоте (м)	0.132	0.026
По центрам фотографирования в плане (м)	0.166	0.070
по высоте (м)	0.202	0.057

Погрешности фототриангуляционных сетей, построенных с учетом калибровочных и паспортных значений элементов внутреннего ориентирования, показывают двух – трехкратное повышение точности результатов, полученных по данным калибровки. Однако, следует помнить о геометрических особенностях калибровки на равнинных полигонах, где роль высотного базиса выполняют опорные точки и центры фотографирования. Положительный результат калибровки может быть получен при наличии

постоянных ошибок координат центров фотографирования. Поэтому калибровку в условиях равнинной местности следует выполнять на проверенных полигонах, где обеспечивается оперативная поверка приборов, надежное определение координат базовых станций и координат центров фотографирования.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

Погрешности определения элементов внутреннего ориентирования зависят от масштаба аэросъемки, направления маршрутов, а также расположения опорных точек по полю снимка. Поэтому калибровку следует выполнять по снимкам рабочего масштаба планируемой аэрофотосъемки.

Параметры калибровки, полученные на равнинном полигоне, зависят от погрешностей координат центров фотографирования. В связи с этим при калибровке камер необходимо дополнительно исследовать спутниковые приемники, обеспечивающие определение координат центров фотографирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антипов И.Т. Математические основы пространственной аналитической фототриангуляции. – М.: «Картгеоцентр» – «Геодезиздат», 2001. 256 с.: ил.
2. Быков В.Л. Полевая калибровка снимков с использованием средств спутникового позиционирования // Геодезия и картография – 2007.- №9. - С. 39 - 43.

© А.Л. Быков, В.Л. Быков, Л.В. Быков, 2012

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ФОТОАППАРАТА ПО НАКЛОННЫМ СНИМКАМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДИАЛЬНЫХ МИР

Вячеслав Николаевич Никитин

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования СГГА, тел. +7-913-712-37-50, e-mail: vslav.nikitin@gmail.com

Андрей Владимирович Семенцов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, аспирант кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования СГГА, тел. +7-960-779-06-79, e-mail: andsemencov@mail.ru

При решении фотограмметрических задач по цифровым снимкам важно знать их разрешение, так как от разрешения снимков зависит точность выполняемых измерений.

В работе предложена методика, расширяющая возможности применения радиальных мир для определения разрешения и приведены результаты исследования двух цифровых фотоаппаратов разных классов.

Ключевые слова: разрешающая способность, радиальная мира, кружок нерезкости.

DEFINITION OF RESOLUTION OF THE CAMERA FOR OBLIQUE IMAGES USING RADIAL TEST TARGETS

Vyacheslav N. Nikitin

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph.D., Assoc. Prof. of department of photogrammetry and remote sensing SSGA, tel. +7-913-712-37-50, e-mail: vslav.nikitin@gmail.com

Andrey V. Sementsov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., a post-graduate student of department of photogrammetry and remote sensing SSGA, tel. +7-960-779-06-79, e-mail: andsemencov@mail.ru

When solving photogrammetric problems for digital images is important to know their resolution, since the accuracy of the measurements depends on the resolution of the image.

In the article proposed a method for extending the capabilities of the radial test target for determining the resolution and the results of investigation for two digital cameras of different classes.

Key words: resolution, radial test target, circle of confusion.

В настоящее время цифровые фотоаппараты широко применяются в аэрофотосъемке, наземной съемке, в различных областях фотограмметрии и дистанционного зондирования.

Для решения поставленных задач важно знать реальное разрешение полученных снимков для выполнения точных измерений по ним. Разрешение

снимков складывается из разрешения объектива и разрешения светочувствительной матрицы.

Разрешающая способность объектива – это способность создавать отдельные изображения двух близко расположенных точек объекта. Её оценивают по наименьшему расстоянию между двумя точками, при котором их видимые изображения еще не сливаются.

Разрешение матриц — основного элемента фотосенсора — зависит от их типа, площади и плотности фоточувствительных элементов на единицу поверхности. Оно нелинейно зависит от светочувствительности матрицы и от способности фотодатчика в зависимости от конкретной технологии его изготовления и применения обеспечивать минимальный уровень шума.

Одним из способов определения разрешающей способности снимка является использование специально создаваемых тест-объектов – мир. Мира служит для количественного определения разрешающей способности и функции передачи модуляции оптических приборов (например, объективов) и светочувствительного элемента (светочувствительной матрицы или плёнки).

Радиальная мира (рис. 1) представляет собой рисунок, образованный тёмными и светлыми секторами круга. Увеличение количества секторов повышает точность измерения разрешения, но приводит к увеличению размера мира.

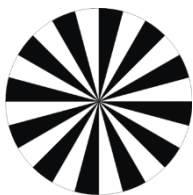


Рис. 1. Радиальная мира с 12 парами чёрно-белых секторов

Существующие методики определения разрешения по радиальным мирам предполагают, что плоскость мира параллельна плоскости снимка. Однако часто при фотографировании тест-объекта это условие не выполняется, что приводит к неконтролируемому падению точности.

Из-за того, что снимки относительно тест-объекта получаются наклонными, происходит перспективное искажение мира. Визуально это проявляется сжатием изображения мира, как условно показано на рис. 2.

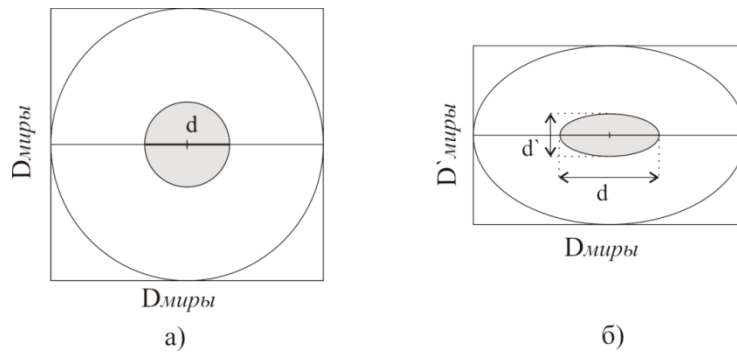


Рис. 2. Условное представление мира на:

а) снимке, параллельном мире; б) наклонном снимке

где $D_{миры}$, $D'_{миры}$ – большой и малый диаметр эллипса мира соответственно;

d , d' – большой и малый диаметр кружка нерезкости мира соответственно.

Как видно, в данном примере происходит сжатие мира по одной из осей – изображение мира приобретает форму эллипса.

Для идеального случая (рисунок 2.а) разрешающая способность фотоаппарата определяется по формуле:

$$R = \frac{\pi d}{N}, \quad (1)$$

где N – число пар штрихов (постоянная мира).

Здесь под термином «кружок нерезкости» понимается центральная зона мира, в которой радиальные штрихи невозможно отделить друг от друга.

Для расчёта разрешающей способности по наклонному изображению мира необходимо учесть коэффициент сжатия:

$$k = \frac{D_{миры}}{D'_{миры}}, \quad (2)$$

Тогда разрешающая способность фотоаппарата вдоль большой и малой оси мира соответственно, составит:

$$R_{\phi} = \frac{\pi d}{kN}, \quad (3)$$

$$R_m = \frac{\pi d' k}{N}, \quad (4)$$

Если формулы определения разрешающей способности фотоаппарата по обеим осям (R_{ϕ} и R_m) перемножить, то можно избавиться от коэффициента сжатия мира:

$$R_{\phi} R_m = \frac{\pi^2 d d'}{N^2}, \quad (5)$$

Таким образом, разрешающая способность по наклонному изображению миры будет определяться по формуле:

$$R = \sqrt{\frac{\pi^2 dd'}{N^2}} = \frac{\pi}{N} \sqrt{dd'}. \quad (6)$$

То есть для определения разрешения по наклонной мире достаточно знать постоянную миры и измерить большой и малый радиусы кружка нерезкости в её центре.

Важно отметить, что в настоящее время, в связи широким распространением цифровых фотоаппаратов, изменилась трактовка понятия «линия миры». Пару из черной и белой полос стали считать за две линии, в отличие от ГОСТ 13.1.701-95 «Репрография. Микрография. Тест-объекты для контроля качества микроизображения. Типы. Методы контроля», где линия – это одна чёрная линия, без учёта пробелов между ними, потому в проведённом исследовании постоянная миры удваивалась.

Для проведения исследования использовались два цифровых фотоаппарата разного класса:

а) Любительский фотоаппарат Samsung D860, обладающий матрицей CCD 1/2,5" и разрешением 8,1 млн. эффективных пикселей.

б) Полупрофессиональный фотоаппарат Canon EOS 500D с объективом EFS 18-55 IS и матрицей APS-C CMOS (22,3 x 14,9 мм) с разрешением 15,1 Мп.

В процессе исследований выполнялось фотографирование тест-объекта, содержащего 24 радиальные миры (рис. 3):

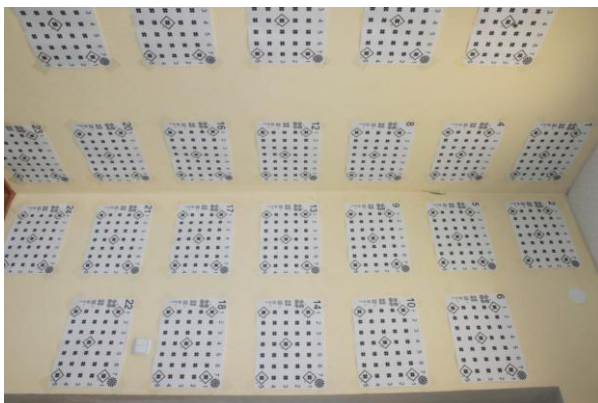


Рис. 3. Тест-объект для исследований

Измерения диаметров кружка нерезкости каждой миры проводились в программе MonoSDS (рис. 4).

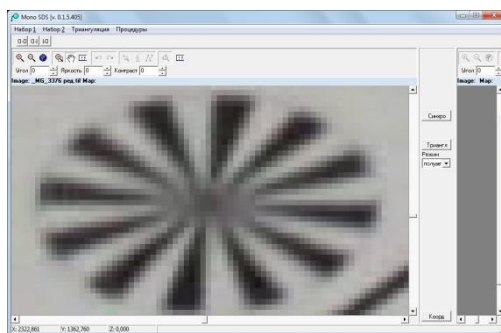


Рис. 4. Изображение радиальной мира в окне программы MonoSDS

Для фотоаппарата Samsung D860 разрешающая способность по полю снимка менялась в диапазоне от 2,63 до 3,73 пикселей. Среднее значение разрешающей способности составило 3,07 пикселя.

Для визуализации полученных данных необходимо знать положение мир на снимке (x, y), для чего все миры были замаркированы в программе MonoSDS. Примеры полученных данных представлены в таблице 1:

Таблица 1. Примеры полученных результатов для фотоаппарата Samsung 860

№ миры	x	y	R
1	169	1131	3,009674
5	506	1588	2,854855
24	3043	1595	3,727554

Интерполяция разрешающей способности фотоаппарата по полю снимка производилась в программном продукте ArcGIS в модуле Spatial Analyst с применением сплайн-интерполяции (рис. 5).

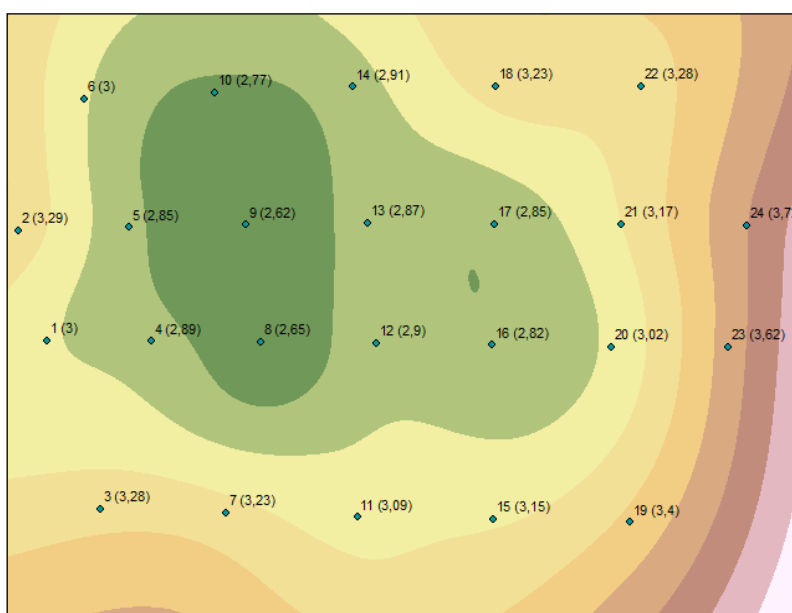


Рис. 5. Интерполяция разрешающей способности фотоаппарата Samsung D860 по полю снимка

Интерполяция разрешающей способности фотоаппарата Canon EOS 500D по полю снимка представлена на рисунке 6.

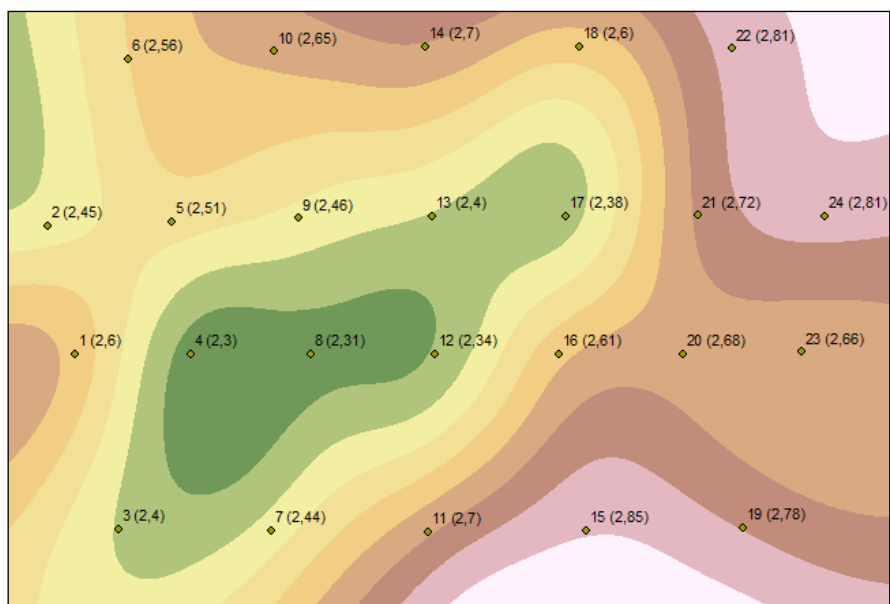


Рис. 6. Интерполяция разрешающей способности фотоаппарата Canon EOS 500D по полю снимка

Разрешающая способность фотоаппарата Canon EOS 500D менялась в диапазоне от 2,30 до 2,86 пикселей. Среднее значение разрешающей способности фотоаппарата составило 2,58 пикселя.

Как и ожидалось, в полученных результатах наилучшие значения разрешающей способности фотоаппаратов находятся в центральной части снимков. Отсутствие систематической ошибки говорит о корректности предложенной методики определения разрешения по наклонным мирам. Следует также отметить, что задачу определения разрешающей способности фотоаппаратов осложняет размытость границ кружка нерезкости мира.

ПРОВЕРКА ДОСТОВЕРНОСТИ ВЕРОЯТНОСТНОЙ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РЕАЛЬНЫМ СЕТЯМ

Иван Тимофеевич Антипов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор технических наук, профессор кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. 8 913 900 38 63, e-mail: antipov@online.nsk.su

Татьяна Александровна Хлебникова

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и информационных систем; тел. 8 913 474 1970, e-mail: t.a.hlebnikova@ssga.ru

Доклад отражает исследования достоверности вероятностной оценки точности фототриангуляции с учетом индивидуальных особенностей реальных производственных сетей.

Ключевые слова: достоверность вероятностных ошибок, реальные фототриангуляционные сети.

THE RELIABILITY CHECK OF PROBABILISTIC ESTIMATION OF ACCURACY OF PHOTOTRIANGULATION WITH REFERENCE TO REAL NETWORKS

Ivan T. Antipov

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), 10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russian Federation, Professor, doctor of science Department of Photogrammetry and Remote Sensing, tel. 8 913 900 38 63, e-mail: antipov@online.nsk.su

Tatyana A. Khlebnikova

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), 10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russian Federation, Assoc. Prof., Department of Engineering Geodesy and Information Systems, tel. 8 913 474 1970, e-mail :t.a.hlebnikova@ssga.ru

The paper reflects of the researches of reliability of a probabilistic estimation of phototriangulation accuracy taking into account specific features of real industrial networks.

Key words: reliability of probable errors, real industrial phototriangulation networks.

На VII Международном научном конгрессе «Гео-Сибирь 2001» авторы докладывали о результатах экспериментальных исследований достоверности вероятностной оценки точности пространственной аналитической фототриангуляции. Такие исследования предусматривали:

- Составление макетов точек местности и снимков;
- Построение для них фототриангуляционных сетей с подсчетом вероятнейших погрешностей уравнированных координат точек местности;
- Сравнение уравнированных значений с макетными данными и определение истинных ошибок уравнированных величин;

– Сопоставление вероятнейших погрешностей координат каждой точки местности с соответствующими истинными ошибками и обобщение результатов такого сопоставления.

В итоге названного эксперимента, проведенного для нескольких десятков макетных блоков, было сделано заключение, что хотя вычисленные при уравнивании вероятные погрешности координат точек фототриангуляционной сети всегда отличаются от истинных значений ошибок, но в целом достоверность вероятных оценок достаточно высока. Поэтому такие оценки целесообразно учитывать в технологических процессах, связанных с цифровым картографированием и моделированием местности. Как правило, для 80% точек фототриангуляционных сетей истинная ошибка в плане лежит в пределах удвоенной вероятной ошибки. Для высот точек этот показатель близок к 90%. Примерно для 15-20% точек разность между двумя этими оценками мала и не превосходит пятой части самих ошибок.

Для моделирования местности и снимков была применена специальная программа, входящая в компонент РНОТОСОМ, который, в свою очередь, является частью программного обеспечения ЦФС ЦНИИГАиК (Дельта). Эта программа имеет два режима работы. В первом режиме, использованном год назад, моделирование осуществлялось применительно к геометрически четкой конфигурации блока и другим параметрам, которые все вместе делали макетный блок слишком стандартизированным, лишенным индивидуальных особенностей, свойственных реальным производственным материалам. Это обстоятельство делало эксперимент слишком академичным, давало повод усомниться в возможности распространить полученные выводы на реальные фототриангуляционные сети. Вот почему еще год назад было высказано пожелание продолжить начатые исследования применительно к реальным сетям.

Путь к этому проходит через моделирование и обработку блоков-аналогов. Это следует из очевидного положения, что для анализа реальной сети лучше всего подходит модель-аналог, за основу создания которой берется сама эта реальная сеть. Принцип составления таких макетов выдвинут

Антиповым И.Т. еще 15 лет назад [1]. В его монографии [2] приведена общая последовательность вычислительных операций. Эта последовательность включает:

- Уравнивание реального фототриангуляционного блока;
- Моделирование блока-аналога, в котором воссозданы все геометрические характеристики реальной сети, т.е. в точности сохранены длины маршрутов, их взаимное расположение, размещение точек на местности и снимках, элементы ориентирования снимков и схема рабочего обоснования. Для моделирования может служить упомянутая выше программа, для которой предусмотрен и второй режим работы;
- Вычислительная обработка блока-аналога;

- Сопоставление качественных и количественных характеристик, полученных для реального блока, с соответствующими данными блока-аналога;
- Выявление общих тенденций.

Реальные производственные материалы получены из различных аэрофотогеодезических предприятий и других организаций, связанных со сгущением рабочего обоснования средствами компонента РНОТОСОМ. Всего отобрано 25 блоков, различных по размерам и другим данным. Общие сведения о параметрах блоков приведены в таблице 1. Из последней видно, что, как правило, фокусное расстояние камеры, которой выполнена аэрофотосъемка, составляло 153мм. Лишь по паре блоков приходится на фотосъемку с камерами, имеющими фокусное расстояние порядка 100 и 300 мм.

Таблица 1. Общая характеристика реальных фототриангуляционных блоков

Индекс Блока	Fk (мм)	Hcp (м)	Кадр (мм)	Общее количество в блоке					Наличие коорд. центров фотогр.
				Маршрутов	Снимков	Точек местн.	Точек снимков	Опорн. точек	
01	153	4700	230	2	54	1418	4198	25	Да
02	152	865	230	17	267	1334	4843	59	Да
03	153	4500	230	7	115	760	2649	11	Нет
04	152	6550	230	4	29	270	875	17	Нет
05	152	600	230	6	61	218	727	64	Нет
06	98	350	180	8	99	527	2224	253	Да
07	98	4900	180	7	125	843	3191	67	Нет
08	152	300	230	6	79	686	2156	44	Да
09	152	1500	230	8	118	882	2461	79	Да
10	303	1820	230	17	332	2808	9263	35	Да
11	152	760	230	16	237	2245	7972	61	Нет
12	152	460	230	8	84	548	1993	48	Нет
13	150	2000	240	15	1000	30077	112402	68	Нет
14	152	3100	230	29	395	4514	15958	53	Да
15	305	610	230	4	55	522	2057	45	Нет
16	152	1300	240	14	242	1779	6418	309	Нет
17	154	770	230	10	443	2801	10977	288	Нет
18	152	1220	230	16	131	825	2910	42	Нет
19	153	1000	230	16	379	2293	8776	157	Нет
20	153	1000	230	10	177	1156	4076	105	Нет
21	152	1300	230	19	351	2778	10376	705	Нет
22	154	1000	230	7	132	844	3037	50	Нет
23	153	2300	230	4	34	245	929	12	Нет
24	154	3000	230	9	178	2354	6981	27	Нет
25	154	1000	230	3	41	265	905	19	Нет

Из отношений высот фотографирования к фокусным расстояниям следует, что в целом использованные производственные материалы охватывали все масштабы картографирования от 1:1000 до 1:25000.

Размеры блоков индивидуальны и по числу маршрутов меняются от 2 до 29, по их длине – от 4 до 76, а по общему количеству снимков – от 29 до 1000. По геометрической схеме блоки можно отнести к трем типам. Блок первого типа блок имеет прямоугольную форму, а длины маршрутов в нем примерно одинаковы. У блока второго типа при переходе от одного маршрута к смежному длина их постепенно возрастает, так что общая схема блока напоминает треугольник. В блоке третьего типа маршруты размещены со сдвигом вдоль их осей, так что блок как бы покрывает сравнительно узкую полосу местности. Аэрофотосъемочные полеты в отдельных блоках производились примерно либо вдоль параллелей, либо вдоль меридианов, либо под каким-то углом к ним.

Опорными точками все блоки обеспечены в достаточном количестве, а в ряде случаев – с большим избытком. В отдельных случаях опорные данные дополнены координатами центров проектирования, которые получены в полете посредством спутниковой навигационной системы.

В целом данные таблицы 1 позволяют утверждать, что принятые для эксперимента реальные блоки достаточно хорошо отражают характер современного использования аэрофотоснимков в картографических целях.

Работа со всеми блоками проведена однотипно. Отметим, кстати, что для обычных макетов наиболее просто принять за ошибки измерений координат точек снимков и опорных данных ряды случайных равномерно распределенных чисел с заданными среднеквадратическими значениями. Именно так моделировались ошибки измерений в эксперименте 2011 года [1]. Этот путь вполне годится и для блока-аналога. При этом соответствующие среднеквадратические значения можно заимствовать из реальной сети либо в целом на блок (вариант 1), либо на каждый маршрут отдельно (вариант 2). Но возможен и иной путь, в котором истинные ошибки измерений задаются на основе совокупности остаточных погрешностей измеренных величин в уравненной реальной сети. Разумеется, можно различным образом манипулировать остаточными погрешностями. В выполненном эксперименте за ошибку измерения какой-то величины принималась остаточная погрешность соответствующей величины в реальной сети, взятая с обратным знаком (вариант 3). Поскольку реальный блок уравнен под условием $[pvv]=\min$, то ясно, что и в блоке-аналоге значения уравненных неизвестных окажутся такими же, как и в реальном блоке. Оговоримся, однако, что это правило действительно лишь в случае, когда ошибки измерений в реальном блоке подчинены нормальному распределению и не содержат грубых промахов. Равенство уравненных неизвестных соответствующей пары блоков служит лишним аргументом, позволяющим распространить выводы, сделанные для макетного блока, на блок реальный.

Результаты эксперимента приведены в таблице 2.

Таблица 2. Количество точек с отношениями истинных ошибок к вероятным в пределах границ

Индекс блока	Верхняя граница						Верхняя граница						Верхняя граница					
	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
	По оси X (число точек в %)						По оси Y (число точек в %)						По оси Z (число точек в %)					
01	51.7	57.0	62.8	70.2	75.9	80.9	45.1	53.1	61.9	69.4	75.8	82.8	54.2	61.2	68.0	72.5	76.3	79.0
02	60.7	68.0	73.4	78.8	83.8	87.5	65.5	74.1	79.6	83.0	87.0	91.6	68.4	74.9	79.7	83.1	86.9	89.2
03	81.6	88.2	92.5	95.5	97.2	98.1	81.1	87.5	91.9	93.2	94.3	95.3	76.6	83.0	89.1	92.1	94.6	97.1
04	39.3	48.0	56.4	62.1	69.5	75.8	45.3	51.5	58.6	66.3	76.7	80.6	58.4	68.5	74.0	78.9	85.0	88.7
05	38.5	46.0	51.2	55.3	59.5	66.7	74.7	82.6	86.7	90.1	92.5	94.2	89.8	94.5	96.6	97.3	98.3	98.3
06	86.1	90.9	93.2	95.4	96.8	98.0	88.6	93.3	95.6	97.8	99.1	99.6	88.0	92.7	94.5	97.3	98.6	99.2
07	98.5	99.5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	97.1	97.9	98.9	99.8	99.8	99.9
08	64.2	70.6	75.3	80.9	85.5	88.1	39.1	46.2	54.1	60.0	67.1	73.2	67.9	76.6	83.6	88.4	92.5	96.5
09	71.4	79.0	84.0	87.5	90.1	92.1	82.4	87.8	91.1	93.0	96.0	96.7	89.2	93.4	95.8	97.4	98.0	98.5
10	47.4	56.0	63.9	70.9	76.6	81.0	42.7	50.6	57.3	65.4	71.0	76.5	65.5	73.2	79.3	84.0	87.1	90.2
11	70.0	78.7	84.1	88.6	91.2	94.3	61.8	70.7	78.9	84.7	90.3	94.4	81.9	86.4	89.3	90.8	92.3	93.8
12	45.7	52.4	59.7	64.4	71.3	77.6	40.4	50.4	58.5	67.3	77.1	85.0	46.4	55.0	66.5	76.5	84.6	87.9
13	44.5	53.2	59.8	66.7	72.6	78.2	44.3	52.1	59.4	65.9	71.8	77.3	58.0	66.5	73.9	79.7	84.7	88.6
14	50.5	59.5	66.6	73.3	78.1	81.3	44.7	52.1	59.9	67.3	73.0	78.1	66.6	74.7	81.2	86.6	90.0	92.5
15	99.4	99.4	99.4	99.6	99.7	99.9	55.0	72.2	88.1	97.8	99.0	99.2	86.1	95.2	99.4	99.6	99.7	99.7
16	53.8	62.3	70.5	75.9	80.7	84.9	35.0	42.5	50.5	57.8	64.0	71.1	44.6	53.6	60.2	66.6	72.3	76.4
17	47.2	54.3	61.1	66.7	72.4	78.3	44.1	52.7	58.6	64.9	70.1	74.5	54.9	62.5	69.3	75.6	79.9	84.5
18	72.0	80.0	84.2	88.5	91.7	93.6	66.2	77.8	85.1	88.8	92.6	94.9	84.3	88.6	92.5	95.0	96.9	98.4
19	44.6	52.2	58.4	63.4	68.2	73.0	63.7	69.8	75.4	79.9	83.5	86.6	75.9	81.5	86.2	89.0	91.3	93.7
20	67.1	73.7	79.3	84.8	87.9	90.3	73.9	80.2	86.2	89.7	92.5	94.4	89.2	94.1	96.2	97.8	98.5	99.6
21	46.4	53.5	61.1	67.8	73.1	77.2	30.1	36.3	42.9	49.8	55.7	62.6	41.8	50.7	58.7	66.3	72.6	78.0
22	92.6	94.3	96.5	97.5	98.2	98.3	86.3	91.6	95.2	97.1	98.0	98.8	97.1	97.9	98.6	99.9	100	100
23	58.7	68.6	79.2	85.3	86.8	88.9	67.4	73.8	79.8	84.4	88.2	94.2	73.8	81.0	84.7	89.6	92.8	93.9
24	89.0	92.9	95.7	96.9	97.3	98.1	93.5	96.4	97.5	98.4	99.1	99.7	96.1	97.8	98.6	99.1	99.2	99.4
25	78.4	84.7	88.8	91.9	93.4	95.6	58.6	69.7	75.9	80.5	84.0	86.3	86.0	88.5	93.6	98.6	97.8	98.1

Таблица 2 показывает количество точек блока (в процентах), для которых отношение истинных ошибок к вероятным лежит в пределах определенных границ. Таким образом, таблица 2 имеет тот же смысл, что и таблица 1 в статье [1].

В целом эксперимент, проведенный по блокам-аналогам, полностью подтверждает сформулированные ранее выводы, в том числе и утверждение о достаточно высокой достоверности вероятных оценок точности координат точек уравненной фототриангуляционной сети и целесообразности учета их в последующих технологических процессах и при характеристике конечных результатов картографирования и моделирования местности. Справедливо и положение, по которому для 80% точек в плане и 90% точек по высоте истинная ошибка лежит в пределах удвоенной вероятной ошибки.

Проведенный эксперимент дает также возможность дополнительно утверждать следующее.

1. Наиболее высока достоверность вероятностной оценки точности сети при прямоугольной форме блока, при которой все маршруты имеют примерно одинаковую длину.

2. Необходимо хорошо обеспечивать опорными точками границы блоков. Особенно важно это при геометрически неправильной форме блока, сильно отличающейся от прямоугольной.

3. Результаты измерений, с которыми уравнивается блок, должны быть равноточными по всей площади блока. Нельзя доверять вероятностной оценке, если в измерениях содержатся грубые промахи или другие данные, вызывающие сомнения.

4. Надежность вероятностной оценки точности блока обратно пропорциональна среднеквадратической ошибке единицы веса, полученной при уравнивании. Важно проверить результаты измерений и добиться, чтобы эта ошибка лежала в пределах удвоенного размера пикселя (или удвоенной ошибки измерения координат и параллаксов точек снимков).

Помимо варианта 3 для задания ошибок измерений в блоке-аналоге был проведен счет для вариантов 1 и 2. Эти варианты никак не противоречат сделанным общим выводам и тенденциям, вытекающим из таблицы 2.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антипов И.Т., Хлебникова Т.А. О достоверности вероятностной оценки точности пространственной аналитической фототриангуляции. – //Труды VII Международного научного конгресса «Гео-Сибирь-2011», 19-29 апреля 2011, Новосибирск, Россия, том 4 «Дистанционные методы зондирования земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». – С. 47-54.
2. Антипов И.Т. Новый принцип составления макетов снимков для исследования задач пространственной фототриангуляции. – //Геодезия и картография. – 1996. – №9. – С. 34–39.
3. Антипов И.Т. Математические основы пространственной аналитической фототриангуляции. – //М.: Картгеоцентр – Геодезиздат, 2003. – 296с.

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ GEOEYE-1 ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ГЕНЕРАЛЬНОГО ПЛАНА СЕЛА БОРОДУЛИХА

Инна Петровна Каретина

Научно-производственный центр «Грид», Казахстан, 070004, г. Усть-Каменогорск, ул. Казахстан, 27, офис 101, заместитель директора по вопросам науки и перспективного развития, аспирант кафедры картографии и геоинформатики СГГА, тел. (7232) 21-61-32, e-mail: npc_grid@mail.ru

Сергей Александрович Каретин

Научно-производственный центр «Грид», Казахстан, 070004, г. Усть-Каменогорск, ул. Казахстан, 27, офис 101, директор, тел. (7232) 21-61-32, e-mail: npc_grid@mail.ru

Анастасия Александровна Сухарева

Научно-производственный центр «Грид», Казахстан, 070004, г. Усть-Каменогорск, ул. Казахстан, 27, офис 101, инженер-картограф, тел. (7232) 20-37-94, e-mail: npc_grid@mail.ru

В статье рассмотрено применение крупномасштабных космических снимков для решения задач градостроительного проектирования.

Ключевые слова: космические снимки, GeoEye-1, генеральный план.

EXPERIENCE OF USING DATA GEOEYE-1 FOR ELABORATION THE BORODULIKHA VILLAGE MASTER PLAN

Inna P. Karetina

Research and production center «Grid», Kazakhstan, 070004, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan st., 27, office 101, scientific and development director, post graduate student, department of cartography and geoinformatics SSGA, phone: (7232) 21-61-32, e-mail: npc_grid@mail.ru

Sergey Al. Karetin

Research and production center «Grid», Kazakhstan, 070004, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan st., 27, office 101, director, phone: (7232) 21-61-32, e-mail: npc_grid@mail.ru

Anastasiya Al. Sukhareva

Research and production center «Grid», Kazakhstan, 070004, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan st., 27, office 101, engineer-cartographer, phone: (7232) 20-37-94, e-mail: npc_grid@mail.ru

The application of large-scale satellite imagery to meet the challenges of urban planning considers.

Key words: satellite imagery, GeoEye-1, master plan.

Разработка эффективных методов создания и обновления топографических карт крупного масштаба является актуальной, поскольку ее успешное решение и последующее развитие вносят важный вклад в обеспечение информации о Земле как основе земельных реформ, планирования, развития и управления земельными ресурсами.

Генеральный план - это юридический документ, разрабатываемый с целью определения прогноза роста численности населения, долгосрочной перспективы территориального развития города, направления формирования планировочной структуры, градостроительного зонирования территории, объектов общегородского назначения, организации транспортного обслуживания, развития системы инженерного оборудования, инженерной подготовки и благоустройства территории, защиты территории от опасных природных и техногенных процессов, охраны природной среды и историко-культурного наследия.

Для создания генеральных планов населенных пунктов нужна топографическая основа, отображающая современное состояние территории. Однако, как правило, топографическая основа небольших населенных пунктов пребывает в плачевном состоянии: карты либо устарели, либо отсутствуют вовсе.

Целью работы явилось получение точных пространственных данных по материалам новой космической съемки сверхвысокого разрешения для создания генерального плана с. Бородулиха, Восточно-Казахстанской области.

Село Бородулиха - административный центр Бородулихинского района, образованного в 1944 году, граничит с севера с Российской Федерацией, с востока – с Шемонаихинским районом, с запада с Бескарагайским районом, с юга с г. Семипалатинском. Численность населения составляет 5226 жителей [1].

Имеющийся в отделе архитектуры и градостроительства топографические планы села Бородулиха масштаба 1: 2000, не показывают общей картины происходящих изменений. А изменения весьма значительны: изменение береговой линии, новое жилищное строительство, новые дороги, садоводства, гаражи, свалки и многое другое.

Общепринятой практикой решения этой проблемы является проведение аэросъемки с последующим изготовлением карт, но жесткие сроки выполнения работ, а также экономические факторы вынуждают искать и иные возможности.

Для обновления пространственной информации на протяжении последних лет успешно используются данные дистанционного зондирования Земли.

Самые новые системы ДЗЗ обеспечивают получение снимков с отличными геометрическими и спектрометрическими характеристиками. Чего стоит только возможность достичь точности плановой привязки в 1-1,2 м, используя минимум опорных точек.

В Казахстане существует практика проведения космической съемки территории Республики Казахстан с помощью заключения договора на проведение космических съемок с провайдерами, наделенными соответствующими правами от операторов спутниковых систем.

Нами был проанализирован район на наличие данных высокого разрешения и провайдерами предложены на выбор файлы покрытия данными QuickBird (0,6м, цветной вариант), WorldView-1(0,5 м, ч/б вариант), WorldView-2 (0,5м, цветной вариант), GeoEye-1 (0,5 м, цветной вариант) и Ikonos (1м, цветной вариант). Минимальная площадь заказа архивного материала составляет 49 кв. км, ширина коридора не меньше, чем 5км.

Архивные данные на район с. Бородулиха имелись за 22.01.2011года, но так как это был зимний снимок, то его нельзя было использовать для обновления топографических планов.

Было решено, что для проведения новой съёмки с разрешением 0,5 метра наилучшим образом подойдет спутник GeoEye-1 (разрешение 0,5 м, цветной вариант). Минимальная площадь под заказ новой съёмки составляет 100кв.км, коридор не меньше 5 км.

Был заключен договор с компанией ООО «Гео-Альянс» на поставку данных GeoEye-1, полученных в космическом пространстве (цветной вариант, уровень Geo). Информационные материалы предоставлялись посредством связи FTP. Формат продукции – GeoTIFF. Продукция – Новая съемка, допустимый процент облачности 15%.

В условиях сельского населенного пункта, где трудно найти четкие опорные точки для привязки полученных снимков, было решено использовать опознаки.

Установка и маркировка опознаков проводилась одновременно с созданием планово-высотного обоснования, при этом использовались GPS-приёмники Trimble R3. Все наблюдения велись в режиме Fast Statik (Быстрая статика) относительно одной базовой станции. Результаты наблюдений обрабатывались при помощи Trimble Geomatics Office.

Результат уравнивания показывает, что средняя квадратическая ошибка определения координат точек не превышает 0,03 м, что позволяет использовать координаты данных пунктов для привязки космоснимка, так как графическая точность снимка составляет 0,61 м (рис. 1).

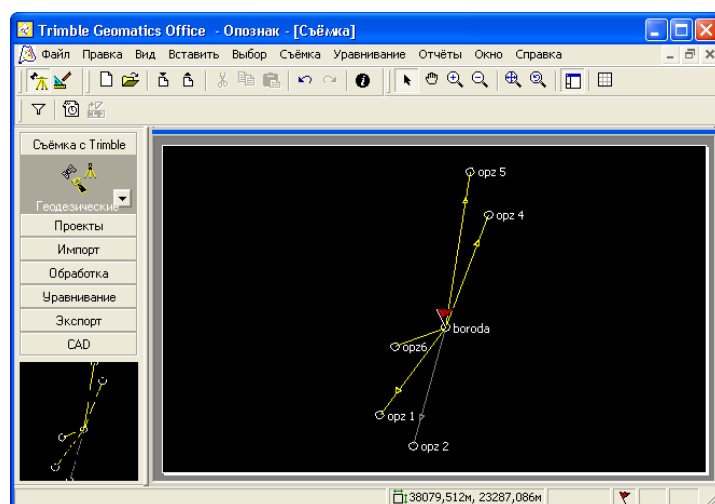


Рис. 1. Графический результат уравнивания

Для маркировки опознаков применяют дешевые местные материалы, обеспечивающие максимальный контраст между маркировочным знаком и фоном. Чаще всего для этого используют известь и мел, которыми засыпают лучи маркировочного знака, предварительно сняв дерн. В степной и горной местности опознаки маркируются с помощью вспомогательных средств. Это

может быть расстеленный, под прямым углом, рулон марли, вершиной которого является опознак или таким же образом выложенная гряда камней.

При маркировке на улицах и дорогах с гравийным, булыжниковым, бетонным или асфальтовым покрытиями, а также в местах, где нет уверенности в обеспечении надлежащего контраста знака с фоном, дополнительно создается искусственный фон.

Размер маркировочного знака определяют в зависимости от масштаба съемки с таким расчетом, чтобы изображение его на снимке было не менее 0,25 мм в длину и 0,03 мм в ширину.

Маркировка производится перед съемкой с минимальным разрывом по времени [2].



Рис. 2. Трехлучевой опознак

В нашем случае было установлено 6 маркировочных опознаков, полностью охватывающих по периметру территорию будущей съемки. Форма знака – крест с тремя (рис. 2) или четырьмя лучами (рис. 3), размер – длина луча 2,5 м, ширина – 1,5 м. Тип центра – квадрат 60X60 см, материал: лучи – белая ткань (ситец), центр – пластик, закреплен металлическими скобами.



Рис. 3. Четырехлучевой опознак

На каждый маркировочный знак составлялась специальная карточка, в которой указывалось местоположение замаркированной точки, что замаркировано, абрис, размеры и форма маркировочного знака, высота над поверхностью земли в см, материал, использованный для маркировки.

12 мая была успешно проведена новая съёмка GeoEye-1 на район с. Бородулиха общей площадью 102 кв.км.

Снимок был поставлен в проекции UTM (WGS 84), 44 зона.

Спутниковые снимки, как и все данные дистанционного зондирования, подвержены геометрическим искажениям, которые вызываются кривизной поверхности Земли, поворотом планеты во время сеанса приёма спутниковой информации и другими причинами [3].

