

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОСИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ»
(СГУГиТ)

XII Международные научный конгресс и выставка

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2016

Международная научная конференция

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

Т. 1

Сборник материалов

Новосибирск
СГУГиТ
2016

Ответственные за выпуск:

Доктор технических наук, профессор, профессор-консультант кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования СГУГиТ, Новосибирск

А. П. Гук

Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией математического моделирования процессов в атмосфере и гидросфере Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск

В. И. Кузин

Кандидат технических наук, доцент кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования СГУГиТ, директор ООО «СИБ-ГЕО-МАР», Новосибирск

А. В. Комиссаров

Кандидат технических наук, доцент,
профессор-консультант, СГУГиТ, Новосибирск

Т. А. Широкова

Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования СГУГиТ, Новосибирск

А. С. Гордиенко

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр., 18–22 апреля 2016 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. Т. 1. – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – 184 с.

ISBN 978-5-87693-909-8 (т. 1)

ISBN 978-5-87693-908-1

ISBN 978-5-87693-901-2

В сборнике опубликованы материалы XII Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016», представленные на Международной научной конференции «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология».

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 502:528.7

ISBN 978-5-87693-909-8 (т. 1)

ISBN 978-5-87693-908-1

ISBN 978-5-87693-901-2

© СГУГиТ, 2016

Научное издание

XII Международные научный конгресс и выставка

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2016

Международная научная конференция

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

Т. 1

Сборник материалов

Материалы публикуются в авторской редакции

Компьютерная верстка *Л. Н. Шиловой*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 14.04.2016. Формат 60 × 84 1/16

Печать цифровая.

Усл. печ. л. 10,70. Тираж 100 экз. Заказ

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, 108, ул. Плеханова, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, 108, ул. Плеханова, 8.

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ОПЕРАТИВНОЙ ГЕОИНФОРМАЦИИ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПОСТОВ СИБИРСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА

Михаил Павлович Шагаев

Сибирский центр ФГБУ «НИЦ "Планета"», 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Советская, 30, ведущий электроник отдела НИР; Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, магистрант кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования, тел. (913)935-26-99, e-mail: shagaev@rcpod.ru

Екатерина Николаевна Кулик

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования, тел. (383)361-08-66, e-mail: e.n.kulik@snga.ru

В статье рассмотрен пример решения по формированию базы данных геоинформации, получаемой в оперативном режиме с гидрологических постов, а также предложены методы визуализации информации. Приведены примеры графического и картографического отображения данных.

Ключевые слова: база данных, мониторинг гидрологической обстановки, гидрологический пост.

AUTOMATED DATABASE FORMATION VIA OPERATIONAL GEODATA OBTAINED ON SIBERIAN FEDERAL DISTRICT HYDROMETRIC STATIONS NET

Mikhail P. Shagaev

Siberian Center FGBU «SRC "Planeta"», 630099, Russia, Novosibirsk, Sovetskaya st., 30, Leading Electronic Engineer of R&D Department; Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, Plakhotnogo st., 10, Master student of Physical Geodesy and Remote Sensing Department, tel. (913)935-26-99, e-mail: shagaev@rcpod.ru

Ekaterina N. Kulik

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, Plakhotnogo st., 10, Ph. D., Associate Professor of Physical Geodesy and Remote Sensing Department, tel. (383)361-08-66, e-mail: e.n.kulik@snga.ru

The article describes an example of the database formation by operational hydro-post geo-information, as well as the visualization methods of such data. Graphic and cartographic data forms are presented.

Key words: database, hydrological monitoring, hydrometric station.

ВВЕДЕНИЕ

Паводки и наводнения – это стихийные бедствия, охватывающие большие территории и превосходящие по наносимому ущербу суммарный урон от других чрезвычайных ситуаций. Одной из основных причин, приводящих к

масштабным потерям от половодий в России, можно назвать отсутствие достоверных прогнозов развития затопления территорий.

Моделирование затопления территории в периоды половодий дает возможность оценить общую гидрологическую обстановку, связанную с инженерно-гидрологическими особенностями территории. Для создания достоверного гидрологического прогноза необходимо опираться на правдоподобную гидрологическую модель, а также использовать все доступные данные о состоянии паводковой обстановки, от данных дистанционного зондирования Земли до данных с гидропостов (ГП). В данной работе был создан инструмент для удобного анализа и визуализации данных, поступающих с гидропостов Сибирского федерального округа (СФО).

Цель работы состоит в разработке инструмента для оценки гидрологической ситуации по данным, поступающим с гидропостов.

1. ГИДРОПОСТЫ СФО

Система гидрологических постов – это сеть пунктов гидрологических наблюдений, предназначенная для сбора данных о состоянии водных объектов. Гидрологические посты осуществляют изучение гидрологического режима водных объектов, измерение количественных и качественных гидрологических характеристик. Все посты работают по единым программам, принятым в системе Росгидромета. Помимо российской сети гидропостов, существует глобальная сеть постов. Основным официальным гидрологическим постам мира присвоены гидрологические коды.

Данные, полученные с ГП, обрабатываются и записываются в гидрологический бюллетень. Бюллетень содержит данные об уровне и температуре воды, температуре воздуха, информацию об осадках и т.д. (рис. 1).

№ 195		14 июля 2015 г.						
Водный объект	Пункт наблюдения	Уровень воды (см) над "0" графика 8 час. утра	Измен. уровня (+, -) за сутки	Осадки (мм)	Температура С в 8 час. утра		ледовые явления в 8 часов утра	
					Воды	Воздуха		
р.обь	Фоминское	96	+5	-	-	-	-	
р.обь	У-пристань	345	-5	-	-	-	-	
р.обь	Барнаул	296	-8	-	-	-	-	
р.обь	Шелаболиха	458	-17	-	-	-	-	
р.обь	Камень/оби	544	+3	-	19.3	22	-	
вдхр	Спирино	619	+2	0.7	21.2	23	-	
вдхр	Ордынское	611	+1	2	21.8	21	-	

Рис. 1. Фрагмент гидрологического бюллетеня за 14 июля 2015 года

Несмотря на важность данных, получаемых с ГП, в последние годы объём и качество производимых гидрологических наблюдений на сети постов были неудовлетворительными. Практически во всех управлениях Гидрометеослужбы (УГМС) имелись посты, на которых наблюдения не производились или производились с отступлениями от требований и планов работ. Причины в последние два десятилетия неизменны – полностью износившийся парк стандартных приборов и оборудования, требующий постоянного ремонта, отсутствие плавательных средств и автотранспорта.

2. АРХИТЕКТУРА БАЗЫ ДАННЫХ

С помощью программы MySQL server 5.0 был создан прототип базы данных, состоящей из трёх связанных друг с другом таблиц. Таблицы содержат общие сведения о реках и постах, а также гидрологическую информацию, поступающую в актуальных бюллетенях гидропостов.

Для наполнения хранилища и, собственно, формирования архива данных был создан программный модуль, реализующий автоматическое считывание информации из оперативных гидрологических бюллетеней с автоматической записью её в соответствующие таблицы базы данных.

База данных состоит из трех таблиц, которые называются *data_table*, *Posts* и *Rivers*. Структура и форматы полей таблиц представлены на рис. 2.

Rivers		Posts		data_table	
Id	integer	Id	integer	Id	int
river_Name	varchar	river_id	integer	Post_Id	int
		post_name	varchar	Date	date
		Lat	float	Level	int
		Lon	float	delta_level	int
		istok	integer	rains	float
		ustye	integer	Wat_temp	float
		max_val	float	Air_temp	int
		Zero_Level	float	Event	varchar
		Start	date	Ice_Situtation	varchar

Рис. 2. Описание структуры таблиц

В таблице *Rivers* содержится информация о реках и водоёмах, на которых находятся гидропосты.

Таблица *Posts* содержит общую информацию о гидропостах. Ниже представлены характеристики гидропостов, разделенные на группы:

- главная информация (название, тип водного объекта);
- местоположение (координаты, положение относительно устья и истока);
- отметки (нуль поста);
- статистика (пики уровней);
- дополнительная информация (даты открытия, любая другая информация).

Таблица *data_table* содержит данные с ГП, разделенные на следующие категории:

- основная информация (уровень воды, температура воды и воздуха);
- данные об осадках;
- отметки и комментарии (данные о ледовых явлениях, события на ГП).

3. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ

Для получения информации из базы данных можно использовать как непосредственно SQL-запросы в оболочке MySQL server так и рабочий проект программного комплекса ArcGIS.

Для отображения информации в проекте ArcGIS, была реализован программный модуль на языке Python. Программа формирует SQL запросы и получает необходимую информацию из базы данных, на основании которой формируются вспомогательные сводные таблицы. Эти таблицы используются проектом ArcGIS непосредственно для графического отображения информации. В отличие от тривиального табличного представления данных, ArcGIS предлагает широкие инструментальные возможности наглядной визуализации пространственной составляющей информации, получаемой с гидропостов.

Средства моделирования и пространственного анализа помогают совмещать гидрологическую информацию с планом местности, растровыми подложками космических снимков; арсенал цифровой картографии повышает информативность картосхем с помощью подписей и условных знаков, диаграмм уровня воды и температуры.

В рабочем проекте ArcGIS представление данных реализуется двумя способами:

- с помощью диаграмм, отображающих данные об уровне и/или температуре воды на определённом пункте за выбранный период (рис. 4);
- с помощью отображения объектов разных классов на карте. Так на карту могут быть нанесены пространственные объекты: точечные (посты, города), линейные (реки), площадные (моря и озёра); а также информационные объекты (диаграммы уровней воды за определённые дни и прочее) (рис. 3).

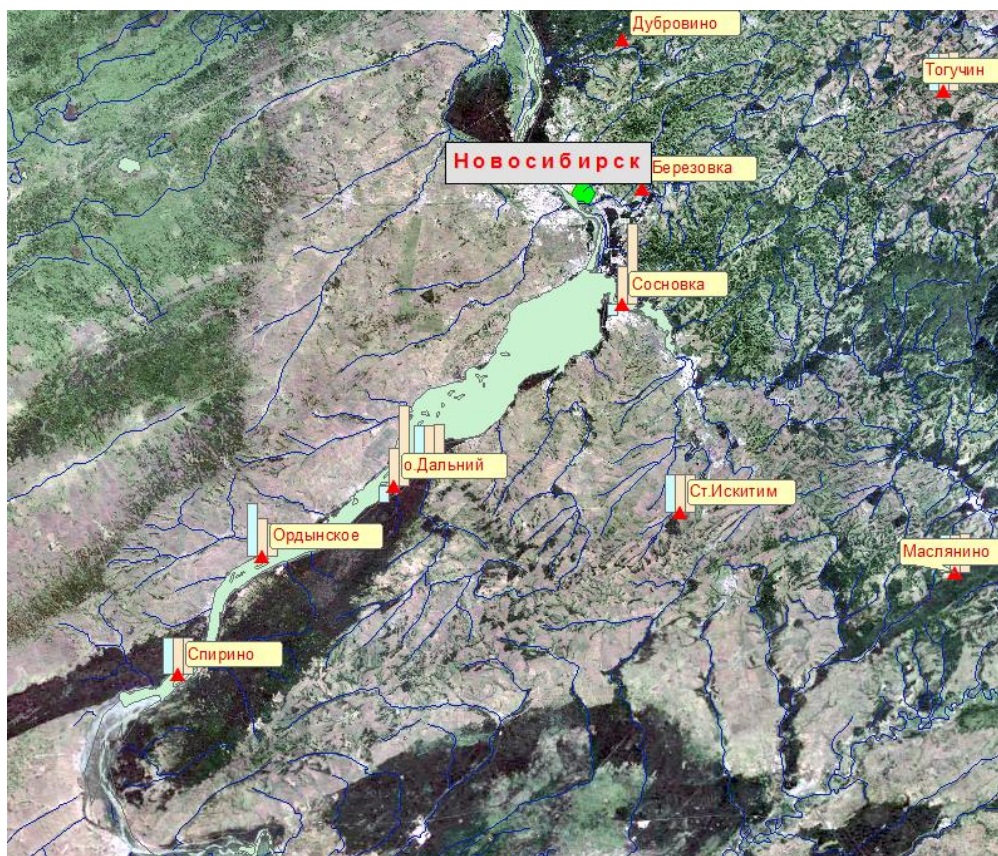


Рис. 3. Представление данных гидропостов в проекте ArcGIS.

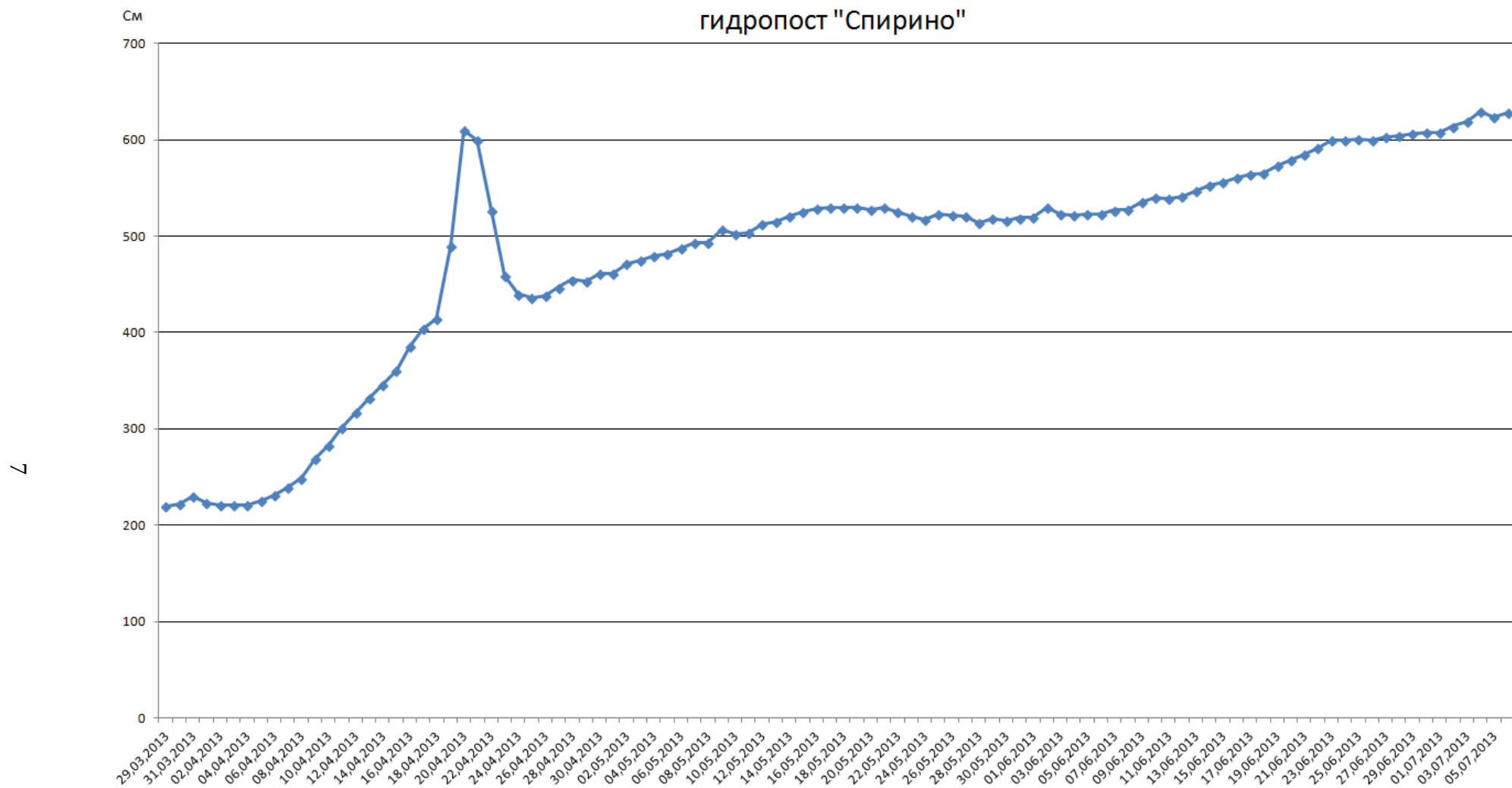


Рис. 4. Графическое представление данных ГП «Спирино» за 2013 год

Информация с гидропостов, представленная в картографическом виде поможет даже неподготовленному пользователю наглядно и достоверно оценить паводковую обстановку в регионе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для прогнозирования и мониторинга паводковой обстановки необходимо получать данные наблюдений с гидропостов в доступной для анализа форме. Реализованное приложение позволяет информативно представить сведения гидрологических бюллетеней и провести адекватную оценку паводковой обстановки в определённый период. Пополняемый архив созданной базы данных является полезным и необходимым инструментом для создания адекватной гидрологической модели местности.

Отдельно необходимо отметить, что количество гидропостов в России с каждым годом уменьшается, а приборы на работающих станциях устаревают. И если на крупных реках и водохранилищах достаточно функционирующих станций, то на средних и малых реках ощущается их недостаток. Подобная тенденция тормозит процесс создания адекватных гидрологических моделей, а также значительно усложняет оперативный мониторинг состояния рек.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шагаев М. П., Кулик Е. Н. Оценка возможностей использования данных прибора MODIS для мониторинга паводковой обстановки на примере паводка на реке Чулым весной 2014 года // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 1. – С. 53–59.
2. Обзор состояния системы гидрологических наблюдений, обработки данных и подготовки информационной продукции в 2014 году / Авторский коллектив сотрудников ФГБУ «ГГИ») – Санкт-Петербург, 2015.
3. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике / Авторский коллектив сотрудников ФГБУ «ЦАО» – Москва, 2014.

© М. П. Шагаев, Е. Н. Кулик, 2016

ОСОБЕННОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ И АНАЛИЗЕ КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Елена Павловна Хлебникова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доцент кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования, тел. (913)901-94-58, e-mail: hlenska@yandex.ru

Мария Толеухановна Абишева

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, магистрант, тел. (705)188-41-74, e-mail: fiesta270488@mail.ru

Целью статьи является анализ рационального применения существующих алгоритмов автоматизированного определения изменений инженерно-технических сооружений, степень их надежности и оптимальные требования к исходным данным при решении прикладных задач на примерах конкретных объектов в различных регионах. В качестве решения авторами показаны возможности оценки, интерпретации и использования результатов для создания и обновления тематических слоёв в ГИС разной направленности для поддержания данных в актуальном состоянии.

Ключевые слова: автоматизированное дешифрирование, данные дистанционного зондирования, многозональные разновременные космические снимки, автоматизация распознавания объектов на изображении, своевременность данных.

FEATURES DETECTION OF CHANGES ENGINEERING AND TECHNICAL INSTALLATIONS AT INTERPRETATION AND ANALYSIS OF SPACE IMAGES

Elena P. Khlebnikova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., associate professor of chair of Physical Geodesy and Remote Sensing, tel. (913)901-94-58, e-mail: hlenska@yandex.ru

Mariya T. Abisheva

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., graduate student, tel. (705)188-41-74, e-mail: fiesta270488@mail.ru

The paper is aimed at rational application analysis for available algorithms of automated determination for engineering and technical installations, their reliability degree and optimal requirements for the source data when solving application tasks through the example of exact object in various regions. As a research task authors have selected an attempt to assess results use for creating and refreshing thematic layers of different directionalities in GIS to keep the data in its actual state.

Key words: automated interpretation, remote sensing data, multi-zonal different time satellite imagery, automated recognition of objects in images, the timeliness of the data.

В последние годы при создании и обновлении картографических материалов используются результаты современной цифровой фотограмметрии. Идентификация объекта по данным дистанционного зондирования выполняется на этапе дешифрирования [1]. Выявление изменений техногенного характера используется для получения определенного объема качественной и количественной информации об интересующих объектах по данным дистанционного зондирования, которые широко используются в разной сфере деятельности: в сельском хозяйстве, геодезии, кадастре и картографии, мониторинге лесного покрова, мониторинге поверхности, системах мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций и др. [2–4].

В статье рассматриваются результаты исследований, проведенные по следующим инженерно-техническим сооружениям:

- Бугринский мост через реку Обь, соединяющий Кировский и Октябрьский районы в городе Новосибирск;
- новая ветка железной дороги, предназначенная для доставки промышленных отходов ТОО «Казцинк» (в районе площадки «Балапан» бывшего Семипалатинского Испытательного полигона РК) к месту хранения на специализированных площадках;
- первый гипермаркет торговой сети «Леруа Мерлен» в непосредственной близости от гипермаркета «Лента» в городе Кемерово, открытие которого планируется в первом полугодие 2016 года.

Исходными материалами для проведения научно-исследовательской работы послужили мультиспектральные спутниковые снимки космических аппаратов Landsat-7/ETM, Landsat-8/ETM, которые были получены с ресурса Геологической службы США (USGS), а также комплекты разновременных космических снимков, полученные с ресурса Google Earth. Данные Internet-ресурсы позволяют бесплатно выбрать из базы имеющихся снимков искомую съемочную систему и даты проведения съемки.

Анализ разновременных снимков (рис. 1–3) указанных территорий позволяет уверенно заявить, что произошли существенные изменения (очевиден факт возникновения) исследуемых инженерно-технических сооружений.



а) б)
Рис. 1. Бугринский мост: а) 2009 год; б) 2014 год



а) б)
Рис. 2. Железная дорога: а) 2014 год; б) 2015 год



а) б)
Рис. 3. «Лента» и «Леруа Мерлен»: а) 2014 год; б) 2015 год

Путем совместного отображения разновременных снимков были получены различные варианты композитных изображений и автоматическое определение изменений по яркостным параметрам разновременных снимков при помощи возможностей программного продукта ERDAS IMAGINE 2010.

В процессе классификации выполняется разбиение множества пикселей, составляющих непрерывное растровое изображение, на несколько категорий на основании их файловых спектральных значений. На примерах «Бугринский мост», «Лента» и «Леруа Мерлен» после выявления наиболее информативного разностного изображения с ним была проведена процедура неуправляемой классификации при различных параметрах (число классов – число итераций – порог сходимости). На основании тематического раstra были сделаны маски следующих типов:

- зоны строительства моста и изменение прилегающих территорий (рис. 4, а);
- зоны изменения береговой линии и места подтопления (рис. 4, б);
- зона застройки торговых комплексов (рис. 5).



а)

б)

Рис. 4. Зоны: а) строительства; б) подтопления

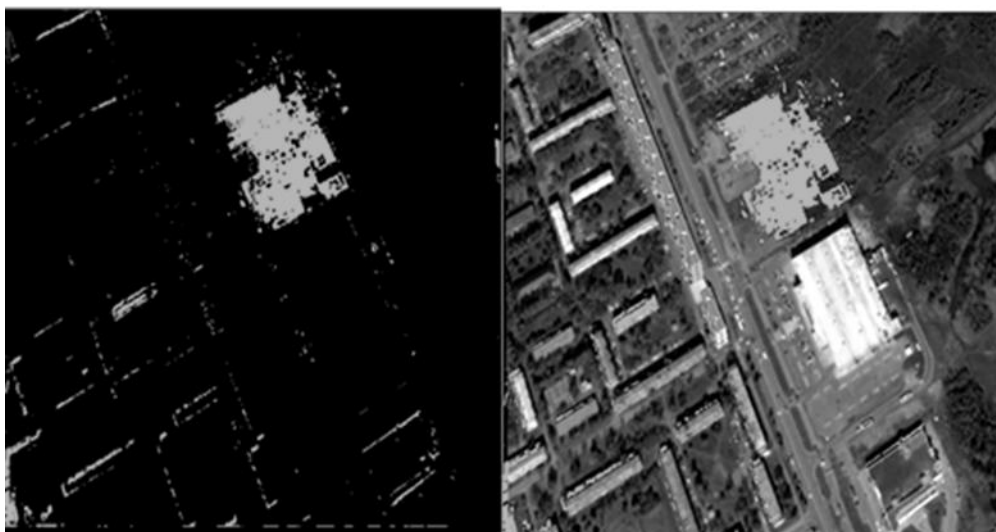


Рис. 5. Зоны застройки торговых комплексов в период с 2014 до 2015

На рис. 5 кроме зоны застройки также показаны фиктивные изменения жилых домов. Этими изменениями являются тени, отобразившиеся на разновременных снимках. Также автоматически не были показаны изменения в зоне бывшей автомойки, которая находилась на исследуемой территории до строительства гипермаркета «Леруа Мерлен», так как эти объекты имеют сходные оптические характеристики. Для распознавания таких объектов приходится привлекать, кроме яркостных и структурных признаков, другие дешифровочные признаки. В данном случае необходимо объединить визуальное и автоматизированное дешифрирование [5].

На примере «Железная дорога» показано создание набора эталонов при помощи менеджера обучающей выборки (рис. 6, а). В процессе контролируемой классификации алгоритм (метод максимального правдоподобия) программы производит сравнение спектрального образа каждого пикселя со спектральными образами эталонов и относит его к одному из заданных классов

(рис. 6, б). Типы и количество классов объектов, выделяемых при классификации, зависят от поставленной задачи. В данном случае для оценки изменений инженерно-технических сооружений достаточно выделить было три класса:

1 – изменения инженерно-технических сооружений, 2 – почвенный покров, 3 – гидрография. В результате было создано новое цифровое изображение, которое может служить основой для подготовки полноценной тематической карты.

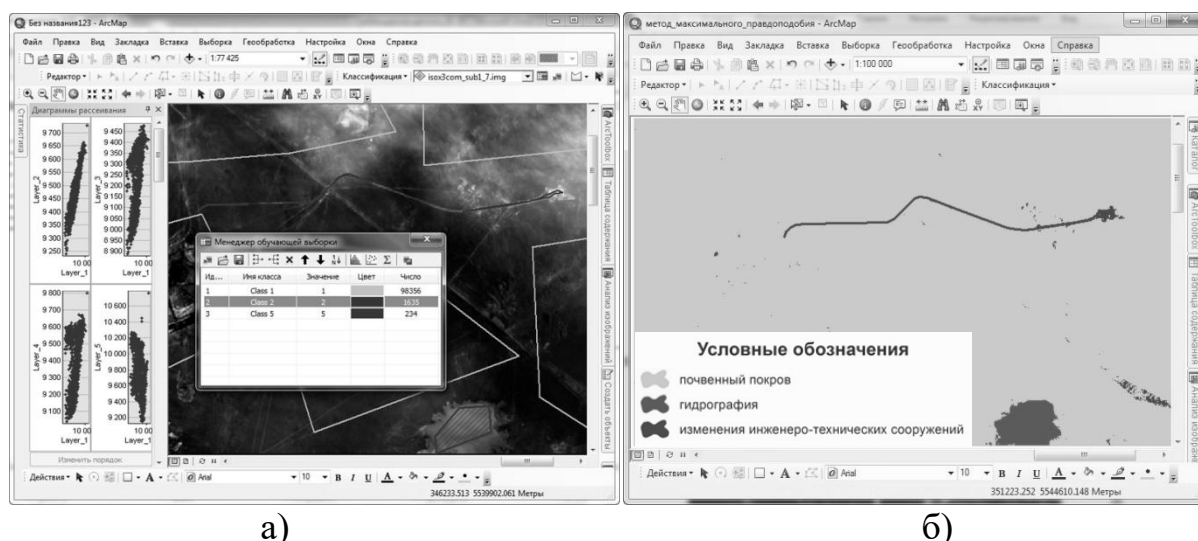


Рис. 6. Железная дорога: а) создание сигнатур; б) тематическая карта

Таким образом, проведенный анализ методов автоматизированного дешифрирования и выявления изменений показывает большие перспективы

возможностей использования космических снимков. К сожалению, во многих случаях используемые на производстве или при предоставлении услуг [6] космические снимки не отражают текущее состояние объектов (являются устаревшими), хотя современные возможности получения данных дистанционного зондирования и многофункциональные реализации алгоритмов определения изменения объектов по их изображениям [2–4, 6] могут значительно ускорить процесс обновления картографических материалов, как в контурной части, так и в атрибутивной.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абишева М. Т. Исследования возможности автоматизированного дешифрирования техногенных объектов бывшего Семипалатинского испытательного полигона по данным дистанционного зондирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bankreferatov.ru/db/M/B7C762CFA703674543257F7700601F2B?Open&From=DownloadConfirmationBackLink#preview>.
2. Дешифровочные признаки изображений объектов на многоспектральных космических снимках. Разработка методик автоматизированного дешифрирования аэрокосмических снимков / А. П. Гук, Л. Г. Евстратова, Е. П. Хлебникова, С. А. Арбузов, М. А. Алтынцев, А. С. Гордиенко, А. А. Гук, Д. П. Симонов // Геодезия и картография. – 2013. – № 7. – С. 31–40.
3. Симонов Д. П. Метрический подход к дешифрированию снимков // Геодезия и картография. – 2014. – № 10. – С. 51–56.
4. Хлебникова Е. П., Симонов Д. П. Возможности применения методов статистического анализа при дешифрировании многозональных космических снимков // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 1. – С. 59–63.
5. Визуальные методы дешифрирования / Т.В. Верещака и др. – М.: Недра, 1990. – 256 с.
6. Хлебникова Е. П., Мирошникова О. А. Обзор текущего состояния возможностей использования публичной кадастровой карты // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 3. – С. 217–222.

© Е. П. Хлебникова, М. Т. Абишева, 2016

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОПРОСТРАНСТВА ПО МАТЕРИАЛАМ АЭРОФОТОСЪЕМКИ

Татьяна Александровна Хлебникова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, Плеханового, 10, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры ИГиМД, тел. (913)474-19-70, e-mail: t.a.hlebnikova@ssga.ru

Ольга Анатольевна Оприцова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий 630108, Россия, г. Новосибирск, Плеханового, 10, руководитель Сибирского учебного научно-производственного картографического центра, тел. (913)940-08-97, e-mail: ooolg@yandex.ru

В статье представлены результаты экспериментальных работ по фотограмметрической обработке материалов аэрофотосъемки различными программными продуктами для целей моделирования геопространства.

Ключевые слова: аэрофотосъемка, беспилотный летательный аппарат, фотограмметрическая обработка снимков, модель геопространства.

PILOT STUDIES OF TECHNOLOGY OF MODELLING OF GEOSPACE FOR AERIAL PHOTOGRAPHY MATERIALS

Tatyana A. Khlebnikova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Dr., Prof., Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, tel. (913)474-19-70, e-mail: t.a.hlebnikova@ssga.ru

Olga A. Opritova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St, Head of the Siberian training research and production cartographical center, tel. (913)940-08-97, e-mail: ooolg@yandex.ru

Results of experimental works on photogrammetric processing of materials of aerial photography by various software products for modeling of geospace are presented in article.

Key words: aerial photography, unmanned aerial vehicle, photogrammetric processing of pictures, geospace model.