Используя данные о координатах, хранящиеся в опорных точках, можно выполнить геометрическую коррекцию с высокой точностью. В нашем случае опорные точки устанавливались в ручном режиме. В качестве эталона были взяты проверенные географические координаты в первом приближении – маркировочных опознаков, во втором приближении опорные точки хорошо узнаваемых объектов села Бородулиха.

Начальная ошибка привязки, рассчитанная по маркировочным опознакам, составила в среднем 12 метров.

В результате трансформирования космического снимка с. Бородулиха в первом приближении ошибка составила в среднем 6 метров, во втором приближении 1,04 м.

В результате выполненной работы получен географически привязанный продукт высокого качества и заложена основа для эффективного обновления топографического плана с. Бородулиха и создания генерального плана поселка.

В процессе обновления данных были добавлены новые строения, существенно изменены данные по незастроенным территориям, добавлены новые объекты, нанесены коммуникации.

Применение новых технологий в обработке данных позволило выполнить столь сложные работы небольшому коллективу. При относительно небольшом бюджете проекта были решены многие задачи, главная из которых - обновление пространственных данных. Полученный опыт показал, что предложенная технология позволяет значительно сократить сроки обновления топографических планов сельских населенных пунктов при помощи привязки космических снимков по опознакам, а также затраты на производство работ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Статья «О Бородулихинском районе» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://oskemen.info/7750-borodulihinskiy-rayon.html>
2. Технические указания по применению аэрофотограмметрических методов и ЭВМ при изысканиях автомобильных дорог/ от 20 октября 1977 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://norm-load.ru/SNiP/Data1/42/42056/index.htm>
3. Геометрическая коррекция спутниковых изображений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.nrcgit.ru/aster/methods/geom_correct.htm

© И.П. Каретина, С.А. Каретин, А.А. Сухарева, 2012

ТЕХНОЛОГИЯ ВРЕМЕННОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТОДА НЕПРЕРЫВНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ

Николай Викторович Юркевич

Новосибирский Государственный Технический Университет, 630092, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, аспирант. nicolay_14283@mail.ru

Рассматривается проблема высокоточной временной синхронизации процессов на примере сейсмической геологоразведки методом непрерывного сейсмического профилирования (НСП).

Ключевые слова: метод непрерывного сейсмического профилирования, временная синхронизация.

CONTINUOUS SEISMIC PROFILING METHOD ELEMENTS TIME SYNCHRONIZATION TECHNOLOGY

Nicolai V. Yurkevich

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630092, Karla Marksa 20, PHD student. nicolay_14283@mail.ru

The work is dedicated to solution of the problem of high degree timing synchronization of distributed systems on an example of Continuous Seismic Profiling method.

Key words: Continuous seismic profiling, Time synchronization.

Введение. В основу метода непрерывного сейсмического профилирования (НСП) заложен принцип изменения структуры звуковой волны при ее отражении от поверхности дна (первое вступление) и от границ разделов между поддонными слоями, а также от объектов, заглубленных в донные отложения. В качестве источника звуковой волны используются массивы пневматических пушек. В качестве приемника используются «гидрофоны» - приборы, основанные на пьезо-элементах (Гурвич, Боганик, 1980; Телфорд и др., 1980; Воскресенский, 2007). Таким образом вне зависимости от реализации, метод НСП включает три составляющие системы: Навигации, Контроля источника и Контроля записи.

Результатом наблюдений является сейсмоакустический разрез (сейсмограмма) геологических слоев вдоль профиля наблюдений в масштабе времен пробега акустических волн.

Особенности метода НСП обуславливают ряд проблем, решение которых возможно только при высокой степени временной синхронизации систем. Так географические координаты источника и приемника должны быть зарегистрированы максимально близко к моменту непосредственного импульса и регистрации сигнала соответственно. В свою очередь, посылка импульса должна осуществляться строго в заранее определенном месте и в

установленное время. Равно как и запись отраженного сигнала должна иметь временную отметку о начале и окончании записи относительно времени испускания импульса-источника. В противном случае глубина отражающего слоя не может быть определена с достаточной степенью достоверности, что исключает возможность решения задач сейсморазведки, основным продуктом которой является 3-х мерное изображение высокого разрешения структуры подземных отложений (Непрочнов и др., 1979; Мазарович, 2005).

Целью данной работы является разработка системы временной синхронизации процессов метода непрерывного сейсмического профилирования с точностью, достаточной для ведения коммерческой геологоразведки углеводородов. Порядок требуемой синхронизации был определен, как 10 мс, что эквивалентно ошибке 1 метр в определении глубины залегания углеводородов при усредненной скорости звука 2000 м/с.

Описание метода. Предлагается использовать систему «сообщений», распространяемых по сетевому интерфейсу заблаговременно и содержащих исчерпывающую информацию о времени, характере события, а также ряд дополнительных данных с возможностью последующего включения любой иной информации в структуру сообщения. Основой данного метода является синхронизация временных таймеров (часов) всех систем относительно времени GPS. Таким образом, задача хранения «истинного» времени возлагается на каждую из систем.

В качестве системы контроля качества синхронизации предлагается использовать импульсную систему. А именно: каждая из систем испускает импульс в момент исполнения команды, тем самым «отчитываясь» о времени исполнения. Контрольная система, получая импульсы от всех систем, имеет возможность сравнить фактическое время прихода импульсов-отчетов с теоретическим и тем самым оценить степень синхронизации.

Данная система контроля качества также позволяет включить в сообщение информацию о временной задержке конкретной системы в предшествующий цикл и, соответственно, осуществить корректировку часов системы при наличии систематической ошибки, либо внести соответствующие корректировки при обработке полученных сейсмограмм.

Для успешного функционирования системы необходим высокостабильный и общедоступный источник эталонного времени. Оптимальным представляется использование времени GPS. Высокоточный приемник со встроенным осциллятором обеспечивает возможность применения технологии сетевых сообщений, синхронизируя внутренние часы различных систем с высокой точностью. Хранителем же внутреннего времени каждой из систем в свою очередь является PCI карта, принимающая сигнал эталонного времени от GPS приемника по протоколу NTP. PCI карта также оснащена осциллятором, обеспечивающим стабильность таймера при потере сигнала центральной системы (работа в автономном режиме).

Навигационная система является владельцем процесса синхронизации. На основании рассчитанного навигационной системой времени достижения источником импульса заданных координат, система навигации посылает сетевое

сообщение о времени и характере грядущего события. В момент наступления заданного времени каждая из систем испускает отчетный импульс, который принимается и анализируется системой контроля качества, которая, в свою очередь, на основании полученных сведений, формирует корректирующие значения для устранения ошибок синхронизации каждой из систем.

Полученные данные о качестве синхронизации передаются навигационной системе и, в случае необходимости, будут включены в следующее сетевое сообщение соответствующей системе для коррекции ошибки ее внутреннего таймера.

Особенностью предложенного метода является то, что задача хранения «истинного» времени перекладывается с «командного пункта» на каждую из синхронизируемых систем в отдельности. Данное решение с одной стороны является явным усложнением общей модели и приводит к усложнению и удорожанию системы. С другой же стороны, наличие «истинного» времени у каждой из систем в отдельности дает возможность заблаговременного распространения сигнала. Иными словами, имея одинаковые точки отсчета и таймеры, каждая из систем в отдельности может прогнозировать наступление конкретного момента независимо от контрольного пункта. Для успешного функционирования предлагаемой системы, необходимо, чтобы временные таймеры (часы) всех систем были синхронизированы с высокой точностью. Также необходимо выбрать источник эталонного времени и обеспечить его высокую стабильность. Построение такого источника – задача нетривиальная, и ее решение не представляется возможным на данном этапе. Так было принято решение использовать в качестве источника «истинного» времени время GPS. Его точность гарантируется высокоточными атомными часами, постоянно контролируется и, что особенно важно в нашем случае, необходимые данные доступны практически в любой точке земного шара с достаточной точностью. Так на первом этапе работы системы эталонное время принимается со спутников системы GPS и передается далее на PCI карты остальных систем. Данные карты имеют встроенный осциллятор для возможности поддержания высокоточного времени в автономном режиме в случае потери сигнала центральной системы.

TES (Time Event Server) является хранителем эталонного времени системы (именно это время используется для задания момента генерации акустического импульса и содержится в сетевом сообщении, передаваемым другим системам). Помимо этого, TES также выполняет функции контролирующей системы. За 100 мкс до наступления момента выстрела TES включает таймер контроля качества, отсчитывающий единицу каждые 0.05 мкс. С помощью данного таймера возможно зарегистрировать момент прихода отчетного импульса от синхронизируемых систем. Таймер останавливается через 100 мкс после момента выстрела. Таким образом, система контроля качества определяет отклонение систем от эталонного времени в пределах ± 100 мкс с разрешением в 0.05 мкс.

Оценка качества предлагаемого метода. Качество синхронизации оценивается методом статистической обработки данных системы контроля

качества. Исходными данными для задачи статистической оценки является экспериментально полученная выборка отклонений систем позиционирования, контроля источника и контроля записи от эталонного времени (рис. 4.1). В данной работе рассмотрим механизм оценки качества на примере выборки из 1841 экспериментов (1841 цикл работы системы).

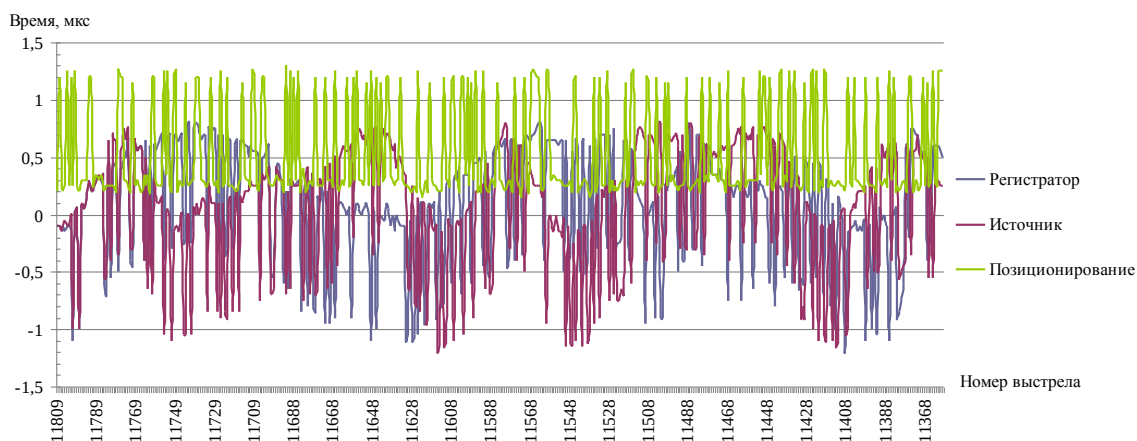


Рис. 4.1. Нефильтрованные экспериментальные данные синхронизации метода НСП.

Как видно из графика (рис. 4.1), выборки зашумлены. Источником данных пиковых отклонений является характеристика отчетного импульса систем. Напомним, что характеристика отчетного импульса подразумевает его длину в 5 мкс. На практике же в результате дискретизации импульса, его длина оценивается или в 5 мкс, или в 4 мкс. Соответственно, экспериментальные данные для некоторых элементов выборки отличаются от реальных на 1 мкс. Для устранения погрешности данные подверглись фильтрации. Значение каждого элемента выборки, имеющего отклонение от среднего за предыдущие 5 циклов, превышающее по модулю 0,6 мкс, увеличивалось на 1 мкс.

Экспериментальные данные после фильтрации представлены на графике (рис. 4.2):

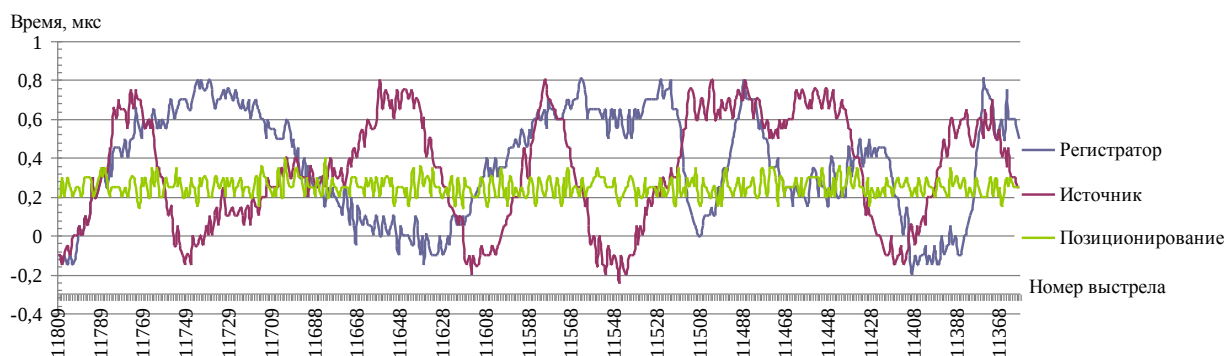
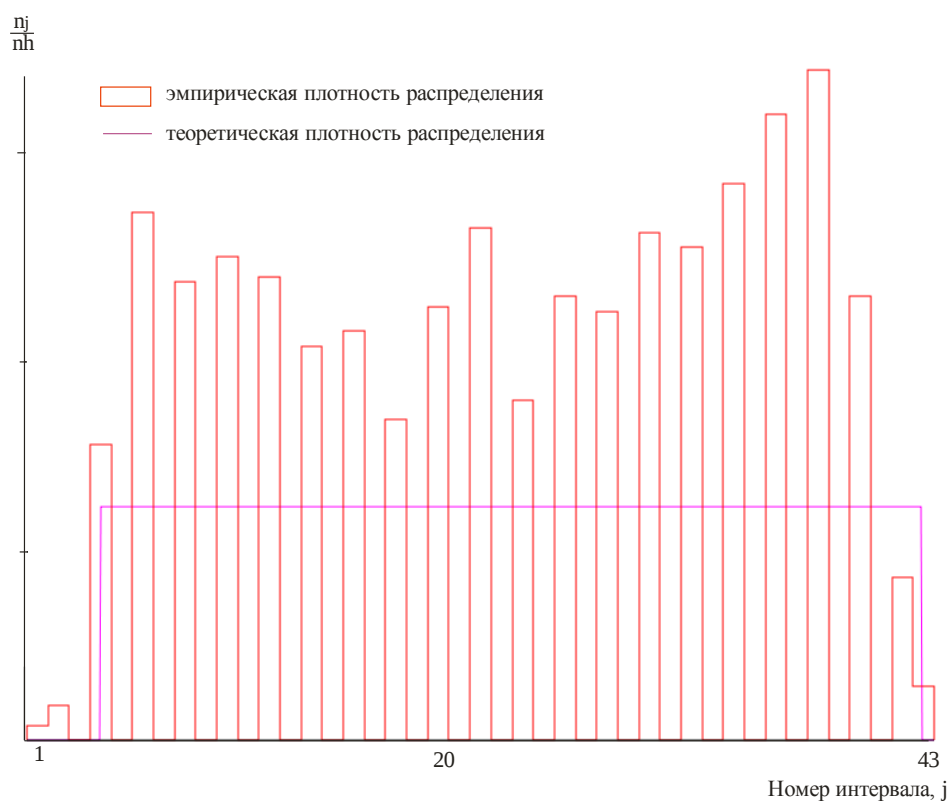


Рис. 4.2. Экспериментальные данные синхронизации после фильтрации.

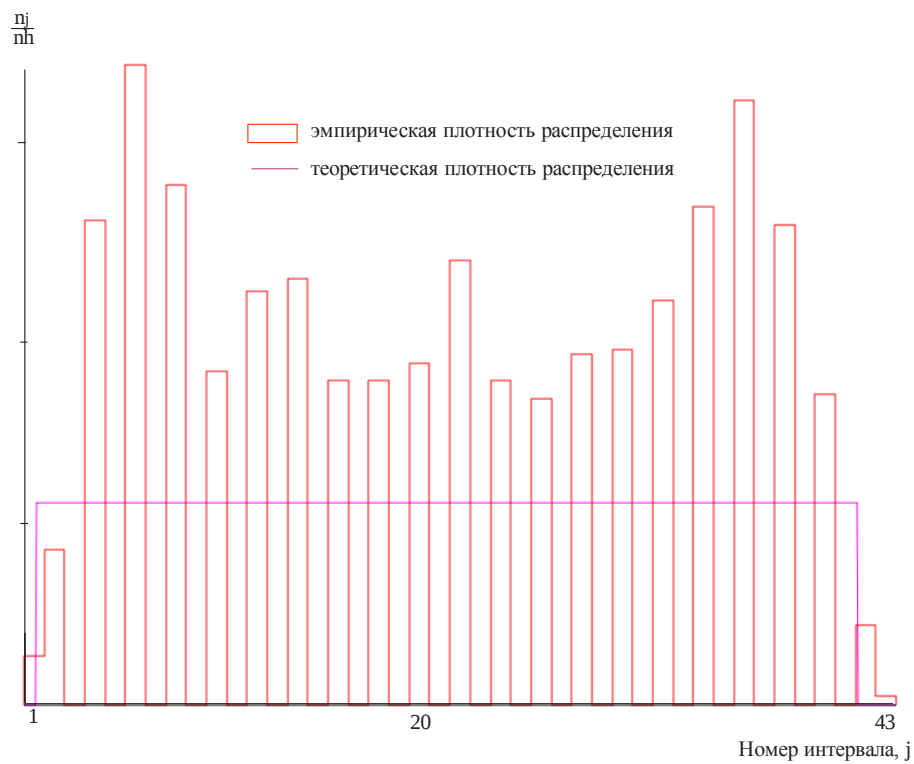
Распределение ошибки системы записи.

$p=0.95: 0.323 \leq m_x \leq 0.349$



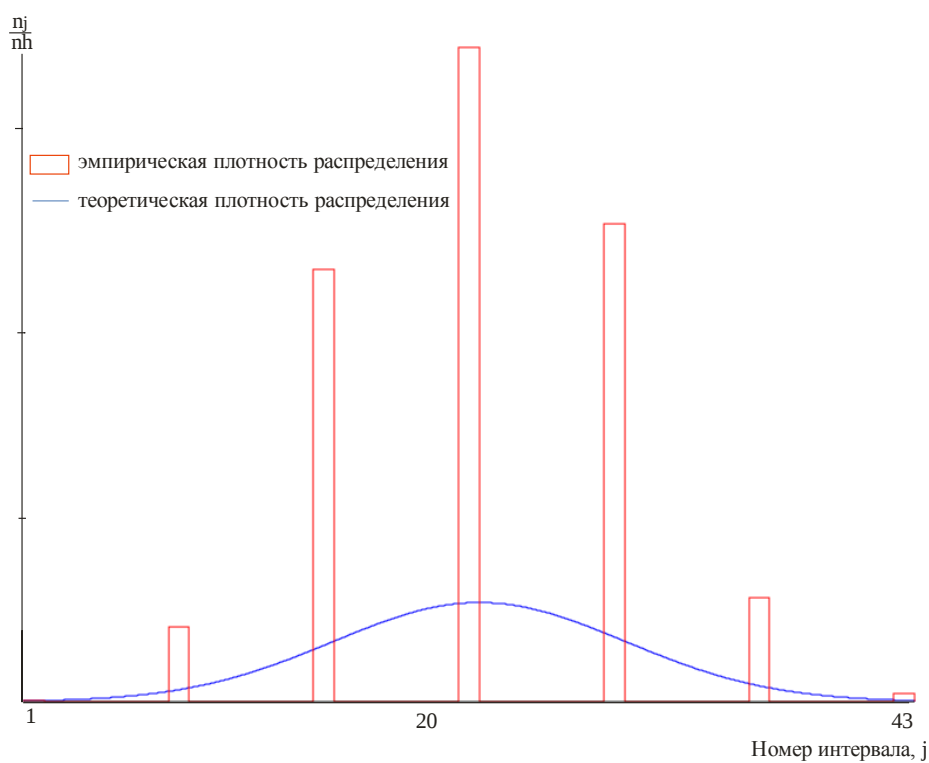
Распределение ошибки системы контроля источника

$p=0.95: 0.269 \leq m_x \leq 0.296$



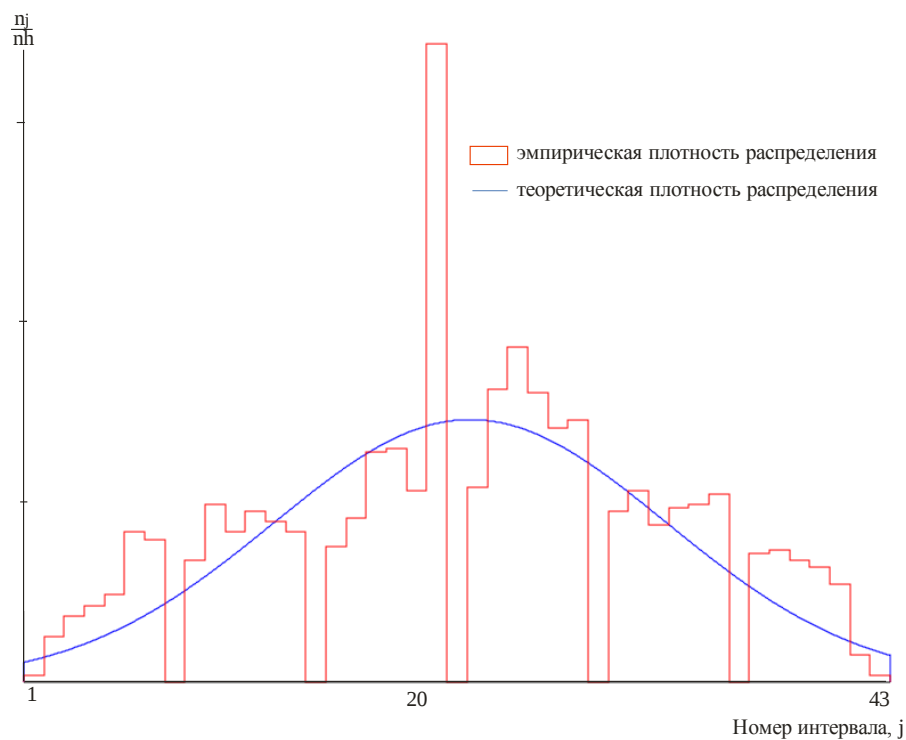
Распределение ошибки системы навигации

$p=0.95: 0.251 \leq m_x \leq 0.255$



Распределение ошибки разницы систем контроля источника и записи.

$p=0.95: 0.034 \leq m_x \leq 0.072$



Автокоррекция таймеров систем. Информация об ошибке синхронизации включается в структуру сетевого сообщения на основе

информации контроля качества за предшествующий цикл работы системы. Таким образом достигается эффект динамической коррекции таймеров, исключается систематическая ошибка таймера и исключается вероятность накопления ошибки. Коррекция таймеров осуществляется только в случае отклонения синхронизируемой системы от эталонного времени более чем на 5 мкс. Тем не менее, данные контроля качества синхронизации записываются для каждой итерации и могут быть просмотрены в любой момент.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балашканд, М.И. Источники возбуждения упругих волн при сейсморазведке на акваториях / М.И. Балашканд, С.А.Ловля. - М.: Недра, 1977. - 128 с.
2. Большев, Л.Н. Таблицы математической статистики / Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов - М.: Наука, 1983. - 120 с.
3. Бяков, Ю.А.. Широкоугольное глубинное сейсмическое профилирование дна акваторий / Ю.А. Бяков, И.Ф. Глумов, Л.И. Коган, Я.П. Маловицкий, Р.Р. Мурзин. - 2 ч. - М.: Наука, 2001. - 293 с.
4. Гурвич, И.И. Сейсмическая разведка / И.И. Гурвич, Г.Н.Боганик. - М.: Недра, 1980. - 551с.
5. Ельников, И.Н. Определение элементов залегания отражающих участков поверхности морского дна при сейсмических исследованиях методом отраженных волн / И.Н. Ельников // Океанология. - 1971. - № 1. - С.160-168.
6. Ельников, И.Н. Решение прямой задачи сейсморазведки в случае многослойной среды с наклонными преломляющими границами / И.Н. Ельников // Морская геология и геофизика. - 1971. - № 1. - С.31-36.
7. Муха, В.С. Статистические методы обработки данных / В.С. Муха. - Минск: Изд-во БГУ, 2009. - 184 с.
8. Непрочнов, Ю.П. Непрерывное сейсмическое профилирование в океане на скоростях до 15 узлов / Ю.П. Непрочнов, Л.Р. Мерклин, И.Н. Ельников // Океанология. - 1979. - Т. 19. - № 4. - С.718-724.
9. Орлов, А.И. Прикладная статистика / А.И. Орлов. - М.: Экзамен, 2006. - 671 с.
10. Пустыльник, Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Е.И. Пустыльник. - М.: Наука, 1968. - 170 с.
11. Соловьев, В.И. Связь на море / В.И.Соловьев, Л.И. Новик, И.Д. Морозов. - Ленинград: Судостроение, 1978. - 350 с.
12. Шерифф, Р. Сейсморазведка: В 2-х томах / Р. Шерифф, Л. Гелдарт. - М.: Мир, 1987. - 448 с. и 400 с.

© Н.В. Юркевич, 2012

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДЗЕМНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ГРУППЫ В РАЙОНЕ ЭЛЬБУССКОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО ЦЕНТРА

Валерий Викторович Ковалевский

Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН (ИВМиМГ СО РАН); 630090, Новосибирск-90, пр. ак. Лаврентьева, 6, заместитель директора, тел. (383)3307069, e-mail: kovalevsky@sscc.ru

Статья представляет результаты исследования характеристик подземной сейсмической группы, развернутой в тоннеле Баксанской нейтринной обсерватории в 24 км от вулкана Эльбрус. Линейная сейсмическая группа имеет апертуру 2.5 км и состоит из 6-и трехкомпонентных сейсмоприемников СК-1П с автономными цифровыми регистраторами «Байкал». В результате эксперимента были определены основные характеристики микросейсмических шумов в точках установки сейсмоприемников группы, их взаимная корреляция, суточные вариации уровня шумов, характеристики техногенных шумов, уровни сигналов от региональных и локальных сейсмических событий, регистрируемых группой.

Ключевые слова: подземная сейсмическая группа, микросейсмические шумы.

INVESTIGATION OF SEISMIC CHARACTERISTICS OF UNDERGROUND SEISMIC ARRAY IN THE REGION OF ELBRUS VOLCANIC CENTER

Valery V. Kovalevsky

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of RAS (ICMMG), 630090, Novosibirsk-90, Lavrentiev Ave, 6, Deputy Director, tel. (383) 3307069, e-mail: kovalevsky@sscc.ru

The article presents results of a study of characteristics of underground seismic array installed in a tunnel of the Baksan Neutrino Observatory, 24 km from Elbrus. Linear seismic group has an aperture of 2.5 km and consists of a six three-component seismic sensors SC-1P with digital recorders "Baikal". The experiment identified the main characteristics of microseismic noise in the points of seismic sensors installation, their mutual correlation, diurnal variations in the noise level, the characteristics of man-made noise, signal levels from regional and local seismic events recorded by the group.

Key words: underground seismic group, microseismic noise.

В задачах изучения структуры локальных неоднородностей в земной коре Приэльбрусья и геодинамических процессов в районе вулкана Эльбрус важное место занимает исследование сейсмической активности в районе Эльбрусского вулканического центра. Комплексными геофизическими исследованиями выявлены глубинные и близповерхностные магматические структуры вулкана Эльбрус, и стоит задача мониторинга их состояния для слежения за возможной активизацией сейсмovolканических процессов [1,2].

В районе Эльбрусского вулканического центра комплексный геофизический и сейсмический мониторинг проводится ИФЗ РАН, ГАИШ МГУ, КБГУ с использованием уникального комплекса геофизических приборов

Северокавказской геофизической обсерватории, расположенной в штольне Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН [3]. Зарегистрированный в обсерватории уровень микросейсмических шумов, показал, что штольня БНО ИЯИ РАН является одним из самых «тихих» мест расположения сейсмостанций в Кавказском регионе. Этому способствует заглубленность штольни на 4 км в цельный скальный массив горы Андырчи, удаленность от промышленных и природных источников сейсмического шума, низкий уровень техногенного шума, связанного с деятельностью самой обсерватории.

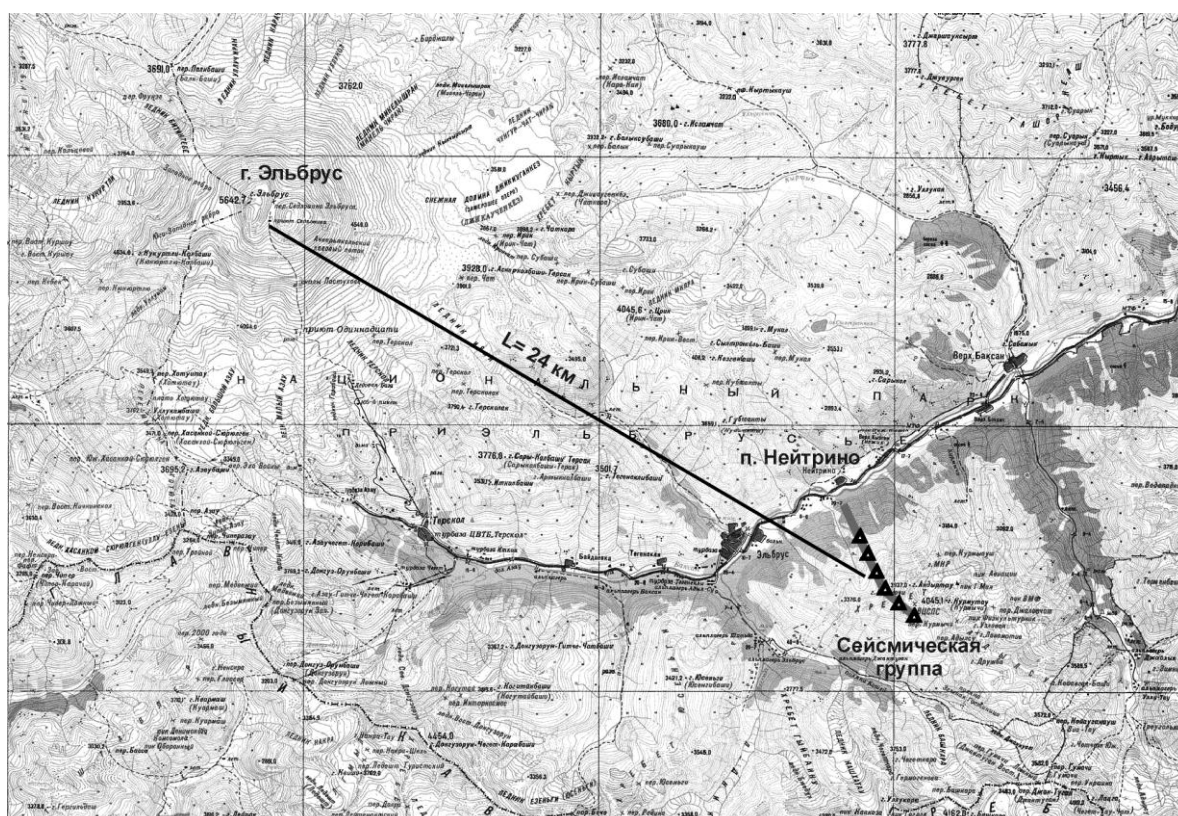


Рис. 1. Карта района расположения сейсмической группы в штольне БНО ИЯИ РАН

Низкий уровень микросейсмических шумов, возможность размещения сейсмоприемников на коренных породах в одинаковых условиях практически по всей протяженности штольни делает возможным создание на базе БНО ИЯИ РАН линейной сейсмической группы с апертурой 3-3,5 км, оснащенной коротко- и среднепериодными трехкомпонентными сейсмометрами для слежения за низкоэнергетической сейсмической активностью района вулкана Эльбрус и решения задач региональной сейсмологии.

Пилотный эксперимент по созданию такой группы был выполнен в июле 2010 года, когда Институтом вычислительной математики и математической геофизики СО РАН и Институтом физики Земли РАН впервые была развернута и опробована в режиме непрерывной работы линейная сейсмическая группа с апертурой 2.5 км из 6-и трехкомпонентных сейсмоприемников СК-1П с автономными цифровыми регистраторами «Байкал». Группа была развернута во

вспомогательной штольне Баксанской нейтринной обсерватории, в 24 км от вулкана Эльбрус (рис. 1). Расстановка сейсмоприемников в группе была равномерной, расстояние между датчиками составляло 500 м. Датчики устанавливались на бетонном основании на коренных породах на расстоянии 500 м друг от друга. Во время эксперимента была проведена непрерывная регистрация сейсмических сигналов в течение 4-х суток – 14-15 июля и 17-18 июля 2010 г.

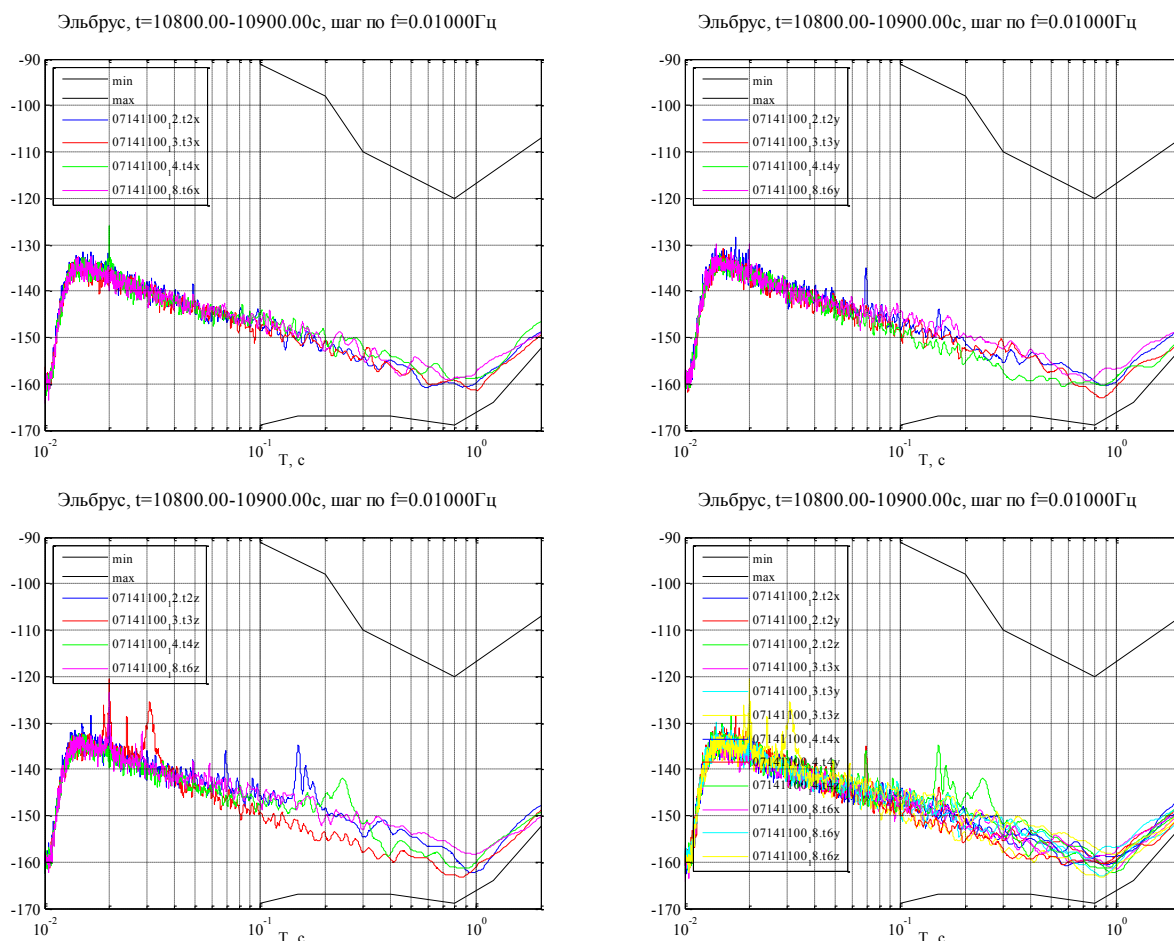


Рис. 2. Характеристики СПМ микросейсмического шума подземной группы. Сейсмоприемники № 2, 3, 4, 6. Компоненты X, Y, Z и среднее по всем компонентам (справа налево и сверху вниз)

Характеристики микросейсмического шума определялись путем вычисления спектральной плотности мощности шума (СПМ) для трех компонент сейсмоприемника в каждой точке сейсмической группы в диапазоне периодов 1 - 0.0125 сек (1-80 Гц).

На графиках СПМ (медианные спектры) по компонентам X, Y, Z для 3 сейсмоприемников группы (рис.2) видно, что максимальный разброс СПМ шума между различными датчиками составляет 5-10 дБ на частотах 1-90 Гц. Среднее значение СПМ шума находится ближе к нижнеуровневой модели сейсмического шума Петерсона [4] с минимальным отклонением 5-8 дБ в

области частот 1-5 Гц и максимальным отклонением 10-20 дБ на частотах 5-10 Гц. СПМ сейсмического шума по компоненте Z по 3 сейсмоприемникам имеет разброс до 10 дБ в диапазоне частот 1-10 Гц, что приблизительно вдвое больше, чем по компонентам X, Y.

Характеристики техногенного шума, обусловленного деятельностью обсерватории, в основном определяются непрерывной работой вентиляционной системы, что проявляется присутствием в спектре шума гармонических составляющих на частотах 10.22 Гц, 20.41 Гц, 30.53 Гц, 50.90 Гц (+0.02 Гц) для всех компонент сейсмоприемников. В местах установки некоторых сейсмоприемников присутствуют составляющие на частотах 5.56 - 6.57 Гц и 14.37 Гц. Для 50 с отрезков записи амплитудные значения этих пиков в спектральной области превышают средний уровень спектра в 2-8 раз. При обработке эти составляющие спектра могут быть удалены цифровой фильтрацией.

За четверо суток эксперимента было зарегистрировано несколько десятков локальных сейсмических событий происшедших на расстоянии 3-10 км от сейсмической группы (разница прихода P и S волн 0.5-1.5 с) и несколько событий с региональных расстояний 40-100 км (разница прихода P и S волн 5-15 с) (рис. 3).

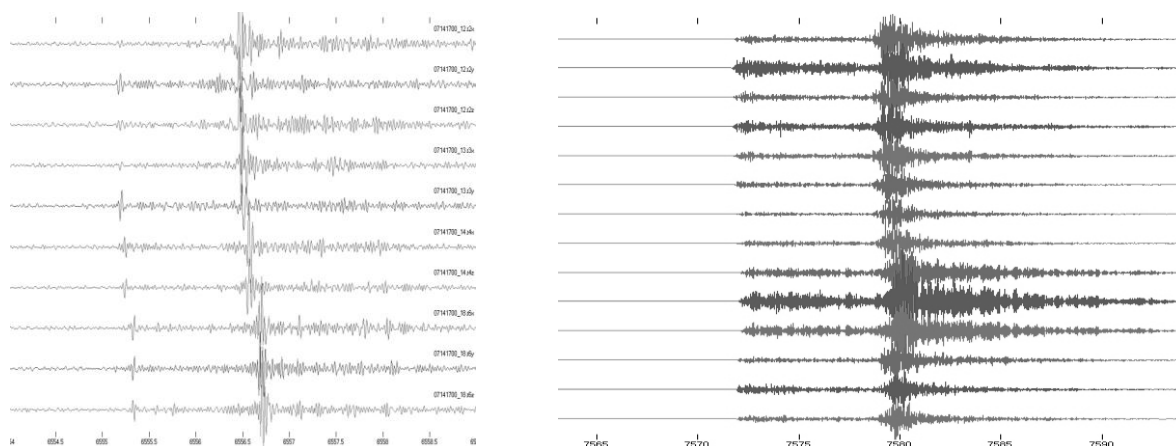


Рис. 3. Примеры записи локальных и региональных сейсмических событий

Результаты эксперимента и их анализ показывают, что линейная сейсмическая группа с апертурой 2.5 км, развернутая в штольне БНО ИЯИ РАН, по уровню микросейсмических шумов и регистрируемых сигналов, а также по их корреляционным свойствам, имеет в короткопериодном диапазоне характеристики сравнимые с характеристиками современных сейсмических групп, работающих в Международной системе мониторинга [5]. Создание в БНО стационарной группы с коротко- и среднепериодными сейсмоприемниками позволит дополнить сеть сейсмических станций ГС РАН в Кавказском регионе сейсмологической системой высокого пространственного разрешения, направленной на решение задач региональной сейсмологии и мониторинга микросейсмической активности района вулкана Эльбрус с целью

определения областей активизации сейсмических процессов связанных с геодинамикой магматического очага вулкана.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ: № 10-07-00387-а, № 11-05-92215-Монг_а, проектов СО РАН 4.5, 4.6, ИП СО РАН 54, 130.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лаверов Н.П., Маловичко А.А., Старовойт О.Е. Российская сеть сейсмологических наблюдений: состояние и перспективы развития // Сейсмичность Северной Евразии. Материалы Международной конференции. – Обнинск : ГС РАН, 2008. С. 5–14.
2. Маловичко А.А. Сейсмический мониторинг разномасштабных природных процессов и катастроф . Экстремальные природные явления и катастрофы. Т.1. Оценка и пути снижения негативных последствий экстремальных природных явлений / Отв. ред. А.О. Глико; отв. сост. А.Л. Собисевич;– М. : ИФЗ РАН, 2010 С. 131-144
3. Собисевич А.Л., Гриднев Д.Г., Собисевич Л.Е., Канониди К.Х. Аппаратурный комплекс Северокавказской геофизической обсерватории // Сейсмические приборы. 2008. Т. 44, № 1. С. 21–42.
4. Peterson, J. Observation and Modeling of Seismic Background Noise. Open-File Report 93-322, Albuquerque, New Mexico, 1993- 42 pp.
5. Н.Н Михайлова, И.И. Комаров. Спектральные характеристики сейсмического шума по данным Казахстанских станций мониторинга // Вестник НЯЦ РК, 2006. - Вып.2. - С. 19 - 26.