В настоящее время моделирование геопространства средствами современных ГИС-технологий является одним из быстро развивающихся направлений. Это обусловлено тем, что во многих областях народного хозяйства потребность в информации о местности уже не удовлетворяется использованием только топографических карт в аналоговом и цифровом видах [1,2,3,4,5].

Для моделирования геопространства источниками служат картматериалы, материалы аэрофотосъемки, космической съемки, данные полевых съемок [1,2,3,4].

В последние годы ряд организаций начинают использовать материалы фотосъемок с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Аэрофотосъемка с БПЛА обладает множеством преимуществ по сравнению с получением данных с помощью космических спутников и воздушных пилотируемых аппаратов. Основные предпосылки использования материалов БПЛА – оперативность получения фотоснимков, возможность съемки с небольших высот, а также в зонах чрезвычайных ситуаций без риска для жизни и здоровья пилотов.

Известно, что аэрофотосъемка с БПЛА имеет ряд особенностей (высота съемки, скорость полета, значительные углы наклона, использование неметрических бытовых камер и другие), которые необходимо учитывать при фотограмметрической обработке для получения продукции, соответствующей требованиям нормативно-технических документов [6].

Методика обработки данных, полученных с БПЛА с учетом их особенностей, позволит специалистам различных отраслей создавать точные модели геопространства, удовлетворяющие их потребностям.

В Сибирском государственном университете геосистем и технологий (СГУГиТ) проводятся исследования в области фотограмметрической обработки данных, полученных с БПЛА, с целью моделирования геопространства.

Для проведения таких исследований выбраны цифровая фотограмметрическая система (ЦФС) PHOTOMOD (компания Ракурс, г. Москва) [7] и программа Agisoft PhotoScan (компания Agisoft LLC, г. Санкт-Петербург) [8].

ЦФС PHOTOMOD осуществляет полный комплекс задач от сбора данных для построения сетей фототриангуляции до создания цифровых моделей рельефа и метрических трехмерных моделей [7]. С помощью данной ЦФС возможно получение пространственной информации по материалам различных съемочных систем, таких как кадровые цифровые и пленочные камеры, космические сканирующие системы, а также радары с синтезированной апертурой.

Перечень задач, решаемых с использованием этой ЦФС, обширен; их выбор зависит от потребностей конкретной производственной организации. Программное обеспечение PHOTOMOD рассчитано на операционную среду Microsoft Windows. В системе реализованы следующие основные возможности для обработки материалов дистанционного зондирования Земли:

- предварительная подготовка исходных снимков;
- внутреннее ориентирование снимков;
- взаимное ориентирование снимков;
- ввод и измерение координат опорных точек;
- внешнее ориентирование снимков;

- моновекторизация;
- стереовекторизация;
- построение ЦМР;
- создание ортофотоплана;
- создание цифровой карты местности;
- построение трехмерной модели городской застройки [7].

Следует отметить, что компания «Ракурс» 20 лет успешно работает на российском и мировом рынках геоинформатики. ЦФС PHOTOMOD является наиболее востребованной коммерческой ЦФС в России и успешно эксплуатируется в 70 странах мира [9]. По информации с сайта Компании обладает Сертификатом соответствия требованиям ГОСТ ISO 9001-2011 (ISO 9001:2008), а также имеет лицензию Федерального Космического Агентства на право осуществления космической деятельности и лицензию Федерального агентства геодезии и картографии России на осуществление геодезической и картографической деятельности [9].

Компания Agisoft LLC работает на российском рынке около 10 лет, но для создания цифровой картографической продукции (цифровые модели рельефа, трехмерные модели местности, ортофотопланы) программное обеспечение Agisoft PhotoScan используется сравнительно недавно.

Программное обеспечение Компании Agisoft LLC в большей степени ориентировано на автоматизацию процесса обработки данных, что имеет существенное значение для оперативного получения топографической информации, а также ведет к удешевлению рабочего процесса.

Программа Agisoft PhotoScan в пользовательском отношении отличается от известных ЦФС. В отзывах опытных пользователей встречаются определения этой программы – «программа нажатия одной кнопки». На самом деле это не совсем так. Безусловно, степень автоматизации высока, но для получения качественного результата, обеспечивающего точность измерений, необходимо тщательное выполнение всех требуемых настроек, а также соблюдение последовательности операций.

Для создания цифровых трехмерных моделей объектов программа Agisoft PhotoScan позволяет использовать фотоснимки, полученные любыми цифровыми фотокамерами с любых ракурсов (при условии, что каждый элемент объекта создаваемой модели виден по крайней мере с двух позиций съемки) [8].

Создание трехмерных моделей объектов в программе Agisoft PhotoScan осуществляется в четыре этапа:

- определение параметров внешнего и внутреннего ориентирования камеры;
- построение плотного облака точек;
- построение полигональной модели объекта;
- построение текстуры модели или ортофотоплана.

Результаты обработки данных каждого этапа используются в последующих этапах, а также могут быть экспортированы в обменный формат данных для использования во внешних программах.

Программное обеспечение Agisoft PhotoScan может функционировать в операционных системах Windows XP или более поздних (64 бит), Mac OS X Snow Leopard или более поздних, Debian / Ubuntu (64 бит) [8].

Использование программы Agisoft PhotoScan для обработки данных, полученных с беспилотных летательных аппаратов в СГУГиТ началось сравнительно недавно. Поэтому первые эксперименты было решено провести на материалах, которые ранее были обработаны в ЦФС PHOTOMOD.

Экспериментальные исследования выполнялись на производственных материалах одного маршрута аэрофотосъемки с характеристиками: масштабы залета – 1:6000, фокусное расстояние АФА – 99,829 мм, формат кадра 18×18 см.

Территория объекта (Новосибирская область) представляла собой практически равнинную местность (перепад высот 8м) с разноэтажной застройкой городского и сельского типов, с луговыми массивами, небольшими лесными участками.

Исследования включали следующие этапы:

- создание проекта;
- сгущение опорных данных с использованием результатов фотограмметрических измерений.

Анализ результатов сгущения опорных данных средствами ЦФС PHOTOMOD показал следующее:

- остаточные средние погрешности по расхождениям на опорных геодезических точках сети после внешнего ориентирования не превышали в плане – 0.15м, по высоте 0,09 м; на контрольных точках в плане – 0.22м, по высоте – 0,17 м;

- остаточные средние погрешности по расхождениям на связующих точках (между стереопарами) не превышали в плане – 0.30м, по высоте – 0,44 м.

Точность фотограмметрического сгущения средствами ЦФС PHOTOMOD соответствовала требованиям нормативного документа [10].

Автоматическая обработка аэрофотоснимков этого же маршрута в программе Agisoft PhotoScan выполнено в нескольких вариантах использования опорных и контрольных точек (маркеров). В результате этой обработки получено разреженное облако точек в трехмерном пространстве.

Анализ результатов расхождений координат и высот на опорных точках Agisoft PhotoScan показал следующее:

- остаточные средние погрешности по расхождениям на опорных геодезических точках сети после ориентирования не превышали в плане – 0.15, по высоте 0.12 м; максимальные погрешности на контрольных точках в плане – 0.48м, по высоте – 0,54 м.

Точность полученной цифровой модели (облака точек) по выбранным материалам аэрофотосъемки средствами Agisoft PhotoScan также соответствует требованиям нормативного документа [10].

По результатам проведенных экспериментов можно сделать вывод, что при соблюдении правильности установки начальных параметров и последовательности выполнения операций средствами Agisoft PhotoScan возможно создание измерительной трехмерной модели геопространства для целей проектирования, оценки и расчета метрических параметров объектов.

Дальнейшие исследования планируется выполнять на выбранных ЦФС по материалам БПЛА для последующего моделирования геопространства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Журкин И. Г., Хлебникова Т. А. Цифровое моделирование измерительных трехмерных видеосцен: монография. – Новосибирск: СГГА, 2012. – 246 с.
2. Хлебникова Т. А. Анализ методов создания трехмерных моделей объектов в ЦФС и ГИС // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 2. – С. 157–162.
3. Антипов И. Т., Хлебникова Т. А. О достоверности вероятностной оценки точности пространственной аналитической фототриангуляции // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск : СГГА, 2011. Т. 4. – С. 47–54.
4. Хлебникова Т. А., Кулик Е. Н. Результаты экспериментальных исследований технологии получения измерительной трехмерной видеосцены по материалам аэрокосмических съемок // Вестник СГГА. – 2010. – Вып. 1(12). – С. 74–82.
5. Антипов И. Т., Хлебникова Т. А. Исследование вероятностной оценки точности пространственной аналитической фототриангуляции // Вестник СГГА. – 2011. – Вып. 2 (15). – С. 50–57.
6. Антипов И. Т., Кобзева Е. А. Об использовании цифровых средне- и малоформатных камер для аэрофотосъемки // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск : СГГА, 2011. Т. 4. – С. 17–27.
7. PHOTOMOD – Руководство пользователя. Версия 5.3 [Электронный ресурс] – Москва: Ракурс. – 2014. – 181 с. – 1 электр. опт. диск (DVD+R).
8. Agisoft PhotoScan Professional Edition - Руководство пользователя. Версия 1.2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_ru.pdf.
9. Сайт компании «Ракурс». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.racurs.ru/>.
10. ГКИНП (ГНТА)-02-036-02. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов. - М.: ЦНИИГАиК. – 2002. – 100 с.

© Т. А. Хлебникова, О. А. Опритова, 2016

ИДЕНТИФИКАЦИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Елена Юрьевна Сахарова

Сибирский центр ФГБУ «НИЦ "Планета"», 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Советская, 30, младший научный сотрудник; Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования, тел. (383)222-33-07, e-mail: elena.saharova27@gmail.com

Любовь Александровна Сладких

Сибирский центр ФГБУ «НИЦ "Планета"», 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Советская, 30, ведущий специалист, тел. (383)222-33-07, e-mail: sla@rcpod.siberia.net

Екатерина Николаевна Кулик

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования, тел. (383)361-08-66, e-mail: e.n.kulik@snga.ru

Рассмотрены работы по автоматизированному дешифрированию сельскохозяйственных культур по многозональным космическим снимкам Landsat, выполненные на территории России и Белоруссии. Проведено сравнение методик и полученных результатов классификации с обучением по исходным и преобразованным спутниковым снимкам.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, мониторинг состояния сельскохозяйственных культур, дешифрирование снимков, классификация с обучением.

CROPS IDENTIFICATION BASED ON REMOTE SENSING DATA USAGE

Elena Yu. Sakharova

Siberian Center FGBU «SRC "Planeta"», 630099, Russia, Novosibirsk, Sovetskaya st., 30, Junior Researcher; Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo st., Post-graduate student of Physical Geodesy and Remote Sensing Department, tel. (383)222-33-07, e-mail: elena.saharova27@gmail.com

Lyubov. A. Sladkikh

Siberian Center FGBU «SRC "Planeta"», 630099, Russia, Novosibirsk, Sovetskaya st., 30, Leading Specialist, tel. (383)222-33-07, e-mail: sla@rcpod.siberia.net

Ekaterina N. Kulik

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo st., Ph. D., Associate Professor of Physical Geodesy and Remote Sensing Department, tel. (913)926-82-57, e-mail: e.n.kulik@snga.ru

Russian and Belarusian studies of automated crops interpretation on multi-zone Landsat images are considered. Comparison of supervised classification methods and results on the raw or enhanced satellite imagery is given.

Key words: remote sensing, crops status monitoring, image interpretation, supervised classification.

В вопросах обеспечения сельскохозяйственной отрасли актуальной информацией, особое место занимают спутниковые данные и продукты, получаемые на их основе. В настоящее время на базе данных дистанционного зондирования Земли возможно получать всестороннюю оперативную информацию, которая позволяет решить целый ряд задач: оценить состояние и интенсивность использования сельскохозяйственных земель, продуктивность возделываемых культур, состояние посевов, влияние внешних факторов на формирование

и развитие сельскохозяйственных культур и т.д. [1–4] Знание о расположении отдельных культур на исследуемых полях в значительной степени облегчает выполнение поставленных выше задач. В связи с этим актуальность внедрения методов идентификации сельскохозяйственных культур по данным спутниковой съёмки становится очевидной.

Важнейшей частью системы земледелия, обеспечивающей эффективное ведение сельского хозяйства, является система севооборота. Проводимые при этом мероприятия позволяют поддерживать плодородие и обеспечивают восстановление почв, улучшают агрофизические свойства почвы, отвечают за профилактику болезней, защиту от вредителей, повышение урожайности выращиваемых культур и т.д. [5] В согласии с этим, структура посевных площадей подвержена ежегодной динамике: меняются как возделываемые культуры, так и площади полей, отведённые под них.

В сельскохозяйственных организациях хранятся архивы с информацией о размещении на полях культур, возделываемых в тот или иной период. Однако в большинстве случаев эта информация имеет статус внутреннего пользования и не всегда есть возможность получить к ней доступ. Такое состояние дел объективно подтверждает актуальность разработки методик независимой и оперативной идентификации возделываемых культур на территории сельскохозяйственных угодий.

Существует ряд работ посвященных вопросам автоматизированного распознавания видовой структуры посевов сельскохозяйственных культур на основе использования мультиспектральных космических снимков. В некоторых случаях, для этих целей используется способ классификации с обучением (правило максимального правдоподобия) по материалам спутниковой съёмки с космического аппарата (КА) Landsat [6, 7]. В данных исследованиях проведено сравнение результатов классификации отдельных культур по исходному снимку и по данным, полученным на основе спектральных преобразований исходных материалов: метод главных компонент, преобразование Tasseled Cap, различные индексные изображения. Для повышения качества тематической обработки применяют маску для дешифрирования, которая представляет собой векторный слой полей.

В первой работе [6] были изучены характеристики пяти сельскохозяйственных культур, наиболее типичных для исследуемой

территории: ячмень яровой, пшеница озимая, подсолнечник, многолетние травы и кукуруза. Помимо исходного снимка для дешифрирования дополнительно были подготовлены порядка 13 преобразованных изображений: различные индексные изображения на основе обработки разных спектральных каналов исходного снимка, преобразование Tasseled Cap и главных компонент. Первая часть экспериментальных работ была направлена на изучение спектральных отражательных свойств каждой культуры, для чего были проведены наземные полевые обследования. Количество эталонов для классификации выбрано исходя из оценки реального состояния культур. В ходе полевых исследований было выявлено, что одни и те же культуры имеют различные стадии развития и разное проективное покрытие, что подтверждается дифференциацией отражательной способности. Согласно с этими наблюдениями, было принято решение о создании эталонов не для каждой отдельной культуры, а для категорий их состояния. Вторая часть экспериментальных работ сводилась к созданию эталонов для каждой категории культур, выполнению классификации и оценке точности полученных результатов. Суммарная доля достоверно идентифицированных полей по анализируемым изображениям варьируется в пределах от 36% до 57%, а максимальная достоверность идентификации отдельных культур достигает от 87% до 100%. При этом автором отмечено, что разные культуры на одном и том же изображении имеют разную степень достоверности распознавания. По результатам данных экспериментов было выявлено, что наибольшая точность классификации наблюдалась при использовании преобразованного изображения (метод главных компонент, метод Tasseled Cap).

Во второй работе [7] для дешифрирования были выбраны следующие культуры: рожь озимая, пшеница озимая, пшеница яровая, тритикале озимая, рапс озимый, ячмень, овес, гречиха, кукуруза, многолетние травы и зернобобовые. По имеющейся информации о размещении сельскохозяйственных культур для каждой из них были созданы спектральные эталоны, после чего выполнялась классификация исходных снимков (временной ряд снимков на безоблачные даты) и преобразованных изображений. Точность классификации оценивалась величиной процентов правильно распознанной культуры на исследуемых полях, а также оценивалась суммарная точность классификации культур по каждому снимку. Наибольшая суммарная точность дешифрирования культур (более 93%) была отмечена при классификации исходного снимка, а также спектрально преобразованных изображений по методу Tasseled Cap и главных компонент. При этом классификация индексного изображения, на основе использования нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI, показала достаточно невысокую достоверность распознавания (в зависимости от даты съёмки значения варьируются от 35% до 65%). Следует отметить, что для повышения достоверности идентификации культур важен не только выбор метода спектральных преобразований снимков, но и выбор сезона съёмки. Максимальные различия отражательной способности культур наблюдались в

период

с конца мая по первую половину июня, что подтвердилось большей достоверностью дешифрирования изображений за этот период по сравнению с более поздними датами.

Представленные работы показали хорошие результаты достоверности распознавания культур по снимкам с КА Landsat. Повышение точности классификации было достигнуто за счет применения векторного слоя полей в качестве маски для дешифрирования. Выполнение такой классификации требует глубокого анализа спектральных отражательных свойств различных культур; при проведении аналогичных экспериментов для получения схожей достоверности распознавания культур необходимым условием является наличие схемы расположения культур на полях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кулик Е. Н. Оперативный космический мониторинг: вчера, сегодня, завтра // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 2. – С. 134–139.
2. Автоматизированное дешифрирование аэрокосмических снимков. Выявление изменений состояния территорий и объектов по многозональным космическим снимкам, полученным на разные даты / А. П. Гук, Л. Г. Евстратова, Е. П. Хлебникова, А. М. Алтынцев, С. А. Арбузов, А. С. Гордиенко, А. А. Гук // Геодезия и картография. – 2013. – № 8. – С. 39–47.
3. Сахарова Е. Ю., Сладких Л. А., Кулик Е. Н. Спутниковый мониторинг состояния посевов зерновых культур с использованием индекса вегетации // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 1. – С. 47–52.
4. Сахарова Е. Ю., Сладких Л. А., Кулик Е. Н. Спутниковый мониторинг состояния посевов зерновых культур юга Западной Сибири // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы II Междунар. науч. конференции / науч. ред. Е. А. Ваганов; отв. ред. М. В. Носков. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2015. – С. 330–334.
5. Словари и энциклопедии на Академике [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/130988/Севооборот>
6. Терехин Э. А. Информативность спектральных вегетационных индексов для дешифрирования сельскохозяйственной растительности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т. 9. – № 4. – С. 243–248.
7. Казяк Е. В., Лещенко А. В. Спектральные преобразования космических снимков Landsat 8 для картографирования растительности агроэкосистем // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 1. – С. 79–83.

© Е. Ю. Сахарова, Л. А. Сладких, Е. Н. Кулик, 2016

СПЕКТРАЛЬНАЯ ОТРАЖАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА СУЗУНСКОГО БОРА

Юрий Сергеевич Отмахов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Центральный сибирский ботанический сад» СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Золотодолинская, 101, кандидат биологических наук, младший научный сотрудник лаборатории геосистемных исследований,
тел. (383)339-97-63, e-mail: otmachov@mail.ru

В работе приводятся данные об отражательной способности растительных объектов. Выявлена важная роль в ближнем ИК диапазоне состав растительных сообществ: больше пропускается излучения в сосновых лесах, а большее отражение наблюдается в мелколиственных лесах. При увеличении водной поверхности болотных массивов снижается их отражательная способность. Проведённые исследования показывают возможности обнаружения объектов растительного и антропогенного происхождения по данным ДЗЗ среднего пространственного разрешения.

Ключевые слова: растительность, дистанционное зондирование, спектральная сигнатура, отражательная способность.

THE SPECTRAL REFLECTANCE OF VEGETATION OF THE SUZUN FOREST

Yury S. Otmakhov

Central siberian botanical garden Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, Zolotodolinskaya 101, Ph. D., researcher of the geosystem laboratory, tel. (383)339-97-63, e-mail: otmachov@mail.ru

The paper presents data about the spectral reflectance of plant communities. An important role in the near-infrared range has the types of vegetation, and the other half is reflectance. Found that when the increased water surface wetlands, then reduced their reflectivity. The studies show the possibility of detection of objects of flora and the anthropogenic origin of remote sensing data of medium spatial resolution.

Key words: vegetation, remote sensing, spectral signature, reflectance.

Спектральные характеристики объектов земной поверхности – необходимый элемент геоинформационной системы, предназначенный для решения задач дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Как правило, включают набор атрибутов, описывающих объекты с таким уровнем информативности и детализации, который позволяет отличить один объект от другого по его спектральным свойствам (Чандра, Кош, 2008).

В настоящее время в библиотеках спектральных характеристик (USGS spectral library, JPL spectral library, ASTER spectral library и др.) хранится информация о спектральной отражательной способности минералов, горных пород, грунтов, жидкостей, летучих соединений, замороженных летучих соединений, растительности, искусственных материалов и др. в разных диапазонах. Прообразом современных спектральных библиотек по праву

можно считать «Атлас спектральных кривых отражения природных образований» и «Каталог спектральных коэффициентов яркости природных образований» Е.Л. Кринова. В его работе «Спектральная отражательная способность природных образований» (Кринов, 1947) содержатся данные по отражательной способности лесных насаждений, кустарников, травяного покрова, мхов, почв, и т.п. в разных районах.

Изучение отражательной способности растительного покрова проводилось на территории Сузунского бора (Новосибирская область, Алтайский край). Для выявления спектральных характеристик объектов использованы данные ДЗЗ с космического аппарата Канопус-В (дата 04 августа 2015г., время 05:46 по Гринвичу). Спектральные диапазоны съёмки (каналы): 1. синий-0.46-0.51 мкм; 2. зеленый-0.51-0.60 мкм; 3. красный-0.63-0.69 мкм; 4. ближний ИК-0.75-0.84 мкм. При изучении спектральных характеристик использованы средние значения и стандартные отклонения спектральных сигнатур пикселей в пределах выбранных полигонов растрового изображения (данных ДЗЗ).

Лесные сообщества (1-5). Кривая спектра имеет схожие черты (рис.): чёткий крутой максимальный подъём в ближней ИК-области спектра, второй максимум приходится на синем участке спектра и минимум – в красном канале. Спектры берёзово-осиновых (4) и лиственнично-берёзовых лесов (5) имеют абсолютное сходство. У сосновых лесов (1) и берёзово-сосновых лесов (2) имеется различие в ближней ИК части. Отдельно, чуть выше этих спектров расположен спектр берёзовых лесов (3), здесь важную роль играет структура листвы.

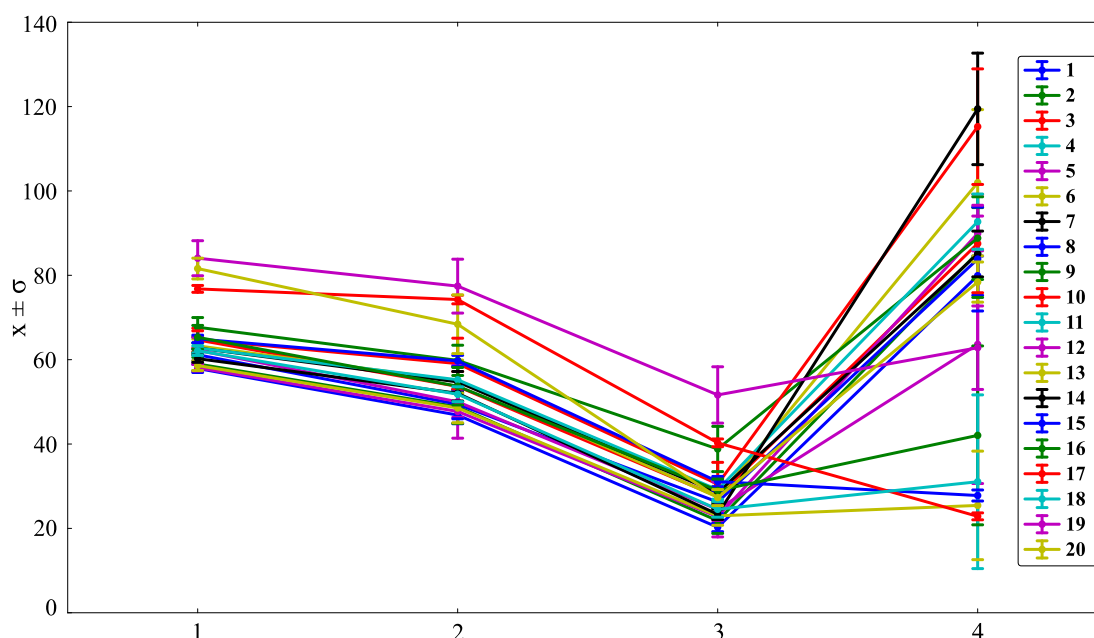


Рис. Кривые спектральной отражательной способности объектов Сузунского бора.

По оси x – спектральные каналы, по оси y – средняя отражательная способность, «усы» - стандартное отклонение. 1. Сосновые леса; 2. Берёзово-сосновые леса; 3. Берёзовые леса; 4. Берёзово-осиновые леса; 5. Лиственнично-берёзовые леса; 6. Семенихинская согра;

7. Шипицинская согра; 8. Болото Ключное; 9. Болото Пиявочное; 10. Болото Зимнее; 11. Болото Макариха; 12. Озеро Галкино; 13. Озеро Песчаное; 14. Озеро Фёдорово; 15. Озеро Телеутское; 16. Озеро Барсуково; 17. Река Обь; 18. Река Чумыш; 19. Железная дорога; 20. Грунтовая дорога

Согры (6-7). По характеру спектра наблюдается схожесть с группой лесных сообществ. Это объясняется тем, что согры представлены заболоченными берёзовыми лесами. В Семинихинской согре (6) отмечен гораздо больший подъём в ближнем ИК диапазоне, по сравнению с Шипицинской согрой. В этом диапазоне заметен эффект, связанный с окнами поглощения воды.

Болота (8-11). Ключное (8), Пиявочное (9), и Зимнее (10) болота имеют схожие спектры, т.к. они имеют схожее покрытие растительности. Спектры имеют плавный спад от синего до красного канала и подъём на ближней ИК области спектра. Кривая спектра болота Макариха (11) располагается гораздо ниже предыдущих и равномерно поднимается в направлении ближнего ИК участка спектра.

Озёра (12-16). Спектры озёр Песчаное (13) Телеутское (15) плавно снижаются от синего к ближнему ИК частям и только у озёр Галкино (12) и Фёдорово (14) наблюдается плавный подъём в ближней ИК области.

Реки (17-18). Кривая имеет сильное падение в видимой и очень пологое понижение в ближней ИК-области спектра, соответствует чистой воде реки Чумыш (18). Кривая расположена существенно выше предыдущей кривой и имеет резкое падение в ближней ИК-части спектра соответствует мутной воде реки Обь (17).

Дороги (19-20). Спектр имеет более крутой подъём на синем и ближнем ИК спектре, соответствует грунтовым дорогам (20). Спектр железной дороги расположен чуть выше и имеет плавный спад к ИК части спектра.

В заключении можно отметить, что спектральные характеристики изученных объектов имеют различия отражательной способности в видимом и ближнем ИК диапазонах. Важную роль в ближнем ИК диапазоне играет состав растительных сообществ, так больше пропускается излучения в сосновых лесах,

а большее отражение наблюдается в мелколиственных лесах. Увеличение водной поверхности в болотных массивах ведет к снижению ее отражательной способности во всем спектральном диапазоне отраженного излучения. Наибольшей отражательной способностью обладает мутная водная поверхность рек. Пик отражения озёр с большим покрытием растительности, приходится на зеленую часть спектра.

Проведённые исследования показывают возможности распознавания объектов растительного и антропогенного происхождения по данным ДЗЗ среднего пространственного разрешения. Рассмотренные спектральные характеристики объектов могут быть применены к информации, получаемой с космического аппарата Канопус-В.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-05-0908 А.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кринов Е. Л. Спектральная отражательная способность природных образований. – М.-Л. АН СССР, 1947. – 273 с.
2. Чандра А. М., Гош С. К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / Пер. с англ. А.В. Кирюшина. – Москва: Техносфера, 2008. – 312 с.

© Ю. С. Отмахов, 2016

УДК 519.652

ПРЯМАЯ ЗАДАЧА ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЭМИССИОННОЙ ТОМОГРАФИИ И ОДИН ЧАСТНЫЙ СЛУЧАЙ ЕЕ ОБРАЩЕНИЯ

Иван Гаврилович Казанцев

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории обработки изображений, тел. (383)330-73-32, e-mail: kig@ooi.sccc.ru

В работе показано, что прямая задача в многоспектральной эмиссионной томографии может быть упрощена в предположении постоянного коэффициента ослабления среды. В этом случае она сводится к послойному лучевому преобразованию, к которому применима известная формула обращения.

Ключевые слова: многоспектральные изображения, томография.

A FORWARD PROBLEM OF MULTISPECTRAL IMAGES FORMATION IN EMISSION TOMOGRAPHY AND PARTIAL CASE OF ITS INVERSION

Ivan G. Kazantsev

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 pr. Akademika. Lavrentjeva, Ph. D., Senior scientific researcher of Image Processing Laboratory, tel. (383)330-73-32, e-mail: kig@ooi.sccc.ru

In this work it is shown that a forward problem of formation of multispectral images in emission tomography can be simplified provided the media has a constant linear attenuation coefficient. In this case the problem is reduced to the slice by slice X-ray transform and the known inversion formula can be applied.

Key words: Multispectral images, tomography.

В работе рассматривается задача восстановления изображений по проекциям, регистрируемым детекторами высокого спектрального разрешения. Идеализированная интегральная модель позитронной эмиссионной томографии (ПЭТ) на не рассеянных (первичных) фотонах хорошо известна. Для известного распределения активности изотопа $f(x, y, z)$ с носителем $D(f)$ внутри среды с линейным коэффициентом ослабления $\mu(x, y, z)$ и носителем $D(\mu)$ и детекторов A

$$p(A, B) = \exp\left[-\int_A^B \mu(x', y', z') dl'\right] \int_A^B f(x, y, z) dl$$

и В малых размеров на поверхности просвечиваемого тела, модель формирования данных имеет вид:

(1)

Здесь dl, dl' – элементы длины на линии АВ. Задача состоит в реконструкции f при известной среде μ по данным $p(A,B)$, регистрируемым большим множеством пар детекторов (A,B). Данные детекторов (1), после коррекции на ослабление, интерпретируются как интегралы от f по отрезкам АВ распространения первичных фотонов с энергией $E=511$ кэВ и задача (1) сводится к классической томографии. На рис. 1 (слева) изображена модель эмиссионной томографии на паре прямых фотонов (u,v), разлетающихся из точки аннигиляции С в результате столкновения позитрона, испускаемого изотопом активности f , с одним из свободных электронов среды μ .