© В.В. Ковалевский, 2012

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ

Александр Александрович Якименко

Новосибирский государственный технический университет, 630092, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, аспирант, тел. +7-923-224-20-10, e-mail: al--le@yandex.ru

В статье исследованы некоторые возможности использования гибридных вычислительных устройств на основе графического процессора в задачах численного моделирования сейсмических волновых полей, а также приведены результаты времени выполнения наиболее трудоемких алгоритмов.

Ключевые слова: графический процессор, разностная схема, моделирование, волновое поле.

USING A HYBRID COMPUTATIONAL SYSTEMS FOR SOLVING PROBLEMS OF GEOPHYSICS

Alexander A. Yakimenko

Novosibirsk State Technical University, 630092, Novosibirsk, pr. K. Marks, 20, postgraduate student, phone. +7-923-224-20-10, e-mail: al--le@yandex.ru

The article explored some possibilities of using hybrid computing devices based on the graphics processor in numerical modeling of seismic wave fields, as well as the results of the run-time most labor-intensive algorithms.

Key words: GPU, difference scheme, modeling, wave field.

ВВЕДЕНИЕ

Доклад посвящен применению современных графических процессоров (ГПУ, GPU, Graphics Processing Unit) в задачах моделирования полных волновых полей в неоднородных упругих средах. Из всех известных методов численного моделирования распространения упругих волн наиболее гибкими, в случае сложно построенных трехмерно неоднородных упругих сред, являются разностный метод и метод конечных элементов, однако их использование требует больших вычислительных затрат даже при применении суперЭВМ. Современные графические процессоры (ГПУ, GPU, Graphics Processing Unit) являются высокопроизводительными вычислительными системами, сравнимыми с суперкомпьютерами в решении широкого класса задач с высокой интенсивностью использования данных. Вычислительные системы, построенные на базе графических процессоров, превосходят традиционные суперкомпьютеры по ряду характеристик: более высокая энергоэффективность, лучшее соотношение цена/производительность, меньшие размеры, пониженные требования к инженерной инфраструктуре, более высокая распространённость и доступность. Представленная работа отражает реализацию параллельной программы для моделирования сейсмических волновых полей в трехмерных

сложно построенных средах на видеокарте персонального компьютера. Выполнена реализация расчета конечно-разностной схемы второго порядка для трехмерной модели на графическом процессоре. Показано преимущество такого подхода по сравнению с центральным процессором. В связи с небольшим объемом оперативной памяти видеокарты, возможно моделирование только моделей малых размеров. Дальнейшая работа будет происходить на гибридных вычислителях с графическими ускорителями «Тесла». Такие устройства состоят из нескольких блоков, каждый из которых включает в себя по три графических процессора. Таким образом, будет выполнено многоуровневое распараллеливание средствами MPI и CUDA.

1. Метод решения задачи

Метод решения задачи моделирования сейсмических волновых полей основан на использовании конечно-разностного метода [2]. Расчет сеточных коэффициентов в разностной схеме проводится на основе интегральных законов сохранения (поскольку параметры λ , μ и ρ могут быть разрывными). Конечно-разностная схема имеет второй порядок аппроксимации по времени и пространству. Общий вид уравнений конечно-разностной схемы следующий:

$$\begin{aligned} \frac{\rho_{i,j,k} + \rho_{i-1,j,k}}{2} \frac{u_{i-1/2,j,k}^{n+1} - u_{i-1/2,j,k}^n}{\tau} &= \frac{\sigma_{xxi,j,k}^{n+1/2} - \sigma_{xxi-1,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x} + \frac{\sigma_{xyi-1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} - \sigma_{xyi-1/2,j-1/2,k}^{n+1/2}}{\Delta y} + \\ &+ \frac{\sigma_{xzi-1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} - \sigma_{xzi-1/2,j,k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta z} + f_{xi,j,k}^n, \\ \frac{\sigma_{xxi,j,k}^{n+1/2} - \sigma_{xxi,j,k}^{n-1/2}}{\tau} &= (\lambda + 2\mu)_{i,j,k} \frac{u_{i+1/2,j,k}^n - u_{i-1/2,j,k}^n}{\Delta x} + \lambda_{i,j,k} \frac{v_{i,j+1/2,k}^n - v_{i,j-1/2,k}^n}{\Delta y} + \\ &+ \lambda_{i,j,k} \frac{w_{i,j,k+1/2}^n - w_{i,j,k-1/2}^n}{\Delta z}, \\ \frac{\sigma_{xyi-1/2,j-1/2,k}^{n+1/2} - \sigma_{xyi-1/2,j-1/2,k}^{n-1/2}}{\tau} &= \mu'_{i-1/2,j-1/2,k} \left(\frac{u_{i-1/2,j,k}^n - u_{i-1/2,j-1,k}^n}{\Delta y} + \frac{v_{i,j-1/2,k}^n - v_{i-1,j-1/2,k}^n}{\Delta x} \right). \end{aligned}$$

(λ , μ – параметры Ламе; ρ - плотность, σ - вектор тензора напряжений, u, v, w – вектора скоростей смещения, f – массовая сила, τ - шаг дискретизации по времени)

2. Реализация конечно-разностной схемы на GPU

Реализация рассматриваемой задачи осуществляется на графическом процессоре с помощью технологии CUDA. Используемый язык программирования – C++. На текущей стадии реализации максимальная размерность трехмерной модели составляет 1024*128*64 или 8388608 (произвольное произведение по трем размерностям) и обусловлена имеющимся объемом видеопамати. Максимальное количество шагов по времени на указанном размере модели без возникновения прерывания «deadlock» - 1000000 шагов. В программе для расчетов используется одинарный тип данных – float.

Распараллеливание функции, насчитывающей выходные массивы, осуществляется в коде, приведенном ниже. Переменная `tid` отвечает за корректное распределение данных по процессорам видеокарты.

```

int i=0;
int tid = threadIdx.x + blockIdx.x * blockDim.x;
for(i = time[0]; i < time[1]; i++)// Цикл по времени
{
    while (tid < N)
    {
        //Расчет схемы.
        tid +=blockDim.x * gridDim.x;
    }
}
}

```

Важным вопросом остаются временные затраты на пересылку исходных массивов данных на видеокарту и возврат готового результата. Была проведена серия экспериментов, демонстрирующая процентное соотношение, затраченное на счет и пересылку на различных размерах модели и итерационного цикла по времени (рис. 1).

В таблице 1 приведены характеристики используемых вычислительных средств.

Таблица 1. Вычислительные средства

CPU	GPU NVIDIA GeForce GTX470
Процессор: Intel Core i7 2600 (3.40 GHz)	Частота GPU 576 МГц
Оперативная память: DDR-III DIMM 2048Mb x2 DDR1333	Кол-во универсальных процессоров 448
Операционная система: Windows 7 Professional 64-bit	Кол-во текстурных процессоров 56
	Частота ядра 607 МГц
	Видеопамять 1280Mb DDR5
	Частота видеопамяти 3348 МГц
	Шина памяти 320 бит

На рис. 2 представлено время выполнения операций, выполняемых с GPU, в зависимости от размеров модели для 1 шага итерации временного цикла по трем параметрам: transfer – пересылка данных, calculate - расчет, all – суммарное время выполнения (Рис. 2 – правый ряд).

В сравнении с расчетом на центральном процессоре (Рис. 2 – левый ряд) для одной итерации по времени достигается ускорение до 3 раз. При увеличении количества итераций цикла по времени и модельной сетки решаемой задачи полученное ускорение может достигать сотни раз.

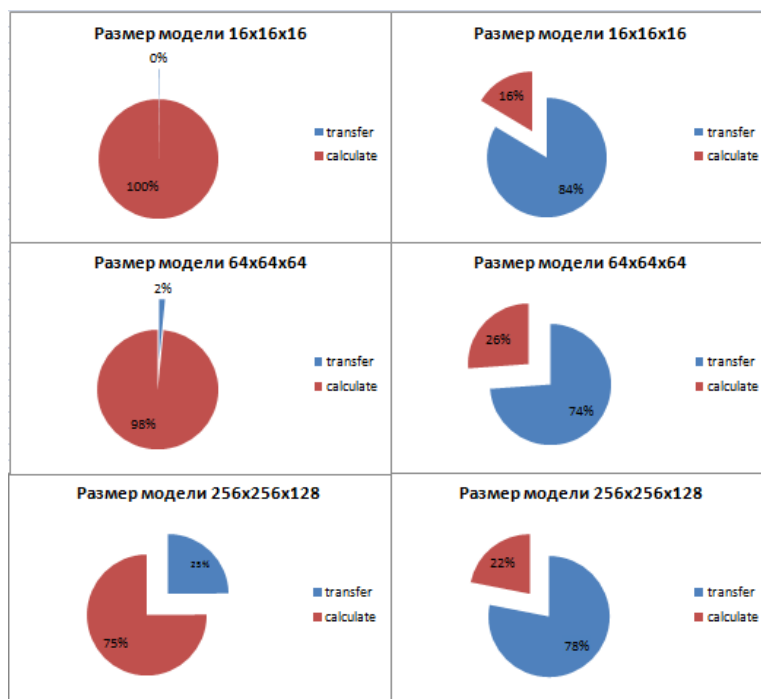


Рис. 1. Процентное соотношение на пересылку (transfer) и счет (calculate) на различных размерах модели и цикла по времени (слева – 1 итерация, справа – 1000000)

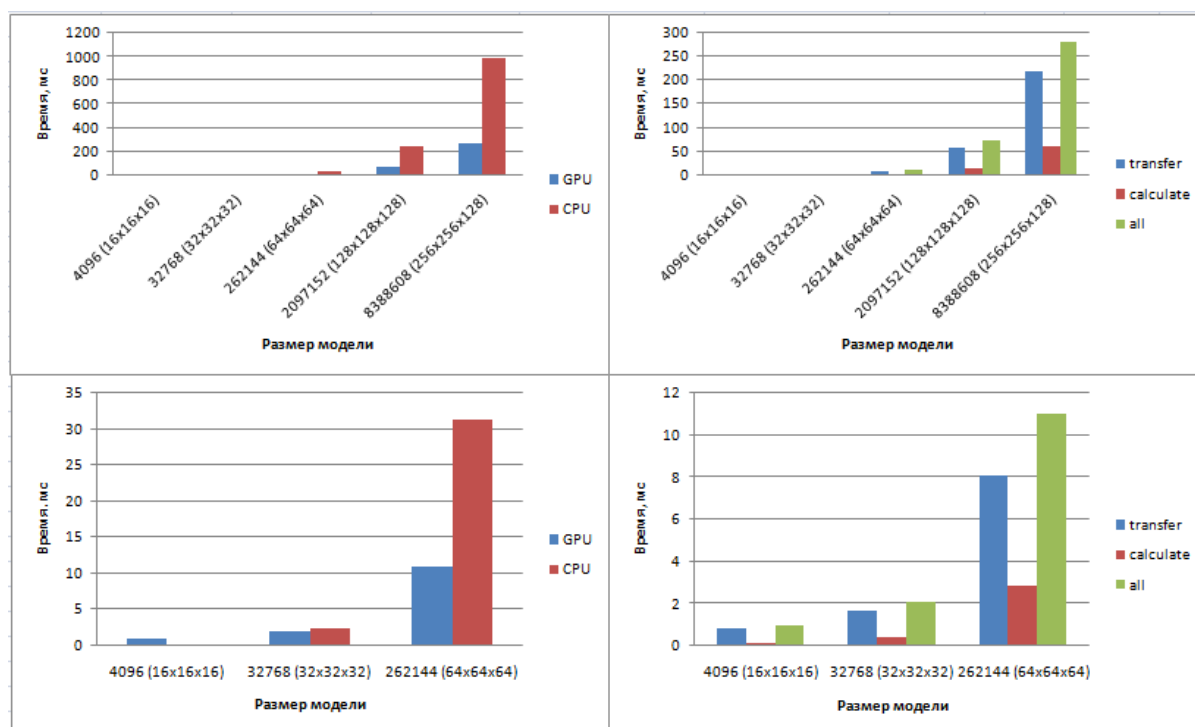


Рис. 2. Время выполнения расчета в зависимости от размера модели (верхний ряд – все размеры, нижний ряд – 4096, 32768, 262144 в более крупном масштабе)

Заключение

Изначально решаемая задача, требует глубокого знания архитектуры используемого графического процессора. Представленный в работе подход является начальным приближением к технологии численного моделирования с использованием ограниченных средств рабочей станции и типа графического процессора. При этом получены предварительные оценки возможностей выбранной технологии на небольших моделях сред. Проблема возникновения ситуации, называемой «deadlock», была решена при разработке метода для изымания промежуточных результатов моделирования. Таким образом, издержки на запуск служебных функций сокращены.

В дальнейшем планируется доработка и усовершенствование текущей версии программы, и перенос ее на платформу гибридного вычислительного устройства с графическими ускорителями Tesla. Это позволит увеличить размеры модели среды и повысить скорость расчета. Кроме того, недавно вышедшая версия CUDA 4.0, открывает новые возможности организации данных и их пересылки, что дает преимущества для распараллеливания программы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сандерс Дж., Кандрот Э. Технология CUDA в примерах. // Введение в программирование графических процессоров, изд-во ДМК Пресс, Москва, 2011, 231 с.
2. Б.М. Глинский, Д.А. Караваев, В.В. Ковалевский, В.Н. Мартынов Численное моделирование и экспериментальные исследования грязевого вулкана «Гора Карабетова» вибросейсмическими методами // Вычислительные методы и программирование, 2010, Т. 11, Москва, с. 95-104.

© А.А. Якименко, 2012

СЕГМЕНТАЦИЯ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ПО СПЕКТРАЛЬНЫМ И ТЕКСТУРНЫМ ПРИЗНАКАМ

Игорь Алексеевич Пестунов

Институт вычислительных технологий СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 6, заведующий лабораторией обработки данных, тел. (383)334-91-55, e-mail: pestunov@ict.nsc.ru

Сергей Александрович Рылов

Новосибирский государственный университет, магистрант, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, e-mail: rylovs@mail.ru

Предлагается вычислительно эффективный алгоритм сегментации спутниковых изображений, основанный на совместном использовании спектральных и текстурных характеристик. Результаты экспериментов на модельных и реальных изображениях подтверждают эффективность предложенного алгоритма.

Ключевые слова: спутниковые изображения высокого разрешения, сегментация изображений, спектральные и текстурные признаки.

SEGMENTATION OF SATELLITE IMAGES WITH HIGH SPATIAL RESOLUTION BY SPECTRAL AND TEXTURAL FEATURES

Igor A. Pestunov

Institute of Computational Technologies SB RAS, 6 Acad. Lavrentjev ave., Novosibirsk, 630090, laboratory chief of data processing, tel. (383)334-91-55, e-mail: pestunov@ict.nsc.ru

Sergey A. Rylov

Novosibirsk State University, 2 Pirogova st., Novosibirsk, 630090, undergraduate, tel. (383)334-91-55, e-mail: rylovs@mail.ru

Effective algorithm for multispectral image segmentation based on joint use of spectral and textural features is proposed. Results on the model data and real images confirming its efficiency are presented.

Key words: satellite images with high spatial resolution, image segmentation, spectral and textural features.

1. Введение

Сегментация является одним из важнейших этапов анализа цифровых изображений [1]. Она заключается в разбиении изображения на непересекающиеся области на основе однородности (похожести) их спектральных и (или) пространственных (текстура, форма, контекст и т.п.) характеристик. Методы сегментации изображений нашли широкое применение во многих прикладных областях, включая дистанционное зондирование Земли из космоса [2].

С каждым годом растет число запускаемых спутников, обеспечивающих поставку многоспектральных изображений высокого пространственного

разрешения (1-10 м) [3]. Их особенность состоит в том, что значительная часть информации о представленных на них объектах заключена в текстуре изображения. Применительно к таким изображениям, традиционные методы сегментации, учитывающие лишь спектральные характеристики, оказываются непригодными, поскольку приводят к чрезмерной фрагментации однородных по текстуре областей. Не являются исключением и методы, реализованные в известных пакетах программ обработки спутниковых изображений (ERDAS Imagine, ENVI и др.).

В связи с этим разработка методов и программно-алгоритмических средств так называемой спектрально-текстурной сегментации многоспектральных изображений в настоящее время является весьма актуальной задачей [4].

В данной работе предлагается метод спектрально-текстурной сегментации спутниковых изображений, основанный на непараметрических алгоритмах кластеризации и свободный от проблемы введения единой метрики в пространстве спектральных и текстурных признаков.

2. Краткое описание метода

Основная идея предлагаемого метода заключается в разделении процесса сегментации на два этапа. На первом этапе производится сегментация исходного изображения по спектральным признакам, а на втором – сегментация картосхемы, полученной на первом этапе, по текстурным признакам. Такой подход позволяет избежать традиционных трудностей, связанных с введением единой метрики, которая необходима при кластеризации данных в пространстве разнородных признаков.

На первом этапе для сегментации изображения по спектральным признакам предлагается использовать разработанный ранее с участием авторов вычислительно эффективный алгоритм *ЕССА* [5]. Алгоритм *ЕССА* основан на ансамбле сеточных (grid-based) алгоритмов кластеризации и позволяет выделять кластеры со сложными границами, различающиеся размером, формой и плотностью (в том числе при наличии «шума»).

Алгоритм кластеризации *ЕССА* позволяет разбить изображение на однородные лишь по спектральным признакам области без какого-либо учета их текстурных характеристик. Поэтому картосхема, получаемая после первого этапа обработки спутникового изображения высокого пространственного разрешения, представляет собой, как правило, чрезмерно раздробленную картину. На ней присутствует множество спектральных классов, которым нет соответствия среди реальных (информационных) классов, интересных пользователю.

На втором этапе производится сегментация полученной картосхемы по текстурным признакам и снижение ее раздробленности.

Для описания соответствующего этому этапу алгоритма введем необходимые обозначения.

Пусть картосхема, полученная в результате применения алгоритма *ЕССА*, состоит из $N_r \times N_c = N$ элементов. Разобьем ее на квадратные фрагменты

размером $k \times k$ элементов. Для простоты положим, что числа N_r и N_c кратны k . Каждому из таких фрагментов f_{ij} , $i = 1, \dots, N_r / k$; $j = 1, \dots, N_c / k$, сопоставим вектор $z_{ij} = (z_{ij}^1, \dots, z_{ij}^M) \in R^M$. Здесь $z_{ij}^l = N_{ij}^l / k^2$, где N_{ij}^l – число элементов фрагмента f_{ij} , относящихся к кластеру с номером l , $l = 1, \dots, M$.

Вектор z_{ij} фактически содержит в себе информацию о текстурной композиции элементов картосхемы в пределах фрагмента f_{ij} . Поэтому кластеризация векторов z_{ij} приведет к сегментации картосхемы по текстуре.

В качестве меры близости между двумя такими векторами $x = (x^1, \dots, x^M)$ и $y = (y^1, \dots, y^M) \in R^M$ примем метрику $\mu(x, y) = 1 - \sum_{i=1}^M \min(x^i, y^i)$.

Процедура кластеризации векторов z_{ij} выполняется в три этапа. На первом этапе осуществляется поиск центров кластеров с помощью простого алгоритма DINA [6]. На втором этапе полученные центры анализируются на предмет близости друг к другу. Если какие-либо два центра находятся на расстоянии меньше r (заданный радиус сферы), то они объединяются в один центр, соответствующий центру тяжести их внутренних точек. На третьем этапе осуществляется классификация векторов путем отнесения их к ближайшему центру, лежащему на расстоянии не превышающем r .

Кластеры, число элементов которых меньше порога τ (задаваемого в процентах от общего числа фрагментов картосхемы), относятся к «шуму». Попавшие в «шум» фрагменты обрабатываются поэлементно. Каждый элемент «шумового» фрагмента относится к тому из соседних расклассифицированных фрагментов, в котором чаще встречаются представители спектрального кластера, содержащего обрабатываемый элемент.

Границы однородных текстурных областей, выделенных на картосхеме в ходе второго этапа сегментации, являются очень грубыми. Для их уточнения последовательно рассматриваются пограничные элементы всех выделенных текстурных областей и содержащие их фрагменты. Рассматриваемый пограничный элемент может либо остаться в текущей области, либо переместиться в смежную (если спектральный кластер, к которому он отнесен, чаще встречается в текстурном кластере смежного фрагмента, чем в содержащем его). После этого рассматриваемый элемент считается частью границы той области, к которой он отнесен. Процесс продолжается до тех пор, пока все пограничные элементы всех текстурных областей не будут рассмотрены.

Предложенный алгоритм текстурной сегментации картосхемы реализован на языке Java в виде модуля *STSA* с входными параметрами k, r, τ .

3. Результаты экспериментальных исследований

В данном разделе представлены результаты сегментации модельных и реальных изображений с использованием модулей *ECCA* и *STSA*,

подтверждающие вычислительную эффективность предложенного метода. Обработка проводилась на ПЭВМ с тактовой частотой 3.3 ГГц.

Во всех экспериментах при работе алгоритма *ECCA* использовался ансамбль из восьми элементов, а для модуля *STSA* значения параметров r и τ полагались равными 0.4 и 1 соответственно.

На рисунке 1 представлены результаты сегментации цветного изображения размером 600×450 пикселей. При работе модуля *STSA* параметр $k = 15$. Общее время обработки 0.3 с.

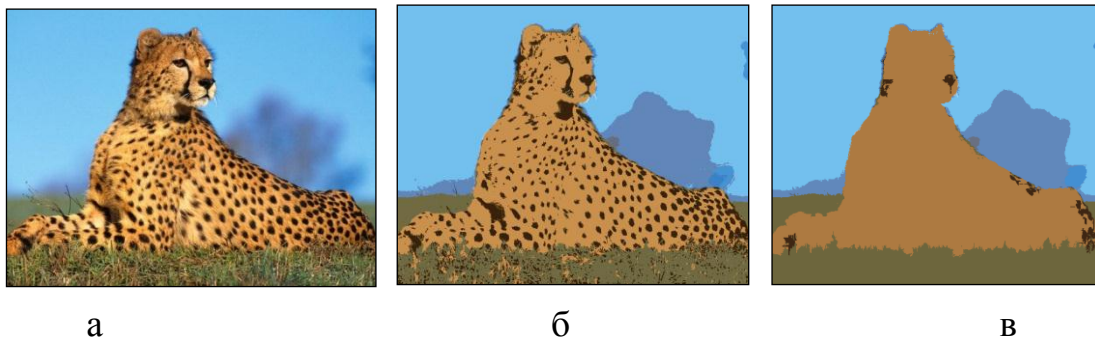


Рис. 1. а – исходное изображение; б, в – результаты сегментации по спектральным и спектрально-текстурным признакам соответственно

На рис. 2 и 3 представлены примеры сегментации двух модельных RGB-изображений размером 800×800 и 627×311 пикселей соответственно. Картосхемы, полученные в ходе выполнения алгоритма *ECCA*, разбивались на фрагменты размером 12×12 пикселей для первого и 35×35 пикселей для второго изображения.

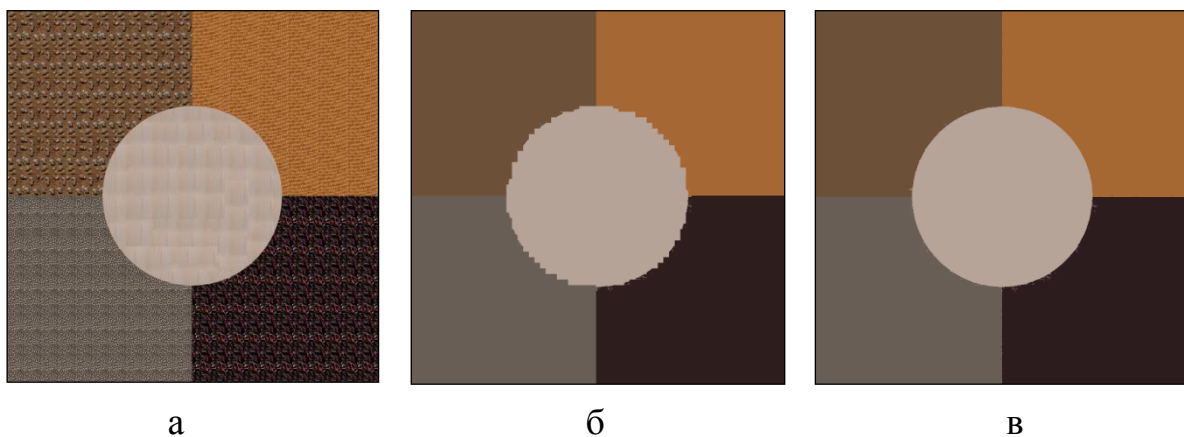


Рис. 2. а – исходное изображение; б, в – результаты сегментации до и после коррекции границ соответственно

На рис. 4 представлены результаты сегментации фрагмента снимка новосибирского Академгородка размером 2701×2458 пикселей, полученного со спутника QuickBird 22 октября 2008 г. Для обработки использовались три

спектральных канала (2, 3 и 4). Картосхема, полученная в результате применения *ЕССА*, разбивалась на фрагменты размером 12×12 пикселей. Общее время обработки 2.6 с.

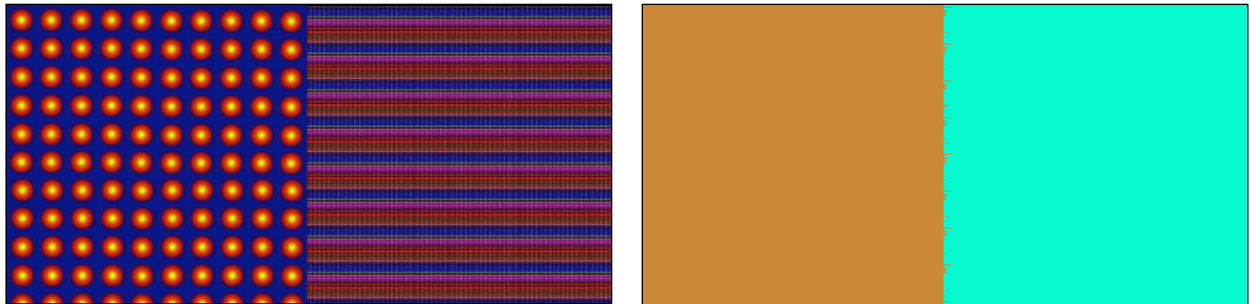


Рис. 3. Исходное изображение (слева) и результаты сегментации (справа)

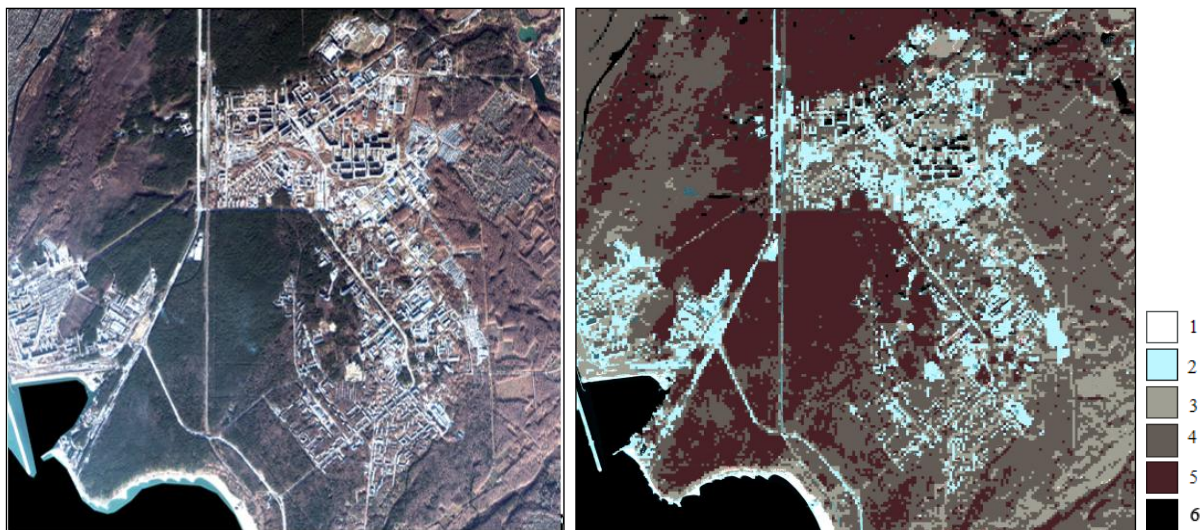


Рис. 4. Слева – фрагмент синтезированного изображения QuickBird, построенного по 4, 3 и 2 каналам; справа – результаты сегментации. Выделено 6 кластеров (1 – песок; 2 – здания, сооружения, дороги; 3 – травянистая растительность; 4 – лиственные насаждения; 5 – сосновые насаждения; 6 – вода)

4. Заключение

В работе предложены двухэтапный метод и созданный на его основе алгоритм спектрально-текстурной сегментации изображений. Приведены результаты экспериментов на модельных и реальных изображениях, подтверждающие вычислительную эффективность предложенного алгоритма и высокое качество получаемых картосхем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhang D., Islam M.M., Lu G. A review on automatic image annotation techniques // Pattern Recognition. – 2012. – Vol. 45. – P. 346-362.
2. Dey V., Zhang Y., Zhong M. A review on image segmentation techniques with remote sensing perspective // ISPRS TC VII Symposium - 100 Years ISPRS, Vienna, Austria, July 5-7 2010. IAPRS. – Vol. XXXVIII. – Part 7A. – P. 31-42.
3. Болсуновский М.Л., Дворкин Б.А. Развитие систем ДЗЗ и информационно-аналитического обеспечения данными космической съемки: ближайшие перспективы // Геоинформатика. – 2010. – № 4. – С. 11-17.
4. Ilea D.E., Whelan P.F. Image segmentation based on the integration of colour-texture descriptors. – A review // Pattern Recognition. – 2011. – Vol. 44. – P. 2479-2501.
5. Пестунов И.А., Бериков В.Б., Куликова Е.А., Рылов С.А. Ансамблевый алгоритм кластеризации больших массивов данных // Автометрия. – 2011. – Т. 47. – № 3. – С. 49-58.
6. Загоруйко Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. Новосибирск: Изд-во Ин-та математики. – 1999. – С. 45.

© И.А. Пестунов, С.А. Рылов, 2012

ИНФОРМАТИВНОСТЬ СИСТЕМ ТЕКСТУРНЫХ ПРИЗНАКОВ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Игорь Алексеевич Пестунов

Институт вычислительных технологий СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 6, заведующий лабораторией обработки данных, тел. (383)334-91-55, e-mail: pestunov@ict.nsc.ru

Павел Владимирович Мельников

Новосибирский государственный университет, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, магистрант, e-mail: pvm96@yandex

В данной работе исследуется информативность систем текстурных признаков, которые построены с использованием четырех популярных методов, основанных на статистиках гистограммы абсолютных разностей и матрицы смежности уровней серого тона, а также авторегрессионной модели SAR и гауссовской марковской модели случайных полей GMRF.

Ключевые слова: спутниковое изображение, текстурные признаки, классификация изображений, качество классификации.

INFORMATIVITY OF SYSTEMS OF TEXTURAL FEATURES FOR CLASSIFICATION OF SATELLITE IMAGES WITH HIGH SPATIAL RESOLUTION

Igor A. Pestunov

Institute of Computational Technologies SB RAS, 6, Acad. Lavrentjev ave., Novosibirsk, 630090, Head of data processing laboratory, tel. (383)334-91-55, e-mail: pestunov@ict.nsc.ru

Pavel V. Melnikov

Novosibirsk State University, 2, Pirogova st., Novosibirsk, 630090, undergraduate, tel. (383)334-91-55, e-mail: pvm96@yandex

Quality of 4 popular texture features extraction methods and their application in the field of classification of hi-resolution satellite images are studied. The discussed methods are: Gray Level Difference (GLD), Gray Level Co-occurrence Matrices (GLCM), Gaussian Markov Random Field (GLRM) model and Simultaneous Autoregressive (SAR) model. Quality of combined sets of textural features and minimization of these sets are also studied.

Key words: satellite imagery, textural features, image classification, classification quality.

Введение

В последние годы наблюдается непрерывный рост числа спутников, обеспечивающих поставку изображений высокого пространственного разрешения (5 м или меньше) [1]. При таком разрешении для многих классов земного покрытия (леса, болота, урбанизированные территории и др.) основная часть информации, используемая при дешифрировании, содержится в текстуре изображения.

К настоящему времени известно более десятка различных методов выделения текстурных признаков [2-4]. Однако универсального метода, позволяющего описать все разнообразие текстур, не существует [5].

Результаты экспериментальных исследований показывают [6], что благодаря комбинированию различных методов, можно добиться существенного повышения качества классификации текстурных изображений.

В данной работе анализируется информативность систем текстурных признаков, построенных с помощью четырех методов, которые хорошо зарекомендовали себя при решении реальных задач. Первые два метода основаны на использовании статистик, полученных с помощью гистограммы абсолютных разностей (Grey-Level Difference (GLD)) [7] и матрицы смежности уровней серого тона (Grey-Level Co-occurrence Matrix (GLCM)) [8]; третий метод – на гауссовской марковской модели случайных полей (Gaussian Markov Random field (GMRF)) [4], а четвертый – на авторегрессионной модели (Simultaneous Autoregressive Model (SAR)) [9].

1. Краткое описание используемых методов

Метод GLD [7]. Этот метод использует для описания текстуры гистограмму $p(\delta, \theta)$ абсолютных разностей уровней серого тона соседних пикселей, расположенных на расстоянии δ друг от друга по направлению θ . В наших экспериментах параметр $\delta = 1$, а $\theta \in \{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\}$. На основе гистограммы $p(\delta, \theta)$ были вычислены следующие признаки: $CON = \sum i^2 p_i(\delta, \theta)$, $ASM = \sum p_i^2(\delta, \theta)$, $ENT = -\sum p_i(\delta, \theta) \log(p_i(\delta, \theta))$ и $MEAN = \frac{1}{m} \sum i p_i(\delta, \theta)$, где m – число уровней серого тона. Общее число сгенерированных признаков равнялось 16.

Метод GLCM [8]. В рамках этого метода текстура характеризуется матрицей смежности значений уровня серого тона. Элементами этой матрицы $P_{ij}(\delta, \theta)$ являются относительные частоты наличия на изображении соседних точек с яркостями i и j , расположенных на расстоянии δ друг от друга по направлению θ . Значения параметров δ и θ выбирались такими же, как и в методе GLD. В качестве текстурных признаков использовались четыре статистики, предложенные в работе [7]: контраст (CON), второй угловой момент (ASM), энтропия (ENT) и корреляция (COR). Общее число признаков, полученных с помощью этого метода, равнялось 16.

Метод GMRF [4]. Пусть I_{xy} – значение уровня серого тона для пикселя с координатами (x, y) . Предполагается, что вероятность значения I_{xy} зависит от пикселей, расположенных в окрестности N_{xy} (рис. 1):

$$p(I_{xy} | I_{kl}, (k, l) \in N_{xy}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp \left(-\frac{\left(I_{xy} - \sum_{t=1}^n \alpha_t s_{kl,t} \right)^2}{2\sigma^2} \right),$$

где $s_{xy,1} = I_{x-1,y} + I_{x+1,y}$, $s_{xy,2} = I_{x,y-1} + I_{x,y+1}$, $s_{xy,3} = I_{x-2,y} + I_{x+2,y}$,
 $s_{xy,4} = I_{x,y-2} + I_{x,y+2}$, $s_{xy,5} = I_{x-1,y-1} + I_{x+1,y+1}$, $s_{xy,6} = I_{x-1,y+1} + I_{x+1,y-1}$. Параметры α_t ($t=1,...,6$) , характеризуют направленность текстуры, а σ – ее зернистость. Эти параметры выступают в качестве текстурных признаков.

		$x, y-2$		
	$x-1, y-1$	$x, y-1$	$x+1, y-1$	
$x-2, y$	$x-1, y$	x, y	$x+1, y$	$x+2, y$
	$x-1, y+1$	$x, y+1$	$x+1, y+1$	
		$x, y+2$		

Рис. 1. Окрестность N_{xy} для пикселя (x, y) выделена серым цветом

Для фрагмента изображения размером $M \times N$ параметры α_t и σ оцениваются с использованием метода наименьших квадратов следующим образом:

$$\begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{pmatrix} = \left(\sum_{xy} \begin{bmatrix} s_{xy,1} s_{xy,1} & \cdots & s_{xy,1} s_{xy,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{xy,n} s_{xy,1} & \cdots & s_{xy,n} s_{xy,n} \end{bmatrix} \right)^{-1} \sum_{xy} I_{xy} \begin{pmatrix} s_{xy,1} \\ \vdots \\ s_{xy,n} \end{pmatrix}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{xy} \left[I_{xy} - \sum_{t=1}^n \alpha_t s_{xy,t} \right]^2}{(M-2)(N-2)}.$$

Метод SAR [9]. Предполагается, что значение I_{xy} зависит от соседних пикселей: $I_{xy} = \sum_{(i,j) \in N} \theta_{ij} I_{x \oplus i, y \oplus j} + \sqrt{\rho} \omega(x, y)$, где $\oplus$ – сложение по модулю M ;

$\omega(x, y)$ – независимые одинаково распределенные гауссовские случайные величины с нулевым средним и единичной дисперсией; M – размер квадратного фрагмента изображения; $N = \{(1,0), (-1,0), (0,1), (0,-1)\}$ – множество координат соседних точек. Параметры модели – веса $\vec{\theta} = col(\theta_{i,j}, (i,j) \in N)$ (здесь и далее $col(a_{ij}, (i,j) \in N)$ – вектор-столбец $(a_{1,0}, a_{-1,0}, a_{0,1}, a_{0,-1})^T$), характеризуют зависимость уровня серого от уровней серого соседей; ρ – общая дисперсия шума. Эти параметры определяются итеративно по следующим формулам:

$$\vec{\theta}(k+1) = \left(R - \frac{1}{\rho(k)} S \right)^{-1} \left(\vec{V} - \frac{1}{\rho(k)} \vec{U} \right), \quad \rho(k) = \frac{1}{M^2} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{M-1} (I_{xy} - \vec{\theta}^T(k) \vec{z}_{xy}),$$

где $\vec{\theta}(k) = col(\theta_{ij}(k), (i,j) \in N)$, k – номер итерации, $\vec{\theta}(0) = S^{-1} \vec{U}$,

$$\begin{aligned}\vec{z}_{xy} &= \text{col}\left(I_{x \oplus i, y \oplus j}, (i, j) \in N\right), R = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{M-1} \vec{s}_{xy} \vec{s}_{xy}^T - \vec{c}_{xy} \vec{c}_{xy}^T, S = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{M-1} \vec{z}_{xy} \vec{z}_{xy}^T, \\ \vec{U} &= \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{M-1} I_{xy} \vec{z}_{xy}, \vec{V} = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{M-1} \vec{c}_{xy}, \vec{c}_{xy} = \text{col}\left(\cos \frac{2\pi}{M}((x-1)i + (y-1)j), (i, j) \in N\right), \\ \vec{s}_{xy} &= \text{col}\left(\sin \frac{2\pi}{M}((x-1)i + (y-1)j), (i, j) \in N\right).\end{aligned}$$

Итерационный процесс прекращаются, когда $|\vec{\theta}(k+1) - \vec{\theta}(k)| < \varepsilon = 0.001$.

В качестве текстурных признаков были выбраны параметры ρ , $\theta_{1,0}$ и $\theta_{0,1}$, так как для данного N $\theta_{1,0} = \theta_{-1,0}$, а $\theta_{0,1} = \theta_{0,-1}$.