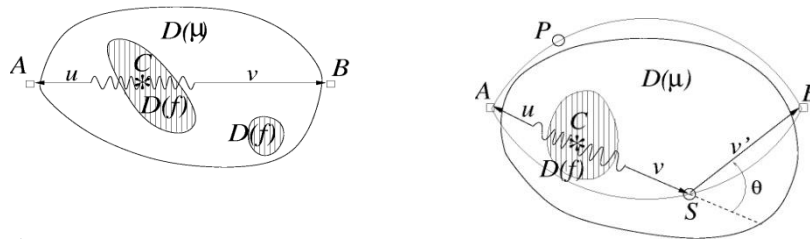


Рис. 1. Модели позитронной эмиссионной томографии:

Слева: геометрическая модель на первичных фотонах (u,v); справа: модель комптоновского рассеяния фотона v в точке S под углом θ .

Однако в детекторы попадают и фотоны с меньшими энергиями $E' < E$, претерпевшие комптоновское рассеяние (рис. 1 справа), т.е. некогерентное отклонение на угол θ . Угол рассеяния θ может быть вычислен из соотношения:

$$E' = \frac{511(keV)}{2 - \cos \theta} \quad (2)$$

С улучшением спектрального разрешения детекторов появляется возможность настраивания ПЭТ-сканеров на регистрацию фотонов, рассеянных под определенным углом θ , с последующим использованием информации в этих данных в дополнение к первичным фотонам. В работе [1] с соавторами получена (и исследована в сравнении с проекциями, генерированными статистически методом Монте-Карло) формула вычисления потока фотонов, рассеянных с углом θ , регистрируемых детектором В при условии, что в А попали первичные фотоны:

$$\xi_{\theta}(A,B) = \int_0^{\theta} d\varphi \cos \varphi \cos(\theta - \varphi) \int_0^{2\pi} d\psi \frac{\mu(\psi, \varphi, |AS|)}{\sigma_C} \frac{\partial \sigma_C}{\partial \Omega} \cdot e^{-\left(\int_A^S \mu dl + \int_S^B \mu' dl\right)} \cdot \int_0^{|AS|} f(\psi, \varphi, r) dr \quad (3)$$

Здесь S – точка, где происходит комптоновское рассеяние, $d\sigma_c / d\Omega$ – дифференциальное поперечное сечение рассеяния. Знак штриха означает значение величины после рассеяния. Сферические координаты (ψ, φ, r) обозначены на Рис. 2 слева.

В статье рассматривается сведение интегрального преобразования (3) к более простой модели, известной как преобразование Радона (лучевое) с послойной сверткой. Ядро свертки зависит от положения – координаты Z слоя среды, подвергающегося свертке (рис. 2 справа). Нами доказано ранее [2], что при наличии полных данных, это преобразование имеет обратное, которое можно применять в виде конструктивного алгоритма реконструкции. Рассмотрим преобразование Радона с послойной сверткой подробнее.

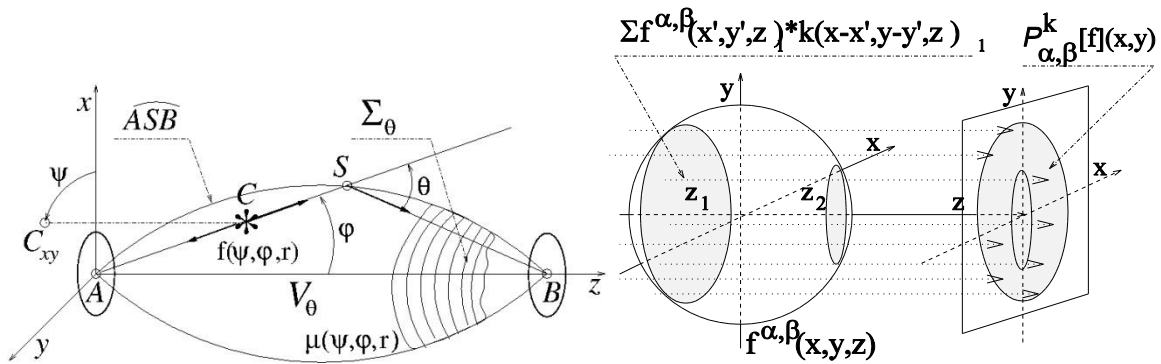


Рис. 2. Иллюстрации математических обозначений:

Слева: Геометрическая модель комптоновского рассеяния, лежащая в основе уравнения (3). Справа: Сечения объекта $f^{\alpha\beta}$ – версии f , повернутой с полярными параметрами α и β , с координатами Z_1 и Z_2 . Все сечения подвергаются свертке и суммируются параллельно оси Z .

На рис. 2 (справа) иллюстрируется определение лучевого преобразования Радона с послойной сверткой в общем виде:

$$p_{\alpha, \beta}^{\theta}(s_1, s_2) = \iiint f^{(\alpha, \beta)}(s_1', s_2', z) h_{\theta}(s_1 - s_1', s_2 - s_2', z) ds_1' ds_2' dz \quad (4)$$

Здесь $f^{(\alpha, \beta)}$ – повернутая версия f с углами поворота α и β . Можно показать, что в случае $\mu(E, S) = \text{const}$ в рассматриваемой нами прямой задаче спектральной ПЭТ уравнение (3) может быть преобразовано к виду (4), где ядро свертки принимает вид:

$$h_{\theta}(\rho, z) = \frac{\mu}{4\pi |AB|} \frac{z(z \cos \theta + \rho \sin \theta)}{\rho^2 (z^2 + \rho^2)^{3/2}} e^{-\frac{|AB|\mu}{\sqrt{z^2 + \rho^2}}(z + \rho \tan(\theta/2))} \quad (5)$$

Ядро является радиально-симметричным и зависит от z – координаты слоя, подвергающегося свертке. Удобно представить уравнение (4) в частотной области:

$$P_{\alpha, \beta}^{\theta}(k_1, k_2) = \int F^{(\alpha, \beta)}(k_1, k_2, z) H_{\theta}(k_1, k_2, z) dz$$

(6)

Алгоритм послойного обратного проецирования с фильтром обращения, также зависящим от Z , состоит из шагов:

Шаг 1. Фильтрация проекции $P_{\alpha,\beta}^{\theta}(k_1, k_2, z)$ с помощью регуляризации обратного фильтра H_{θ}^{-1} в частотной области для каждого слоя с позицией Z :

$$b_{\alpha,\beta}^{\theta}(x, y, z) = F^{-1}\left\{P_{\alpha,\beta}^{\theta}(k_1, k_2, z) \frac{H_{\theta}(k_1, k_2, z)}{(H_{\theta}^2(k_1, k_2, z) + \lambda |k|^2)}\right\} \quad (7)$$

Шаг 2. Вычисление интегрального изображения $M_{\alpha,\beta}^{\theta}(x, y, z)$ в виде суммирования обратных проекций $b_{\alpha,\beta}^{\theta}$ по всем направлениям $(\alpha; \beta) \in S^2$

$$c^{\theta}(x, y, z) = \iint_{S^2} b_{\alpha,\beta}^{\theta}(x, y, z) d\alpha d\beta \quad (8)$$

Шаг 3. Интегральное изображение подвергается фильтрации типичным для томографии фильтром $|k|$ в частотной области

$$F(k_1, k_2, k_3) \} \cong C^{\theta}(k_1, k_2, k_3) \times |k| \quad (9)$$

Нижеследующая теорема [2] утверждает, что реконструкция по полному набору спектральных проекций не зависит от угла рассеяния θ .

Теорема: Интегральные изображения (в области преобразования Фурье) асимптотически тождественны на высоких частотах k , и тождественны интегральному изображению $C^{(\theta=0)}(k)$, $C^{\theta}(k)$ полученному по не рассеянным проекционным данным.

Для проверки полученных формул проведены вычислительные эксперименты – с полным углом обзора и с неполными данными и по углу и по пространству. Для экспериментов с полным углом обзора выбран фантом размером 256^3 . Он состоит из 7 больших и 11 малых сфер (рис. 3 слева), служащих носителем функции активности $f=1$, помещенных в воду с постоянным коэффициентом ослабления $\mu=0.096\text{см}^{-1}$.

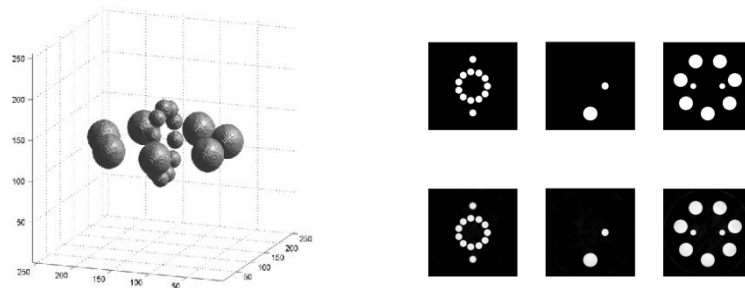


Рис. 3. Вычислительный эксперимент с полными данными:

Слева: Цифровой фантом размером 256^3 . Справа: три сечения фантома (верхний ряд); те же сечения реконструкции по 1000 проекциям.

Сгенерированы 1000 проекций в случайно выбранных направлениях по формуле (3) для угла сканирования $\theta=30^\circ$. Восстановление произведено по алгоритму (7)-(9) с параметром регуляризации $\lambda = 0.01$. На рис. 3 справа – три сечения фантома, верхний ряд – тестовый объект, нижний – реконструкция.

Вычисления по неполным данным иллюстрируются на рис. 4. Рассматривается система из двух линейных панелей с детекторами А и В. Каждая линейка содержит 72 детектора, настроенные на регистрацию фотонов обладающих энергией соответствующей углу рассеяния $\theta = 30^\circ$. Данные сгенерированы по формуле (3), ослабление постоянно $\mu=0.096\text{см}^{-1}$. Применение алгоритма обратного проецирования с послойной регуляризующей фильтрацией дает реконструкции с множеством артефактов вследствие существенной неполноты данных.

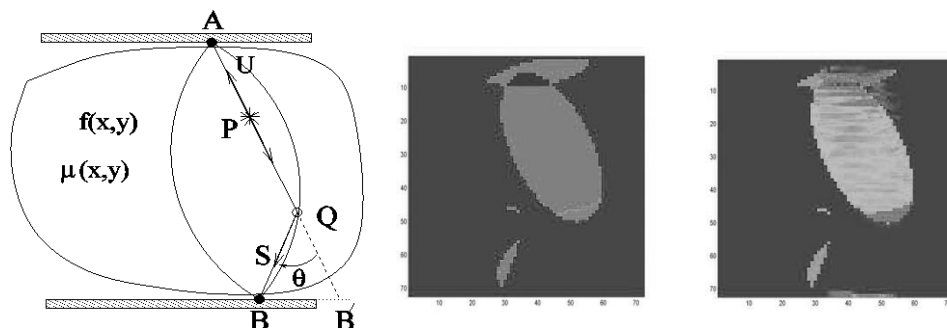


Рис. 4. Вычислительный эксперимент с неполными данными:

Слева: двумерная геометрия ПЭТ сканера с двумя линейками детекторов А и В. Центр: тестовое изображение 72×72 с областями различных значений активности f ; Справа: результат реконструкции по 50 итерациям алгебраического метода ART-TV с 20 итерациями метода полной вариации.

Поэтому применен хорошо адаптируемый к различным геометриям просвечивания и теоретически точный алгебраический итерационный метод ART-TV [3] с параметром релаксации 0.03, в котором на каждой итерации осуществляется минимизация полной вариации градиента реконструируемого изображения. Эксперименты позволяют сделать вывод, что многоспектральная информация, содержащаяся в данных рассеяния, может быть успешно использована наравне с традиционным монохроматическим излучением.

Работа частично поддержана грантом РФФИ 16-07-00066.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Казанцев И. Г., Яровенко И. П., Прохоров И. В. Моделирование процесса измерения комптоновского рассеяния в позитронной эмиссионной томографии // Вычислительные технологии. – 2011. – Т. 16, № 6. – С. 27–37.

2. Kazantsev I. G., Klukowska J., Herman G. T., Cernetic L. Fully three-dimensional defocus-gradient backprojection in cryoelectron microscopy // *Ultramicroscopy*. – 2010. – V. 100. – P. 1128–1142.

3. Sidky E.Y., Pan X. Image reconstruction in circular cone-beam computed tomography by constrained, total-variation minimization // *Physics in Medicine and Biology*. – 2008. – V. 53. – P. 4777–4807.

© И. Г. Казанцев, 2016

УДК 528.88

МОНИТОРИНГ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Светлана Алексеевна Жилыева

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, магистрант кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования, тел. (913)482-42-44, e-mail: zhilyaeva.sveta@inbox.ru

Екатерина Николаевна Кулик

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования, тел. (383)361-08-66, e-mail: e.n.kulik@ssga.ru

Рассмотрены вопросы мониторинга вулканической активности по данным дистанционного зондирования. Проанализированы возможности решения задач мониторинга по данным космических многозональных снимков Landsat на примере вулкана Плоский Толбачик.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, мониторинг вулканической активности, определение температуры поверхности.

VOLCANIC ACTIVITY MONITORING BASED ON REMOTE SENSING DATA

Svetlana A. Zhilyaeva

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo st., Master student of Physical Geodesy and Remote Sensing Department, tel. (913)482-42-44, e-mail: zhilyaeva.sveta@inbox.ru

Ekaterina N. Kulik

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo st., Ph. D., Associate Professor of Physical Geodesy and Remote Sensing Department, tel. (383)361-08-66, e-mail: e.n.kulik@ssga.ru

Volcanic activity's monitoring items by remote sensing data are considered. Multispectral Landsat images' usability for monitoring tasks on example of the Ploskiy Tolbachik volcano is analyzed.

Key words: remote sensing, volcanic activity monitoring, surface temperature determination.

Данные дистанционного зондирования позволяют упростить решения множества задач, касающихся мониторинга поверхности земного шара. Спутниковые съемки в различных диапазонах спектра ведутся ежедневно, что позволяет вести непрерывные наблюдения за самыми разнообразными явлениями и объектами земной поверхности.

Информация, получаемая методами дистанционного зондирования, имеет особую специфику и огромный ряд преимуществ. Для мониторинга вулканической активности самым значимым преимуществом использования данных дистанционного зондирования является безопасность проводимого исследования. Районы вулканической активности, как правило, располагаются в местах, до которых сложно добраться, и, где проблематично осуществлять безопасное наблюдение.

В данной работе представлено исследование информационных возможностей открытых материалов дистанционного зондирования для проведения мониторинга вулканической активности на примере извержения вулкана Плоский Толбачик, которое началось 27 ноября 2012 года и продолжается до сих пор.

В рамках исследования решались следующие задачи мониторинга вулкана Плоский Толбачик:

- определение температуры поверхности склонов вулкана и прилегающей территории по спутниковым снимкам;
- оценка динамики лавового поля.

Доступ к данным спутниковых съемок осуществлялся с помощью Интернет-геопортала Earth Explorer Геологической службы США [4]. Было получено 5 спутниковых снимков на следующие даты: 21 июля 2009 г., 3 августа 2011 г., 2 сентября 2013 г., 17 июля 2014 г., 28 сентября 2014 г.

Снимки на 21 июля 2009 г. и 3 августа 2011 г. (до извержения) были получены съемочной системой Thematic Mapper (TM), установленной на борту спутника Landsat 5. Снимки на 2 сентября 2013 г., 17 июля 2014 г. и 28 сентября 2014 г. (после начала извержения) получены съемочными системами OLI (Operational Land Imager) и TIRS (Thermal InfraRed Sensor), установленными на борту Landsat 8.

Все исследования и обработка геоданных проводились в программном продукте ERDAS Imagine.

Предварительная обработка снимков включала в себя:

- импорт изображений из формата GeoTiff в формат IMG;
- формирование многоканального изображения из одноканальных;
- выбор области интереса.