2. Исходные данные и методика исследования

Для экспериментального исследования использовались 40 текстурных изображений размером 640×640 пикселей, взятые из альбома Бродатца [10] (рис. 2), и пять фрагментов спутникового снимка QuickBird (рис. 3), представляющие пять классов земного покрытия – редкие сосновые леса (1), густые сосновые леса (2), лиственные леса (3), сельскохозяйственные угодья (4) и территории садоводческих обществ (5). Фрагменты получены путем преобразования псевдоцветного изображения, построенного с использованием 2, 3 и 4 каналов снимка QuickBird. Размер каждого из этих фрагментов составлял 256×256 пикселей.

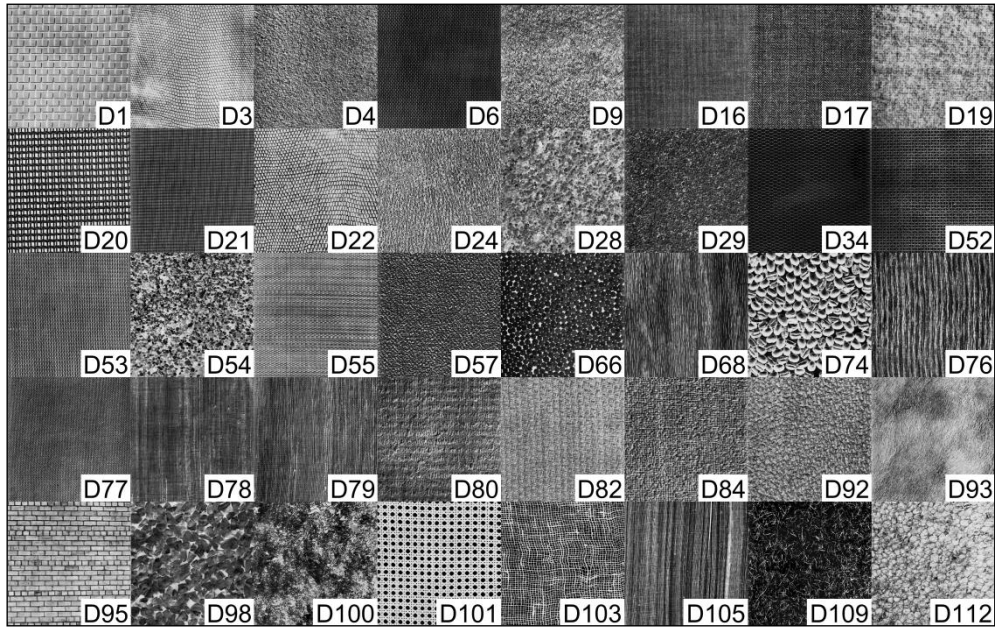


Рис. 2. Текстуры изображения из альбома Бродатца

Оценка качества систем текстурных признаков производилась путем вычисления ошибки классификации, полученной на контрольной выборке с помощью классификатора максимального правдоподобия, встроенного в пакет RSI ENVI 4.5.

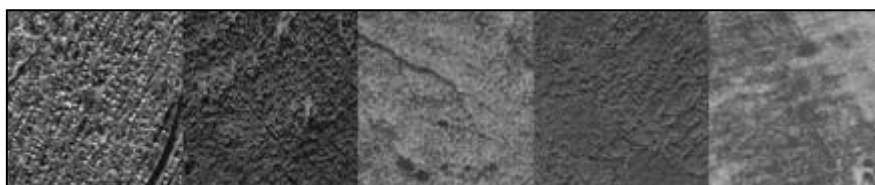


Рис. 3. Пять фрагментов снимка QuickBird

Для формирования обучающих и контрольных выборок на изображениях из альбома Бродатца с помощью скользящего окна с перекрытием 50 % выделялись фрагменты размером 32×32 пикселя; на каждом из пяти фрагментов снимка QuickBird с помощью скользящего окна с перекрытием 25 % выделялись фрагменты размером 16×16 . Треть всех выделенных фрагментов использовалась для формирования обучающей выборки, остальные составляли контрольную выборку.

Для сокращения вычислительных затрат при выборе наилучших систем признаков использовалось расстояние Джеффриса-Матусита [11].

3. Результаты экспериментальных исследований

В ходе исследований было установлено, что информативность признаков, получаемых с помощью метода GLCM, зависит от числа уровней квантования серого тона. Набор признаков, полученный при 16 уровнях квантования, обеспечивал минимальную ошибку классификации, поэтому во всех экспериментах использовались изображения с шестнадцатью градациями уровня серого тона.

В таблице представлены результаты классификации изображений, приведенных на рисунках 2 и 3, с использованием различных комбинаций текстурных признаков. Несложно заметить, что при классификации изображений из альбома Бродатца среди отдельных методов наилучшие результаты обеспечивают GLCM и GLD, среди пар методов – GLCM+GLD и GLD+GMRF, а среди троек – GLD+GLCM+GMRF. Использование всех четырех методов обеспечивает незначительное увеличение качества классификации.

Таблица. Результаты классификации

Использованные методы	Число признаков	Точность классификации, %	
		Альбом Бродатца	QuickBird
GLD	16	90.77	95.43
GLCM	16	90.87	98.29
GMRF	7	71.63	97.40
SAR	3	57.97	92.13
GLD+GLCM	32	93.85	97.61
GLD+GMRF	23	93.04	96.59
GLD+SAR	19	92.83	97.39
GLCM+GMRF	23	92.75	98.41
GLCM+SAR	19	91.69	99.14
GMRF+SAR	10	84.34	97.93
GLD+GLCM+GMRF	39	95.10	97.98
GLD+GLCM+SAR	35	94.09	98.53
GLD+GMRF+SAR	26	94.34	97.55
GLCM+GMRF+SAR	26	93.30	99.01
GLD+GLCM+GMRF+SAR	42	95.20	98.70

В последнем столбце в таблицы представлены результаты классификации пяти фрагментов спутникового снимка QuickBird. В данном случае, среди отдельных методов наилучшие результаты обеспечивают GLCM и GMRF, среди пар методов – GLCM+SAR и GLCM+GMRF, а среди троек – GLCM+GMRF+SAR. Использование всех четырех методов приводит к ухудшению качества классификации.

Из всех 42 признаков были выбраны пары признаков, обеспечивающие максимальное среднее расстояние Джеффриса-Матусита между всеми парами классов. Наилучшие пары образованы признаками COR и ENT метода GLCM; параметр направления θ существенного влияния не оказывал. Точность классификации с использованием пяти наилучших пар признаков варьировалась от 96.83 до 97.47 %. Использование наборов из трех, четырех и более признаков к существенному увеличению точности классификации не привело.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования показали, что при наличии большого числа текстурных классов точность классификации можно повысить путем комбинирования рассмотренных в работе методов. Кроме того, по их результатам можно также сделать следующие выводы: при классификации спутниковых изображений наилучшее качество обеспечивает статистический метод GLCM, использование модельных методов GMRF и SAR нецелесообразно ввиду их вычислительной трудоемкости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Болсуновский М.Л., Дворкин Б.А. Развитие систем ДЗЗ и информационно-аналитического обеспечения данными космической съемки: ближайшие перспективы // Геоинформатика. – 2010. – № 4. – С. 11-17.

2. Харалик Р.М. Статистический и структурный подходы к описанию текстур // ТИИЭР. – 1979. – Т. 67. – №5 – С. 98-120.
3. Zhang J., Tan T. Brief review of invariant texture analysis methods // Pattern Recognition. – 2002. – Vol. 35. – P. 735-747.
4. Petrou M., Garcia Sevilla P. Image Processing Dealing with Texture. London: Wiley. – 2006.
5. The Handbook of Patter Recognition and Computer Vision (2nd ed.) / C.H. Chen, L.F. Pau, P.S.P. Wang (eds.) – World Scientific Publishing Co. – 1998. – P. 207-248.
6. Al-Kadi O.S. Texture Measures Combination for Improved Meningioma Classification of Histopathological Images // Pattern Recognition. – 2010. – Vol. 43 (6) – P. 2043-2053.
7. Weszka J.S., Dyer C.R., Rosenfield A. A. Comparative Study of Texture Measures for Terrain Classification // IEEE Trans. on Syst., Man, and Cybernetics. – 1976. –Vol. SMC-6. – No. 4. – P. 269-285.
8. Haralick R. M., Shanmuga K., Dinstein I., Textural Features for Image Classification // IEEE Trans. on Syst. Man and Cybernetics. – 1973. – Vol. SMC3. – P. 610-621.
9. Kashyap R., Chellappa R. Estimation and Choice of Neighbors in Spatial-Interaction Models of Images // IEEE Trans. on Information Theory – 1983. – Vol. IT-29 (1). – P. 60-72.
10. Brodatz P. A. Photographic Album for Artists and Designers // New York: Dover. – 1996.
11. Дейвис Ш.М., Ландгребе Д.А., Филипс Т.Л. и др. Дистанционное зондирование: количественный подход // М.: Недра. – 1983. – 396 с.

© И.А. Пестунов, П.В. Мельников, 2012

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МОНОХРОМАТИЧЕСКИХ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ПО ДАННЫМ МОНИТОРИНГА РАЙОНА ОЗЕРА БАЙКАЛ

Сергей Александрович Ефимов

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, научный сотрудник лаборатории геофизической информатики, тел. (383)3307069, e-mail: serg@opg.sccc.ru

В статье представлены результаты обработки экспериментальных данных, полученных в рамках вибросейсмического мониторинга района озера Байкал. Исследован процесс затухания вибросейсмических волн в зависимости от расстояния. Построены графики затухания волн для частот 7, 8, 9 Гц.

Ключевые слова: вибросейсмический мониторинг, затухание вибросейсмических волн.

RESEARCH OF FEATURES OF DISTRIBUTION MONOCHROMATIC VIBROSEISMIC WAVES ACCORDING TO MONITORING AREA OF LAKE BAIKAL

Sergei A. Efimov

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russian Federation, the prospectus of Academician Lavrentjeva, 6, the scientific employee of laboratory of geophysical computer science, tel. (383)3307069, e-mail: serg@opg.sccc.ru

Results of processing of the experimental data received in frameworks vibroseismic of monitoring of area of lake Baikal are submitted. Process of attenuation vibroseismic waves is investigated depending on distance. Schedules of attenuation of waves for frequencies 7, 8, 9 Hz are constructed.

Key words: vibroseismic of monitoring, attenuation vibroseismic waves.

Серия разрушительных землетрясений в марте 2011 года в районе акватории Японского острова еще раз напомнила об актуальности создания геофизических систем, ориентированных на прогноз тектонических событий. Очевидно, что появление эффективных геофизических систем связано с изучением строения структуры земной поверхности и созданием инструментов для ее изучения. В настоящее время существует технология вибросейсмического просвечивания земли, позволяющая объективно исследовать структурные особенности земной поверхности и формировать прогнозные факторы эволюции литосферы. В 2009 г. сотрудниками ИВМиГ СО РАН проведены полевые экспериментальные работы по вибросейсмическому просвечиванию и мониторингу разломных зон хребта Хамар-Дабан (юго-восток Байкала). При проведении работ по активному вибросейсмическому просвечиванию исследовалась структура волнового поля

вибраторов при прохождении разломных зон хребта Хамар-Дабан с использованием профильной регистрации волнового поля. В качестве источника сейсмических волн использовался вибратор СВ-100, расположенный на Южно-Байкальском вибросейсмическом полигоне СО РАН, п. Бабушкин. Излучение сигналов вибратором осуществлялось в режиме свип-сигналов в диапазоне частот 6-10 Гц, и в режиме гармонического излучения на фиксированных частотах 7 Гц, 8 Гц, 9 Гц. Регистрация осуществлялась на профилях длиной 5 - 10 км в зонах разломов вдоль реки Мантуриха (район п. Бабушкин, удаление 3,6 км от источника, длина профиля 4,8 км), реки Еловка (район г. Каменска, удаление 38,9 км от источника, длина профиля 4,0 км), реки Большая Санжеевка (район п. Хурамша, удаление 59,3 км от источника, длина профиля 10,0 км). Регистрация вибросейсмических сигналов осуществлялась аппаратурой Байкал (22 регистратора) с сейсмическими датчиками GS-3, СК1-П, координатная привязка - системой GPS.

Вибросейсмическое зондирование проводилось в рамках комплексного геофизического исследования зон разломов. Общая схема экспериментов представлена на следующем рисунке.

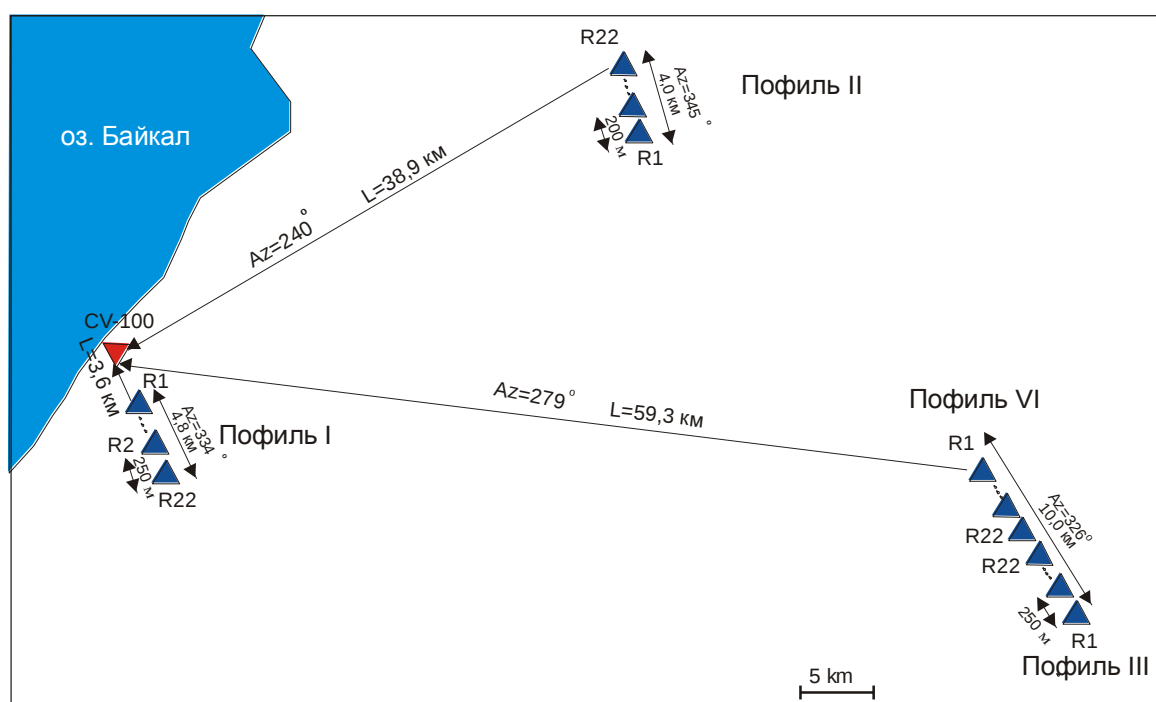


Рис. 1. Общая схема экспериментов

Общая схема эксперимента, план проведения эксперимента и результаты регистрации сейсмических сигналов представлены на информационно-вычислительной системе «Вибросейсмическое Просвечивание Земли» - сайт <http://org.sscc.ru/db>. Для формирования таблиц и графиков амплитудных значений волнового монохроматического поля для всех профилей использованы инструменты информационно-вычислительной системы «Вибросейсмическое

Просвечивание Земли». Все оценки получены для Z компоненты сейсмоприемников.

Целью данной работы является исследование затухания интенсивности вибросейсмических волн от расстояния. Закон затухания амплитуды сейсмических волн с расстоянием представляется следующей формулой [1]:

$$A(x) = \frac{A_0}{(1+x)^n} e^{-\alpha x} \quad (1)$$

где x - расстояние между пунктом возбуждения и приемником; A_0 - амплитуда смещений в очаге события; n - показатель, отвечающий за геометрическое расхождение; α - коэффициент поглощения.

$$\alpha = \frac{\omega}{2Q \cdot V} = \frac{\pi \cdot f}{Q \cdot V} \quad (2)$$

где f - частота сигнала; Q - добротность среды; V - скорость волны.

Формула (1) показывает, что затухание сейсмической энергии зависит от двух факторов: геометрическое расхождение энергии и поглощение энергии, связанной с неидеальной упругостью среды. Коэффициент поглощения α выражает долю энергии, потерянной во время прохождения расстояния, эквивалентного полной длине волны. В практической геофизике вместо формулы (1) для описания процесса затухания волн чаще используют следующую модель, которая обобщает два вышеуказанных фактора:

$$A(x) = \frac{A_0}{(x)^k} \quad (3)$$

k - коэффициент, приближенно учитывающий все факторы, влияющие на затухание сейсмических волн ($k = 1 \dots 3$).

План проведенных экспериментов, показанный на рис.1, позволяет сформировать оценки интенсивности вибросейсмического поля в четырех точках регистрации: профили 1, 2, 3, 4. На каждом профиле построены амплитудные значения интенсивности монохроматического вибросейсмического поля. Особенностью формирования такого поля является его пространственная неоднородность. Данное обстоятельство иллюстрирует следующий рисунок, показывающий амплитуды сигнала на профиле 3 и 4.

В качестве оценки интенсивности вибросейсмического поля для каждого профиля принята обобщенная по пространству оценка: среднеквадратическое значение пространственных амплитуд для каждого профиля. Для аппроксимации полученных данных использована модель затухания сейсмических волн, соответствующая формуле (3). Результаты обработки экспериментальных данных представлены на следующем рисунке.

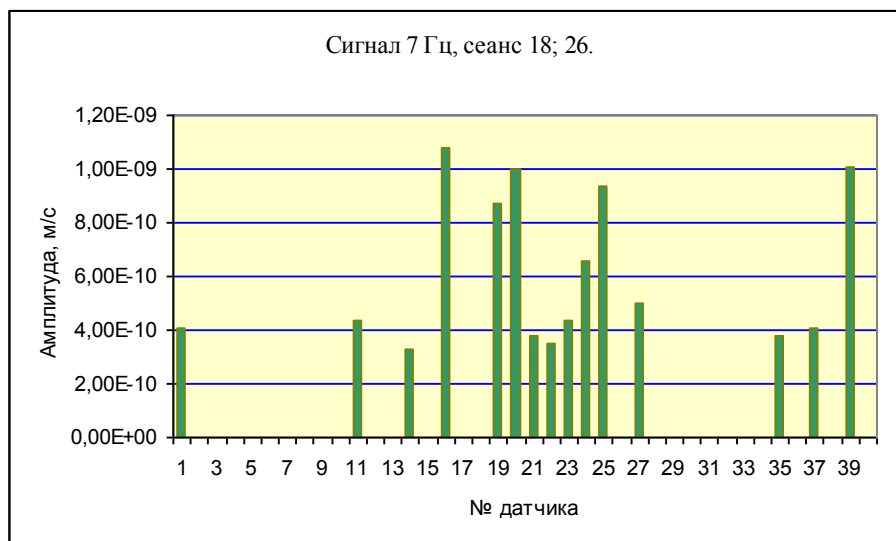


Рис. 2. Амплитуда вибросейсмического поля на профиле 3 и 4

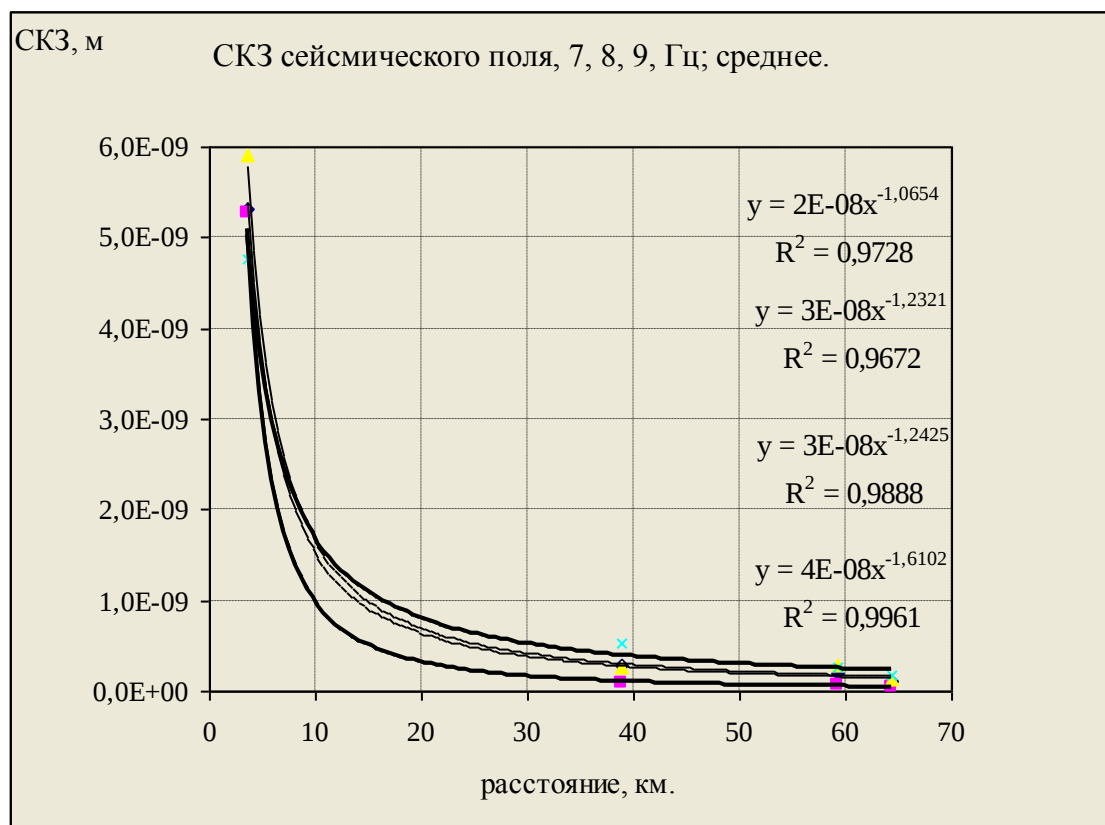


Рис. 3. Зависимость затухания амплитуды (смещения) волнового поля, формируемого монохроматическим зондирующим сигналом 7 Гц (нижняя линия), 8 Гц (средняя линия), 9 Гц (верхняя линия)

Результаты обработки показывают, что обобщенный показатель затухания k для вибросейсмического сигнала 7 Гц равен 1,610, для частот 8 Гц и 9 Гц соответственно – 1,232 и 1,065. Усредненная по всем частотам модель затухания

сейсмических волн имеет обобщенный показатель затухания k равный 1,242. На рис.4 представлен график зависимости амплитуды (смещения) волнового поля в логарифмическом масштабе.

Выводы. Рис.3 - зависимость затухания амплитуды (смещения) волнового поля от расстояния - показывает, что полученные результаты хорошо совпадают с математической моделью по формуле (3). При этом необходимо отметить, что формула (2) указывает на более высокое поглощение сейсмических волн для высоких частот. Тогда можно было ожидать, что для монохроматического сигнала 9 Гц интенсивность волнового поля будет минимальна по отношению к частотам 8 Гц и 7 Гц. Рис.4 показывает обратную картину: затухание для волнового поля частоты 7 Гц максимально, а для волнового поля частот 9 Гц минимально. Это обстоятельство указывает, что фактор геометрического расхождения существенно различается для монохроматических волн разной частоты. В нашем случае этот фактор в большей мере влияет (понижает) на интенсивность низкочастотного сигнала, а степень его влияния превосходит фактор поглощения.

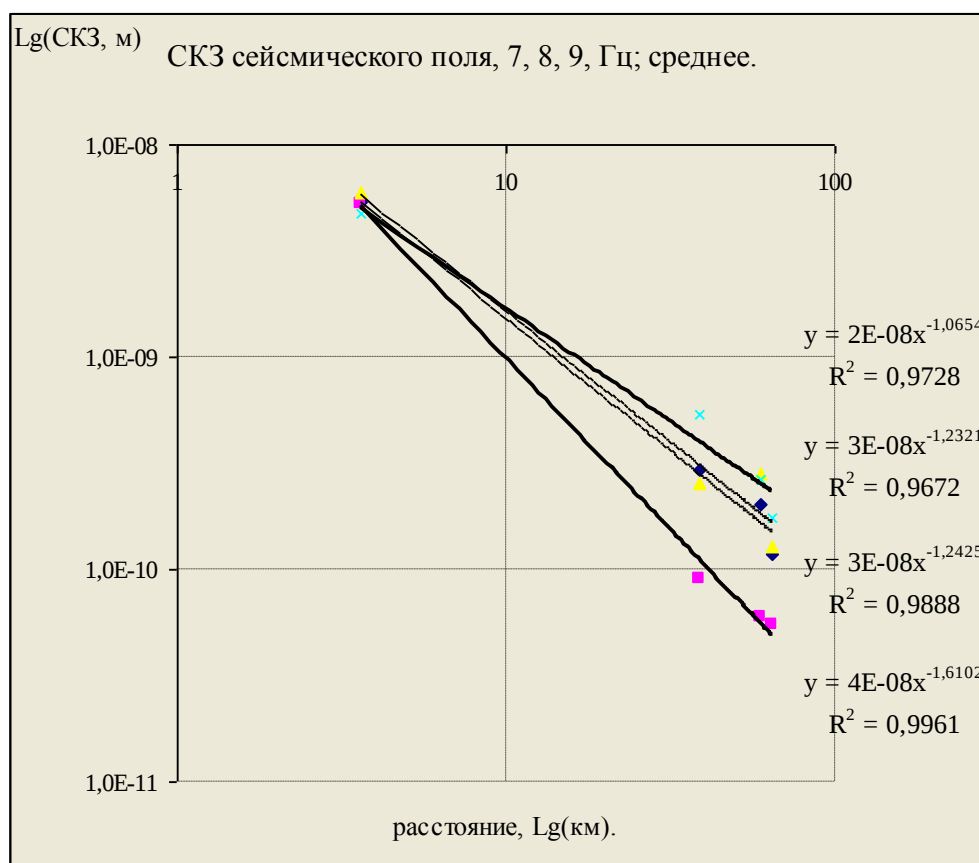


Рис.4. Логарифмическая зависимость затухания амплитуды (смещения) волнового поля: 7 Гц (нижняя линия), 8 Гц (средняя линия), 9 Гц (верхняя линия)

Автор выражает благодарность всем участникам экспериментальных работ, усилия которых предоставили возможность исследования особенностей

вибросейсмического поля и строения геологических структур в районе озера Байкал.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кири П., Брукс М. Введение в геофизическую разведку: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988.- 382 с.

© С.А. Ефимов, 2012

ВИБРОЗОНДИРОВАНИЕ ГРЯЗЕВОГО ВУЛКАНА КАРАБЕТОВА ГОРА, ЭКСПЕРИМЕНТ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Дмитрий Алексеевич Караваев

Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН (ИВМиМГ СО РАН); 630090, Новосибирск-90, пр. ак. Лаврентьева, 6, младший научный сотрудник, тел. (383)3307069, e-mail: kda@opg.sccc.ru

Валерий Викторович Ковалевский

Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН (ИВМиМГ СО РАН); 630090, Новосибирск-90, пр. ак. Лаврентьева, 6, заместитель директора, тел. (383)3307069, e-mail: kovalevsky@sscc.ru

Борис Михайлович Глинский

Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН (ИВМиМГ СО РАН); 630090, Новосибирск-90, пр. ак. Лаврентьева, 6, заведующий лабораторией ССКЦ, тел. (383)3307069, e-mail: gbm@opg.sccc.ru

Марат Саматович Хайретдинов

Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН (ИВМиМГ СО РАН); 630090, Новосибирск-90, пр. ак. Лаврентьева, 6, главный научный сотрудник, тел. (383)3307069, e-mail: marat@opg.sccc.ru

В статье приведены результаты экспериментальных исследований грязевого вулкана Карабетова гора Таманской грязевулканической провинции вибросейсмическими методами зондирования. Приводятся результаты профильной регистрации вибросейсмического поля и обработки методом отраженных волн для определения структуры вулканической постройки. Представлена математическая модель грязевого вулкана Карабетова гора, приводятся результаты численного моделирования и сравнение натурного и численного экспериментов.

Ключевые слова: вибросейсмическое зондирование, грязевые вулканы, математическое моделирование, волновые поля.

VIBROSEISMIC SOUNDING KARABETOVA GORA MUD VOLCANO: EXPERIMENT AND MATHEMATICAL MODELING

Dmitri A. Karavaev

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of RAS (ICMMG), 630090, Novosibirsk-90, Lavrentiev Ave, 6, Junior Researcher, tel. (383) 3307069, e-mail: kda@opg.sccc.ru

Valery V. Kovalevsky

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of RAS (ICMMG), 630090, Novosibirsk-90, Lavrentiev Ave, 6, Deputy Director, tel. (383) 3307069, e-mail: kovalevsky@sscc.ru

Boris M. Glinski

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of RAS (ICMMG), 630090, Novosibirsk-90, Lavrentiev Ave, 6, Head of Laboratory SSCC, tel. (383) 3307069, e-mail: gbm@opg.sccc.ru

Marat S. Khairtdinov

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of RAS (ICMMG), 630090, Novosibirsk-90, Lavrentiev Ave, 6, Main Researcher, tel. (383) 3307069, e-mail: marat@opg.sccc.ru

The article discusses the results of experimental investigations of mud volcano Karabetova Gora in Taman mud volcano province using vibroseis methods sounding. The results of vibroseis profile field recording and processing by method of reflected waves to determine the structure of the volcanic are presented. The mathematical model of mud volcano Karabetova Gora is made, the results of numerical modeling and comparison of natural and numerical experiments are compared.

Key words: vibroseis sounding, mud volcanoes, mathematical modeling, wave fields.

Керченско-Таманская область характеризуется активной грязевулканической деятельностью и включает около 50 грязевых вулканов. Самым крупным из активных вулканов Таманской грязевулканической провинции является грязевой вулкан Карабетовой горы, расположенный вблизи п. Тамань. В последние годы на этом вулкане были проведены комплексные геолого-геофизические исследования его строения с применением методов микросейсмического и магнитотеллурического зондирования. Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН совместно с Институтом физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН и Кубанским Государственным Университетом поставил ряд экспериментальных исследований по вибросейсмическому зондированию структур грязевых вулканах Тамани – Шуго, Ахтанизовский, Карабетова гора [1-4].

Экспериментальные исследования структуры вулканической постройки грязевого вулкана Карабетова гора были выполнены с использованием сейсмического вибратора, профильной регистрации волнового поля и сейсморазведочных методов обработки данных. При проведении экспериментальных работ исследовалась структура волнового поля вибраторов при прохождении флюидосодержащих зон грязевого вулкана. В качестве источника использовался сейсмический вибратор СВ-10/100, регистрация осуществлялась комплексом RefTek-125A (40 регистраторов с вертикальными сейсмоприемниками GeoSpace GS-20DX). Схема вибросейсмического просвечивания, расположения точек излучения и профилей регистрации приведена на рис. 1. В качестве зондирующих сигналов вибратора использовались свип-сигналы в диапазоне частот 10 - 64 Гц с линейной разверткой частоты и длительностью 60 с. Количество идентичных сеансов излучения составляло 5, 10 и 20 для различных точек.

Пять точек излучения сигналов вибратором располагались в линию длиной 2 км через 500 м (точки Т1-Т5 на рис.1). Регистрация производилась на поперечном профиле П1 длиной 3.4 км пересекающий вулкан. Для излучения

сигналов вибратором во встречном направлении к точкам T1-T5 была добавлена точка T8 излучения на конце профиля. Для определения строения и скоростных характеристик вмещающей среды вне зоны вулкана была проведена регистрация волнового поля вибраторов на профиле П2 длиной 1,8 км с использованием 37 регистраторов RefTek с шагом расстановки 50 м (рис.1). Излучение сигналов вибраторами осуществлялось в трех точках профиля (точки T8, T10, T11) с последующей обработкой по методике сейсморазведки на отраженных волнах (МОВ).

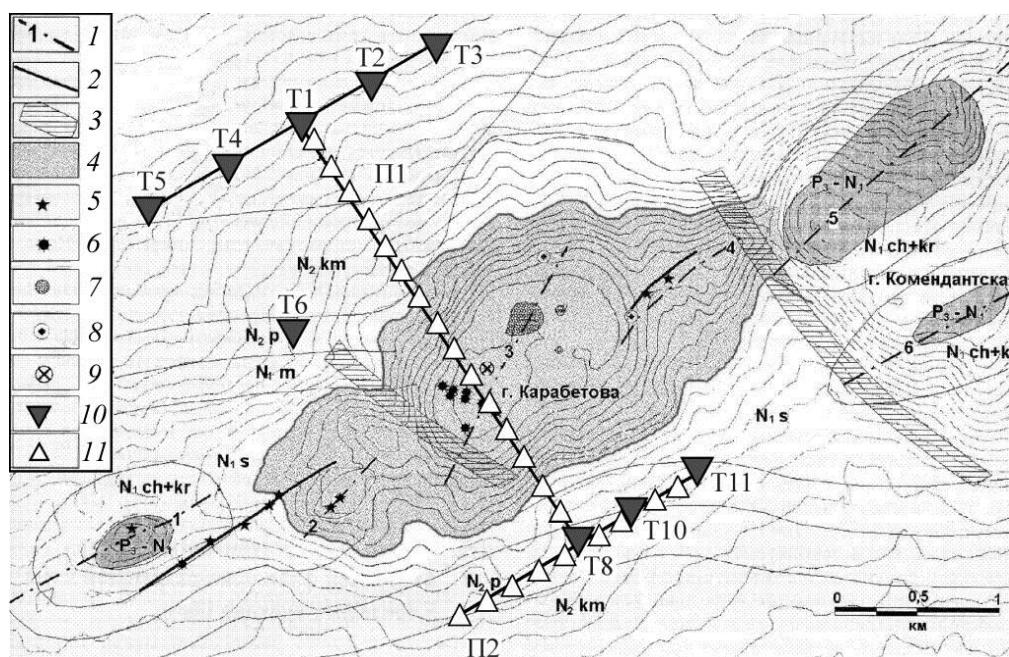


Рис. 1. Геологическая схема района Карабетова гора по [9] и общая схема профилей регистрации при проведении вибросейсмических исследований грязевого вулкана. 1 – оси антиклинальных складок; 2 – 3 разломы; 4 – покров сопочной брекчии грязевого вулкана; 5 – 6 грифоны; 7 – сальзы; 8 – крупные конусообразные грифоны; 9 – центр взрывного извержения 6 мая 2001 г.; 10 – пункты вибросейсмического излучения вибратора СВ – 10/100; 11 – пикеты профиля вибросейсмической регистрации системами RefTek

Анализ сейсмограмм методом отраженных волн, ОГТ и выделением гофографов позволил выделить 3-4 основных слоя вулканической постройки до глубины 1000 м и определить их скоростные характеристики. По годографам отраженных волн определены точки выклинивания слоев на поверхность вдоль профиля регистрации, пересекающего вулкан (рис. 2). Обнаружена несимметричность антиклинальной структуры вулкана с более пологим наклоном слоев со стороны Азовского моря и более крутым со стороны центральной части Таманского полуострова. Выделен также флюидозаполненный канал вулкана, который имеет форму цилиндрической трубки с поперечным размером около 100 м, которая конусообразно расширяется к поверхности. Экспериментально обнаружены резонансные эффекты сейсмических волн в канале, которые проявляются продолжительными слабо

затухающими колебаниями на сейсмограммах в области канала. Выделен узкополосный спектральный пик на сейсмограммах над центральной частью вулкана на частотах 25–28 Гц. Проведенные численные расчеты также подтверждают, что этот пик связан с геометрией центрального канала вулкана.

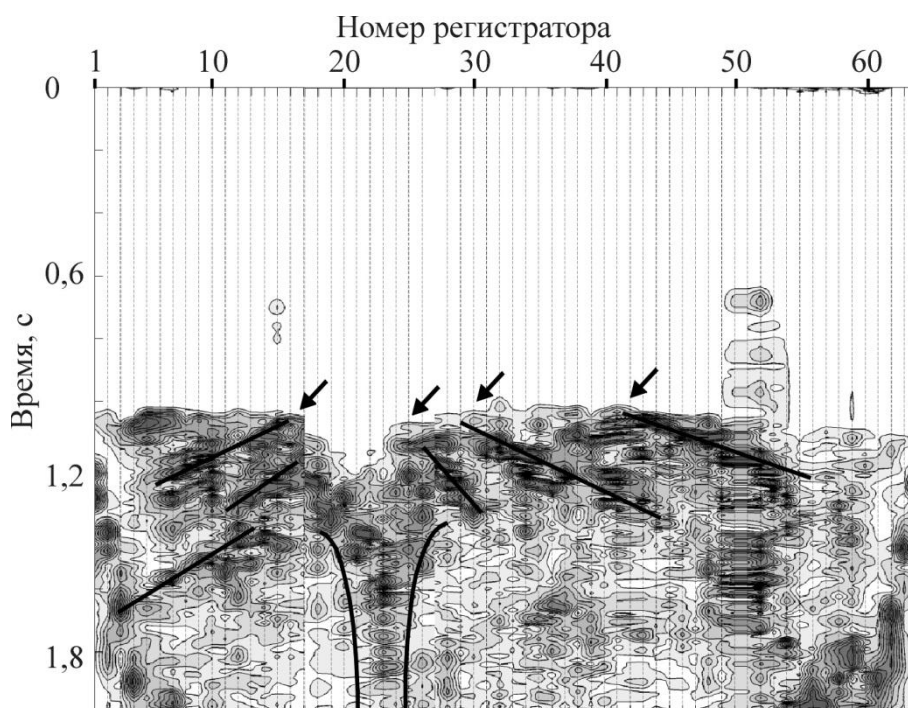


Рис. 2. Компоновка редуцированных сейсмограмм от источника в точках Т1, Т8 и Т6. Линиями отмечены годографы волн, отраженных от наклонных слоев и границы флюидозаполненного канала вулкана, стрелками - точки соединения годографов прямой и отраженных волн, соответствующие точкам выхода выклинивающихся слоев на поверхность

Численное моделирование распространения сейсмических волн для 3D модели вулкана проведено на основе решения полной системы уравнений динамической теории упругости с соответствующими начальными и граничными условиями. Для этого создан построитель численных трехмерных моделей неоднородных упругих сред и параллельная программа с использованием конечно-разностного метода. Выполненные численные расчеты волновых полей при вибросейсмическом зондирования вулкана Карabetова гора на созданной трехмерной модели позволили объяснить наблюдаемые в эксперименте особенности сейсмограмм, связанные с выклиниванием слоев вулканической постройки и резонансами волн в центральном канале вулкана.

На редуцированных теоретических сейсмограммах, представленных на рис.3 (аналогично редуцированным экспериментальным сейсмограммам рис. 2) видно пресечение на поверхности годографов прямой волны и волн, отраженных от слоев, выходящих на поверхность. Точки пересечения годографов показаны стрелками. Выделяются также длительные резонансные колебания на сейсмограммах в зоне канала вулкана. В целом на теоретических

сейсмограммах представлен весь ансамбль волн: прямых, отраженных, преломленных и обменных на границах слоев. Теоретические сейсмограммы хорошо согласуются с данными эксперимента, что свидетельствует о приемлемости математической модели для анализа экспериментальных данных вибросейсмического зондирования и анализа структуры вулканической постройки.

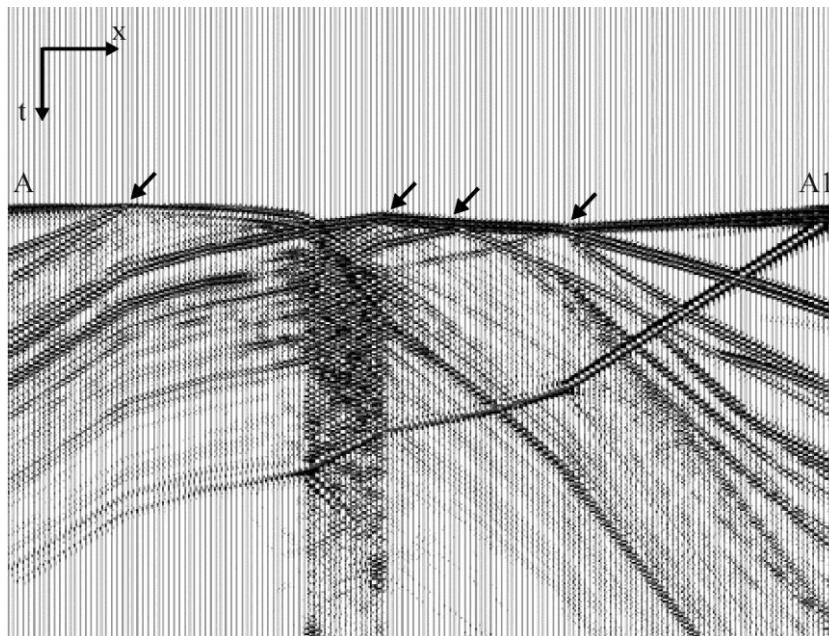


Рис.3. Редуцированные теоретические сейсмограммы ($V=1.65$ км/с), Z компонента волнового поля для профиля А-А1. Стрелками отмечены точки пересечения годографов волн, отраженных от выклинивающихся слоев, с годографом прямой волны

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ: № 10-07-00387-а, № 11-05-92215-Монг_а, проектов СО РАН 4.5, 4.6, ИП СО РАН 54, 130.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками. Монография. Коллектив авторов. Филиал «Гео» Издательства СО РАН, Новосибирск, 350 стр, 2004.
2. Active geophysical monitoring. Handbook of Geophysical Exploration: Seismic Exploration, vol. 40, Elsevier Science, 450 p. 2010
3. Изменение окружающей среды и климата. Природные и связанные с ним техногенные катастрофы– Т.1: Сейсмические процессы и катастрофы, Ч.2. – М.: ИФЗ РАН, 2008.
4. Б.М.Глинский, Д.А.Караваев, В.В.Ковалевский, В.Н.Мартынов. Численное моделирование и экспериментальные исследования грязевого вулкана «Гора Карабетова» вибросейсмическими методами // Вычислительные методы и программирование. – Москва, 2010. – Т. 11, №1. – С.95-104.

СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВИБРАТОРА ЦВ-100 ЮЖНОБАЙКАЛЬСКОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА

Людмила Петровна Брагинская

Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН (ИВМиМГ СО РАН); 630090, Новосибирск-90, пр. ак. Лаврентьева, 6, ведущий программист, тел. (383)3307069, e-mail: ludmila@opg.sccc.ru

Валерий Викторович Ковалевский

Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН (ИВМиМГ СО РАН); 630090, Новосибирск-90, пр. ак. Лаврентьева, 6, заместитель директора, тел. (383)3307069, e-mail: kovalevsky@ssccc.ru

Геннадий Иванович Татков

Геологический институт Сибирского отделения РАН (ГИН СО РАН); 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, директор, тел. (3012)434921, e-mail: tatkov@gin.bsccnet.ru

Андрей Павлович Григорюк

Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН (ИВМиМГ СО РАН); 630090, Новосибирск-90, пр. ак. Лаврентьева, 6, научный сотрудник, тел. (383)3307069, e-mail: and@opg.sccc.ru

Цырен Алексеевич Тубанов

Геологический институт Сибирского отделения РАН (ГИН СО РАН); 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, научный сотрудник, тел. (3012)434921, e-mail: siren65@mail.ru

Артем Дамбиевич Базаров

Геологический институт Сибирского отделения РАН (ГИН СО РАН); 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, научный сотрудник, тел. (3012)434921, e-mail: gin@gin.bsccnet.ru

В статье приведены результаты анализа многолетних данных вибросейсмического мониторинга Байкальской рифтовой зоны с использованием виброисточника ЦВО-100, определения сезонных вариаций характеристик сигналов, излучаемых вибратором и характеристик вибрационных сейсмограмм, регистрируемых сеймостанциями локальной и региональной сети.

Ключевые слова: вибросейсмический мониторинг, волновые поля, сезонные вариации.

SEASONAL CHANGES OF THE VIBROSEISMIC FIELD OF VIBRATOR CV-100 SOUTHBAYKAL GEODYNAMIC TEST SITE

Ludmila P. Braginskaya

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of RAS (ICMMG), 630090, Novosibirsk-90, Lavrentiev Ave, 6, lead programmer, tel. (383) 3307069, e-mail: ludmila@opg.sccc.ru

Valery V. Kovalevsky

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of RAS (ICMMG), 630090, Novosibirsk-90, Lavrentiev Ave, 6, Deputy Director, tel. (383) 3307069, e-mail: kovalevsky@sscc.ru

Gennady I. Tat'kov

Geological Institute, Siberian Branch of the Academy of Sciences (GIN RAS), 670047, Ulan-Ude, ul. Sakhyanovoy 6a, Director, tel. (3012) 434921, e-mail: tatkov@gin.bscnet.ru

Andrew P. Grigoryuk

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of RAS (ICMMG), 630090, Novosibirsk-90, Lavrentiev Ave, 6, Scientist, tel. (383) 3307069, e-mail: and@opg.sccc.ru

Tsyrenov A. Tubanov

Geological Institute, Siberian Branch of the Academy of Sciences (GIN RAS), 670047, Ulan-Ude, ul. Sakhyanovoy 6a, Scientist, tel. (3012) 434921, e-mail: siren65@mail.ru

Artem D. Bazarov

Geological Institute, Siberian Branch of the Academy of Sciences (GIN RAS), 670047, Ulan-Ude, ul. Sakhyanovoy 6a, Scientist, tel. (3012) 434921, e-mail: gin@gin.bscnet.ru

The paper presents results of the analysis of longitudinal data vibroseismic monitoring of the Baikal rift zone using vibration sources SVO-100, the definition of seasonal variations in the characteristics of the signals emitted by the vibrator and the vibration characteristics of the seismograms recorded by seismic stations of local and regional networks.

Key words: vibroseismic monitoring, wave fields, seasonal variations

Для оценки прошлого и современного состояния Байкальской рифтовой зоны в контексте сейсмической опасности и прогноза ее развития необходима разработка инструментария и методик экспериментальных наблюдений изменений напряженно-деформируемого состояния земной коры в регионе. Потребности экспериментального исследования процессов подготовки сильных и катастрофических землетрясений инициировали быстрое развитие нового направления в геофизике - активного вибросейсмического мониторинга, основанного на применении для глубинных исследований Земли мощных управляемых вибрационных источников сейсмических волн [1, 2].

В Южнобайкальском регионе создана локальная сейсмологическая сеть с использованием 100-тонного низкочастотного сейсмического вибратора ЦВО-100, расположенного на вибросейсмическом полигоне СО РАН п. Бабушкин в южной части Байкала, многоканальных систем регистрации вибросейсмических сигналов, локальной Селенгинской системы сейсмонаблюдений, региональных сейсмических станций Прибайкалья (рис.1).

С 2003 г. Геологическим институтом СО РАН и Бурятским филиалом ГС СО РАН проводится регулярный мониторинг южной и центральной частей Байкальской рифтовой зоны с применением монохроматического и свип-излучения вибратора. Для наблюдения долговременных вариаций времен пробега глубинных волн необходимо стабильное излучение и высокая

повторяемость излучаемых вибрационных сигналов, что обеспечивается системой управления вибратором, а также изучение и учет сезонных вариаций вибросейсмического поля вибратора.

На основе анализа многолетних данных вибросейсмического мониторинга Байкальской рифтовой зоны с использованием виброисточника ЦВО-100 были исследованы сезонные вариации характеристик сигналов, излучаемых вибратором и характеристик вибрационных сейсмограмм, регистрируемых сейсмостанциями локальной и региональной сети. Для анализа сезонных вариаций в ИВМиМГ СО РАН и ГИН СО РАН были обработаны записи колебаний грунта в ближней зоне вибратора и записи с сейсмостанций Хурумша и Тырган при излучении свип-сигналов за период с августа 2003 г. по март 2006 г.

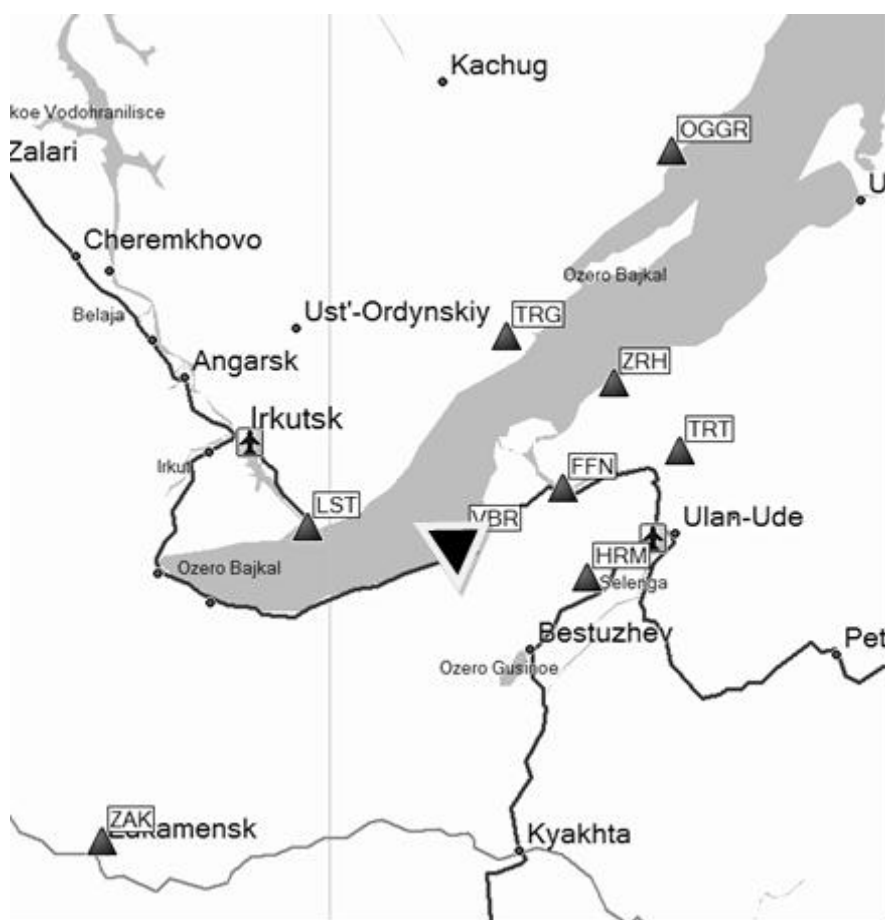


Рис. 1. Система вибросейсмического мониторинга Южной и центральной части Байкала. Центральный треугольник – вибратор ЦВО-100, черные треугольники – сейсмические станции

Календарная сборка автокорреляционных функций излученных свип-сигналов вибратора в ближней зоне и их спектров с августа 2003 по март 2006 года приведена на рис. 2. На графиках хорошо видно перемещение максимума спектра сигнала из высокочастотной области в низкочастотную и обратно в течение года. В период ноябрь-май амплитуда сигнала вибратора имеет

монотонный вид с максимумом в конце рабочего диапазона на 10 Гц. В июне увеличивается амплитуда в среднем диапазоне с максимумом в районе 7 Гц. В июле-сентябре максимум амплитуды в районе 6,5-6,8 Гц, далее в октябре график аналогичен июньскому с максимумом около 7 Гц. Характер графиков стабильно повторяется от года к году. Такое изменение характера излучения вибратора связано с промерзанием грунта в месте его установки. В зимние месяцы вибратор как бы вмерзает в грунт своей платформой и анкерами, что обеспечивает излучение высоких частот. В летние месяцы после оттаивания грунта, по видимому, остается остаточная увлажненность области контакта вибратора с грунтом и окружающей площади, что мешает излучению высоких частот, оставляя высокую мощность излучения вблизи резонансной частоты. Эта резонансная частота также несколько смещается от 7,2 Гц до 6, 5 Гц и обратно за летние месяцы.

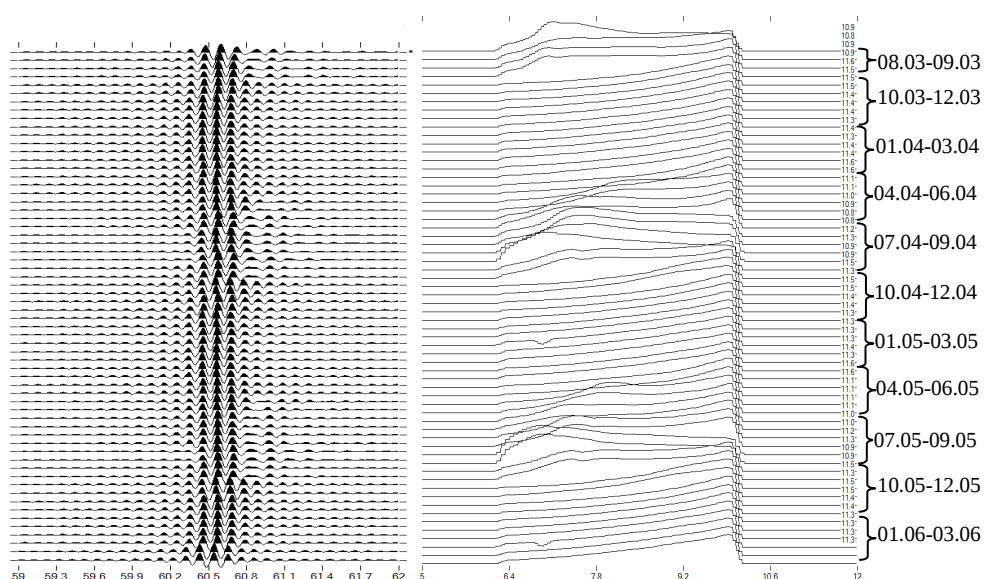


Рис. 2. Автокорреляционные функции свип-сигнала вибратора в ближней зоне и их спектры. Календарная сборка с августа 2003 г. по март 2006 г.

Аналогичный анализ сезонных изменений характеристик вибрационных сейсмограмм и их спектров был сделан за тот же период для сеймостанций Хурумша и Тырган (рис. 3). Спектр имеет неравномерный, изрезанный вид со многими локальными максимумами, однако его общие закономерности те же что и для спектра излученного сигнала вибратора. Это - наличие в спектре всех частот включая высокие до 10 Гц в зимние месяцы, смещение его максимума в область резонанса источника 6-7 Гц и пропадание высоких частот в летние месяцы. Изрезанность спектра сейсмограмм связана с интерференцией отдельных спектральных составляющих на расстоянии 65 км от источника. Участки вибрационных сейсмограмм Z-компоненты для сеймостанции Хурумша для различных времен вступлений волн приведены на рис.4. Видно, что для отдельных волн на вибрационных сейсмограммах изменяются амплитуды цугов колебаний и их характерные частоты.. Изменение спектра

излученного сигнала вибратора приводит к существенному изменению цуга и смещению его максимума для волн в первых вступлениях на 12 -13 сек, значительно меньшее влияние наблюдается для поперечных волн с временами вступлений 22-23 сек, и вновь большее для поверхностных волн на временах 31-32 сек. Выявленные сезонные вариации характеристик вибрационных сейсмограмм требуют подробного анализа и учета при проведении вибросейсмического мониторинга и выявлении вариаций времен прихода основных волн связанных с изменениями в среде.

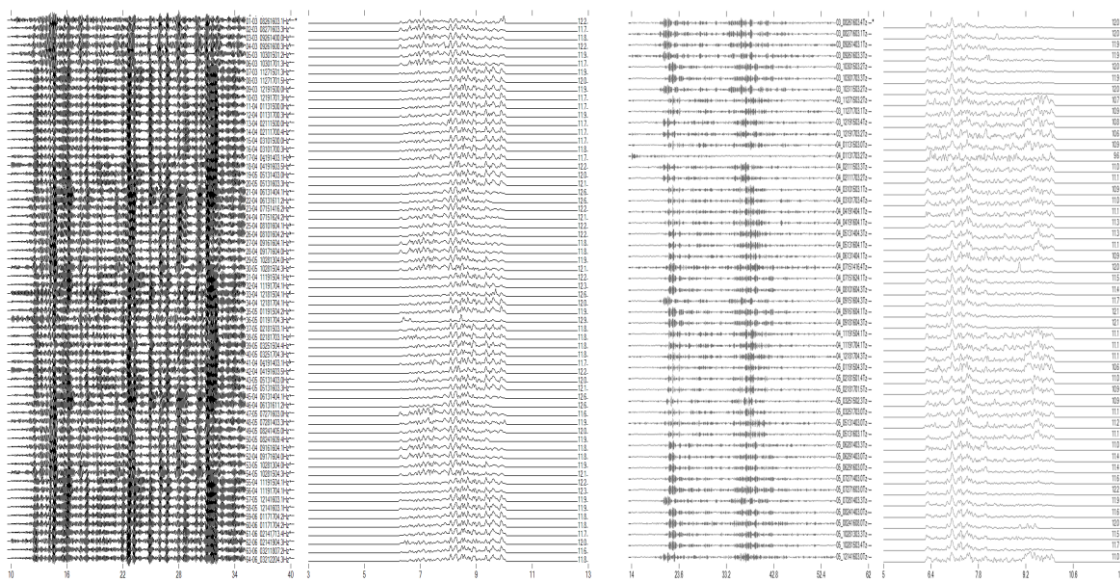


Рис. 3. Вибрационные сейсмограммы Z-компоненты и их спектры для сеймостанций Хурумша (слева) и Тырган (справа) за период 08.03 - 03.06 г.

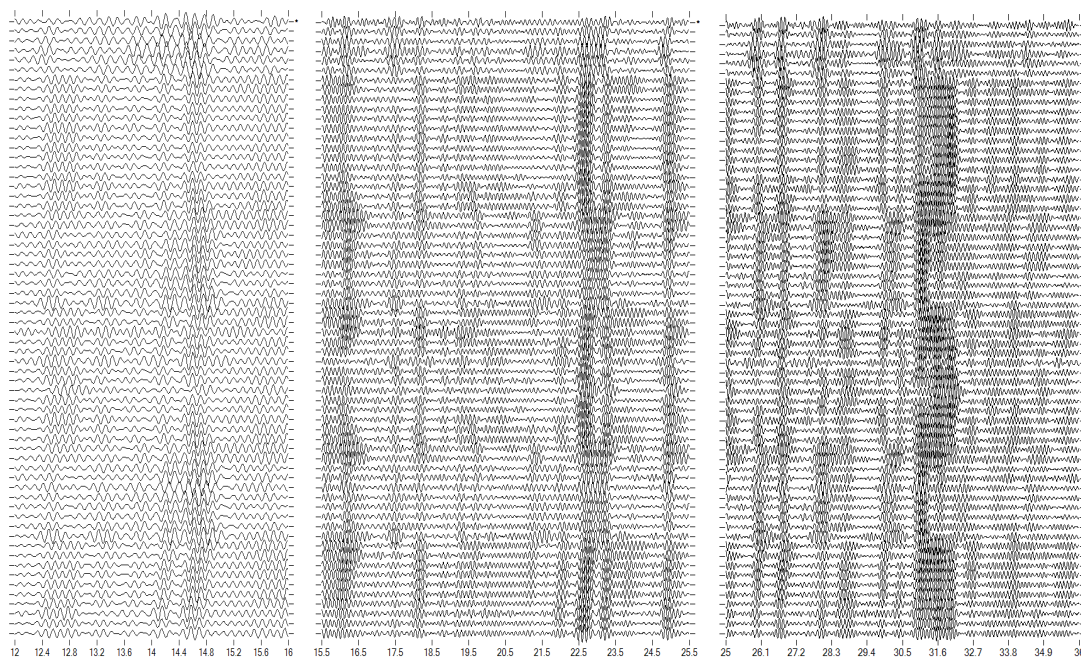


Рис. 4. Участки вибрационных сейсмограмм Z-компоненты для сеймостанции Хурумша. Календарная сборка с августа 2003 г. по март 2006 г.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ: № 10-07-00387-а, № 11-05-92215-Монг_а, проектов СО РАН 4.6, ИП СО РАН 54.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками. Монография. Коллектив авторов. Филиал «Гео» Издательства СО РАН, Новосибирск, 350 стр, 2004.
2. Active geophysical monitoring. Handbook of Geophysical Exploration: Seismic Exploration, vol. 40, Elsevier Science, 450 p. 2010.

© Л.П. Брагинская, В.В. Ковалевский, Г.И. Татков,
А.П. Григорюк, Ц.А. Тубанов, А.Д. Базаров, 2012

ОПЫТ СОЗДАНИЯ ТЕМАТИЧЕСКОГО ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСА «АКТИВНАЯ СЕЙСМОЛОГИЯ»

Людмила Петровна Брагинская

Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН (ИВМиМГ СО РАН); 630090, Новосибирск-90, пр. ак. Лаврентьева, 6, ведущий программист, тел. (383)3307069, e-mail: ludmila@opg.sccc.ru

Андрей Павлович Григорюк

Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН (ИВМиМГ СО РАН); 630090, Новосибирск-90, пр. ак. Лаврентьева, 6, научный сотрудник, тел. (383) 330 87 43, e-mail: and@opg.sccc.ru

В работе представлены архитектура, интерфейс и основные пользовательские сервисы Интернет-ориентированной научной информационной системы для поддержки теоретических и экспериментальных исследований в области активной сейсмологии с функциями социальной сети. Основными компонентами НИС являются: информационно-вычислительная система (ИВС), обеспечивающая пользователей многопараметрическим поисковым, вычислительно-аналитическим и ГИС сервисами для работы с данными сейсмического мониторинга в режиме on-line; пополняемая пользователями база данных научных работ – электронная библиотека; пополняемый пользователями библиографический каталог. В настоящее время ресурс доступен по адресу <http://opg.sccc.ru>.

Ключевые слова: сейсмология, вычислительные информационные системы, базы данных.

THE EXPERIENCE OF THE THEMATIC WEB RESOURCE «ACTIVE SEISMOLOGY»

Ludmila P. Braginskaya

Lead Programmer, Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Address: prospect Akademika Lavrentjeva, 6, Novosibirsk, 630090, Russia. e-mail: ludmila@opg.sccc.ru, tel. (383) 330 70 69

Andrey P. Grigoruk

Researcher, Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS Address: prospect Akademika Lavrentjeva, 6, Novosibirsk, 630090, Russia. e-mail: and@opg.sccc.ru, tel. (383) 330 87 43

Architecture, interface and the basic user services of the Internet oriented scientific informational system (SIS) with social network functions for the theoretical and experimental research in active seismology are reported. The main components of SIS comprise the informational and computing system, which supplies the users with multi-parametrical search, digital analytic and GIS services for on-line seismic data monitoring; the e-library and bibliography replenished by users. At present the informational system can be found at <http://opg.sccc.ru>.

Key words: seismology, informational computing system, database.

Активная сейсмология является новым направлением в геофизике, в котором для изучения строения земной коры и исследования геодинамических процессов в зонах землетрясений и вулканов используются управляемые источники сейсмических волн — мощные сейсмические вибраторы, гидромеханические и электромагнитные импульсные источники [1]. В последние годы к методам активной сейсмологии так же относят экспериментальные работы, в которых регистрируется сейсмическое поле природных источников по технологии, определенной конкретной задачей геофизики, например сейсмоэмиссионная томография вулканических структур с использованием сейсмического шума из активной области вулкана. В 2010 г. был проведен уникальный эксперимент по регистрации сейсмического шума методом «сейсмической антенны» в штольне Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН.

Последние три десятилетия работы по активной сейсмологии проводятся в России, Японии, Китае, США, европейских странах. В Японии с вибросейсмической системой ACCROSS проводится мониторинг сейсмоопасных и разломных зон земной коры. С участием ИВМиМГ СО РАН в рамках экспериментальных исследований проводился вибросейсмический мониторинг литосферы в Алтае-Саянском регионе, Байкальской рифтовой зоне и Таманской грязе-вулканической провинции, на профиле Улан-Удэ—Улан-Батор. В области активной сейсмологии накоплен большой объем информации по всем составляющим метода, включая вопросы теории метода, создания управляемых источников, результатов экспериментальных работ, методов математического моделирования, который представлен в разрозненных источниках — статьях, монографиях, отчетах, на сайтах институтов и др. Предлагаемая НИС «Активная сейсмология» служит интеграции тематических информационных и вычислительных ресурсов.

Современные веб-технологии, известные как технологии веб 2.0, позволяют не просто лучше обслуживать информационные потребности пользователя сети, но и активно вовлекают его во взаимодействие — как с другими пользователями, так и с самими информационными ресурсами. Для научного сообщества социальные технологии веб 2.0 представляют особый интерес. Они позволяют расширить формат профессионального взаимодействия, выводят его на глобальный уровень, стимулируют творческие способности каждого из участников процесса и — что самое существенное — они отвечают традициям научного сообщества, в котором всегда была важна взаимная оценка коллег и признание ими достигнутых результатов.

НИС «Активная сейсмология» существенно расширила круг исследователей, использующих экспериментальные данные для развития методов обработки и интерпретации вибросейсмических данных, математического моделирования и т.п.

Научная информационная система "Активная сейсмология" предоставляет следующие основные пользовательские сервисы:

- База данных научных работ – электронная библиотека, содержащая тезисы и полные тексты статей, комментарии, информацию об авторах и научных организациях.
- Библиографический каталог публикаций с возможностью поиска по авторам, названию, году издания.
- Возможность обсуждать размещенные на сайте статьи, а также публиковать собственные материалы.



Рис. 1. Информационно-аналитический Интернет-ресурс <http://opg.sccc.ru>

В НИС «Активная сейсмология» интегрирована Информационно-вычислительная система для управления данными экспериментов «Вибросейсмическое просвечивание Земли» [2].

Информационная система содержит базу данных, (на сегодняшний день порядка 35000 сеймотрасс), зарегистрированных в ходе экспериментов (1996–2010 гг.), полученных в ходе экспериментов по вибросейсмическому просвечиванию, проводимых ИВМиМГ СО РАН. Пользователям предоставляется возможность параметрического поиска (18 параметров), просмотра и анализа в режиме онлайн. Также пользователь имеет возможность построения по результатам поиска интерактивных карт и спутниковых снимков с обозначенными источниками и регистраторами сейсмических волн [3]. По мнению авторов, именно предоставление в режиме онлайн экспериментальных

данных и предлагаемые сервисы ИВС являются привлекательной особенностью предлагаемой научно-информационной системы. На сегодняшний день 50 зарегистрированных участников публикуют свои статьи и участвуют в обсуждении работ коллег.

Основными пользователями НИС «Активная сейсмология» являются специалисты, работающие в вибросейсмической тематике или смежных областях. Можно отметить, что в этом списке представлены все основные российские научные учреждения, работающие в данном направлении, что позволит обеспечить полноту и актуальность предоставляемой информации. Особенно важным представляется участие в работе НИС ученых, которые являются основателями метода активной сейсмологии. Опубликованные ими статьи дают полное представление о теоретических основах вибросейсмического метода.

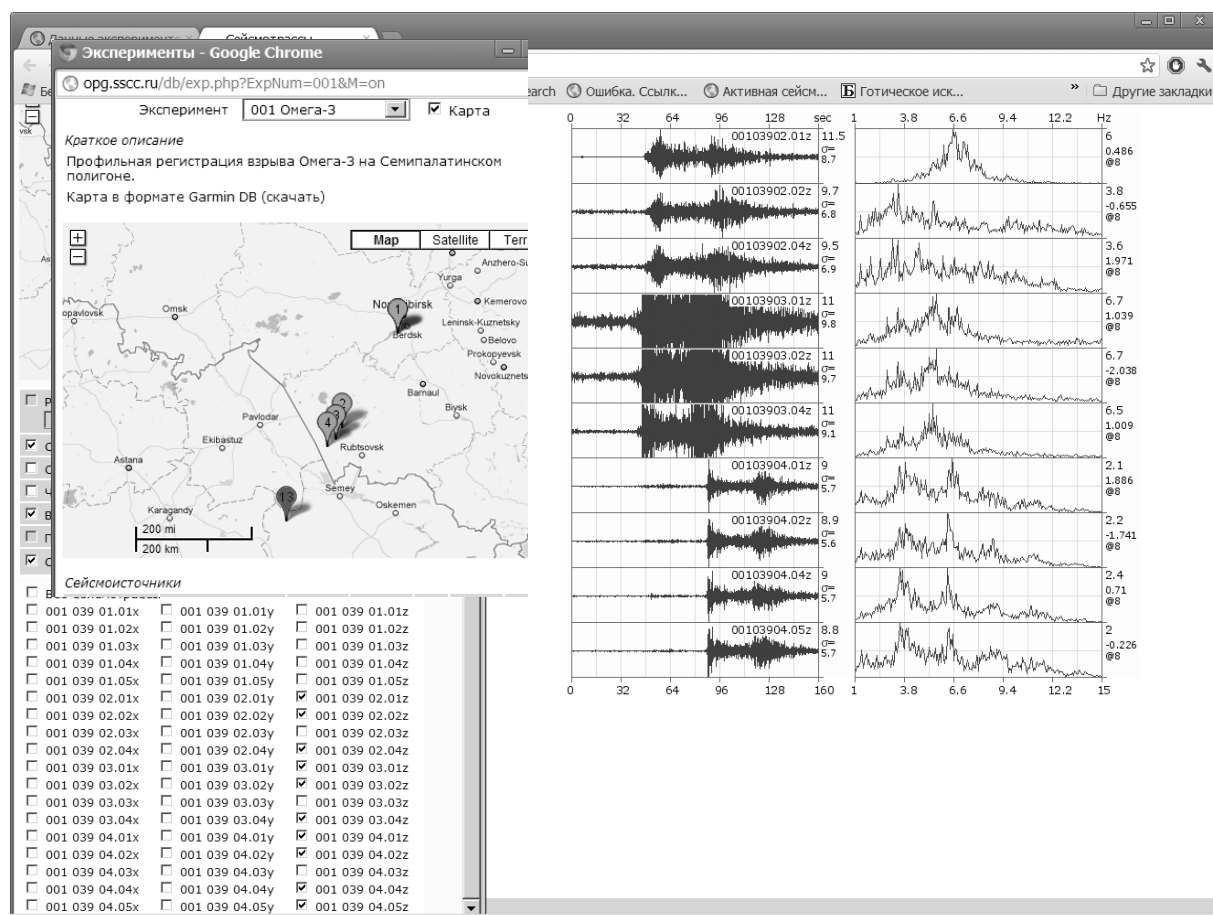


Рис. 2. Сервисы доступа к экспериментальным данным

В разделе «Математическое моделирование» опубликован ряд работ, в которых приводятся результаты обработки данных вибросейсмических экспериментов, сравниваются результаты численного и натурного экспериментов.

Пользователями НИС являются не только ученые Новосибирских институтов СО РАН, но и ДВО РАН, Камчатской геофизической службы, КубГУ, ИФЗ РАН, Геологического института Улан-Удэ и т.д.

В разделах «Вулканология и сейсмология» и «Экспериментальная геофизика» представлены результаты исследований, многие из которых напрямую не связаны с методом активной сейсмологии. Общим является предмет исследования — сейсмичность Байкальской рифтовой зоны, Таманской грязевулканической провинции, вулкана Эльбрус и т.п.

НИС «Активная сейсмология» поддерживает два вида ввода данных: интерактивный ввод данных пользователями и административный ввод данных. Для интерактивного ввода проблема достоверности происхождения информации решается ограничением ввода документов только аутентифицированными пользователями. Администрация Интернет-ресурса оставляет за собой право удалять материалы, не соответствующие объявленной тематике.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ: № 10-07-00387-а, № 11-05-92215-Монг_а, проектов СО РАН 4.5, 4.6, ИП СО РАН 54, 130.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками // Отв.ред. Г.М. Цибульчик. –Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, Филиал «Гео» Издательства СО РАН, 2004.
2. Григорюк А.П., Брагинская Л.П. Управление данными выбросейсмического мониторинга. // Мониторинг окружающей среды, геоэкология, дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия. Сб. материалов междунар. науч. конгресса «ГЕО-Сибирь-2007» Т.3. –Новосибирск: СГГА, 2007.
3. Григорюк А.П., Брагинская Л.П. Опыт веб-картографирования на основе сервиса Google Maps // Мониторинг окружающей среды, геоэкология, дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия. Сб. материалов междунар. науч. конгресса «ГЕО-Сибирь-2008» Т.3. –Новосибирск: СГГА, 2008.

© А.П. Григорюк, Л.П. Брагинская, 2012

АНАЛИЗ ДАННЫХ РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА В ОКРЕСТНОСТЯХ АЭС «ФУКУСИМА - 1»

Владимир Федотович Рапута

Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 6, ведущий научный сотрудник, тел. (383)330-61-51, e-mail: raputa@sscc.ru

Предложена модель реконструкции полей выпадений полидисперсной примеси от мгновенного источника по оси следа. Для описания процесса переноса аэрозолей в атмосфере использовано решение полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии. Фракционный состав примеси в источнике по скоростям оседания задаётся с помощью двойного гамма-распределения. Проведена апробация разработанной модели реконструкции на данных мониторинга аварийного загрязнения окрестностей АЭС «Фукусима -1».

Vladimir F. Raputa

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Novosibirsk, prospect Akademika Lavrentjeva, 6, tel. (383)330-61-51, e-mail: raputa@sscc.ru

ANALYSIS OF RADIATION MONITORING NEAR THE NPP «FUKUSIMA - 1»

The model of reconstruction of fields of losses of a polydisperse impurity from an instant source on a trace axis is offered. For the description of process of carrying over of aerosols in atmosphere the semiempirical equation of turbulent diffusion is used. The fractional structure of an impurity in a source on speeds of subsidence is set by means of double gamma distribution. Approbation of the model of reconstruction on the data of monitoring of emergency pollution of vicinities of radiochemical factory the atomic power station «Fukushima-1» is spent.

Key words: numerical modeling, aerosol, radioactive contamination, the reconstruction, the inverse problem.

Проблема определения количественных характеристик радиоактивного загрязнения природных сред в результате аварий на атомных станциях и предприятиях ядерно-технологического цикла является весьма актуальной. Применение методов прямого моделирования переноса загрязняющих примесей в принципе даёт возможность вполне корректного описания полей концентраций, но в данном случае этот подход сталкивается со значительными затруднениями обеспечения моделей соответствующей входной информацией. К ним следует отнести неопределённости высоты и мощности источника выброса радионуклидов в атмосферу, распределение в начальном облаке аэрозольных частиц по размерам и скоростям оседания и т.д., что приводит к необходимости использования при численном моделировании дополнительной экспериментальной информации о полях загрязнения и создания соответствующих моделей реконструкции [1, 2]. Необходимым этапом решения этих задач является анализ информативности используемой экспериментальной информации, планирования и оптимизации систем мониторинга [3].

1. Модель реконструкции атмосферных выпадений полидисперсной примеси

Предварительный анализ полученных данных наблюдений аэрозольных выпадений радионуклидов показывает, что изменение полей их концентраций по мере удаления от места аварийного выброса может быть весьма значительным. Это позволяет сделать предположение о присутствии в их составе как крупных, так и достаточно мелких аэрозольных фракций. Для априорного описания распределения вещества примеси по скоростям оседания w в атмосфере воспользуемся следующей двухпараметрической функцией [4]

$$N(w) = \frac{a^{m+1}}{\Gamma(m+1)} w^m e^{-aw}, \quad m \geq -1, \quad a = \frac{m}{w_m}, \quad (1)$$

где параметр w_m характеризует скорость преобладающей по количеству частиц фракции примеси, m - степень однородности распределения частиц примеси по скоростям w , $\Gamma(m)$ - гамма-функция Эйлера.

Исходным моментом для расчета поля выпадений полидисперсной примеси от точечного источника является соотношение [4]

$$p = \int_0^{\infty} w q_w N(w) dw, \quad (2)$$

где q_w - поле концентрации монодисперсной примеси со скоростью оседания w .

При расчете средней концентрации в приземном слое атмосферы используется степенная аппроксимация скорости ветра и коэффициента вертикального турбулентного обмена [5]:

$$u(z) = u_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^n, \quad K_z = k_1 \frac{z}{z_1}, \quad (3)$$

где u_1 и k_1 - значения u и K_z при $z = z_1$.

С использованием соотношений (3) и аналитических решений уравнения турбулентной диффузии для относительно невысоких источников поле концентрации q_w вблизи земли можно представить в виде [5]

$$q_w(x, y) = \frac{M c^{\omega}}{2(1+n) \sqrt{\pi k_0} \Gamma(1+\omega) x^{1.5+\omega}} \exp\left(-\frac{c}{x} - \frac{y^2}{4k_0 x}\right). \quad (4)$$

Здесь ось x ориентирована в направлении ветра, ось y направлена в поперечном ветру направлении, M - мощность источника примеси, k_0 - параметр турбулентного обмена в направлении оси y ,

$$c = \frac{u_1 H^{1+n}}{(1+n)^2 k_1}, \quad \omega = \frac{w}{k_1 (1+n)}. \quad (5)$$

С учётом соотношений (1), (4) выражение (2) можно представить в виде

$$p(x, y) = \frac{M a^{m+1}}{2(1+n) \sqrt{\pi k_0} \Gamma(1+m) x^{1.5}} \exp\left(-\frac{c}{x} - \frac{y^2}{4k_0 x}\right) \int_0^{\infty} \frac{w^{m+1} \exp(-aw)}{\Gamma(1+\omega)} \left(\frac{c}{x}\right)^{\omega} dw = \quad (6)$$

$$= \frac{Ma^{m+1}(1+n)^{m+1}k_1^{m+2}}{2\sqrt{\pi k_0}\Gamma(1+m)x^{1.5}} \exp\left(-\frac{c}{x} - \frac{y^2}{4k_0x}\right) \int_0^\infty \frac{\omega^{m+1} \exp(-ak_1(1+n)\omega) \left(\frac{c}{x}\right)^\omega}{\Gamma(1+\omega)} d\omega$$

В частности, для осевой концентрации ($y=0$) соотношение (6) представляется в виде

$$p_{ось}(x) = \frac{\theta_1}{x^{1.5}} \exp\left(-\frac{c}{x}\right) \int_0^\infty \frac{\omega^{\theta_2} \exp(-\theta_3\omega) \left(\frac{c}{x}\right)^\omega}{\Gamma(1+\omega)} d\omega, \quad (7)$$

$$\theta_1 = \frac{Ma^{m+1}(1+n)^{m+1}k_1^{m+2}}{2\sqrt{\pi k_0}\Gamma(1+m)x^{1.5}}, \quad \theta_2 = m+1, \quad \theta_3 = ak_1(1+n)$$

Замечание. Параметры θ_2, θ_3 зависят от характеристик дисперсного состава аэрозольной примеси и метеорологических условий. Данное обстоятельство позволяет существенно снизить количество опорных точек измерений при проведении повторного оценивания осевого загрязнения в другие моменты времени. В этом случае достаточно лишь провести переоценку параметра θ_1 , который согласно (7) пропорционален мощности источника и изменение которого будет происходить лишь вследствие радиоактивного распада выпавших нуклидов.

2. Анализ данных наблюдений радиоактивного загрязнения почвенного покрова в региональных окрестностях АЭС «Фукусима-1»

Мощное землетрясение 11 марта 2011 г. у берегов Японии обусловило отключение на АЭС «Фукусима-1» централизованного электроснабжения, а последующее за ним катастрофическое цунами вывело из строя резервные дизель-генераторы, что не позволило в дальнейшем проводить эффективное охлаждения активных зон остановленных реакторов и в конечном итоге привело к серии мощных взрывов на станции с выбросом в атмосферу смеси радионуклидов, включающих радиоактивные изотопы йода, цезия. В частности, в направлении на северо-запад от АЭС (префектура Фукусима) образовался след почвенных выпадений с высоким уровнем радиоактивного загрязнения.

В префектуре Фукусима ежедневно производится автомобильная радиационная разведка района загрязнения за пределами 20-ти километровой зоны вокруг АЭС. Данные этого мониторинга ежедневно появляются в открытом доступе на сайте Министерства образования, культуры, спорта, науки и технологии Японии (МЭХТ). В начальный период загрязнения (15 - 18 марта) максимальная мощность дозы в 30 км на северо-запад от АЭС составляла порядка 150-170 мкЗв/ч. В дальнейшем снижение мощности дозы на следе происходило довольно быстро, что указывает на наличие в составе выброса значительной доли коротко живущих радионуклидов.

На рис. 1 представлена карта мощности доз (мкЗв/ч) на 12 апреля 2011 г., построенная на основании данных передвижного мониторинга. Максимальная доза в 20 км от АЭС на радиоактивном следе уже составила 58.8 мкЗв/ч. Для проведения численной реконструкции загрязнения по оси следа в качестве опорных точек измерений использовались точки со значениями доз 3, 5 и 10 мкЗв/ч. На рис. 2а представлены результаты реконструкции осевой части следа,

полученные с использованием соотношения (7), по указанным выше опорным значениям мощностей доз.

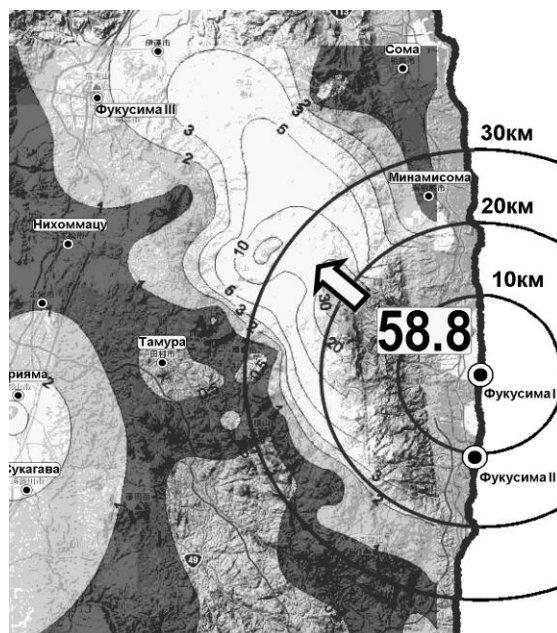


Рис. 1. Карта следа радиоактивного загрязнения почвы от серии взрывов на АЭС «Фукусима - 1» по состоянию на 12 апреля 2011 г. (мкЗ/ч)

Анализ результатов численного моделирования показывает, что восстановленная кривая вполне удовлетворительно описывает загрязнение по оси следа и что зависимость (1) достаточно адекватно воспроизводит спектр распределения выброшенных взрывами на АЭС частиц по скоростям оседания. Быстрый рост мощности доз в направлении к АЭС указывает на то, что подобную тенденцию следует ожидать и внутри 20 километровой зоны.