Для определения температурных характеристик поверхности необходимо исключить влияния снега, посредством создания маски снега. При создании данной маски использовался нормализованный дифференциальный индекс снега NDSI. NDSI – это относительная величина, характеризующаяся различием отражательной способности снега в красном и коротковолновом инфракрасном диапазонах [3]:

$$NDSI = \frac{b_{0.55} - b_{1.64}}{b_{0.55} + b_{1.64}}, \quad (1)$$

где $b_{0.55}$ – спектральный канал, регистрирующий длину волны равную 0,55 мкм;
 $b_{1.64}$ – спектральный канал, регистрирующий длину волны равную 1,64 мкм.

Для съемочной системы ТМ спектральным каналом, регистрирующим длину волны равную 0,55 мкм, является 2-ой спектральный канал, а канал, регистрирующий длину волны равную 1,64 мкм – 5-ый спектральный канал. Для OLI, TIRS – 3-ий спектральный канал и 6-ой спектральный канал соответственно.

Для создания маски снега необходимо установить пороговое значение – если для пикселя снимка рассчитанные значения будут выше заданного порога, то этот пиксель будет классифицироваться как снег. В данной работе был выбран порог равный 0,15.

Конвертация данных, полученных со спутника Landsat 5, в значения температур земной поверхности осуществлялась в два этапа [1]:

- а) расчет реальных значений приходящего излучения на сенсор;
- б) пересчет значений излучения на сенсоре в значения температуры.

Расчет реальных значений приходящего излучения на сенсор L_λ рассчитывается по формуле:

$$L_\lambda = \frac{(L_{max\lambda} - L_{min\lambda}) * (Q_{cal} - Q_{cal_{min}}) + L_{min\lambda}}{Q_{cal_{max}} - Q_{cal_{min}}}, \quad (2)$$

где L_{min} – количество приходящего излучения, которое после масштабирования становится Q_{min} ;

L_{max} – количество приходящего излучения, которое после масштабирования становится Q_{max} ;

$Q_{cal_{min}}$ – минимальное калиброванное значение (0 или 1);

$Q_{cal_{max}}$ – максимальное калиброванное значение (255);

Q_{cal} – значение в спектральном канале 6 (DN).

Параметры, которые используются в формуле, как правило, распространяются с самими данными Landsat. Если в поставке данных файла с параметрами не было, то их можно найти на официальной странице Landsat). [5] Приборы ТМ во время эксплуатации периодически перенастраивались, поэтому, определенному периоду времени соответствует свой набор параметров.

Пересчет значений излучения на сенсоре в значения температуры осуществлялся по формуле:

$$T = \frac{K_2}{2.302585093 * \log_{10}(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1)} - 273,15 (^{\circ}\text{C}), \quad (3)$$

где K_1 – калибровочная константа 1;

K_2 – калибровочная константа 2;

L_λ – излучение на сенсоре, полученное по формуле 2.

Калибровочная константа 1 равна 607,76. Калибровочная константа 2 равна 1260,56 [2].

Снимки Landsat 8 состоят из 11-ти спектральных диапазонов, где 10-ый и 11-ый каналы – дальние инфракрасные, что позволяет анализировать по ним энергию самой земной поверхности, а не отражение солнечного излучения. Параметры, которые используются для пересчета данных в значения температур, также распространяются совместно со снимками. Можно делать вычисления на основе и 10-го, и 11-го спектрального канала. Коэффициенты каждого канала для пересчета используются разные.

Как и в случае с данными ТМ, конвертация данных Landsat 8 выполняется также в 2 этапа.

Расчет реальных значений приходящего излучения на сенсор выполняется по формуле:

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L, \quad (4)$$

где M_L – фактор мультипликативного перемасштабирования;

Q_{cal} – используемый спектральный канал;

A_L – добавка масштабирующего фактора.

Пересчет значений излучения на сенсоре в значения температуры выполняется по формуле 3. Для 10-го спектрального канала: $K_1=774,89$; $K_2=1321,08$. Для 11-го спектрального канала: $K_1=480,89$; $K_2=1201,14$ [1].

На рис. 1, 2 и 3 представлена температура поверхности с использованием псевдоцветов для разных дат.

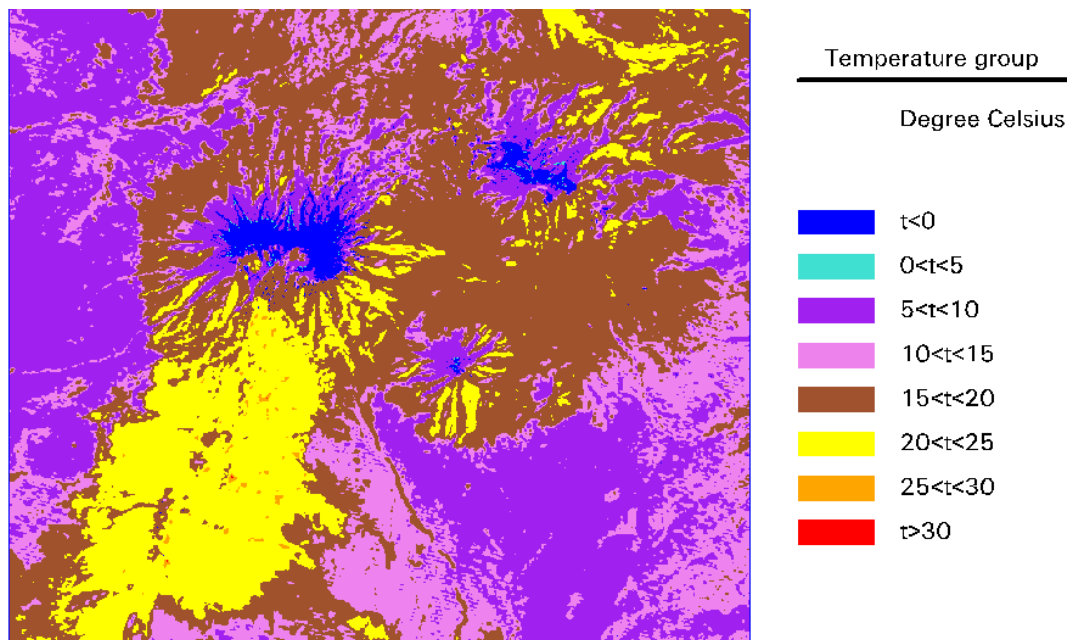


Рис. 1. Температура поверхности, 3 августа 2011 года

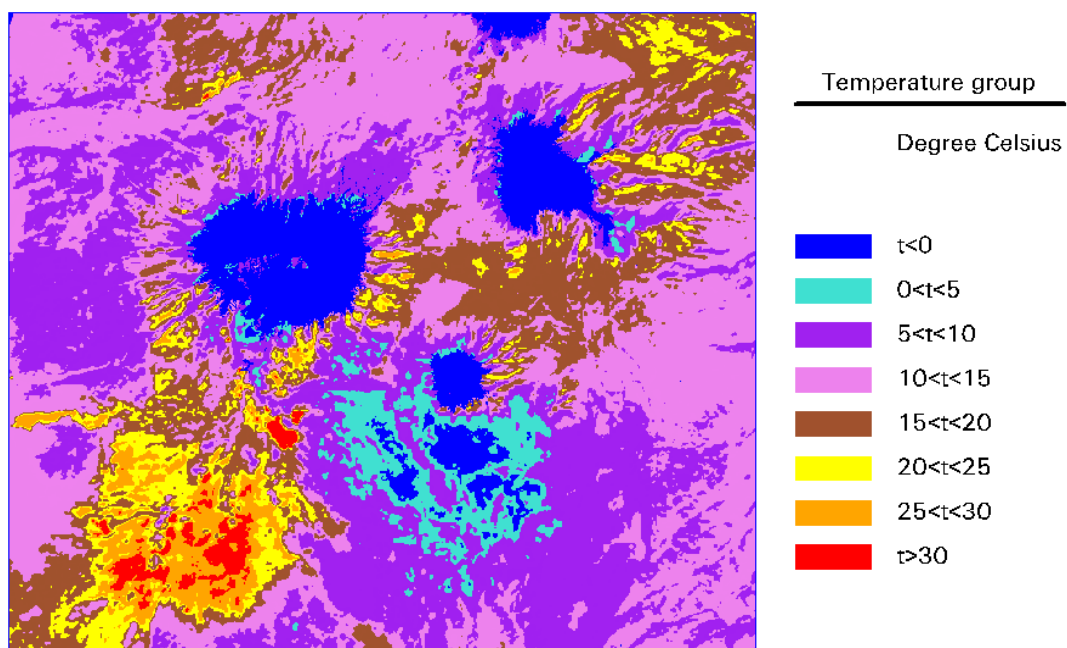


Рис. 2. Температура поверхности, 2 сентября 2013 года
(после начала извержения)

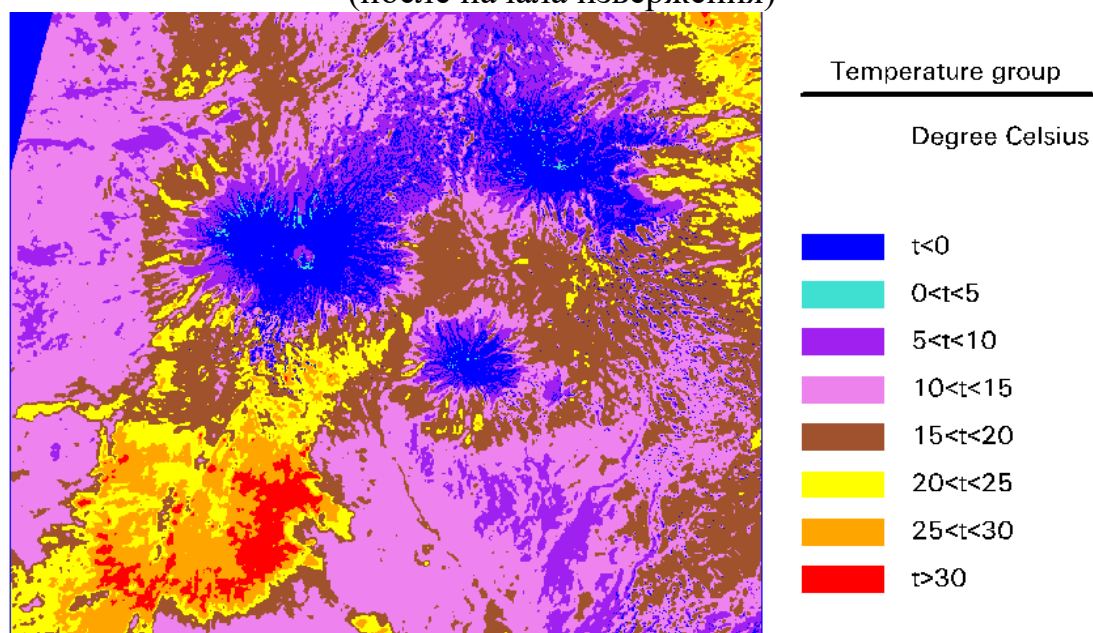


Рис. 3. Температура поверхности, 17 июля 2014 года
(после начала извержения)

Анализируя псевдоцветные изображения можно сделать вывод о том, что наибольшая температура поверхности наблюдается в сентябре 2013 года и в июне 2014 года.

Для выявления динамики лавового поля, необходимо сравнить между собой снимки с наибольшей и наименьшей площадью лавового поля. На рис. 4 представлена иллюстрация динамики лавового поля.

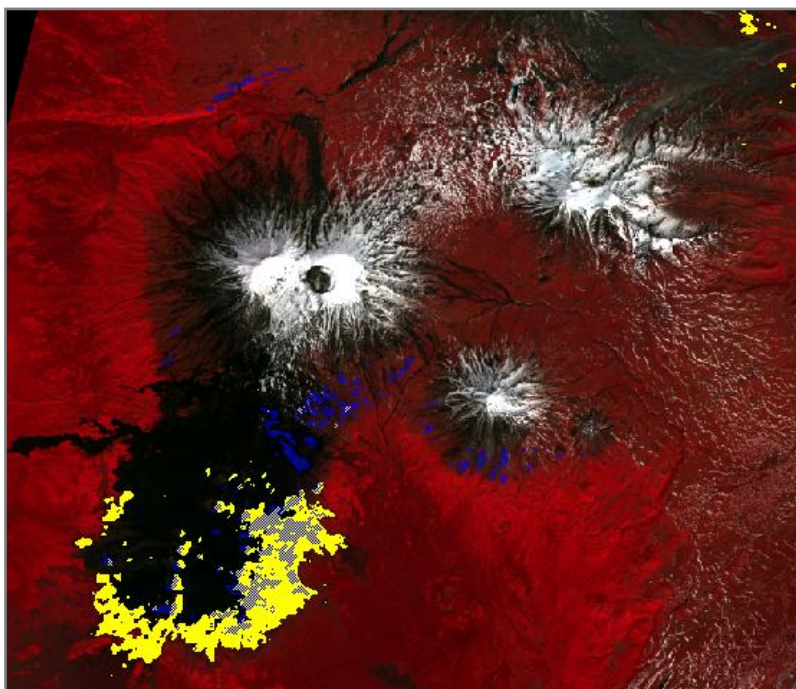


Рис. 4. Динамика площади лавового поля;

желтый цвет – 17 июля 2014 года; синий цвет – 28 сентября 2014 года

По визуальной оценке рис. 4 можно сделать вывод о том, что температура лавового поля значительно снизилась.

Результаты проведенного исследования подтверждают эффективность использования материалов дистанционного зондирования для ряда задач мониторинга вулканической активности. Но стоит заметить, что для детального мониторинга необходимо иметь более широкий набор данных, чем тот, что имеется в открытом доступе в сети Интернет. Комплексирование различных типов данных и их совместная интерпретация позволят решить более значимый ряд задач мониторинга вулканической активности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Esri CIS [Электронный ресурс]: Космический термометр / Константин Нагорнук. – Электрон. текст. данные, граф. данные и табл. – 2014. – Режим доступа: http://www.esri-cis.ru/blogs/?page=post&blog=arcgis&post_id=179, свободный.
2. GIS-Lab [Электронный ресурс]: Конвертация данных Landsat TM/ETM+ в значения температуры – Теория / Авторский коллектив GIS-Lab; координатор GIS-Lab Максим Дубинин. – Электрон. текст. данные, граф. данные и табл. – 2005. – Режим доступа: <http://gis-lab.info/qa/dn2temperature.html>, свободный.
3. MapExpert [Электронный ресурс]: Обработка данных ДЗЗ – Этапы обработки данных. – Электрон. текст. данные, граф. данные и табл. – 2005. – Режим доступа: http://mapexpert.com.ua/index_ru.php?id=26&table=Menuhtml, свободный.
4. USGS [Электронный ресурс]: U.S. Geological Survey – EarthExplorer / U.S. Department of the Interior. – Электрон. текст. данные, граф. данные и табл. – 2015. – Режим доступа: <http://earthexplorer.usgs.gov>, свободный.
5. USGS [Электронный ресурс]: U.S. Geological Survey – Landsat Missions / U.S. Department of the Interior. – Электрон. текст. данные, граф. данные и табл. – 2015. – Режим доступа <http://landsat.usgs.gov>, свободный.