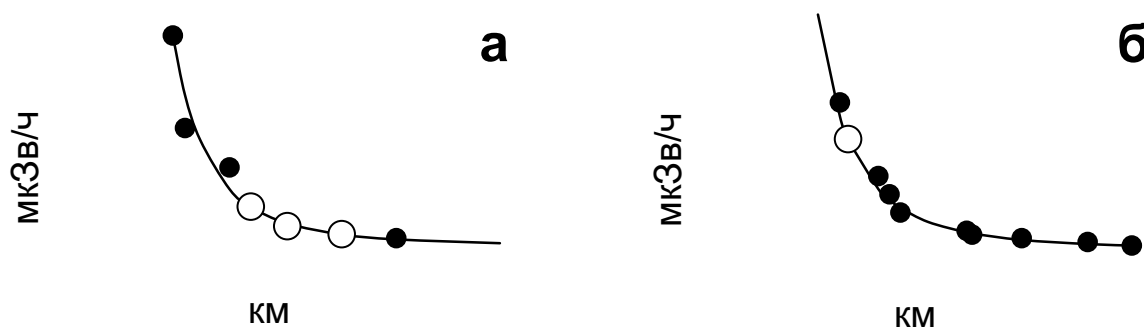


Рис. 2. Численная реконструкция осевой части следа радиоактивных выпадений от аварии на АЭС «Фукусима -1»: а) по состоянию на 12 апреля, б) на 24 апреля 2011 г.

Зависимость (7) позволяет провести оценивание уровней осевого радиоактивного загрязнения внутри рассматриваемой зоны до довольно

близких расстояний от АЭС. Для повышения точности описания уровней загрязнения в ближней зоне необходим более детальный учёт распределения активности по вертикали в момент выброса радионуклидной смеси. Использование полученных оценок параметров θ_2, θ_3 по состоянию радиационной обстановки на 12 апреля 2011 г. дали возможность провести анализ осевого загрязнения и для других сроков наблюдений по более ограниченной информации. В частности, на рис. 2б приведены результаты восстановления осевого загрязнения по одному значению уровню мощности доз по состоянию на 24 апреля 2011 г. Согласие данных радиационного мониторинга и численной реконструкции в диапазоне расстояний от 20 до 80 км подтверждает надёжность данных измерений и определённую универсальность полученных оценок параметров θ_2, θ_3 применительно к рассматриваемому аварийному загрязнению территории.

Заключение

Разработанная малопараметрическая модель реконструкции выпадений полидисперсной примеси даёт возможность численного анализа данных наблюдений практически по всей оси следа. Для получения оценок неизвестных параметров в зависимости (7) требуется привлечение относительно небольшого объёма данных измерений. Как показал численный анализ данных радиационного мониторинга, весьма полезным приёмом оказалось выделение группы параметров, зависящих от характеристик дисперсного состава, что позволило при восстановлении полей осевых концентраций в другие моменты времени дополнительно сократить количество используемых уровней измерений. Весьма полезной является информация о количественном составе выброшенной в атмосферу радионуклидной смеси. Её наличие позволяет после проведения численной реконструкции поля выпадений нуклидов дать прогноз радиационной обстановки на последующие моменты времени.

Для анализа данных мониторинга аварийного загрязнения в ближней зоне необходим более детальный учёт вертикального распределения относительной активности в облаке взрыва. В связи с этим полезно привлечение дополнительной априорной информации о характере и мощности взрыва.

Автор выражает благодарность д.ф.-м.н. Н.А. Прибатурину за представленную информацию и полезные обсуждения в процессе работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 4.4.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Израэль Ю.А., Цатуров Ю.С., Назаров И.М., Петров В.Н., Стукин Е.Д., Фридман Ш.Д., Кантарович Р.С., Федоткин А.Ф., Керцман В.М. Реконструкция фактической картины радиоактивного загрязнения местности в результате аварий и ядерных испытаний // Метеорология и гидрология. - 1994. - № 8. - С. 5-18.
2. Рапута В.Ф. Модели реконструкции загрязнения осевой части Восточно-Уральского радиоактивного следа // Вычислительные технологии. - 2006. - Т. 11. - Ч. 2. - Спецвыпуск. - С. 10-16.

3. Успенский А.Б., Федоров В.В. Вычислительные аспекты метода наименьших квадратов при анализе и планировании регрессионных экспериментов. М.: Изд-во МГУ, 1975. 168 с.
4. Прессман А.Я. О распространении в атмосфере тяжёлой неоднородной примеси из мгновенного точечного источника // Инженерно-физич. журн. - 1959. - Т. 2. - № 3. - С. 78- 87.
5. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Ленинград: Гидрометеиздат, 1985. 272 с.

© В.Ф. Ранута, 2012

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКОГО СТОКА ИЗ БАСЕЙНА РЕКИ ОБЬ

Виктор Иванович Кузин

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, ул. Ак. Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией, тел. (383)3306450, e-mail: kuzin@sscc.ru

Наталья Александровна Лаптева

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, ул. Ак. Лаврентьева, 6, младший научный сотрудник, тел. (383)3306450, e-mail: lapteva@vector.nsc.ru

В статье представлена климатическая модель речного стока с разрешением $1/3$ градуса. Модель является линейной резервуарной моделью, то есть ячейка модели представляет собой резервуар или каскад резервуаров, скорость стока из которых линейно зависит от притока и наклона ячеек и обратно пропорциональна расстоянию между ячейками. Поток воды разделяется на поверхностный сток, речной сток и грунтовый сток, задаваемый климатической моделью поверхности. В модели производится учет влияния болот и озер в зависимости от процентного содержания в ячейке.

Сибирский регион в модели разбит на восемь основных водосборных бассейнов, включающих Обь-Иртыш, Пур, Енисей, Лена, Анадырь, Индигирка, Колыма, Амур. Для расчетов использовались данные реанализа NCEP/NCAR для Обь-Иртышского бассейна Западной Сибири. Контрольные данные о стоках рек взяты из результатов измерений на гидрологической станции Обь-Салехард.

Ключевые слова: математическое моделирование, климатический речной сток, бассейн реки Оби.

MATHEMATICAL MODELLING OF THE RUNOFF FROM THE OB RIVER BASIN

Victor I. Kuzin

doctor, professor, Head of the Laboratory, Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, prospect Akademika Lavrentjeva, 6, Novosibirsk, 630090, Russia, tel. (383)3306450, e-mail: kuzin@sscc.ru

Natalya A. Lapteva

junior Researcher, Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, prospect Akademika Lavrentjeva, 6, Novosibirsk, 630090, Russia, tel. (383)3306450, e-mail: lapteva@vector.nsc.ru

Climatic model of the river runoff with $1/3$ degree resolution is presented in the paper. The model is the linear reservoir model i.e., each cell in the model is the reservoir or the cascade of the reservoirs. The speed of the output from the cell is depended linearly of the input to the cell and the slope of the cell and verse proportional to distance between the cells. The flow is separated to the surface flow, river runoff and ground flow which is determined in accordance with the ground surface model.

Siberian region in the model is divided to eight watersheds which include Ob-Irtysh, Pur, Yenisei, Lena, Anadyr, Indigirka, Kolyma, Amur. Data of the NCEP/NCAR reanalysis was used for

the numerical modeling for the Ob-Irtysh watershed in the Western Siberia. The control data about the river discharge was taken from the results of the measurements on the hydrological station Ob-Salechard.

Key words: mathematical modelling, climatic river runoff, Ob river basin.

Введение.

В гидрологической составляющей климатической системы Арктика играет важную роль. Интерес к гидрологическим процессам в Арктике и в частности в Северном Ледовитом океане в последние десятилетия существенно увеличивается [1].

Важным источником притока пресной воды в Северный Ледовитый океан является речной сток. Первые оценки речного притока в Арктику были даны в работах [2, 3].

Современные оценки [4, 5] дают значение около 3.2 тыс. куб. км в год что дает около 56% по сравнению с притоком через Берингов пролив. Из этого объема крупные реки российского Севера дают около 2.24 тыс. куб. км в год, что составляет около 70% от всего речного стока [4]. Наибольшую величину стока дают такие реки как Енисей, Лена и Обь.

В настоящей работе рассматривается климатическая резервуарная модель речного стока, разрабатываемая для региональной климатической модели Сибирского региона и обсуждаются результаты расчетов, проведенные на основе гидрологических данных реанализа NCEP/NCAR для Обь-Иртышского бассейна, обладающего наибольшим водосбором из всех рек Азии, составляющим $2.99 \cdot 10^{+6}$ км².

Климатическая модель речного стока.

Разрабатываемая модель является линейной резервуарной моделью. Модель составлена из линейных резервуаров в ячейках сетки. Это означает, что скорость стока из ячейки линейно зависит от притока и пропорциональна наклону в ячейке и обратно пропорциональна расстоянию между центрами ячеек.

Скорость изменения стока из ячейки или каскада ячеек в простейшем варианте модели Калинина-Милюкова [6, 7] определяется на основе решения последовательности обыкновенных дифференциальных уравнений вида

$$k \cdot \frac{dQ(t)}{dt} = I(t) - Q(t), \quad (1)$$

где k – коэффициент времени задержки для ячейки,

$I(t)$ – приток в ячейку, $Q(t)$ – сток из ячейки.

Для каскада из n ячеек решается система из n уравнений, связывающих притоки и стоки из последовательных ячеек.

Общим решением линейных уравнений типа (1) при нулевых начальных условиях является интеграл свертки (Дюамеля)

$$Q(t) = \int_0^{\infty} I(\tau) \cdot h(t - \tau) \cdot d\tau \quad (2)$$

Здесь $h(t)$ есть функция влияния линейной системы («кривая добегания» в российской гидрологической терминологии). В простейшем варианте одной ячейки она имеет вид

$$h(t) = \frac{1}{k} \cdot e^{-\frac{t}{k}} \quad (3)$$

Для каскада из n резервуаров кривая добегания имеет вид, аналогичный дискретному представлению гамма-распределения

$$h(t) = \frac{t^{n-1}}{k^n \cdot (n-1)!} \cdot e^{-\frac{t}{k}} \quad (4)$$

Здесь k коэффициент задержки для каждой ячейки.

В конкретной реализации модели мы будем использовать структуру, предложенную в институте Макса Планка в Гамбурге [7].

В этом подходе поток воды на суше разделяется на три составляющие: поверхностный сток, грунтовый сток, речной сток. Значения коэффициентов задержки для поверхностного и речного стоков определяются по формулам, зависящим от наклона ячейки или от перепада высот между ячейкам, отнесенного к расстоянию между их центрами.

В каждой ячейке производится учет процентного содержания болот и озер.

Эффект болот параметризуется множителем задержки, который влияет на скорость поверхностного и речного стоков в зависимости от процентного содержания болот. Эффект содержания озер производится аналогичным образом.

Результаты моделирования.

При проведении численных экспериментов по климатической модели речного стока было выбрано разрешение, соответствующее разрешению в региональной климатической модели, разработанной в ИВМиМГ СО РАН, и составляющее 0.3×0.3 градуса по широте и долготе соответственно. Орография, полученная из данных реанализа (NCEP/NCAR Reanalysis Project at the NOAA-CIRES Climate Diagnostics) путем интерполяции и субъективной коррекции, позволяет моделировать сток пресных вод основных Сибирских рек в бассейн Северного Ледовитого океана. Данные о рельефе поверхности были откорректированы с учетом однозначности направления стока из каждой ячейки сетки. Учет болот и озер осуществлялся на основе обработки массива глобального распределения болот и озер [8, 9].

Исходя из задачи изучения климатических процессов Сибири, рассматриваемая область покрывает территорию $40^{\circ}\text{N} - 80^{\circ}\text{N}$, $50^{\circ}\text{E} - 150^{\circ}\text{E}$ по пространству. Эта зона простирается по долготе от Урала до Дальнего Востока и по широте от Северного Казахстана до Северного Ледовитого океана. В модели учитывались бассейны рек: Обь-Иртыш, Пур, Ангара-Енисей, Лена, Индигирка, Колыма, Анадырь, Амур. Ячейки поверхностного и грунтового стока представлялись в модели как отдельные резервуары, а ячейки речного стока задавались как каскад резервуаров.

Для выбранного варианта модели стока необходимо задание следующих входных параметров: осадки; испарение, переходы из жидкой в твердую фазы и обратно, инфильтрация в почву. Эти данные были взяты из данных реанализа NCEP/NCAR. В качестве контрольных данных использовались климатические данные годовых расходов Сибирских рек Атласа Арктики и данные о среднемесячных стоках полученных постами Гидрометслужбы на створах Обь-Салехард. Длина рядов составляла период 1936 – 1990 гг. Данные для каждого месяца были осреднены за указанный период и полученные значения для каждого месяца были приняты за климатические значения.

На рис. 1 представлены результаты сравнения результатов моделирования среднеклиматических годовых стоков на основе данных реанализа NCEP/NCAR с годовыми расходами, полученными на основе гидрологических съемок.



Рис. 1. Годовые расходы (куб.км)

На рисунке 2 представлены распределения гидрографов годового стока на створе Обь-Салехард. Сплошными линиями представлены среднеклиматические гидрографы по расчетам и гидрологическим измерениям. Различия в максимальных расходах составляют 12% с запаздыванием паводка по фазе на один месяц. Гистограмма представляет годовые гидрографы и осадки, осредненные по десятилетиям с 1948 по 2010 гг.

Годовой гидрограф Обь-Салехард, км³

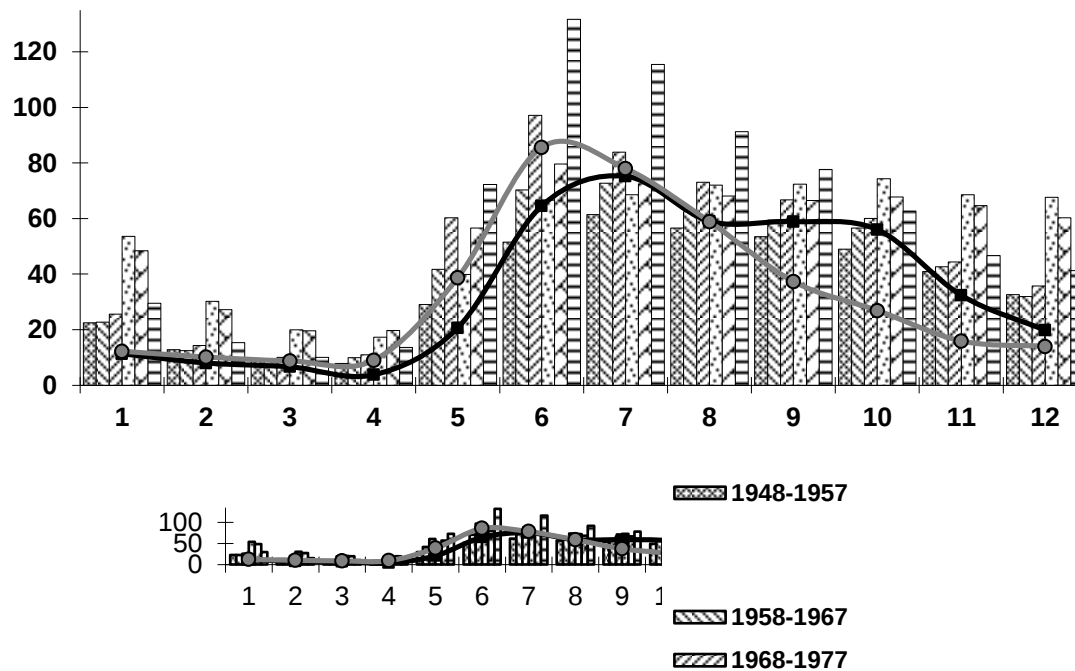


Рис. 2

Заключение

На основе разработанной модели климатического речного стока проведены эксперименты по моделированию речного стока на основе данных реанализа NCEP/NCAR. Результаты сравнения рассчитанного среднеклиматического годового стока и годового гидрографа с данными измерений на гидрологическом посту Обь-Салехард дает хорошее совпадение. Расчеты межгодовой изменчивости дают большие отличия с 1975 года. Модельный сток в соответствии с осадками реанализа увеличивается, что может являться откликом на климатические изменения в Западной Сибири, приводящие к росту стока Сибирских рек, наблюдаемых в последние десятилетия [5].

Авторы статьи благодарны А.А.Фоменко за конструктивные обсуждения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горшков С.Г.(ред.). Атлас Мирового океана // Pergamon, New York. -1983. - Т. 3. - 189 с.
2. Под ред. Трешникова А.Ф. Атлас Арктики // М: ААНИИ. - 1985. - 204 с.
3. Berezovskaya S, Yang D, Kane D. Compatibility analysis of presipitationand runoff trends over the large Siberian watersheds // Geoph. Res Lett. - 2004. - V. 31. - doi:10.1029/2004GL121277.
4. Aagaard K., Carmack E.C. The role of sea ice and other fresh water in the arctic circulation // J. Geophys. Res. 1989. - V. 94. - P. 14485-14498.
5. Serreze M.C., Barrett A.P., Slater A.G., Woodgate R.A., Aagaard K., Lammers R.B., Steele M., Moritz R., Meredith M., Lee C.M. The large-scale freshwater cycle of the Arctic // Journal of Geophysical Research. - 2006. - V. 111: C11010.

6. Бураков Д.А. К оценке параметров линейных моделей стока // Метеорология и гидрология. - 1989. - № 10. - С. 89-95.
7. Hagemann S., Dumenil L. Hydrological discharge model // Technical report No 17, MPI, Hamburg. - 1998. - 42 p.
8. Matthews E. Methane emissions from natural wetlands: Global distribution, area, and environmental characteristics of sources // E.Matthews, I.Fung. Global Biogeochem. - Cycles 1. - 1987. - № 1.
9. Sausen R. A model of river runoff for use in coupled atmosphere-ocean models// R. Sausen, S. Schubert, L. D'umenil. J. Hydrol. - 1994. - №155. - P. 337–352.

© В.И. Кузин, Н.А. Лантева, 2012

ВИХРЕВОЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЕ ИМПУЛЬСА И ТЕПЛА В УСТОЙЧИВО СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЯХ: ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Людмила Ивановна Курбацкая

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, просп. Лаврентьева, 6, старший научный сотрудник, тел. (383) 330-61-52, e-mail: L.Kurbatskaya@omgp.sccc.ru

Альберт Феликсович Курбацкий

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, 630090, г. Новосибирск, Институтская ул., 4/1, главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук, профессор, тел. (383) 330-78-05, e-mail: kurbat@itam.nsc.ru

С помощью мезомасштабной RANS- модели турбулентности установлено, что поведение параметров турбулентного вихревого перемешивания согласуется с последними данными измерений, проведенных в лаборатории и в атмосфере. Исследуются некоторые проблемы, возникающие при описании турбулентного вихревого перемешивания в атмосферном пограничном слое. В частности, при переходе течения в сильно устойчивое состояние потоковое число Ричардсона Ri_f может изменяться немонотонно, возрастая с увеличением градиентного числа Ричардсона Ri_g до достижения состояния насыщения $Ri_g \approx 1$, а затем убывая. Показано, что поведение вихревых коэффициентов диффузии импульса и тепла согласуется с представлением о поддержании переноса импульса (но не тепла) распространяющимися внутренними волнами в сильно устойчивом состоянии атмосферного пограничного слоя.

Ключевые слова: атмосферный пограничный слой, вихревое перемешивание импульса и тепла, численное моделирование.

EDDY MIXING OF MOMENTUM AND HEAT IN STABLY STRATIFIED BOUNDARY LAYERS: MODELLING AND SIMULATION

Kurbatskaya Lyudmila I.

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6 prospect Akademika Lavrentjeva, Novosibirsk 630090, senior scientific researcher, tel. (383)330-61-52, e-mail: L. Kurbatskaya@omgp.sccc.ru

Kurbatskiy Albert F.

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, 4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk 630090, principal scientific researcher, DSc (Phys. and Math.), professor, tel. (383)330-78-05, e-mail: kurbat@itam.nsc.ru

Certain qualitative changes in turbulent eddy mixing in an atmospheric boundary layer (ABL) during transitional regimes towards stronger stratification are highlighted using numerical simulations with the mesoscale RANS turbulence model. The flux Richardson number Ri_f (or the mixing efficiency) for the stably stratified atmospheric boundary layer as a function of the gradient Richardson number Ri_g is investigated. In particular, the flux Richardson number can behave non-monotonic, which has increased with increasing of the gradient Richardson number, saturates and

then decreases after a value of Ri_g around 1.0. Behavior of turbulent eddy mixing coefficients for momentum and heat in this study is consistent with the representation that the flow can sustain propagating internal waves that can effectively transport momentum, but not heat. This behavior is in good agreement with observational results for stably stratified nocturnal boundary layer flows.

Key words: atmospheric boundary layer, eddy mixing of a momentum and heat, modelling and simulation.

Вычислительный эксперимент, выполненный в [1], показывает, что количественно корректный тренд для обратного турбулентного числа Прандтля с ростом градиентного числа Ричардсона Ri_g в устойчиво стратифицированном пограничном слое может быть получен (сплошная линия на рис. 1), если используется модифицированное выражение для турбулентного временного масштаба скалярного поля: $\tau_{p\theta} = \tau / (1 + a \cdot \tau^2 N^2)$, где $a = 0.16$, если $N^2 > 0$ и $a = 0$, если $N^2 \leq 0$. Действительно, штриховая линия на рис. 1 соответствует результатам численного моделирования, выполненного со ‘стандартным’ предположением, что $\tau_{p\theta} \propto \tau = E_k / \varepsilon$. Эта зависимость (штриховая линия на рис. 1) не соответствует экспериментально наблюдаемому убыванию обратной величины турбулентного числа Прандтля в термически устойчиво стратифицированных течениях [2-4].

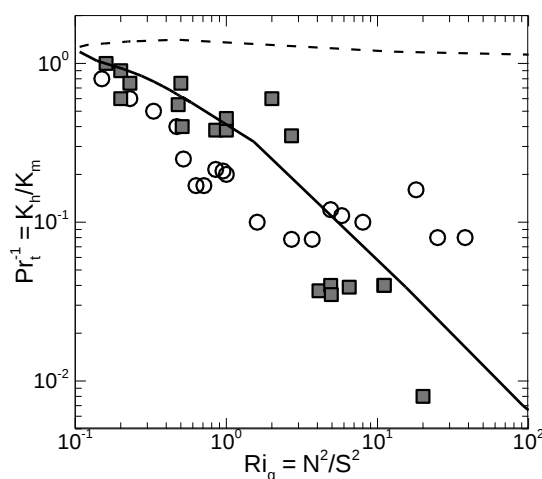


Рис. 1. Обратное турбулентное число Прандтля $Pr_T^{-1} = K_h / K_m$ как функция Ri_g .

Сплошная и штриховая линии – результат моделирования с - и без учета внутренних волн, соответственно. Символами обозначены данные измерений (■ – [3], ○ – [2])

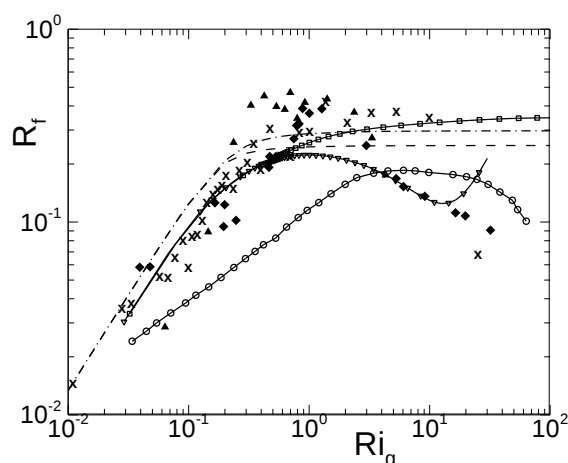


Рис. 2. Эффективность перемешивания (Ri_f) как функция градиентного числа Ричардсона (Ri_g). Данные измерений: $\blacktriangle$, $\times$, $\blacklozenge$ - [5]. Численное моделирование: ∇ – переходный период, $\square$ - сильно устойчивый режим; $\circ$ – струйное течение [6], штриховая линия [7], штрихпунктирная линия [8]

Один из важных аспектов, на которые мы хотели бы обратить внимание – это не монотонная зависимость Ri_f от Ri_g в переходный период к сильно устойчивому состоянию, когда поток тепла может уменьшаться с возрастанием устойчивости течения. На рис. 2 представлена зависимость $Ri_f - Ri_g$, полученная в результате численного моделирования эволюции пограничного слоя на основе трехпараметрической RANS-модели турбулентности, в сравнении с данными измерений [5] и полуэмпирическими зависимостями [6, 7]. Рис. 2 показывает, что в ранние ночные часы (сплошная линия, маркированная символами, ∇) в переходный период к сильно устойчивому состоянию, потоковое число Ричардсона показывает не монотонное поведение.

Такое не монотонное поведение Ri_f получено, например, в неоднородном струйном течении в тропопаузе [8] (сплошная линия на рис. 2, маркированная символами $\circ$). Насыщение числа Ri_f возникает при $Ri_g \approx 1$. В сильно устойчивом (ночном) ночном пограничном слое, потоковое число Ричардсона Ri_f носит монотонный характер (сплошная линия, маркированная на рис. 2 символами, $\square$), как и полуэмпирические параметризации [6, 7], показанные штриховой и штрихпунктирной линиями, соответственно.

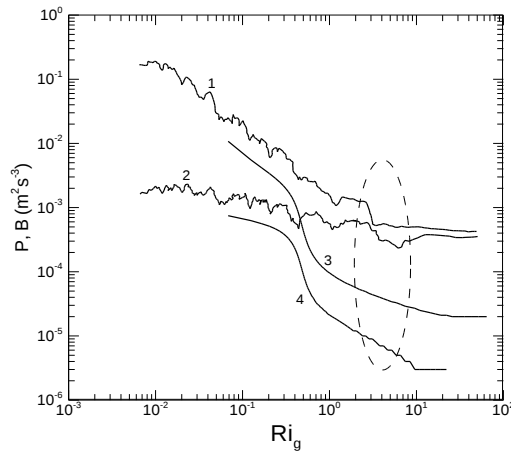


Figure 3. Изменение порождения сдвигом P (линия 1— данные измерений PMF02, линия 3—результат численного моделирования) и потока плавучести B (линия 2— данные измерений PMF02, линия 4—результат численного моделирования)

Рис. 3 показывает порождение энергии турбулентности сдвигом скорости P (линия 3) и поток плавучести B (линия 4), входящие в выражение для потокового числа Ричардсона, в сравнении с порождением P (линия 1) и потоком плавучести B (линия 2), которые найдены вычислением в PMF02 на основе данных измерений в атмосфере. На рис. 4 представлены вычисленные вихревые коэффициенты диффузии импульса K_m (сплошная линия 1) и тепла K_h (сплошная линия 2), нормализованные на $\overline{w'^2}/S$, вместе с данными измерений в пограничном слое атмосферы [2].

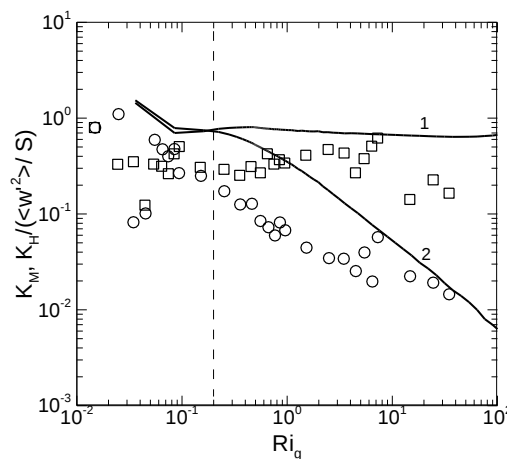


Рис. 4. Коэффициенты вихревой диффузии K_m (линия-1) и K_h (линия-2) нормализованные на $\overline{w'^2}/S$ как функции числа Ri_g в устойчиво стратифицированном атмосферном пограничном слое. Измерения в атмосфере (M02): K_m - $\square$, K_h - $\circ$

Работа выполнена при финансовой поддержке Интеграционного проекта СО РАН по фундаментальным исследованиям (проект № 132), гранта РФФИ № 11-01-00187, а также программы фундаментальных исследований Президиума РАН №4 и Отделения математических наук РАН №3.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kurbatskiy, A. F., Kurbatskaya L. I. On the turbulent Prandtl number in a stably stratified atmospheric boundary layer // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2010. – Vol. 46. – P. 169 - 177.
2. Monti H., Fernando H.J.S., Princevac M., Chan W.C., Kowalewski T.A., Pardjak E.R. Observations of Flow and Turbulence in the Nocturnal Boundary Layer over a Slope // *J Atmos. Sci.* – 2002. – Vol. 59. – P. 2513-2534.
3. Strang E.J., Fernando H.J.S. Vertical mixing and transports through a stratified shear layer. // *J. Phys. Oceanography*. – 2001. – Vol. 31. – P. 2026-2048.
4. Ohya Y. Wind-tunnel study of atmospheric stable boundary layers over a rough surface // *Boundary Layer Meteorology*. – 2001. – Vol. 98. – P. 57-82.
5. Pardyjak, E. R., Monti, P., and Fernando, H. J. S. Flux Richardson number measurements in stable atmospheric shear flows. // *J. Fluid Mech.* – 2002. – Vol. 459. – P. 307- 316.
6. Mellor, G. L., Yamada, T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // *Reviews of Geophysical and Space Physics* – 1982. – Vol. 20. – P. 851- 875.
7. Nakanishi, M. Improvement of the Mellor-Yamada turbulence closure model based on large-eddy simulation data // *Boundary-Layer Meteorology*. – 2001. – Vol. 99. – P. 349 - 378.
8. Mahalov, A., Nicolaenko, B., Tse, K. L., and Joseph, B. Eddy mixing in jet-stream turbulence under stronger stratification. *Geophysical Research Letters*. – 2004 – Vol. 31. L23111.

© Л.И. Курбацкая, А.Ф. Курбацкий, 2012

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ СНЕГОВОГО ПОКРОВА В ОКРЕСТНОСТЯХ НОВОСИБИРСКОГО ЭЛЕКТРОДНОГО ЗАВОДА

Василий Васильевич Коковкин

Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 3, старший научный сотрудник, тел. (383)316-56-32, e-mail: basil@niic.nsc.ru

Владимир Федотович Рапута

ИВМиМГ СО РАН, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 6, ведущий научный сотрудник, тел. (383)330-61-51, e-mail: raputa@sscc.ru

Сергей Евгеньевич Олькин

ГНЦ ВБ «Вектор», 630559, пос. Кольцово, Новосибирская обл., заведующий лабораторией, тел. (383)336-74-79, e-mail: olkin@vector.nsc.ru

Сергей Владимирович Морозов

Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 9, заведующий лабораторией, тел. (383)330-66-62, e-mail: morozov@nioch.nsc.ru

В рамках кинематической схемы описания процесса распространения в атмосфере тяжёлой полидисперсной примеси предложена модель количественной интерпретации данных маршрутных наблюдений полей выпадений в окрестности точечного источника. На примере Новосибирского электродного завода выполнен численный анализ данных экспериментальных исследований загрязнения снегового покрова пылью, ПАУ, ионными компонентами. Показано, что наиболее значительные выпадения измеренных компонентов происходят в ближней окрестности высотной трубы завода в составе крупных фракций частиц.

Ключевые слова: моделирование, источник выбросов, снежный покров, аэрозоль, выпадение, бенз(а)пирен.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF SNOW COVER CONTAMINATION IN THE ENVIRONS OF NOVOSIBIRSK ELECTRODES-MAKING PLANT

Basil B. Kokovkin

Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry SB RAS, 630090, Novosibirsk, prospect Akademika Lavrentjeva, 6, tel. (383)316-56-32, e-mail: basil@niic.nsc.ru

Vladimir F. Raputa

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Novosibirsk, prospect Akademika Lavrentjeva, 6, tel. (383)330-61-51, e-mail: raputa@sscc.ru

Sergey E. Olkin

SRC VB VECTOR, 630559, Koltsovo, Novosibirsk region, tel. (383)336-74-79, e-mail: olkin@vector.nsc.ru

Sergey V. Morozov

Novosibirsk Institute of Organic Chemistry SB RAS, 630090, Novosibirsk, prospect Akademika Lavrentjeva, 9, tel. (383)330-66-62, e-mail: morozov@nioch.nsc.ru

In the framework of kinematic scheme description of distribution in atmosphere of heavy poly-disperse admixture process, a model was proposed for quantitative interpretation of route observations of fallout fields in the environs of point-type source. On the example of Novosibirsk electrodes-making plant, the numerical analysis of experimental investigations of snow cover contamination by dust, PAH, ionic components data was done. It was shown that the mostly large fallouts of measured components are occurred the close-in high-rise plant chimney for large-scale particles fraction content.

Key words: modeling, pollution source, snow cover, aerosol, precipitation, benzo(a)pyrene.

Введение

Закономерности распространения в атмосфере и выпадения на земную поверхность тяжёлых примесей представляют значительный интерес для решения многих практических задач и изучения турбулентных свойств атмосферы [1, 2]. Движение в атмосфере облака тяжёлых частиц определяется в основном двумя факторами: действием силы тяжести в сочетании с силами сопротивления со стороны воздуха и полем ветра. Следует также отметить, что по мере увеличения скорости осаждения частиц происходит убывание коэффициентов турбулентного обмена. При скоростях оседания порядка 0.5 - 1 м/с вполне пригодна для использования кинематическая схема выпадения частиц на поверхность земли. При описании распространения более мелких фракций аэрозольных примесей следует учитывать эффекты турбулентного перемешивания в атмосфере [3].

При проведении численного моделирования и интерпретации данных экспериментальных исследований распространения тяжёлых примесей требуется также информация о функции распределения спектра размеров частиц, которая, как правило, отсутствует. В этом случае возникает необходимость учёта дополнительных априорных сведений о возможных описаниях функции распределения спектра размеров и постановках соответствующих обратных задач переноса примеси в приземном и пограничном слоях атмосферы [4].

Экспериментальные исследования

Новосибирский электродный завод (НЭЗ) расположен в равнинной местности в 50 км южнее Новосибирска. Основное производство основано на технологии пиролиза графита, изготовленного из антрацита Горловского разреза, кокса, каменноугольного пека, кубовых остатков нефтехимии. Полиароматические углеводороды (ПАУ) составляют значительную часть выбросов завода в атмосферу. Выброс смолистых веществ, включающих бенз(а)пирен (БП) и другие ПАУ, формируется в основном в цехе обжига и в настоящее время осуществляется через одну 180 метровую трубу.

Отбор проб снега в окрестностях НЭЗ проводился в начале марта 2010 г. по двум радиальным относительно трубы маршрутам, направленным на север и северо-восток. Основные выпадения примесей в зимнее время происходят в

основном в северо-восточном секторе [5]. Схема отбора снеговых проб представлена на рис. 1. Точки пробоотбора на маршрутах размещались с учётом предварительной информации об источниках выброса ПАУ, условий местности, системе дорог, размещения населённых пунктов и лесных насаждений, состояния снежного покрова, климатических характеристик повторяемости и скорости ветра в зимнее время и т.д. Наличие двух маршрутов позволяет повысить контроль точности оценивания полей загрязнения снежного покрова.

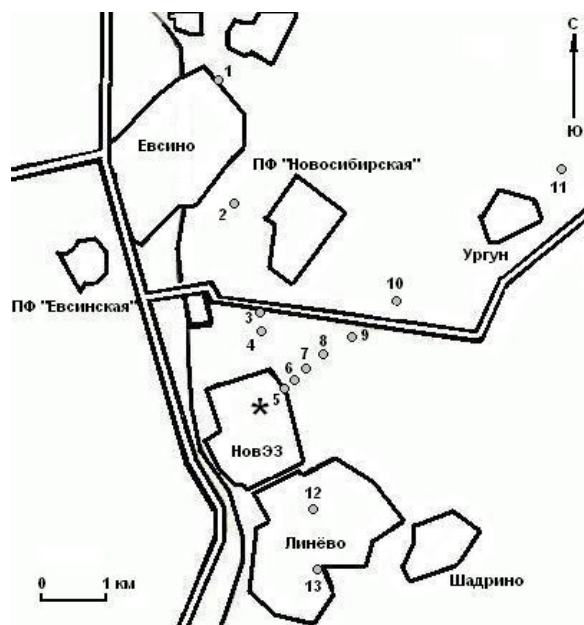


Рис. 1. Схема отбора снеговых проб в районе Новосибирского электродного завода * - основной источник выброса бенз(а)пирена

Предварительный анализ данных экспедиционных и химико-аналитических исследований показал, что концентрация БП в снеге, несмотря на значительную высоту трубы, с удалением от источника быстро уменьшается. Характер изменения концентрации БП с удалением от завода позволяет утверждать, что в данном случае вклад доли относительно мелких частиц, содержащих БП, в ближней зоне выпадений (до 3 км) относительно не велик.

Таким образом, основные выпадения БП в зоне до 3 км от трубы связаны с крупными композитными частицами и обусловлены спецификой протекающих технологических процессов. К северу, в непосредственной близости от завода в соответствии с направлениями преобладающих в течение зимы ветров сформировалась область очень высоких концентраций.

Постановка обратной задачи переноса полидисперсной примеси

Результаты проведённых экспедиционных и химико-аналитических исследований позволяют предположить, что выпадение БП в исследуемой зоне происходит в составе аэрозольных фракций, обладающих весьма значительными скоростями оседания в атмосфере. В данном случае для описания процесса выпадения БП на снеговой покров ограничимся

кинематическим приближением, которое можно выразить следующим соотношением

$$\frac{H}{w} = \frac{x}{U}. \quad (1)$$

Здесь H - высота источника, w - скорость оседания определённой фракции частиц, x - расстояние от трубы, на котором происходит выпадение рассматриваемой фракции на подстилающую поверхность, U - средняя скорость ветра в слое оседания.

Распределение аэрозольной примеси в источнике по скоростям оседания w удобно задавать в виде следующей двухпараметрической функции [4]

$$N(w) = \frac{a^{n+1}}{\Gamma(n+1)} w^n e^{-aw}, \quad n \geq -1, \quad a = \frac{n}{w_m}, \quad (2)$$

где параметр w_m характеризует скорость преобладающей по количеству частиц фракции примеси, n - степень однородности распределения частиц примеси по скоростям w , $\Gamma(n)$ - гамма-функция Эйлера.

С учётом (1), (2) количество полидисперсной примеси, выпадающей на расстоянии x для заданного направления и скорости ветра за время T , можно оценить с помощью соотношения

$$P(x) = Q \cdot T \cdot N\left(\frac{UH}{x}\right), \quad (3)$$

где Q - производительность источника.

Тогда концентрация примеси в снеге опишется следующей функциональной зависимостью

$$q(x, \vec{\theta}) = \theta_1 x^{\theta_2} \exp\left(-\frac{\theta_3}{x}\right), \quad (4)$$

$$\theta_1 = \frac{cQT a^{n+1} (UH)^n}{\Gamma(n+1)}, \quad \theta_2 = -n, \quad \theta_3 = aUH, \quad (5)$$

c - коэффициент разбавления примеси в снеге.

Оценка неизвестного вектора параметров $\vec{\theta}$ проводится по данным наблюдений с использованием метода наименьших квадратов.

Численное моделирование

Для оценки трёх параметров в (4) необходимо использовать наблюдения не менее, чем в трёх точках по маршруту отбора снеговых проб. Их выбор проводился с использованием методов и алгоритмов построения локально оптимальных планов наблюдения. На рис. 2 приведены результаты восстановления поля концентрации БП по трём опорным точкам измерений в северо-восточном направлении от источника. Из анализа рис. 2 вытекает удовлетворительное согласие измеренных и вычисленных концентраций различных инградиентов примеси в контрольных точках наблюдений.