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ И ВЫБОР МЕТОДОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ЗЕРНОХРАНИЛИЩА

Кайрат Темирбаевич Кошек

Северо-Казахстанский государственный университет имени М. Козыбаева, 150000, Республика Казахстан, г. Петропавловск, ул. Пушкина, 86, доктор технических наук, профессор кафедры энергетики и радиоэлектроники, тел. (7152)49-34-67, e-mail: kkoshekov@mail.ru

Наталья Владимировна Астапенко

Северо-Казахстанский государственный университет имени М. Козыбаева, 150000, Республика Казахстан, г. Петропавловск, ул. Пушкина, 86, докторант специальности 6D075100 «Информатика, вычислительная техника и управление», тел. (705)652-96-52, e-mail: astankin@mail.ru

В процессе автоматизации работы зернохранилища возникает задача вычисления объема зерна, для обеспечения его контроля и сохранности. Данная статья рассматривает существующие методы получения исходных данных, и причины по которым получение цифровой модели силоса с помощью рассмотренных методов является затруднительным. Предлагается алгоритм расчет объема зерна на основе карты глубин, полученных после сканирования поверхности. Особенность алгоритма заключается в его независимости от упорядоченности исходных данных.

Ключевые слова: облако точек, цифровая модель, цифровая модель высот, триангуляционная модель, алгоритмы, фотограмметрия.

CLASSIFICATION AND SELECTION OF METHODS OF RECOGNITION OF THE AUTOMATED INFORMATION MONITORING SYSTEM OF GRANARY

Kairat T. Koshekov

North Kazakhstan state University named after M. Kozybayev 150000, Republika Kazakhstan, Petropavlovsk, Pushkin, St., 86, doctor of technical Sciences, Professor of the Department of energy and radio electronics, tel. (7152)49-34-67, e-mail: kkoshekov@mail.ru

Natalia V. Astapenko

North Kazakhstan state University named after M. Kozybayev, 150000, Republika Kazakhstan, Petropavlovsk, Pushkin, St., 86, doctoral specialty 6D075100 «Informatics, computer facilities and management», tel. (705)652-96-52, e-mail: astankin@mail.ru

When the process of automation of the granary there is the problem of calculating the volume of the grain for control and safety. This article describes the existing methods of obtaining baseline data, and why they are not suitable for obtaining a digital model of the surface of grains. Here the algorithm of calculation of grain volume, based on the depth map obtained after the scanning surface. The peculiarity of the algorithm lies in its independence from the ordering of raw data.

Key words: point cloud, digital model, digital elevation model, triangulated irregular network, algorithms, photogrammetry.

Во главе современных тенденций развития информационных систем стоят задачи по автоматизации управления и контроля технологических процессов. Решение подобных задач позволяет снизить влияние так называемого человеческого фактора и, соответственно, повысить качество продукции и увеличить оптимизацию в хранении сырья. В области сельского хозяйства также ведутся работы по автоматизации технологических процессов, и в частности процессов управления зернохранилищами. Использование автоматики позволяет минимизировать количество обслуживающего персонала, снизить требования, предъявляемые к опыту персонала и его квалификации, в тоже время обеспечить качественную сохранность зерна при общем снижении затрат на эксплуатацию зернохранилища. В лаборатории Северо-Казахстанского государственного университета имени М.Козыбаева разрабатывается автоматизированная информационная система для мониторинга, контроля и управления работы зернохранилища. В данной статье рассматривается процесс разработки подсистемы мониторинга объема зерна в силосе.

Разрабатывая систему мониторинга наполненности зернохранилища, необходимо учитывать некоторые особенности работы с сыпучими продуктами, такие как наличие сложной формы поверхности продукта: наличие горки, воронки, кусковые слипнувшиеся комки. В результате использования метода мы должны получить трехмерную модель объекта на компьютере.

На первых этапах исследования предполагалось построить модель и провести необходимые расчеты с помощью фотограмметрии, но в результате проведенных опытов пришлось отказаться от нее по ряду причин. Для решения задачи рассматривались методы фотограмметрии, представленные в таблице. В таблице дается краткое описание метода и указываются причины, по которым метод был отклонен для построения цифровой модели поверхности силоса.

Все фотометрические подходы, так или иначе, используют свойства проективного преобразования, выполняемого камерой. Как было замечено, многие из приведенных выше способов будут неэффективны, если распознаваемый объект не имеет четкой формы и выраженных границ или сегментов. Условия задачи исключают возможность использования подобных методов.

В процессе исключения потенциально возможных для решения поставленной задачи методов фотограмметрии, было принято решение о моделировании поверхности заполняемого зернохранилища посредством уровнемеров или лазерных сканеров. Лазерные сканеры – замечательное решение для распознавания поверхности в зернохранилище, однако крайне высокая цена подобных готовых решений не подходит для сельскохозяйственных организаций. Наиболее подходящим методом для моделирования поверхности образованной в зернохранилище можно считать метод использования уровнемеров, но в этом случае необходимо рассчитать минимально эффективное количество точек замеров, для моделирования трехмерной поверхности.

Таблица

Краткое описание метода	Причина невозможности использования для получения цифровой модели зернохранилища
1. Использование данных о фокусировке для оценки расстояний	
Для каждой точки на одном изображении выполняется поиск парной ей точки на другом изображении. Затем по паре соответствующих точек выполняется триангуляция и определяются координаты их прообраза в трехмерном пространстве. Глубина вычисляется, как расстояние до плоскости камеры.	Поверхность зерна на фотоизображении представлена текстурно и поэтому велика вероятность искажения информации при определении парной точки, поэтому данный метод не подходит для решения представленной задачи.
2. Фотометрический метод	
Для распознавания объекта используется множество его изображений под разными углами и при разном освещении. Этот способ распознавания довольно точен и, несмотря на большое количество изображений, работает быстро.	Данный метод также не подходит для решения поставленной задачи, так как зернохранилище представляет собой замкнутое помещение. Расположение камер возможно под углами от 0 до 90 градусов, а позиция объекта (поверхность зерна) динамично изменяется.
3. Оценка формы по освещенности	
Данный метод близок к фотометрическому стерео, основан на том, зрение человека устроено так, что он склонен считать плавно затененные поверхности удаляющимися от направления взгляда. С помощью формулы отражения по закону Ламберта можно связать интенсивность элемента поверхности и направление нормали к поверхности в этом месте.	Недостатком данного метода является возможность использования только в лабораторных условиях, а так же необходимость использования сложной процедуры предварительной калибровки.
4. Метод структурированного света	
Метод структурированного света идейно близок к реконструкции по стереопаре, но вместо двух камер используется одна камера и один проектор. Поверхности объектов освещаются через шаблон в виде сетки. Камера при формировании изображений передает результат искажения сетки за счет формы и ориентации поверхности.	Недостаток данного метода – зависимость точности от расстояния, а так же невозможность работы в условиях сильной внешней засветки или плохо отражающих свет поверхностей.
5. Использование теней для оценки формы объектов	
Этот метод позволяет получать информацию о форме поверхности по тени на изображениях, полученных с различных ракурсов или при различных условиях освещения. Основная проблема здесь кроется в отделении границ объектов от фона	В нашей задаче можно определить только контур всей поверхности по стенкам зернохранилища, но в этом случае для моделирования центральной части необходимо сделать слишком грубые допущения.

изображения – то есть определении к чему принадлежат точки изображения – к границе объекта или к фону.	
--	--

Окончание табл.

Краткое описание метода	Причина невозможности использования для получения цифровой модели зернохранилища
6. Использование поляризации для оценки формы объектов	
Используя состояние поляризации света, отраженного от поверхности, а не его интенсивность при определенных обстоятельствах позволяет более точного определения ориентации поверхности.	Обычные системы получения изображений могут быть использованы только для записи интенсивности света, отраженного от объекта наблюдения. Таким образом, при использовании данного метода для распознавания поверхность зерна, будет выглядеть однородной, даже если она имеют какую-то внутреннюю структуру.

В целом, процесс реконструкции трехмерной модели можно разделить на три основных этапа:

- сбор трехмерных (дальнометрических) данных;
- построение поверхности;
- оптимизация.

На этапе сбора данных требуется получить данные о дальности для некоторого набора различных фрагментов, которые в совокупности содержат всю поверхность объекта. Далее происходит регистрация или совмещение карт глубин каждого фрагмента. В зависимости от метода сбора, исходные данные представляются либо в виде модели TIN, либо в виде модели DEN.

Модель TIN (Triangulated Irregular Network), или модель па триангуляционной нерегулярной сетке, или свободная модель. Построение цифровой модели рельефа с использованием модели данных TIN сводится к созданию оптимальной сети треугольников, элементы которой стремятся быть как можно ближе к равносторонним. При этом любая точка двумерного пространства обладает только одной высотной координатой.

Модель DEM (Digital Elevation Model) более популярна и удобна для практического использования, так как представлена на регулярной сетке со сторонами, параллельными координатным осям X и Y системы местности.

Эксперименты докажут какая модель позволяет получить более точные значения и является более предпочтительной. В настоящее время мы определили общий алгоритм вычисления объема зерна в силосе вне зависимости от того, будут ли исходные данные представлены регулярно или в виде облака точек. Алгоритм представлен на рис.

Исходные данные хранятся в текстовых файлах в виде значений точек в трехмерной системе координат. В том случае, когда исходное облако точек является нерегулярным осуществляется их упорядочивание в соответствии

с заданной координатной сеткой с помощью существующих методов триангуляции. В поставленной задаче точность расчетов играет немаловажную роль, поэтому решено вычислять объем поверхности самым ресурсозатратным способом, путем суммирования объемов косоусеченных призм. Для уменьшения погрешности вычисления используем методы интерполяции в случае разреженности облака исходных точек.



Рис. Общий алгоритм расчета объема зерна

В данной статье рассмотрен процесс решения задачи по получению цифровой модели поверхности силоса. Автоматизация данной задачи позволит осуществлять непрерывное наблюдение за процессом работы автоматизированного зернохранилища и осуществлять контроль объема зерна, таким образом можно будет обеспечивать сохранность зерна от хищения и неправильного хранения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Заборов В.В., Меженин А.В., Тозик В.Т., Использование прототипов в задачах распознавания трехмерных объектов // XVI Всероссийская научно-методическая конференция «Телематика 2009»: сб. материалов в 2 т. (Санкт-Петербург, 22-25 июня 2009 г.) – Санкт-Петербург: СПб государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2009. Т. 2. – С.358-359.
2. Базовая картографическая модель местности. Руководство по созданию. – Минск, 2002. – 85 с.

3. Научно-образовательный курс «Задача сопоставления локальных точек в 3D реконструкции» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mm-dsp.com/files/>.

4. Sansoni G., Trebeschi M., Docchio F., State-of-The-Art and Applications of 3D Imaging Sensors in Industry, Cultural Heritage, Medicine, and Criminal Investigation // Sensors 2009, 9, C.568-601. [Electronic resource] – Англ. – Режим доступа: www.mdpi.com/journal/sensors

© К. Т. Кошеков, Н. В. Астапенко, 2016

КЛАСТЕРЫ С ОБЪЕМНЫМИ ПРОТОТИПАМИ В РАСПОЗНАВАНИИ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Алексей Александрович Бучнев

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, старший научный сотрудник лаборатории обработки изображений, тел. (383)333-73-32, e-mail: baa@ooi.sccc.ru

Валерий Павлович Пяткин

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, зав. лабораторией обработки изображений, тел. (383)333-73-32, e-mail: pvp@ooi.sccc.ru

Рассматривается технология нечеткой кластеризации данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) расширенными алгоритмами С-средних и Густафсона – Кесселя. Расширения алгоритмов состоят в использовании объемных прототипов и меры сходства кластеров.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, нечеткая кластеризация, объемные прототипы, степень сходства кластеров.

CLUSTERS WITH VOLUME PROTOTYPES IN RECOGNITION OF SATELLITE DATA

Aleksey A. Buchnev

Institute of the Computational mathematics and mathematical geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, acad. Lavrent'ev av., 6, lab of the images processing senior researcher, tel. (383)333-73-32, e-mail: baa@ooi.sccc.ru

Valeriy P. Pyatkin

Institute of the Computational mathematics and mathematical geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, acad. Lavrent'ev av., 6, lab of the images processing head, tel. (383)333-73-32, e-mail: pvp@ooi.sccc.ru

The fuzzy clustering technology of the Earth remote sensing data, based on extended C-means and Gustafson-Kessel algorithms, is discussed. The algorithms extensions consists of using clusters volume prototypes and measure of clusters similarity.

Key words: remote sensing, fuzzy clustering, volume prototypes, measure of clusters similarity.

Одним из основных вопросов тематической обработки (интерпретации) данных ДЗЗ является вопрос повышения качества распознавания. Возникающие трудности обусловлены, в частности, “загрязнением” выборок смешанными векторами признаков, т.е. векторами, которые образуются при попадании в элемент разрешения съемочной системы нескольких природных объектов [1, 2]. Большинство алгоритмов классификации для отнесения векторов признаков классам вычисляют для каждого вектора значения подходящей функции

«правдоподобия». В случае зачисления вектора признаков в класс по максимальному значению функции правдоподобия получается так называемая жесткая кластеризация (например, так работает классический алгоритм К-средних).

Альтернативным подходом является нечеткая кластеризация, которая позволяет каждому вектору признаков принадлежать одновременно всем кластерам с определенной степенью членства (принадлежности) в каждом кластере. Одним из первых алгоритмов нечеткой кластеризации является, вероятно, алгоритм С-средних [3]. Вопросы реализации и использования этого алгоритма

в обработке данных ДЗЗ освещаются в [4].

Дальнейшим развитием системы нечеткой кластеризации данных ДЗЗ является реализация нечеткой кластеризации расширенными алгоритмами С-средних (*Fuzzy C-means – FCM*) и Густафсона-Кесселя (*Gustafson-Kessel – GK*) [5]. В алгоритме *FCM* выбранная метрика, определяющая форму получаемых кластеров, одинакова для всех кластеров и не меняется в процессе работы. Принципиальное отличие алгоритма *GK* от алгоритма *FCM* состоит в том, что каждый кластер имеет индивидуальную метрику, основанную на нечеткой ковариационной матрице кластера (метрика Махаланобиса). Эта метрика динамически меняется в процессе выполнения итераций алгоритма.

Расширения *FCM* и *GK* алгоритмов (получаются *E-FCM* и *E-GK* алгоритмы) состоят в следующем:

1. В качестве прототипов кластеров используются объемные прототипы (*volume prototypes*). В частности, если в алгоритме *E-FCM* используется евклидова метрика, тогда таким прототипом будет гипершар. В алгоритме *E-GK* объемным прототипом кластера является гиперэллипсоид. Размеры объемных прототипов определяются на основе объемов кластеров. Такие прототипы менее чувствительны к отклонениям в распределении данных.

2. Вводится понятие «сходства» (*similarity*) кластеров. Начиная с заведомо большего числа кластеров, кластеры, степень сходства которых превышает заданный порог, объединяются в итерационном процессе кластеризации для того, чтобы получить подходящее разбиение данных.

Приведенные выше рисунки демонстрируют процесс построения карты нечеткой кластеризации алгоритмом *E-FCM*. На рис. 1 приведено исходное изображение бассейна Обского водохранилища, полученное 19.04.2011 г. (спутник Modis/Terra). На рис. 2 представлен результат работы алгоритма. Во входных данных было задано 7 кластеров, в результате работы алгоритма все векторы признаков были разбиты по двум кластерам.

Заметим, что в качестве начального разбиения векторов признаков по нечетким кластерам используются выходные данные алгоритма С-средних.