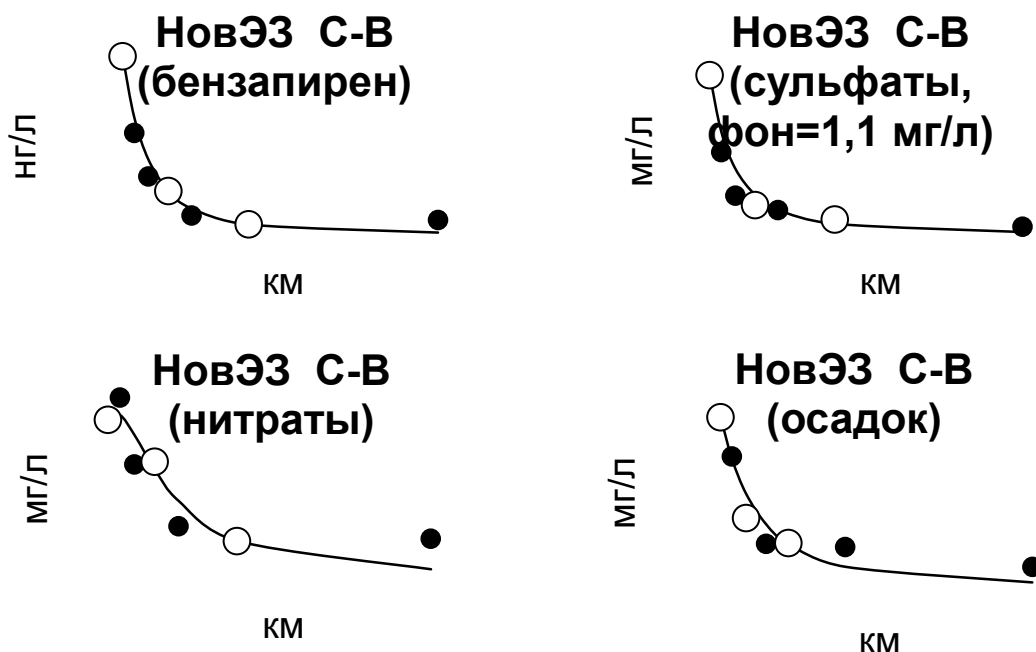


Рис. 2. Численно восстановленные концентрации бенз(а)пирена, сульфатов, нитратов, пыли в снеге на северо-восточном маршруте пробоотбора. ○ - опорные точки, ● - контрольные точки наблюдений

Максимум приземной концентрации достигается на расстоянии менее 0,5 км от трубы, что указывает на весьма высокие скорости оседания выбрасываемых частиц.

Заключение

В рамках кинематической схемы оседания крупных частиц примеси в атмосфере разработана малопараметрическая модель реконструкции поля выпадений в полидисперсном приближении, что позволяет проводить численный анализ данных наблюдений в диапазоне расстояний до 3-4 км от источника. Апробация модели показала вполне удовлетворительное согласие с данными экспериментальных исследований загрязнения снегового покрова в зоне влияния высотного источника выброса крупнодисперсных фракций примеси. При построении модели оценивания существенную роль играют априорные сведения о характеристиках дисперсного состава примеси. Значительные выпадения примесей в ближних окрестностях электродного завода происходят в составе крупных фракций частиц, что указывает на практическое отсутствие очистки выбрасываемых в атмосферу примесей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 4.4.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юдин М.И. К теории рассеяния тел конечных размеров в турбулентной атмосфере // ДАН СССР, 1945. - Т. 49. - № 8. - С. 584-587.
2. Смит Ф.Б. Турбулентное рассеяние облака тяжёлых частиц / Атмосферная диффузия и загрязнение атмосферы. М.: ИЛ, 1962. С. 217-235.
3. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: Гидрометеоиздат. 1991. 279 с.
4. Прессман А.Я. О распространении в атмосфере тяжёлой неоднородной примеси из мгновенного точечного источника // Инженерно-физический журнал. 1959. - Т. 2. - № 3. - С. 78-87.
5. Климат Новосибирска. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 221 с.

© В.В. Коковкин, В.Ф. Рапута, С.Е. Олькин, С.В. Морозов, 2012

ОЦЕНИВАНИЕ ПОЛЕЙ ДЛИТЕЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ ПО ДАННЫМ МОНИТОРИНГА СНЕГОВОГО ПОКРОВА

Татьяна Владимировна Ярославцева

ЗапСибНГМИ, г. Новосибирск, ул. Советская, 30, младший научный сотрудник, тел. (383)330-61-51, e-mail: raputa@sscc.ru

Владимир Федотович Рапута

ИВМиМГ СО РАН, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 6, ведущий научный сотрудник, тел. (383)330-61-51, e-mail: raputa@sscc.ru

Кира Оскаровна Шутова

Управление гидрометеослужбы, г. Барнаул, тел. (3852)68-18-04, e-mail: kira-shutova@yandex.ru

Обсуждаются методы интерполяции полей загрязнения территории города, обусловленных совокупностью выбросов примеси от большого числа распределённых источников. При построении интерполяционных формул используются асимптотические методы теории потенциала и общие закономерности атмосферной диффузии примеси в приземном слое атмосферы. Проведена апробация предложенных алгоритмов применительно к данным мониторинга загрязнения снегового покрова г. Барнаула.

Ключевые слова: интерполяция, загрязнение, примесь, метеопост, снеговой покров.

ESTIMATION OF LONG-TERM FIELD CONTAMINATION OF URBAN AREAS ON THE SNOW MONITORING DATA

Tatyana V. Yaroslavtseva

West-Siberian Regional Hydrometeorological Research Institute, Novosibirsk, ul. The Soviet, 30, tel. (383) 330-61-51, e-mail: raputa@sscc.ru

Vladimir F. Raputa

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Novosibirsk, prospect Akademika Lavrentjeva, 6, tel. (383)330-61-51, e-mail: raputa@sscc.ru

Kira Os. Shutova

Barnaul, тел. (3852) 68-18-04, e-mail: kira-shutova@yandex.ru

The methods of interpolating fields of pollution in the city from a large number of distributed sources are discussed. In the construction of interpolation formulas are used asymptotic methods of potential theory and the general laws of atmospheric diffusion of impurities in the surface layer of the atmosphere. The approbation of the proposed algorithms with respect to the monitoring data of snow cover pollution of Barnaul carried out.

Key words: interpolation, pollution, impurities, measurements, snow cover.

Исходя из особенностей размещения источников загрязнения на территории города можно предположить чрезвычайно сложный характер распределения концентраций примесей в его атмосферном воздухе. Несмотря

на широкое применение расчётных методов для определения полей концентраций, существенное значение имеют и мониторинговые исследования состояния загрязнения городской среды. Это связано с тем, что локальные климатические условия распространения примесей в атмосфере связаны с характером размещения промышленных предприятий и автомагистралей на территории города, типом застройки, рельефом местности, размером города и другими факторами [1]. Необходимо также отметить, что существует значительная неопределённость в количественном составе поступающих в атмосферу газовых и аэрозольных примесей, процессах их химической трансформации. Поэтому результаты расчётов полей концентраций примесей необходимо сравнивать с экспериментальными данными, анализировать возможные расхождения, устанавливать наличие дополнительных источников и соответствие расчётных значений максимумов концентраций реальным. Значение информации о состоянии пространственного загрязнения атмосферного воздуха возрастает также с необходимостью учёта в проектных разработках данных мониторинга о фоновых концентрациях вредных примесей в местах планируемого размещения дополнительных источников и жилой застройки [2].

Для решения поставленных задач необходимо, чтобы существующая система мониторинга обеспечивала достоверные и репрезентативные сведения о содержании примесей в атмосферном воздухе. В связи с этим в городе требуется размещать весьма значительное количество метеопостов наблюдений, что в настоящее время далеко не всегда возможно. Одним из возможных путей выхода из создавшейся ситуации является использование природных планшетов. В частности, проведения в зимнее время дополнительных исследований загрязнения снегового покрова города различными примесями [3]. Для анализа процессов длительного загрязнения этот подход может оказаться значительно эффективнее, поскольку позволяет обеспечить непрерывность измерений и создать необходимую плотность сети наблюдений.

1. Метод асимптотических разложений полей загрязнения территорий города

Поле концентрации лёгкой примеси от точечного источника мощности M за длительный промежуток времени может быть описано следующим соотношением [1]

$$\Phi(r, \varphi, \theta) = M \cdot \theta r^{-2} e^{-\frac{2r_m}{r}} P(\varphi + 180^\circ) \quad (1)$$

где r, φ - полярные координаты расчетной точки с началом в месте расположения источника, r_m - расстояние от источника, на котором достигается максимальная приземная концентрация, θ - агрегированный параметр, зависящий от метеорологических переменных, $P(\varphi)$ - повторяемость направлений ветра за рассматриваемый промежуток времени.

Тогда с учётом (1) концентрацию примеси в случае площадного источника S в точке $M(x, y) \in S$ можно представить в виде

$$Q(x, y) = \theta \cdot \iint_S \frac{m(\xi, \eta) P(\varphi + 180^\circ)}{d^2 e^{\frac{2r_m}{d}}} d\xi d\eta. \quad (2)$$

где (ξ, η) - текущие координаты источника в точке $M_1(\xi, \eta) \in S$, $m(\xi, \eta)$ - эмиссия примеси, $\varphi(\xi, \eta, x, y) = \arctg\left(\frac{y-\eta}{x-\xi}\right)$, $d = |M_1M| = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}$.

На практике мощность эмиссии площадного источника $m(\xi, \eta)$, как правило, неизвестна, либо может быть задана лишь весьма приближенно. В таких условиях интерпретация данных наблюдений с помощью соотношения (3) становится достаточно затруднительной. В этом случае целесообразно проводить оценивание (2) с использованием его асимптотических представлений и измеренных значений концентраций в области S . Учитывая, что $d = \sqrt{r^2 + r_1^2 - 2rr_1 \cos \theta}$, получим [4]

$$\frac{1}{d} = \frac{1}{r\sqrt{1 + \alpha^2 - 2\alpha\mu}} = \frac{1}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n P_n(\mu), \quad (3)$$

где $r = |\overrightarrow{OM}|$, $r_1 = |\overrightarrow{OM_1}|$, $\alpha = \frac{r_1}{r}$, $\mu = \cos \theta$, $P_n(\mu)$ - полином Лежандра n -го порядка.

Подстановка конечного числа членов ряда (3) в соотношение (2) создаёт возможность построения различных приближений поля концентрации лёгкой примеси внутри области S .

2. Интерполяция по территории города фоновых концентраций

В практике Общегосударственной службы наблюдений и контроля за загрязнением атмосферного воздуха основным источником экспериментальной информации для определения фона являются данные стационарных или маршрутных постов (ПНЗА). Значения фоновых загрязнений определяются лишь в наборе дискретных точек – местах размещения ПНЗА, которые могут находиться как близко друг от друга, так и на значительном удалении (до 10-15 км). В настоящее время в Унифицированной программе расчёта загрязнения атмосферы фон интерполируется по следующей формуле при безразмерном параметре $\alpha = 2$ [5]

$$C_{\phi j} = \frac{\sum_{i=1}^{n'_{\Pi}} \frac{C_{\phi i}}{(r_{ij})^\alpha}}{\sum_{i=1}^{n'_{\Pi}} \frac{1}{(r_{ij})^\alpha}}, \quad (4)$$

где $C_{\phi i}$ - значение фона для i -того ПНЗА; $C_{\phi j}$ - значение фона для j -той расчётной точки, не совпадающей ни с одним ПНЗА; r_{ij} (км) – удаление i -того

ПНЗА от j -той расчётной точки; n'_Π - число ПНЗА, для которых установлены значения $C_{\phi i}$ рассматриваемого вещества.

Рекомендованное в формуле (4) значение $\alpha = 2$ принято на основании учёта некоторых общих закономерностей атмосферной диффузии слабооседающей примеси от большого числа низких источников, рассредоточенных по значительной территории. В частности, к ним следует отнести автомагистрали, источники частного сектора, пылящие поверхности на территории города и т.д.

В соотношении (4) параметр α может несколько варьироваться в зависимости от рассматриваемой примеси. Следует также отметить, что на практике значения фона, определённые для конкретных ПНЗА, часто необоснованно распространяются на удалённые расстояния. Поэтому к числу важных характеристик относятся радиусы зон репрезентативности ПНЗА, которые зависят от пространственной изменчивости фона [5].

3. Численная интерполяция данных наблюдений загрязнения бенз(а)пиреном снежного покрова г. Барнаула

Регулярные измерения загрязнения атмосферного воздуха г. Барнаула проводятся на пяти ПНЗА. На рис. 1 и рис. 2 указано их положение на территории города. Измерения же содержания бенз(а)пирена (БП) выполняются лишь на ПНЗА № 1 и № 13, что явно недостаточно для объективной оценки загрязнения БП территории всего города.



Рис. 1. Интерполированное с постов № 1 и № 13 поле концентрации бенз(а)пирена (нг/л) в снежном покрове г. Барнаула

Для выхода из этой непростой ситуации могут быть использованы дополнительные наблюдения загрязнения снежного покрова в различных точках города, в том числе и на постах. С использованием соотношения (4) на рис. 1 и рис. 2 представлены результаты интерполяции полей загрязнения БП снежного

покрова по измерениям на ПНЗА № 1 и № 13 и на всех пяти постах соответственно в конце зимнего сезона 2011 г. Интерполяционное поле БП на рис. 1 имеет довольно простую структуру и пригодно для ограниченного использования. На значительных удалениях от рассматриваемых постов, особенно за пределами городской территории его поведение явно не правдоподобно.



Рис. 2. Интерполированное с пяти постов поле концентрации бенз(а)пирена (нг/л) в снежном покрове г. Барнаула

Поле концентрации БП, представленное на рис. 2, заметно усложняется. Анализ рис. 2 показывает, что в области между ПНЗА № 1, № 6 с одной стороны и ПНЗА № 18 с другой стороны интерполяционное поле БП меняется монотонным образом, что позволяет сделать предположение о подчинённом положении ПНЗА № 3, № 13 относительно вышеперечисленных. И действительно, проверка этого предположения показывает, что интерполяционное поле концентрации БП, построенное по данным наблюдений на постах с №№ 1, 6 и 18, качественно и количественно вполне воспроизводит поле БП, построенное по всем пяти постам.

БИБЛИГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Безуглая Э.Ю. Мониторинг состояния загрязнения атмосферы в городах. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 199 с.
2. Берлянд М.Е., Безуглая Э.Ю., Генихович Е.Л., Зашихин М.Н., Оникул Р.И. О методах определения фоновго загрязнения атмосферы в городах // Труды ГГО, 1984. – Вып. 479. - С.17-30.
3. Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л: Гидрометеиздат, 1985. 182 с.

4. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1972. 735 с.
5. Грачёва И.Г., Оникул Р.И., Яковлева Е.А. Об интерполяции по территории города фоновых концентраций атмосферных примесей // Труды ГГО, 1998. - Вып. 549 - С. 98-107.

© Т.В. Ярославцева, В.Ф. Рипута, К.О. Шутова, 2012

НОВЫЙ ГИСТОГРАММНЫЙ АЛГОРИТМ С АВТОМАТИЧЕСКИМ ВЫБОРОМ ДЕТАЛЬНОСТИ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ПО ЗАДАННОЙ РАЗДЕЛИМОСТИ КЛАСТЕРОВ¹

Валерия Сергеевна Сидорова

Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 6, научный сотрудник лаборатории обработки изображений, тел. (383) 330-73-32, e-mail: svvs@oii.sccc.ru

Предложен новый гистограммный иерархический алгоритм. Целью иерархического деления кластеров является достижение предельной детальности по заданной разделимости кластеров. Рассмотрено приложение алгоритма к пятиспектральному спутниковому снимку.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, обработка изображений, кластеризация, многомерная гистограмма, кластерная разделимость.

NEW HISTOGRAM ALGORITHM FOR AUTOMATIC CHOICE OF CLUSTERIZATION DETAIL ON GIVEN CLUSTER SEPARABILITY

Valerija S. Sidorova

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Lavrentjev avenu, 6, Novosibirsk, 630090, scientific researcher, laboratory of Image Processing, tel.: (383) 330-73-32, e-mail: svvs@oii.sccc.ru

Histogram clustering algorithm finds clusters with separability below assigned. Different detail of the data areas is in accordance with average separability of their internal clusters due to the hierarchical technique. Application of the algorithm for uncontrolled Earth's surface classification by five spectral satellite data is shown.

Key words: remote sensing, image processing, clustering, multidimensional histogram, cluster separability.

Предлагается развитие гистограммного алгоритма, использующего оценку кластерной разделимости [1,2]. Он основан на методе Нарендры [3]. Гистограмма рассматривается как аппроксимация плотности вероятности векторов признаков. Быстрый непараметрический не итеративный алгоритм Нарендры разделяет векторное пространство признаков по унимодальным кластерам, модальные векторы которых соответствуют локальным гистограммным максимумам, а границы проходят по долинам гистограммы. Детальность кластеризации в алгоритме Нарендры регулируется заданием числа уровней предварительного квантования, одинакового для всего векторного пространства. В [2] был предложен иерархический алгоритм, который определяет различную детальность в зависимости от кластерной

¹ Работа выполнена частично при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 10- 07-00131).

разделимости подобластей, оптимизируя среднюю кластерную делимость по всему пространству признаков. Согласно исследованиям, наблюдается тенденция к уменьшению средней делимости с ростом числа уровней квантования. Хотя делимость индивидуальных кластеров может оставаться удовлетворительной существенно дольше.

В новом иерархическом алгоритме предлагается другая цель: в подобластях пространства найти такие максимальные детальности, при которых порождаются дочерние кластеры с делимостью ниже назначенной точности.

Меры делимости отдельного кластера и совокупности $K(n)$ кластеров определены в [1]:

$$m^j(n) = \frac{1}{B^j(n) * H^j(n)} \sum_{i=1}^{B^j(n)} h_i^j(n), \quad (1)$$

$$m(n) = \frac{1}{K(n)} \sum_{j=1}^{K(n)} m^j(n), \quad (2)$$

где параметр n - число уровней квантования векторного пространства, $h_i^j(n)$ - значение гистограммы в i -ой точке границы кластера j , $B^j(n)$ - число точек границы кластера j , $H^j(n)$ - максимальное значение гистограммы.

В [1] показано, что (2) удовлетворяет требованиям, предъявляемым к мере изолированности кластеров или мере качества кластеризации [4]. Минимумы (2) соответствуют лучшим классификациям. Чем меньше значение (1), тем лучше изолированность отдельного унимодального кластера. Всегда $m^j(n) \leq 1$ и $m(n) \leq 1$.

Квантование пространства признаков предложено осуществлять гораздо более плавно [1], чем в алгоритме Нарендры, когда срезался бит в каждом спектральном канале, т.е. число уровней можно было уменьшать только вдвое: 256, 128, 64 и т.д. Теперь число уровней можно изменять на 1. Пусть их начальное значение $n < n_0$, $n_0 = 256$. Размер ячейки для произвольного уровня квантования $s = (n_0 - 1) / (n - 1)$. Тогда, если L - число признаков, а $f = [f(1), f(2), \dots, f(L)]$ - вектор признаков, то новый вектор $g = [g(1), g(2), \dots, g(L)]$ как результат квантования:

$$g(k) = \left[\frac{f(k)}{s} \right], \quad k = 1, \dots, L,$$

где $[\cdot]$ часть целого числа.

На первом этапе нашего иерархического алгоритма находим такое число n (и соответствующие новые векторы g), при котором распределение по унимодальным кластерам, полученное методом Нарендры, дает абсолютный минимум мере (2), в диапазоне изменения $255 > n > n_1$. Затем, для данных внутри каждого кластера, предложенный алгоритм увеличивает начальное число уровней квантования (детальность) и находит свое собственное новое число и соответствующее собственное наилучшее кластерное распределение в смысле меры (2) и так далее. Кластерная нумерация - сквозная. Для каждого

дочернего кластера алгоритм сохраняет значение меры (1) и номер родительского кластера. До сих пор описание алгоритма совпадает с предложенным в [2]. Однако, цель нового алгоритма другая. Предыдущая версия предлагала получать распределение, оптимальное в смысле средней меры кластерной разделимости.

Для последующего деления, новый алгоритм рассматривает каждый дочерний кластер как отдельную область, если его разделимость удовлетворяет условию (3). Плохо разделенные его подкластеры (не удовлетворяющие (3)) рассматриваются как одна область.

$$m^j(n) < \varepsilon, \quad (3)$$

где ε заданная точность.

Задача ставится так: увеличивать детальность квантования пространства и продолжать делить кластеры, пока $n < n_1$. Затем результаты анализируются снизу вверх. Если условие (3) нарушено, то данные кластера могут быть возвращены к родительскому кластеру. Процесс продолжается, пока в иерархическом дереве не попадется хороший в смысле (3) предок. Когда анализ закончится, для каждого полученного кластера будет определена детальность квантования соответствующей области пространства признаков.

Рассмотрим изображение земной поверхности (рис.1); получен со спутника NOAA_17 24 апреля 2003г. Изображение пятиспектральное. Его объем около 1,7 мегабайт, размер 1480*1124 пикселей. Алгоритм построения многомерной гистограммы с использованием хеширования был предложен в [5].

Верхнюю левую часть изображения занимают тающие снега тайги Сибири, внизу оттаявшая поверхность Казахстана. Правую часть снимка покрывают сплошные и полупрозрачные облака.

Было пройдено девять этапов иерархического алгоритма, дальнейшее деление кластеров приводило к нарушению условия разделимости (3). Для кластеров заснеженной части тайги был получен 41 кластер, число уровней квантования изменялось между 20 и 37. Пространственное расположение кластеров на карте хорошо соответствуют земным объектам. Прослеживается русло Оби и ее притоки, озеро Чаны под снегом. Несколько кластеров соответствуют проступающим через снег темным хвойным лесам. Полупрозрачные облака создают дополнительные кластеры. Вода озер уже после второго этапа иерархии выделилась в различные кластеры, дальнейшее увеличение детальности позволило отделить берега озер, однако они весьма неоднородны и составляют плохо разделимые кластеры. Областям, покрытым облаками, соответствуют 32 кластера, число уровней квантования изменялось между 16 до 32. Для свободной от облаков и снега поверхности Земли получено 58 кластеров. Максимум числа уровней квантования векторного пространства - 50. Интересно заметить, что три кластера соответствуют районам добычи полезных ископаемых открытым способом. Они отмечены черным и желтым тонами на карте и локализуются в районах Экибастуза, Баянаула - угледобыча, в Майкаине золото открытым способом; южнее Семипалатинска также уголь и

золото. Эти кластеры отражают распределение яркостей в инфракрасном диапазоне на 11 и 12 мкм (Рис. 1d, 1e). Видны темные пятна, соответствующие сегментам кластеров. В других спектральных диапазонах нет контрастных объектов в этих областях изображения. Справа от Иртыша ведется добыча природных строительных материалов, соли. В районе городов Алтай, Фуюнь Китая также добыча золота, возле селений Самарское и Курчум строительные материалы, полиметаллы. Зоны отечественных разработок, в частности, Кузбасс закрывает облако, однако, в небольшом просвете обнаруживается небольшой компактный сегмент черного кластера немного южнее города Ленинска-Кузнецкого. Также маленькие сегменты кластера расположены поблизости от Ак-Довурака и озера Ачит-Нуур в Монголии.

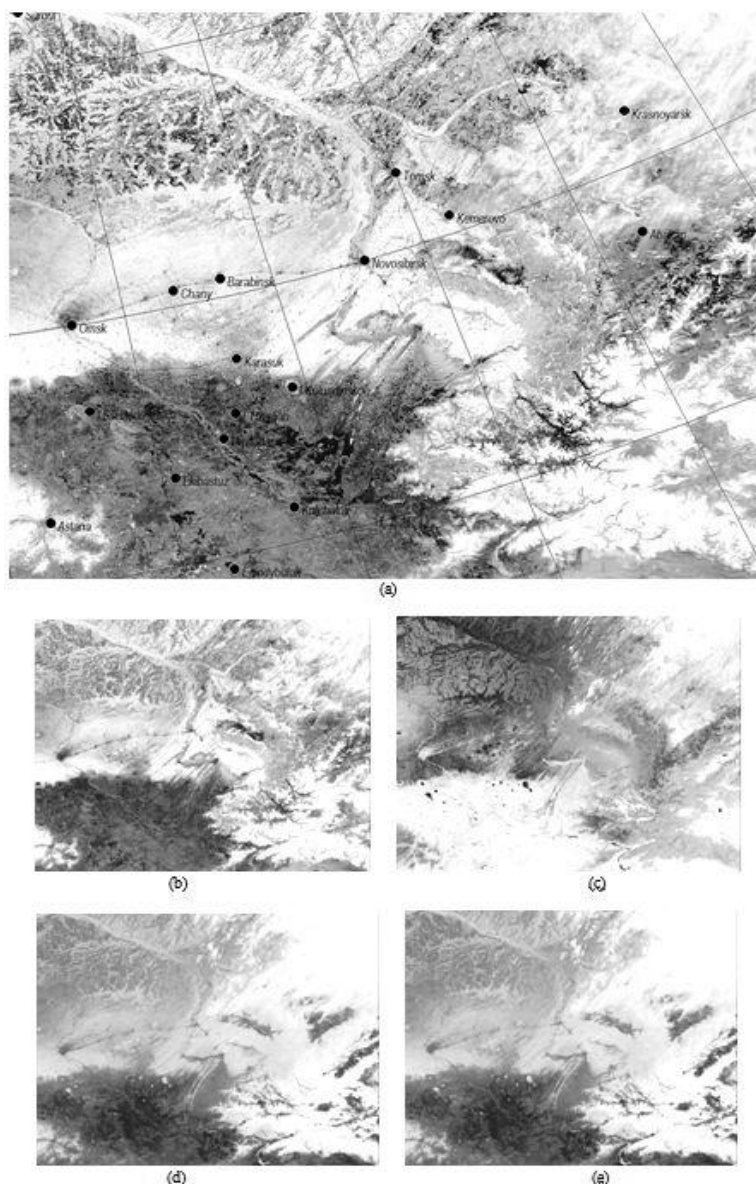


Рис. 1. Изображение со спутника NOAA_17 24 апреля 2003г: а), б) области видимой части спектра, инфракрасный: с) 3.7 мкм, d) 11 мкм, е) 12 мкм

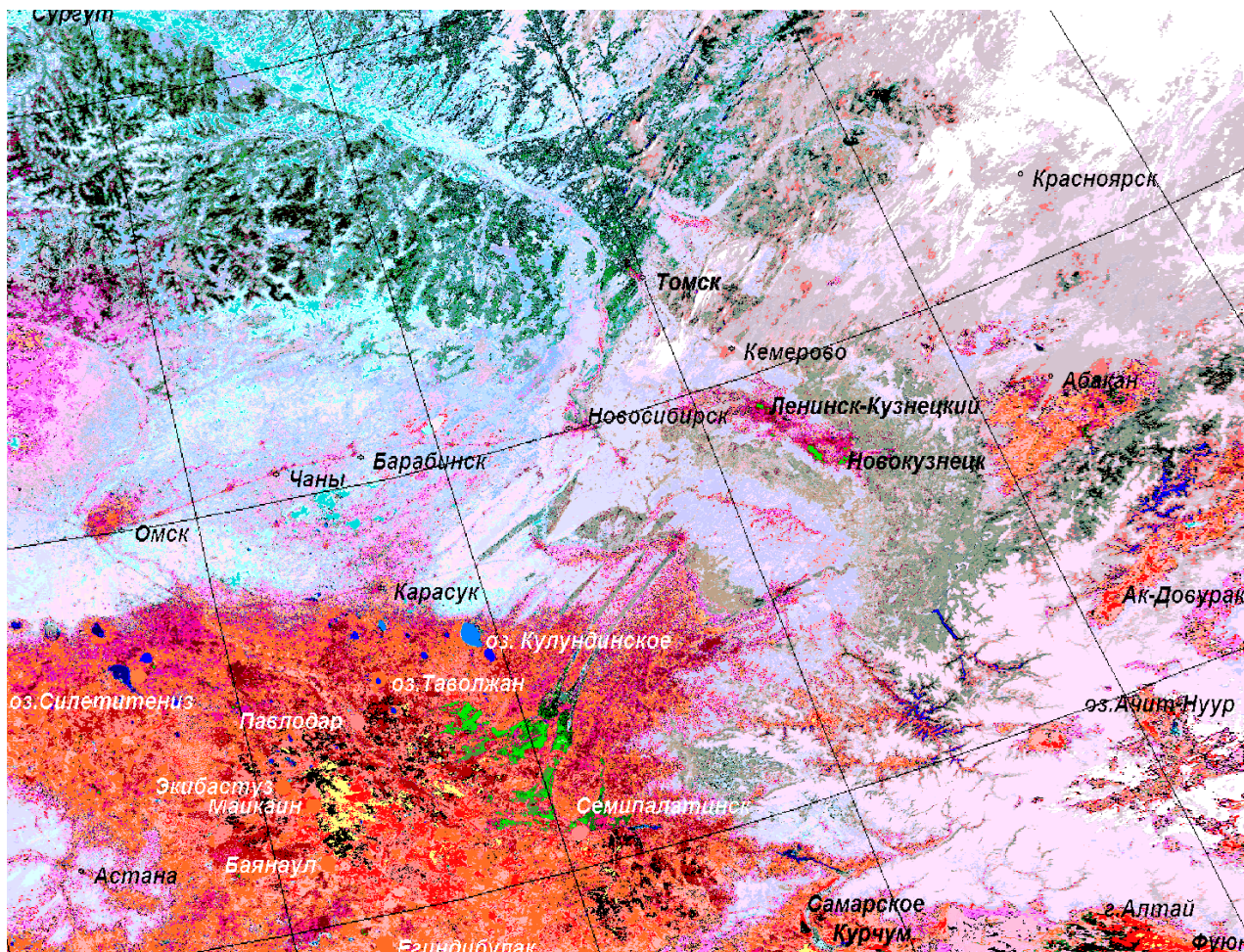


Рис. 2. Кластерная карта

Для всего изображения получено 120 кластеров, включая кластеры всех размеров. Максимальная детальность – 50 уровней квантования. Разделимость почти каждого кластера $< \varepsilon = 0.07$. Доля остальных кластеров очень мала. Для сравнения: при той же максимальной детальности $n = 50$, одинаковой для всего пятиспектрального изображения, алгоритмом Нарендры получается 4686 кластеров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 1. Сидорова В.С. Оценка качества классификации многоспектральных изображений гистограммным методом [Текст] / В.С. Сидорова // Автометрия. – 2007. – Том 43. – №1. – С. 37- 43.
2. Narendra P.M. and Goldberg M. A non-parametric clustering scheme for LANDSAT [Text] / Narendra P.M. and Goldberg M. // Pattern Recognition. – 1977 – 9 – P. 207.
3. V.S. Sidorova. Automatic Hierarchical Clustering Algorithm for Remote Sensing Data [Text] / V.S. Sidorova // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2011 – Vol. 2 – No. 2 – P. 318–321.
4. 4. M. Halkidi, Y. Batistakis and M. Vazirgiannis. [Text] / M. Halkidi, Y. Batistakis and M. Vazirgiannis. On clustering validation techniques. // Journal of Intelligent Information Systems – 2001 – No.17 (2-3) – P.107-132.

5. 5. V. S. Sidorova. Separating of the Multivariate Histogram on the Unimodal Clusters.
[Text] / V. S. Sidorova. // Proceedings of the Second IASTED International Conference
“Automation Control and Information Technology”. – Novosibirsk. – 2005. – P. 267–274.

© *B.C. Сидорова, 2012*

ОБЛАЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ БАЗЫ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА ПРИРОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Пётр Алексеевич Калантаев

Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН, 630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 6, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории обработки изображений, тел. +79133997691, e-mail: kln@oii.sccc.ru

Облачные вычисления – это следующий шаг в эволюции Интернет как источника услуг. Сдвиг технологической платформы в сторону сетей из объединенных компьютеров подготовил перевод исследований природных ресурсов на более эффективную облачную платформу сетей из дата-центров. В работе представлен подход построения многоагентного «облака» семантической базы данных природных явлений. Посредством программных агентов в «облаке» непрерывно анализируются и накапливаются знания для оперативного формирования часто меняющихся сценариев и прогнозов природных явлений. Работа частично поддержана грантом РФФИ 10-07-00131.

Ключевые слова: облачные вычисления, виртуализация, интеллектуальный агент, база данных, мониторинг природных явлений.

CLOUD TECHNOLOGIES DATABASE MONITORING OF NATURAL PHENOMENA

Piotr A. Kalantaev

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS 6, prospect Akademika Lavrentjeva, Novosibirsk, 630090, Russian Federation.

Cloud computing - the next step in the evolution of the Internet as a source of services. The shift in the direction of the technological platform of the combined networks of computers produced a translation of research resources to more efficient cloud platform network of data centers. This paper presents an approach of constructing multiagent "cloud" semantic database of natural phenomena. By means of software agents in a "cloud" is continuously analyzed and accumulated knowledge to the rapid formation of frequently changing scenarios and predictions of natural phenomena. This work was partially supported by RFBR grant 10-07-00131.

Key words : cloud computing, virtualization, intelligent agent, database, monitoring of natural phenomena.

1. Введение

Первое определение облачным вычислениям (cloud computing) дал Джон Гейдж из Sun Microsystems – еще в 1984 году! «сеть есть компьютер». В XXI веке Лью Такер, технический директор по облачным вычислениям Sun Microsystems уточнил - «в облачных вычислениях дата-центр есть компьютер». «Облако» - это настоящий Интернет – бесконечный компьютер, построенный из сети сетей компьютеров. Для специалистов облачные системы означают сетевые вычисления (grid computing), коммунальные компьютерные системы (utility computing), программное обеспечение как услугу, виртуализацию,

интернет-приложения, самоуправляемые системы и распределенные вычисления, удаленную обработку данных и обработку по запросу – а также различные комбинации этих терминов. Для неспециалистов облачные вычисления – это просто пользовательская платформа в Интернет (персональный компьютер или мобильный телефон) для доступа к бесконечным аппаратным, программным и информационным ресурсам, предоставляемых провайдерами облачных услуг (CSP - Cloud Service Provider). Облачные вычисления – это следующий шаг в эволюции Интернет как источника услуг, отталкивающийся от практики распределенных вычислений «виртуального суперкомпьютера», представляющего рой из миллионов персональных компьютеров. Этот сдвиг технологической платформы в сторону сетей из объединенных компьютеров, позволил перевести исследования природных ресурсов на облачную платформу сетей из объединенных дата-центров.

2. Web 3.0 и интеллектуальные агенты.

«Облако» и Web 2.0 представляют собой лишь поворотную точку в круто растущем графике экспоненциального роста Интернет [1]. Web 1.0 был «только для чтения», Web 2.0 – «для чтения и записи», Web 3.0 будет «для интеллектуального чтения, записи и исполнения» – в «облаке». Программный агент – это пакет программного обеспечения, исполняющий задачи для «других», автономно, без всякого внешнего контроля после того, как эти задачи были поставлены. Под «другими» можно понимать пользователей или технологические процессы базы данных природных явлений. Стандартный программный агент основывается на трех необходимых свойствах: автономность, способность реагировать и способность выйти на связь. Автономность означает, что только сам агент контролирует свои действия и состояние, способность реагировать - обнаружение изменений в окружающей агента среде и реагирование на них. Программные агенты могут общаться с людьми, другими программными агентами или объектами, будучи способны планировать и ставить цели, поддерживать модели представлений (собственные и других агентов), рассуждать о действиях (собственных и других агентов, в том числе людей) и повышать уровень знаний и качество работы через обучение. Интеллектуальный агент - это отдельная категория программного обеспечения, использующего локальные знания о собственных и принадлежащих другим агентам задачах и ресурсах (многоагентные системы). Интеллектуальные агенты могут быть интегрированы в структуры «облака», содержащие конкретные функции по решению задач обработки данных и мониторинга природных явлений. Они поддерживают естественное соединение информации и технологий, основанных на знаниях и могут поддерживать процесс логических рассуждений, например, включение в них возможных сценариев и прогнозов природных явлений. Они позволяют включить функцию обучения и самосовершенствования как на уровне инфраструктуры - адаптивная маршрутизация, так и на уровне приложения - адаптивные пользовательские интерфейсы [2]. Интеллектуальные пользовательские интерфейсы значительно повышают производительность и качество обработки запросов от различных служб реагирования на природные явления.

Интеллектуальные агенты используются для сбора ситуационной аналитики и процессов обработки сложных событий (СЕР - Complex Event Processing). Получение достоверной информации и непрерывный анализ природных явлений и ситуаций в «облаке» – это следующая сложная задача для интеллекта исследователя, обеспечиваемого аналитикой Web 3.0, позволяющей количественный анализ и обработку огромных массивов данных природных явлений.

3. Роевой интеллект семантической базы данных на «облаке»

Кроме значения ситуационной аналитики, следует обратить внимание на роль обработки сложных событий. Как пишет профессор Стэнфорда Дэвид Лакхэм в своей книге *The Power of Events*, некоторые СЕР-сообщения, возможно, содержат не данные о ситуации (ими обмениваются приложения), а информацию о событиях низкого уровня, которые собираясь в структуры, могут открыть информацию о ситуации высокого уровня благодаря роевому интеллекту. Термин «роевой интеллект» (Swarm Intelligence) означает тип искусственного интеллекта, основанный на коллективном поведении децентрализованных, самоорганизующихся систем [3]. Обычно системы роевого интеллекта – это многоагентные системы, состоящие из простых агентов, взаимодействующих друг с другом и окружающей средой. Агенты следуют простым правилам, и, хотя нет никакой централизованной контрольной структуры, описывающей, как должны себя вести отдельные агенты, локальные и до определенной степени случайные взаимодействия между ними приводят к появлению общего «интеллектуального» поведения, неизвестного отдельным агентам. Естественные примеры роевого интеллекта - муравейники, птичьи стаи, стада животных, колонии бактерий и мальки рыб. Благодаря низкоуровневым событиям, происходящим в многоагентном «облаке» семантической базы данных природных явлений, возможно появление ценных интеллектуальных ресурсов, рис.1.



Рис. 1. Схема многоагентного «облака» семантической базы данных природных явлений

В ходе управляемых воздействий на окружающую среду и обработки сложных событий программными агентами создается обратная связь природного явления с базой данных мониторинга, рис.2.

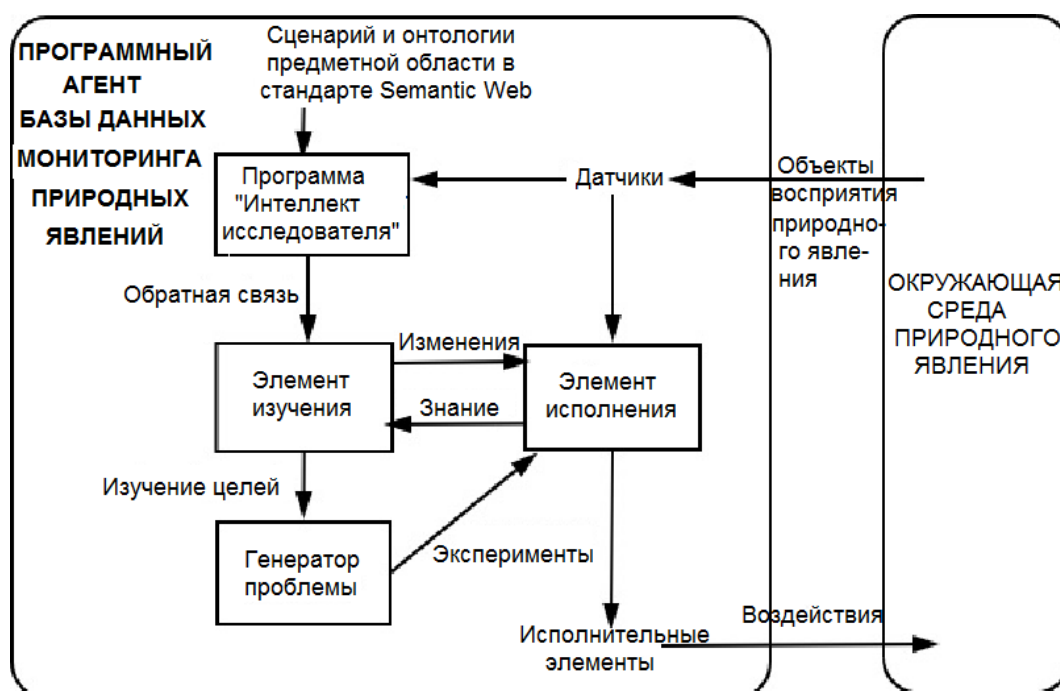


Рис. 2. Функциональная схема программного агента базы данных мониторинга природных явлений.

Программные агенты в «облаке» непрерывно анализируют, обрабатывают и накапливают знания в семантической базе данных согласно сценариям и онтологиям предметной области, заданным по стандарту Semantic Web [2]. Накопленные знания применяются для контроля и управления природными явлениями и ресурсами.

4. Заключение

Функционал современной «облачной» системы мониторинга природных явлений предусматривает выполнение как вычислительных функций, так и решение задач интеграции ресурсов различных облачных приложений в семантической базе данных природных явлений, а также интерфейсные операции между приложениями, решение задач по выбору правильных семантических схем общения между задачами (например, преобразование потоков обмениваемых данных), управление вычислительными и информационными потоками, объединение их в комплексы и т. д. Семантическая база данных на многоагентном «облаке» обещает дать толчок для развития природоресурсных исследований качественно нового уровня, где на первый план будут выходить интеграционные функции, а не просто получение вычислительных результатов. На текущем этапе проекта разрабатывается программный агент лабораторной базы данных мониторинга природных явлений, интегрирующий информацию о текущем и прогнозируемом состоянии природной среды и экологии городского района. На

следующем этапе проекта разработанный программный агент планируется интегрировать в многоагентную базу данных экологического мониторинга окружающей среды Новосибирского Академгородка. Работа выполнена частично при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 10-07-00131.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калантаев П.А.. Семантическая организация пространственных данных. // В сборнике трудов Международной Конференции "ИНТЕРКАРТО - ИНТЕРГИС 11 Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт" 25 сент.-3 окт. 2005 г., Ставрополь-Домбай-Будапешт, изд-во СГУ, 2005 г., с.92-96.
2. Калантаев П.А., Пяткин В.П.. Концепция Semantic Web в моделировании сенсорной сети природных явлений // Труды VII Международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2011»// 19-29 апреля 2011, Новосибирск, Россия, т.4, с. 109-112.
3. Питер Фингар. Dot Cloud. Облачные вычисления - Бизнес-платформа XXI века. / издательство «Аквармариновая Книга», М., 2011, 256 с.

© П.А. Калантаев, 2012

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКА МЕТАНА В АТМОСФЕРУ ИЗ ВОД ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО ШЕЛЬФА

Валентина Владимировна Малахова

Институт вычислительной математики и математической геофизики, 630090, г. Новосибирск, Проспект Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. 8-913-892-7069, e-mail: malax@sscc.ru

Елена Николаевна Голубева

Институт вычислительной математики и математической геофизики, 630090, г. Новосибирск, Проспект Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник тел. 8(383)330-64-50, e-mail: elen@ommfao.sccc.ru

На основе крупномасштабной модели гидротермодинамики Северного Ледовитого океана рассматривалась модельная задача о выносе растворенного метана в Арктический океан со стоком сибирских рек. Для оценки вклада речного стока в общую эмиссию метана, были рассчитаны его интегральные потоки для всей области моделирования. Получено, что поток метана в атмосферу может составить от 800 до 1600 тонн в год в зависимости от рассматриваемого периода. Показано, что окисление метана обеспечивает его эффективный сток в пределах зоны распространения и способствует уменьшению потока метана в атмосферу.

Ключевые слова: перенос метана, поток метана, окисление метана, Восточно-Сибирский шельф.

MODELLING OF A METHANE EMISSION IN ATMOSPHERE FROM WATERS OF THE EAST-SIBERIAN SHELF

Valentina Vladimirovna Malakhova

Kandidat (PhD) of Physical and Mathematical Sciences, Researcher Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of SB RAS, Novosibirsk, Russia, Pr. Acad. Lavrentieva, 6, Novosibirsk, 630090, Russia, tel. 8-913-892-7069, e-mail: malax@sscc.ru

Elena Nikolaevna Golubeva

Doctor (PhD) of Physical and Mathematical Sciences, Researcher Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of SB RAS, Novosibirsk, Russia, Pr. Acad. Lavrentieva, 6, Novosibirsk, 630090, Russia, tel. 8(383)330-64-50, e-mail: elen@ommfao.sccc.ru

On the basis of the climatic picture of circulation the modelling problem about carrying out of the dissolved methane in the Arctic Ocean with a drain of the Siberian Rivers is considered. The regional large-scale ocean model, developed in ICMMG the SB RAS is used. For an estimation of the river drain contribution, its integrated flux for area of dissolved methane maximum have been calculated. It is received, that the methane emission in atmosphere can make from 800 to 1600 tons a year depending on the considered period. It is shown, that methane oxidation controles CH_4 release to the atmosphere.

Key wrds: methane transport, methane flux, methane oxidation, East Siberian shelf.

1. Введение

В ряде работ [1-4] показано, что роль Северного Ледовитого океана (СЛО) в глобальном цикле метана существенно занижена. Так, в результате экспедиционных исследований 2003-2008 гг. в Восточно-Сибирском море и море Лаптевых были выявлены шлейфы высокого содержания растворённого метана, [3, 4]. Экспериментально установлено, что придонный слой вод в указанных районах перенасыщен метаном относительно его содержания в атмосфере высоких широт северного полушария на 2 200–3 000%, а поверхностные воды – до 700–2000%. Концентрации растворенного метана в поверхностном слое воды в эстуариях сибирских рек колебались в пределах от 7 до 700 нмоль/л, [5].

Часть этих аномалий ассоциируют с наземными источниками, поставляющими метан с помощью речного стока [5]. Действительно, водосборы сибирских рек находятся на территории с наличием многолетней мерзлоты, хранящей огромные запасы органического углерода. Обогащенные метаном озера Колымо-Индигоирской низменности также соединены с реками многочисленными протоками. С другой стороны, сибирский шельф доступен для прямой разгрузки метана посредством подмерзлотного стока. Также исследователи допускают наличие морского источника, а именно возможность разгрузки метана из газогидратных структур [4]. В этой связи становится актуальным выявление вклада пресноводных и морских арктических экосистем как источников метана на арктическом шельфе.

2. Описание численного эксперимента

В данной работе рассматривается распространение растворенного метана, поступающего со стоком сибирских рек в воды шельфовой зоны СЛО. Исследование проводится на основе численных экспериментов с региональной моделью СЛО – Северная Атлантика, разработанной в ИВМиМГ СО РАН.

В результате работы численной модели с использованием данных реанализа NCEP/NCAR была восстановлена система взаимодействия водных масс Северной Атлантики и СЛО, включая циркуляцию вод в морях сибирского шельфа [6]. На основе полученной климатической картины циркуляции рассматривалась модельная задача о выносе растворенного метана в Арктический океан со стоком сибирских рек. Распределение растворенного метана (C) в морской воде получено как решение адвективно-диффузионного уравнения для примеси.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \cdot \nabla C = Diffusion + C_{ox}$$

где u – скорость морских течений, *Diffusion* - описывает процесс горизонтальной и вертикальной диффузии метана на основе операторов второго порядка. C_{ox} - описывает сток метана, в частности, за счет его окисления.

На боковой границе области в точках, соответствующих дельтам рек Обь, Енисей, Лена, Яна, Колыма, Индигирка, задавались значения концентрации растворенного метана, соответствующие данным измерений. На участках боковых границ, соответствующих местам впадения рек, используются данные

о среднеклиматическом сезонном изменении стока рек Арктического региона (информация доступна на сайте международного проекта АОМIP <http://www.who.edu/page.do?pid=29836>). Задание расхода рек сопровождается заданием притока пресной воды (с нулевой соленостью) и концентрации метана с помощью следующего граничного условия:

$$-\mu_s \frac{dC}{dn} + (u \cdot n)C = Q$$

где $Q = -\frac{CT_r}{A}$ n – нормаль к границе, через которую осуществляется

приток, $u_n = (u \cdot n)$ – скорость в этом направлении, T_r – величина расхода реки, A – площадь боковой поверхности равная произведению длины участка границы и глубины бассейна на этом участке, μ_s – коэффициент горизонтальной диффузии.

В рамках описанной численной модели был реализован численный эксперимент для временного интервала с 2001 по 2009 год. Источники растворенного метана задавались в эстуариях сибирских рек в пределах от 30 до 300 нмоль/л, в соответствии с данными измерений [5]. При этом для эстуария Оби была принята величина – 30 нмоль/л; Енисея – 70 нмоль/л, Лены – 300 нмоль/л, Индигирки, Колымы и Яны – 200 нмоль/л.

В морских водах при наличии кислорода имеет место дополнительный биохимический процесс – окисление метана, что обеспечивает его эффективный сток. Различные параметризации этого процесса в настоящее время обсуждаются в литературе [7-9]. В численном эксперименте процесс окисления метана был реализован на основе подхода, предложенного в работе [7]. Был введен термин «turnover times» (время жизни), как мера, характеризующая время существования метана в растворенном виде в морской воде. Результаты измерений концентраций метана в районе его поддонной разгрузки, приведенные в работе [7], показывают, что его «время жизни» в морской воде относительно постоянно: примерно 1.5 года для глубоких слоев океана с высокой концентрацией CH_4 и порядка десятилетий на небольших глубинах, где его концентрация существенно ниже.

Подобная параметризация была рассмотрена в работе [10]: сток метана в модели задавался с учетом его времени жизни [7], которое составляло 1.5 года на глубине свыше 370 м и 10 лет для более мелкого океана. В эксперименте мы использовали аналогичный подход, а именно, рассматривали

$$C_{ox} = C / \tau, \text{ где } \tau = \begin{cases} 1.5 \text{ года при } z \geq 370 \text{ м} \\ 10 \text{ лет при } z < 370 \text{ м} \end{cases}$$

3. Результаты моделирования

Результаты численного эксперимента показали, что сток реки Лены вносит весомый вклад в формирование аномально высоких концентраций метана в шельфовых водах моря Лаптевых. В соответствии с динамикой речного стока максимальные концентрации (до 70 нмоль/л) появляются в мае. Дальнейшее

распространение происходит в соответствии с системой течений в циклоническом направлении, определяемой действующей системой ветров и отклоняющим вправо эффектом силы Кориолиса. Полученные высокие концентрации метана сохраняются только в районе речного стока Лены, и к сентябрю происходит их распространение к проливу Дм. Лаптева, однако максимальные значения уменьшились и составили только около 22 нмоль/л.

Перенасыщение поверхностных вод растворенным метаном позволяет рассчитать поток метана в атмосферу. Расчет эмиссии метана проводился по методологии, описанной в [11]. Поток метана из шельфовых вод в атмосферу был рассчитан как функция разницы концентрации растворенного метана в поверхностном слое воды (C_w , нмоль/л) и равновесной с атмосферой концентрации метана (C_a , нмоль/л, для данного региона получена от 3 до 4.5 нмоль/л), скорости ветра (V , м/с) и числа Шмидта (Sc).

$$F = 0.31V^2 \left(\frac{Sc}{660} \right)^{-0.5} (C_w - C_a)$$

Число Шмидта характеризует свойства метана при различной температуре воды (T , °C) и определяется по формуле,

$$Sc = 2039.2 - 120.31 \cdot T + 3.4209 \cdot T^2 - 0.040437 \cdot T^3$$

Были рассчитаны потоки метана вода-атмосфера с учетом поля концентраций метана в морской воде, полученного в численном эксперименте. Потоки составили от 0 до $40 \cdot 10^{-10}$ г(CH_4)/см²час для сентября 2003 года, от 0 до $20 \cdot 10^{-10}$ г(CH_4)/см²час для сентября 2004 года, что сопоставимо с данными наблюдений. Полученный максимальный поток метана определяется в шельфовых водах моря Лаптевых в районе дельты реки Лены, рисунок 1. В соответствии с данными измерений [3] средний поток метана в атмосферу из восточно-сибирского шельфа составил в – $4.86 \cdot 10^{-10}$ г(CH_4)/см²час в сентябре 2003 года и $3.02 \cdot 10^{-10}$ г(CH_4)/см²час в сентябре 2004 года.

Для оценки вклада речного стока в общую эмиссию метана, были рассчитаны интегральные потоки метана для всей области моделирования. На рисунке 2 приведены диаграммы с полученными оценками для всего летнего периода, когда отсутствует ледовый покров. Получено, что эмиссия метана в атмосферу могла составить от 800 до 1600 т (CH_4) в зависимости от рассматриваемого года. Так в 2003 году получен возможный поток метана 1600 т, в 2004 году – 1360 т. Подобные оценки для этих периодов, полученные на основе данных измерений, приведены в работе [12]. Эмиссия метана из восточно-сибирского шельфа могла составить 5700 т (CH_4) в 2003 году и 1570 т в 2004 году.

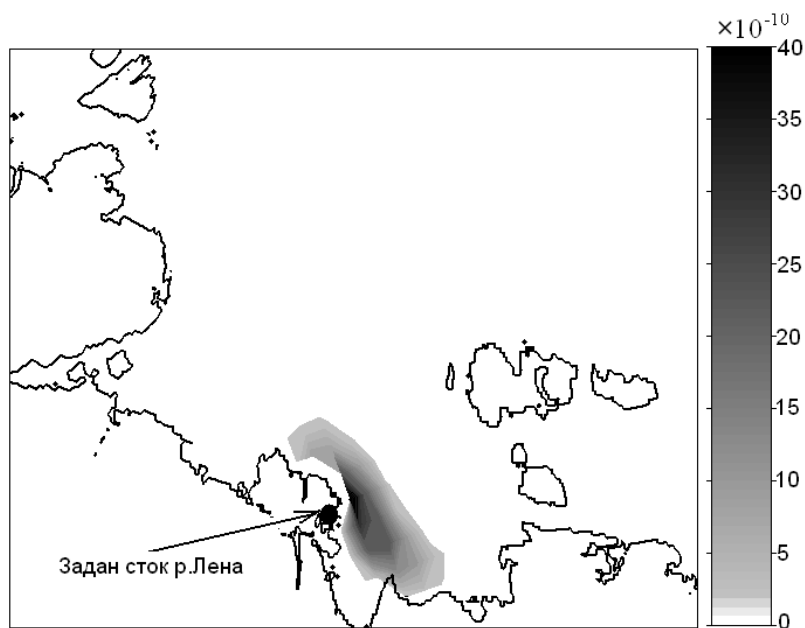


Рис. 1. Поток метана в атмосферу (в $\text{г}(\text{CH}_4)/\text{см}^2$ в час), полученный в численном эксперименте для сентября 2003 года

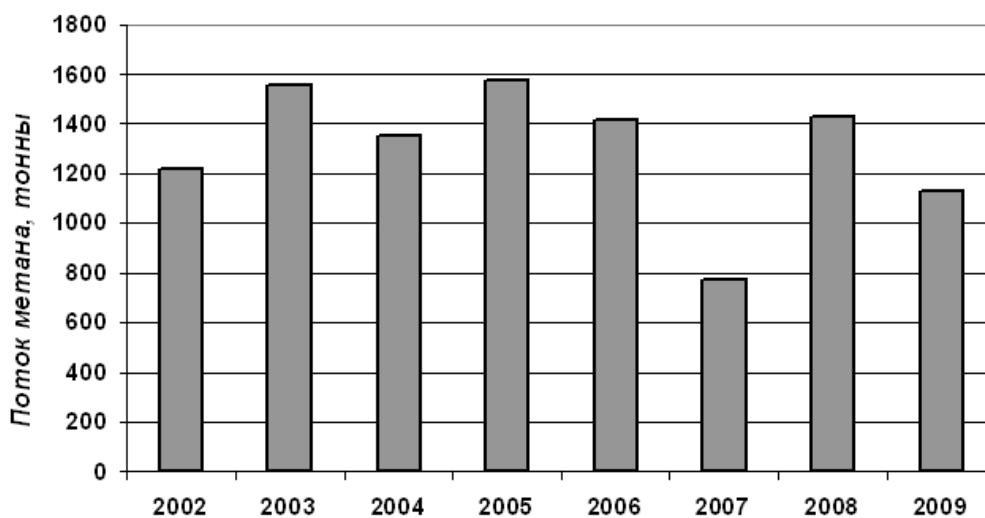


Рис. 2. Суммарный поток метана в атмосферу в тоннах, полученный для летнего периода

4. Выводы

В результате численного моделирования получено, что сток реки Лены может вносить весомый вклад в формирование anomalно высоких концентраций метана в воде в море Лаптевых. В соответствии с динамикой речного стока получено, что видимые значения метана появляются в мае, дальнейшее распространение происходит в соответствии с системой течений, и к сентябрю максимальные значения определяются у пролива Дм. Лаптева. Что соответствует данным измерений.

Показано, что окисление метана в толще воды обеспечивает эффективный сток в пределах зоны распространения растворенного газа, что может уменьшать его поступление в атмосферу. Получено, что поток метана в атмосферу может составить от 800 до 1600 тонн в год в зависимости от рассматриваемого периода.

Работа выполнена при поддержке междисциплинарного ИП СО РАН №109, проекта РФФИ № 11-05-01075-а.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. McGuire A. D., Anderson L. G., Christensen T.R., Dallimore S., Guo L., Hayes D. J., Heimann M., Lorenson T. D., Macdonald R. W. and Roulet N. Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change // Ecological Monographs. – 2009.- V.79(4). - P. 523–555.
2. Damm E., Mackensen A., Budeus G., Faber E., and Hanfland C. // Pathways of methane in seawater: plume spreading in an Arctic shelf environment (SW-Spitsbergen) //Continental Shelf Research 2005. – V.25. – P.1453–1472.
3. Shakhova N., Semiletov I. Methane release and coastal environment in the East Siberian Arctic shelf // Journal of Marine Systems. – 2007. - № 66. – P. 227–243
4. Шахова Н.Е., Сергиенко В.И., Семилетов И.П. Растворенный метан в шельфовых водах Арктических морей // Доклады Академии наук. – 2005. – Том. 402. - №4. – С. 529-533
5. Шахова Н.Е., Семилетов И.П., Бельчева Н.Н. Великие Сибирские реки как источники метана на Арктическом шельфе // Доклады Академии наук. – 2007. – Том. 414. - №5. – С. 683-685
6. Голубева Е. Н., Платов Г. А. Численное моделирование отклика Арктической системы океан-лед на вариации атмосферной циркуляции 1948 – 2007 гг. //Известия РАН, серия ФАО. – 2009. - Том.45. - № 1. - С.145 -160.
7. Valentine, D.L., Blanton, D., Reeburgh, W.S., Kastner, M. Water column methane oxidation adjacent to an area of active hydrate dissociation, Eel River Basin // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2001. -Vol. 65. - No. 16. – P. 2633–2640
8. Elliott S. Maltrud M, Reagan M., Moridis G., Cameron-Smith P. Marine methane cycle simulations for the period of early global warming // J. of Geophysical Research.- 2011.- V.16.- G01010. doi:10.1029/2010JG001300
9. Griffiths R.P., et al Field Observations of Methane Concentrations and Oxidation Rates in the Southeastern Bering Sea// Applied and environmental microbiology.- 1982.- Vol. 44.- No. 2.- P. 435-446
10. Yamamoto A., Yamanaka Y., Tajika E. Modeling of methane bubbles released from large sea-floor area: Condition required for methane emission to the atmosphere // Earth and Planetary Science Letters. - 2009.- V.284.- P.590–598
11. Wanninkhof R.. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean. Journal of Geophysical Research. - 1992.- V.97.- NO.C5.- P.7373–7382.
12. Shakhova N., Semiletov I., Panteleev G. The distribution of methane on the Siberian Arctic shelves: Implications for the marine methane cycle // Geophysical Research Letters. – 2005. – V.32. - L09601, doi:10.1029/2005GL022751

О КОНСТРУКТИВНОМ ВЫЧИСЛЕНИИ СЕЧЕНИЙ МНОГОМЕРНОГО КУБА

Иван Гаврилович Казанцев

Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН, 630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории обработки изображений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН тел. +89059364821, e-mail: kig@ooi.sccc.ru

В задачах визуализации многомерных массивов и изображений важным средством является визуализация сечений, вычисление которых требует рутинных комбинаторных вычислений. В работе предлагается быстрый аналитический метод вычисления центральных сечений. Работа частично поддержана грантом РФФИ 10-07-00131.

Ключевые слова: гиперкуб, сечение, проекция.

ON A CONSTRUCTIVE COMPUTATION OF THE SECTION OF HYPERCUBE

Ivan G. Kazantsev

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS 6, prospect Akademika Lavrentjeva, Novosibirsk, 630090, Russian Federation.

The problem of imaging of the multidimensional images and arrays includes an important part such as visualization of the sections which needs the routine combinatorial computations. In this work a fast analytical method of central projections calculations is proposed.

Key words: hypercube, section, projection.

В работе предлагается быстрый конструктивный некомбинаторный алгоритм вычисления фигуры пересечения V куба размерности N , или N -куба $K = [-1, 1]^N \subset \mathbb{R}^N$ и центральной плоскости Π , заданной двумя ортонормированными векторами $P, Q \in \Pi$. Основной идеей метода является сведение вычислений в пространстве $\mathbb{R}^N$ к операциям в двумерном пространстве плоскости Π с использованием гномонической проекции. Фигура сечения $V = K \cap \Pi$ есть замкнутая выпуклая фигура, а именно центрально симметричный выпуклый многоугольник с максимально возможным числом $2N$ вершин и $2N$ сторон. Введем грани, или граничные $(N-1)$ -кубы F_{vk} , $k=1, \dots, N$, удовлетворяющие формуле: $F_{vk} = \{(x_i) \mid x_k = \pm 1; -1 \leq x_i \leq 1, i \neq k\}$. Объединение $F = \bigcup F_{vk}$ является границей куба K [1]. Каждый граничный $(N-1)$ -куб F_{vk} имеет $(2N-2)$ соседних грани и одну симметричную грань-антипод. Любые два соседних $(N-1)$ -куба из F имеют непустое пересечение в виде $(N-2)$ -кубов. Легко видеть, что каждое ребро многоугольника V принадлежит одной из граней или $(N-1)$ -кубу F_{vk} , а вершины V принадлежат одному из $(N-2)$ -кубов.

Таким образом, вершины V являются точками пересечения плоскости π и некоторых $(N-2)$ -кубов из границы F .

Задача вычисления сечения V для произвольной размерности N может классифицироваться как глобальный поиск точек пересечения плоскости π и $(N-2)$ -кубов из границы F . Известно, что число L -кубов на границе N -куба есть $2^{N-L}N!/(L!(N-L)!)$. Поэтому в нашем случае традиционный подход потребует глобального перебора среди $2N(N-1)$ кандидатов на вершины многоугольника. Для больших размерностей этот метод становится затратным по времени.

Предлагаемый алгоритм вычисления V ассоциирует плоскость π с единичной окружностью C на этой плоскости и ортонормированными векторами $P, Q \in C$. Окружность $C=C(P, Q)$ описывается параметром $t \in [0, 2\pi)$ в форме

$$C(P, Q) = \{S(t) = P \cos t + Q \sin t\}.$$

Эти окружности лежат на единичной сфере S^{N-1} , которая находится во взаимно-однозначном соответствии с границей F . Этот гомеоморфизм устанавливается с помощью гномонической проекции S^{N-1} на F :

$$\Gamma : U = \{u_k\} \rightarrow \frac{1}{u_{\max}} U,$$

где $U \in S^{N-1}$, $u_{\max} = \max\{|u_1|, \dots, |u_N|\}$.

Приступим к описанию алгоритма. Пусть $P = \{p_k\}$ и $Q = \{q_k\}$, $k = 1, \dots, N$. Построим $2N$ точек $T_k = (p_k, q_k)$ и $T_{-k} = -(p_k, q_k)$ и их выпуклую оболочку

$$H = \text{conv}(\{T_{\pm k}\}).$$

Мы можем доказать (доказательство за неимением места опускается), что число

M точек H_m , $m = 1, \dots, M$, составляющих множество H , равно числу вершин V и эти вершины вычисляются в несколько некомбинаторных шагов. Сначала вычисляются точки E_m такие, что $OE_m \in H_m H_{m+1}$ (H_m упорядочены против часовой стрелки, с условием $H_{M+1} = H_1$). На следующем шаге вычисляются точки $D_m = P \cos(\vartheta_m) + Q \sin(\vartheta_m)$, где ϑ_m являются угловыми координатами точек E_m на плоской системе координат (p, q) . Наконец, гномонические проекции

$$V_m = \Gamma[D_{k_m}]$$

точек D_m на границу F N -куба дают нам вершины V_m многоугольника V .

Для сравнения эффективности комбинаторного и конструктивного алгоритмов были проведены численные эксперименты. Использовался персональный компьютер с Pentium Dual Core CPU, 2.5 GHz под ОС Windows XP. Коды написаны в среде MATLAB.

Центральные плоскости π моделировались многократно (десять раз для каждой размерности N), используя генератор случайных ортонормированных N -векторов P и Q . Средние времена затрат переборного и нового алгоритмов для размерностей $N=3, \dots, 100$ для вычисления V фиксировались, используя функции МАТЛАБ **tic** и **toc**. Для вычисления выпуклой оболочки H

использовалась функция **convhulln**. Сравнение показало что вычислительные временные затраты для нового алгоритма имеют очень медленный линейный рост для размерностей $N < 100$ (Рис. 1 и Рис. 2), а средние времена вычислений $V = [-1,1]^N$ / для комбинаторного переборного алгоритма имеют порядок $O(N^5)$.

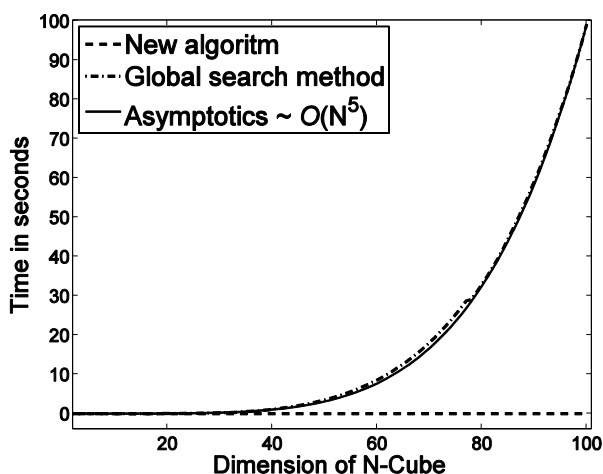


Рис. 1. Вычислительные затраты (в секундах) нового алгоритма и традиционного комбинаторного для $N=3, \dots, 100$ в сравнении с асимптотикой $O(N^5)$

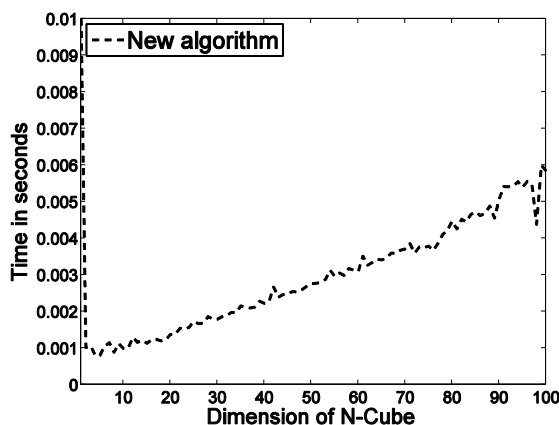


Рис. 2. Временные затраты нового алгоритма при размерностях $N=3, \dots, 100$ (для детальной визуализации рисунка1)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. C. Zong. What is known about unit cubes // Bulletin of the American Mathematical Society. - 2005. - Vol. 42. - 181-211.

МАСШТАБИРУЕМАЯ МОДЕЛЬ ГИПЕРРЕЛЬЕФА В 4D-ПРОСТРАНСТВЕ

Павел Алексеевич Ким

Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН, 630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории обработки изображений федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН, тел. +79231131135, e-mail: kim@ooi.sccc.ru

В задачах разбиения космического изображения по унимодальным кластерам, структура двумерной гистограммы может содержать в себе полезную информацию, используемую при кластеризации. При переходе к векторам признаков большей размерности, такая геометрическая интерпретация требует задания более сложного инструмента - гиперрельефа в 4D-пространстве. Работа частично поддержана грантом РФФИ 10-07-00131.

Ключевые слова: масштабируемая модель рельефа, уравнение Пуассона, минимальные геометрические фигуры, картографические горизонталы.

THE SCALED MODEL OF THE HYPER-RELIEF IN 4D-SPACE

Pavel A. Kim

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS 6, prospect Akademika Lavrentjeva, Novosibirsk, 630090, Russian Federation.

The structure of the two-dimensional histogram can comprise the helpful information during splitting of the image by unimodal clusters. Using three-dimensional vectors, such kind of geometrical interpretation demands the more complex tool - a hyperrelief in 4D-space.

Key words: the Scaled model of a relief, the equation of Poissona, the minimal geometrical shapes, cartographical horizontals.

Исходно трехмерная масштабируемая модель рельефа задается конструктивно как интегральная гладкая аппроксимация ступенчатой модели рельефа, определяемой дискретным множеством опорных точек, в которых известна усредненная высота ступенек, а их проекции определяют разбиение, покрывающее опорную горизонтальную область задания рельефа[1-5]. Неудобство ступенчатой модели проявляется уже в том, что привычное изображение «высотной» карты местности системами горизонталей оказывается неинформативным за счет их слияния на ступеньке. Поскольку поверхность масштабируемой модели выбирается из условия минимальности ее площади, то ее уравнение должно удовлетворять уравнению Пуассона с константной правой частью для каждого площадного элемента. При этом гладкость формируемого участка, отличающегося постоянной кривизной соответствует «резиновой» мембране, обеспечивая тем самым точное

изображение рельефа посредством системы вложенных плоских замкнутых фигур-горизонталей.

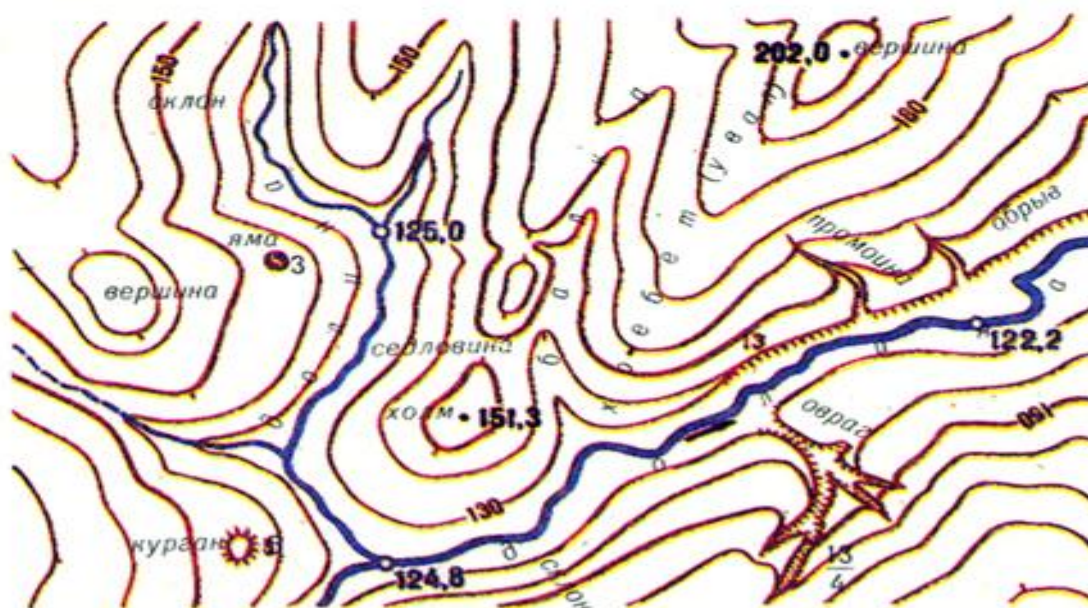
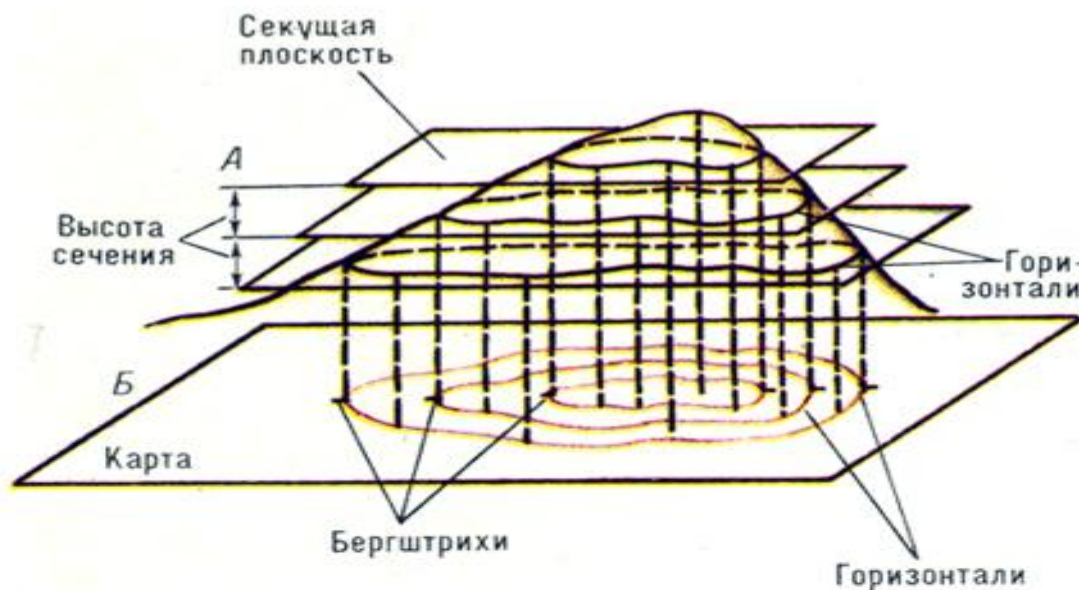


Рис. 1. Принцип получения горизонталей и проектирование их на общую плоскость карты.

Рис. 2. Изображение рельефа местности при помощи горизонталей, высотных отметок и условных знаков (сечение рельефа 10 м).

Точки сгущения вложенных горизонталей соответствуют локальным максимумам и минимумам высот. Представленное на рисунке русло реки стремится к некоему локальному минимуму, закрытому либо озером, либо мировым океаном. Используемые термины «водораздел», «речной бассейн» отражают топологические свойства рельефа, которые могут быть эффективно

использованы при решении задачи кластеризации. При двухспектральном анализе изображения, гистограмма двумерных векторов признаков образует своего рода рельеф в фазовом пространстве спектров. И если рассматривать «перевернутую» поверхность, то логично к кластерам относить «озерные бассейны» для определенного выбираемого уровня высоты поверхности «озера». Границы перевернутых кластеров проходят по «водоразделам». Выбирая разные уровни поверхности «озер» возможно получать не только различное количество кластеров, но и различные их распределения в фазовом пространстве, сохраняя при этом топологическую связность объектов одного кластера. Такой интуиционистский метод кластеризации считается феноменологически частным, непригодным для использования при многоспектральном анализе, когда размерность фазового пространства векторов признаков больше двух. Применяя принципы формирования масштабируемой модели рельефа попытаемся распространить этот метод на трехмерное фазовое пространство векторов признаков космического изображения. Для этого построим масштабируемую модель гиперрельефа в 4D-пространстве.

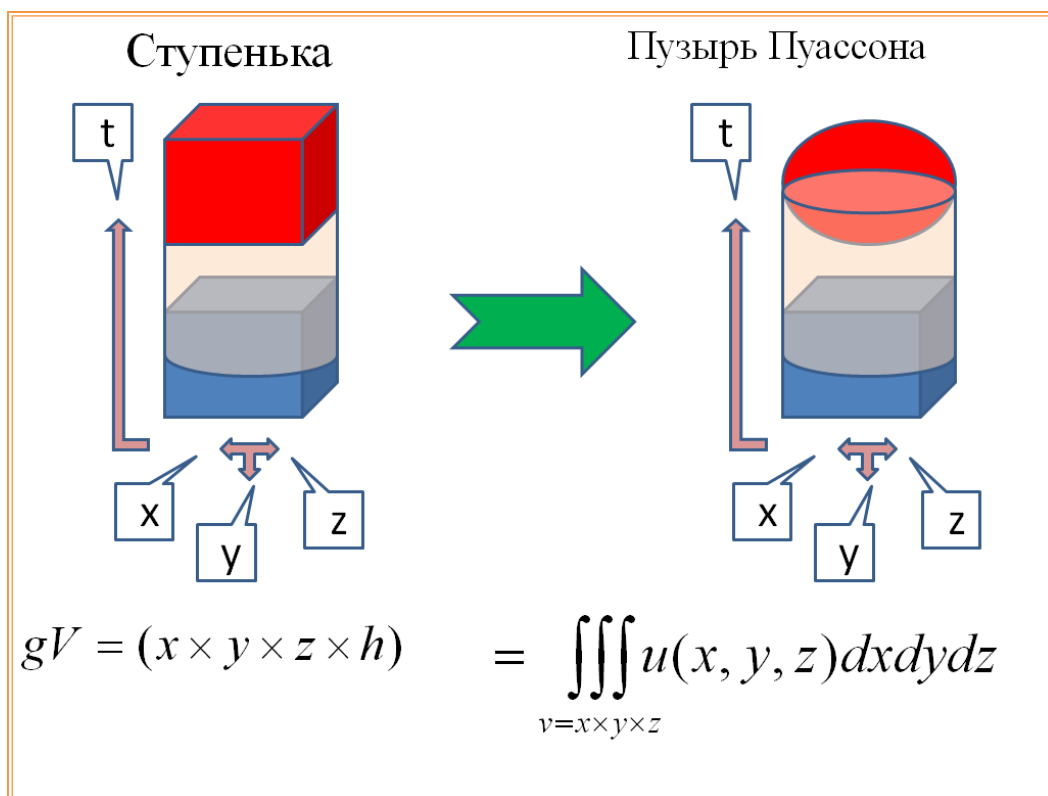


Рис. 3. Преобразование одной ступеньки

Масштабируемая модель $f(x, y, z)$ также строится на основе ступенчатой модели гиперрельефа, задаваемой высотами ступенек над трехмерными областями разбиения пространства. Когда гиперповерхность задана уравнением $N = f(x, y, z)$, то ее объем вычисляется по формуле $V = \iiint_G \sqrt{(f'_x)^2 + (f'_y)^2 + (f'_z)^2 + 1} dx dy dz$. здесь G - проекция

гиперповерхности N на пространства $\{x;y;z\}$. В качестве отыскиваемой гиперповерхности выберем решение, имеющее минимальный объем всей гиперповерхности, и удовлетворяющее граничным условиям по границе области. При этом на каждом участке разбиения должно сохраняться равенство гиперобъема над участком разбиения «*гиперобъему соответствующей ступеньки*». То есть, для каждого участка выполнено

$$(\forall i) \iiint_{G_i} f(x, y, z) dx dy dz = V_{G_i} \times h_{G_i}, \text{ где } V_{G_i} - \text{объем соответствующего участка, а } h_{G_i} -$$

усредненное значение высоты для данного участка. Также и интеграл по всей области задания, должен равняться сумме гиперобъемов конечного числа ступенек разбиения, при минимальности объема обтягивающей гиперповерхности $\iiint_{G_i} f(x, y, z) dx dy dz = \sum_i V_{G_i} \times h_{G_i}$.

Искомая функция выбирается по минимальному объему гиперповерхности из класса/семейства непрерывных функций, у которых гиперобъем (или интеграл по элементу разбиения) равен объему соответствующей ступеньки.



Рис.4. «Матрешечные» структуры

По аналогии с географическими картами построим систему горизонталей для гиперрельефа, то есть спроецируем на область задания гиперрельефа (в

нашем случае пространственный объем) пересечение гиперрельефа с плоскостью $f=\text{const}$. Система горизонталей масштабируемой модели гиперрельефа образует «матрешечные» структуры объемов. Математический анализ этих структур позволяет выделить топологические характеристики, аналогичные «руслу», «водоразделу», «водному бассейну», что открывает пути к разработке алгоритмов кластеризации для трехспектрального анализа космоизображений. Нарботка методик работы со вложенными пространственными структурами, а уже известны молекулярные структуры такого типа [6], позволяет надеяться на переход к гиперрельефам еще большей размерности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ким П.А. Дифференциальное представление масштабируемой модели рельефа. // Труды VII Международного научного конгресса <ГЕО-Сибирь-2011>, 19-29 апреля 2011, Новосибирск, Россия, т.4, <Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология>, стр.113-115
2. Ким П.А. Генерация профилей масштабируемой модели рельефа. // Труды VI Международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2010», 19-29 апреля 2010, Новосибирск, Россия, т.4, ч.1. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология», с. 107-110.
3. Ким П.А. Минимизация поверхности деформируемого тела // Международный симпозиум "Образование, наука и производство:..." (Комсомольск - на- Амуре, 26-28 октября 2010 года): В 5 т. Т.4, ГОУ ВПО "КнАГТУ", 2010. стр.261-264
4. Ким П.А. Полидуга как элемент конструирования профилей масштабируемой модели рельефа. // Труды Международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2007», 25-27 апреля 2007, Новосибирск, Россия, т.3 «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология», с.188-192.
5. Ким П.А. Порождение геометрических объектов итерационным способом. // Труды 15 Международной конференции по компьютерной графике и ее приложениям ГрафиКон'2005. 20-24 июня 2005 года Россия Новосибирск Академгородок, ИВМиМГ СО РАН стр.216-223
6. Федоров А. Бронзовая молекулярная матрешка: металл в металле. <http://www.km.ru/nauka/2012/02/17/issledovaniya/bronzovaya-molekulyarnaya-matreshka-metall-v-metalle> (дата обращения: 20.02.2012).