Включение алгоритмов *E-FCM* и *E-GK* в состав программного комплекса по обработке спутниковых данных PlanetaMonitoring позволяет расширить возможности системы кластеризации комплекса по построению разбиения, наиболее полно соответствующего внутренней структуре данных.

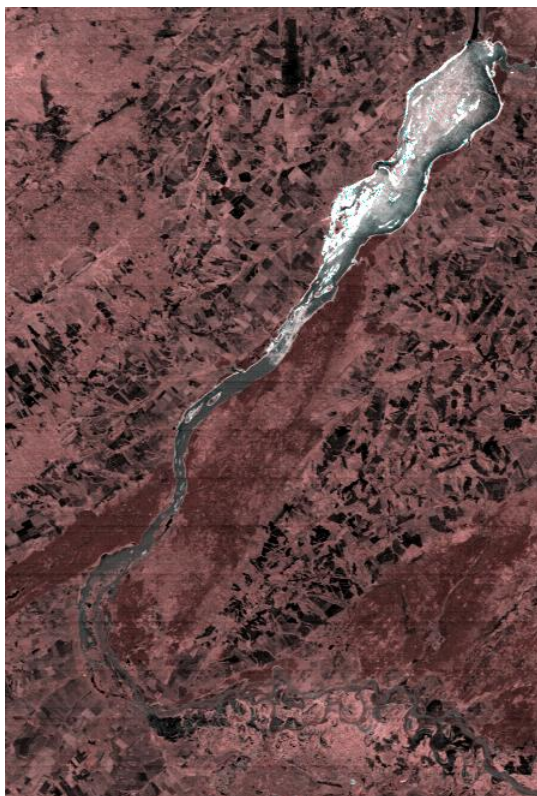


Рис. 1

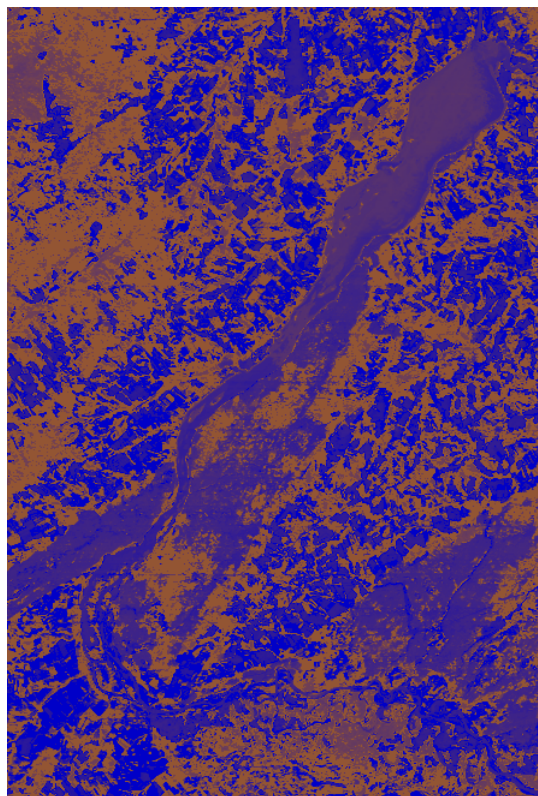


Рис. 2

Работа выполнена частично при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-07-00066) и Программы I.33П фундаментальных исследований Президиума РАН (проект № 0315-2015-0012).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Асмус В.В. Программно-аппаратный комплекс обработки спутниковых данных и его применение для задач гидрометеорологии и мониторинга природной среды. Диссертация в виде научного доклада на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. На правах рукописи. Москва – 2002, -75 с.
2. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. Пер. с англ. Москва: Техносфера, 2010.
3. Bezdek J.C. Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms. Plenum Press, New York, 1981.
4. Асмус В. В., Бучнев А. А., Пяткин В. П. Кластерный анализ в обработке данных дистанционного зондирования Земли // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Пленарное заседание : сб. материалов (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – С. 71–78.
5. Uzay Kaimak and Magne Setnes. Extended Fuzzy Clustering Algorithms. ERIM report series ERS-2000-51-LIS. Rotterdam, Netherlands, November 2000, 24 pp.

© А. А. Бучнев, В. П. Пяткин, 2016

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ НА ГИБРИДНОМ КЛАСТЕРЕ НКС-30T+GPU

Евгений Владимирович Русин

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-73-32, e-mail rev@ooi.sccc.ru

Предлагается подход к созданию высокопроизводительных технологий обработки данных дистанционного зондирования Земли на вычислительных кластерах с GPU, реализованный и апробированный на гибридном кластере НКС-30T+GPU Сибирского суперкомпьютерного центра. Обсуждаются некоторые аспекты реализации подхода и результаты экспериментов.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, высокопроизводительная обработка, распределенная обработка, вычисления на GPU.

TECHNOLOGIES FOR THE PROCESSING OF EARTH REMOTE SENSING DATA ON NKS-30T+GPU HYBRID CLUSTER

Evgeny V. Rusin

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, prospect Akademika Lavrentjeva, 6, Ph. D., senior scientific researcher, tel. (383)330-73-32, e-mail: rev@ooi.sccc.ru

An approach is proposed for the creation of high-performance technologies for the processing of Earth remote sensing data on computer clusters with GPU. The approach is implemented and tested on NKS-30T+GPU hybrid cluster, Siberian Supercomputer Center. Some aspects of the implementation of the approach and the results of experiments are discussed.

Key words: remote sensing, high-performance processing, distributed processing, GPU computations.

Введение

Гигантские объемы данных ДЗЗ, трудоемкость обрабатывающих их алгоритмов и потребность интерпретации данных ДЗЗ в реальном времени влекут необходимость привлечения к обработке спутниковых данных высокопроизводительных ЭВМ [1]. В последнее десятилетие появился большой практический интерес к использованию современных графических процессоров (Graphics Processing Unit, GPU) в качестве универсального вычислителя. Вообще говоря, GPU ориентирован на эффективное решение задач машинной графики, в частности он содержит аппаратные функции, позволяющие эффективно (с производительностью до нескольких ТФлопс) выполнять массовые вычисления (однотипные операции над большим объемом данных). Эти возможности позволяют использовать GPU в задачах, не связанных с визуализацией, но также опирающихся на массовые вычисления, например, в

задачах обработки и анализа изображений. На ряде практических задач вычисления на GPU обеспечили ускорение расчетов на два порядка по сравнению с вычислениями на центральном процессоре, что соответствует результатам, получаемым на суперЭВМ. Концепция универсальных вычислений на GPU получила поддержку производителей графических ускорителей (технологии CUDA от NVIDIA, FireStream от AMD), что делает доступным написание программ, использующих GPU, на языке высокого уровня без знаний архитектуры сопроцессора. Высокая производительность современных GPU, их относительно небольшая стоимость и появление технологий, упрощающих их программирование, делают популярным построение гибридных кластеров, в которых традиционные вычислительные узлы дополнительно оснащаются одним или несколькими графическими ускорителями. Создание программного обеспечения для таких вычислительных систем является сегодня актуальной научной задачей. В настоящей работе рассматривается подход к реализации технологий высокопроизводительной обработки данных ДЗЗ на гибридном кластере НКС-30Т+GPU Сибирского суперкомпьютерного центра (ССКЦ).

Кластер НКС-30Т+GPU

Техническое описание гибридного кластера НКС-30Т+GPU ССКЦ можно найти в [2]. Для целей нашей работы достаточно отметить, что в его состав входят 40 серверов SL390s G7, каждый из которых имеет:

- два 6-ядерных CPU Xeon X5670 (2,93 ГГц),
- 96 Гбайт ОЗУ,
- три GPU NVIDIA Tesla M 2090 на архитектуре Fermi (compute capability 2.0), с 512 ядрами, 6 Гбайт памяти GDDR5.

Общая пиковая производительность серверов – 85 Тфлопс.

Система SSCCIP и библиотека SSCC-PIPL

Рассматриваемые технологии реализованы как расширения созданной ранее автором системы SSCCIP (Siberian Scientific Computing Center – Image Processing), интегрирующей удаленную многопроцессорную ЭВМ в процессы обработки и анализа данных ДЗЗ [3]. Концептуально система представляет собой рабочее место оператора, функционирующее в окружении операционной системы MS Windows и обеспечивающее выполнение операций обработки данных ДЗЗ. Сама обработка при этом выполняется на удаленной суперЭВМ, а ЭВМ оператора фактически выполняет функции управления вычислениями и визуализации результатов. Архитектурно система SSCCIP состоит из:

- Клиентской компоненты, функционирующей на ЭВМ оператора и управляемой оператором.
- Серверной компоненты, функционирующей на удаленной многопроцессорной ЭВМ и выполняющей непосредственно вычисления. Важной ее частью является разработанная автором библиотека обработки

изображений на многопроцессорной ЭВМ SSCC-PIPL (Siberian Scientific Computing Center – Parallel Image Processing Library) [4].

- Коммуникационной компоненты, связывающей клиентскую и серверную компоненты защищенным SSH-каналом.

Система реализована на языке C++, межузловой обмен на многопроцессорной ЭВМ выполняется с помощью коммуникационной библиотеки MPI. Важным принципом, использованным при создании системы, являлась легкость добавления («погружения») в нее новых технологий обработки. Следуя этому принципу, при разработке всех компонент системы автор придерживался идеологии технологического каркаса (framework), при которой операции, общие для всех или достаточно большой группы технологий, реализуются кодом системы, а операции, специфичные для каждой технологии, реализуются отдельно при погружении очередной технологии.

Добавление в систему SSCCIP операций GPU

Изменения системы SSCCIP, связанные с введением в нее вычислений на GPU, затрагивают только серверную компоненту и библиотеку SSCC-PIPL:

- Ядро библиотеки SSCC-PIPL расширено шаблонами выполнения на GPU типовых операций над изображениями: операций типа «пиксель-пиксель» (например, сложение двух изображений), «окрестность-пиксель» (различные свертки), «всё изображение-константа» (вычисление суммы пикселей), и т.д. Каждый шаблон типовой операции содержит код, общий для всех операций данного типа (загрузка изображений в память GPU и обратно, загрузка параметров обработки в память GPU, выполнение вычислительного ядра CUDA, итерирование по пикселям изображений, манипуляции с окрестностями пикселей, получение и задание значений отдельных пикселей и пр.), и вызовы кода, специфичного для конкретных алгоритмов (сериализация параметров алгоритма в блок памяти и выполнение элементарной операции обработки над отдельным пикселем). Таким образом, для погружения нового алгоритма обработки в систему необходимо реализовать только код, специфичный для этого алгоритма. Шаблоны операций предоставляют различные варианты реализации типовых операций:

- Размещение исходного изображения в глобальной (одномерный и двумерный вариант) и текстурной памяти GPU;

- Одномерное и двумерное размещение результирующего изображения в глобальной памяти GPU;

- Размещение параметров обработки в глобальной и константной памяти GPU;

- Синхронное и асинхронное выполнение операций CUDA.

При этом поддерживаются все способы представления изображения на наборе вычислительных узлов SSCC-PIPL (полное изображение на каждом узле, разрезание на непересекающиеся полосы, разрезание на полосы с перекрытием). Важно отметить, что все операции, связанные с межузловым

обменом

и GPU, реализованы в ядре SSCC-PIPL, а особенности конкретного алгоритма реализуются в терминах обработки изображений (манипуляции с окрестностью и пр.). Данный факт существенно упрощает трудоемкий процесс реализации и отладки параллельных программ на суперЭВМ.

- Серверная компонента системы SSCCIP расширена возможностью использования GPU-операций SSCC-PIPL.

Результаты

Эксперименты, выполненные на кластере НКС-30Т+GPU, показывают, что:

- Привлечение GPU существенно увеличивает производительность вычислений. Так, GPU-реализация алгоритма поиска кольцевых структур на аэрокосмоснимках [5] выполняется в 70-100 раз (в зависимости от размеров изображения) быстрее аналогичной реализации на центральном процессоре.

- Повышение уровня абстракции модели вычислений (шаблоны типовых операций, параметризуемые относительно высокоуровневым кодом конкретных алгоритмов) значимо не ухудшает производительность создаваемых реализаций. Так, упомянутая выше GPU-реализация алгоритма поиска кольцевых структур с помощью библиотеки уступает по производительности лишь на 1-2 % низкоуровневой реализации с помощью прямого вызова подпрограмм CUDA. При этом значительно упростился процесс создания программы для GPU.

Работа выполнена частично при поддержке РФФИ (грант № 16-07-00066) и программы I.33П фундаментальных исследований Президиума РАН (проект № 0315-2015-0012).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бучнев А.А., Пяткин В.П., Русин Е.В. Распределенная высокопроизводительная обработка данных дистанционного зондирования Земли // Исследование Земли из космоса – 2007. – № 4. – С. 34-38.
2. Гибридный кластер: НКС-30Т+GPU, <http://www2.sccc.ru/НКС-30Т/НКС-30Т.htm>
3. Rusin E.V. Technology of High Performance Image Processing on Multiprocessor Computer // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2012. – Vol. 22, No. 3. – P. 470-472.
4. Rusin E.V. An object-oriented library of parallel image processing // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2009. – Vol. 19, No. 3. – P. 559-561.
5. Alekseev A.S, Pyatkin V.P., Salov G.I. Crater Detection in Aero-space Imagery Using Simple Nonparametric Statistical Tests // Lecture Notes in Computer Science. – Springer-Verlag, 1993. – Vol. 179. – P. 793-799.

© Е. В. Русин, 2016

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМОСНИМКОВ И НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ПОЛЕЙ ДЛИТЕЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА ГОРОДА

Татьяна Владимировна Ярославцева

Новосибирский НИИ гигиены Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Пархоменко, 7, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-61-51, e-mail: tani-ta@list.ru

Владимир Федотович Рапута

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)330-61-51, e-mail: raputa@sscc.ru

Обсуждаются результаты мониторинга загрязнения снежного покрова г. Кемерово взвешенными веществами. С использованием зимних спутниковых снимков, полученных в панхроматическом диапазоне, в соответствии с дискретной шкалой оттенков серого цвета, проиндексирована плотность тона изображения очагов загрязнения. Для зимних сезонов 2008-2011 гг. проведено сопоставление результатов компьютерной обработки космоснимков с результатами наземного мониторинга загрязнения снежного покрова. Установлено наличие корреляционных связей между оттенками серого цвета и содержанием твёрдых осадков в пробах снеготалой воды.

Ключевые слова: пылевое загрязнение, атмосфера, снежный покров, спутниковые снимки, корреляционный анализ.

USING SATELLITE IMAGERY AND GROUND SURVEILLANCE FOR THE ANALYSIS OF LONG-TERM POLLUTION FIELDS OF CITY SNOW COVER

Tatyana V. Yaroslavtseva

FBSI «Novosibirsk scientific research institute of hygiene» of Rospotrebnadzor, 630108, Russia, Novosibirsk, Parhomenko, 7, Ph. D., researcher, tel. (383)330-61-51, e-mail: tani-ta@list.ru

Vladimir F. Raputa

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, pr. Akad. Lavrentjeva, 6, Ph. D., chief researcher, tel. (383)330-61-51, e-mail: raputa@sscc.ru

We discuss the results of the monitoring of Kemerovo snow cover pollution by suspended solids. Using satellite winter images obtained in panchromatic range, in accordance with the scale of discrete shades of gray, it was indexed image tone density of pollution sources. For the winter season 2008–2011 the results of satellite imagery computer processing and ground-based monitoring of snow contamination were compared. The presence of correlations between shades of gray and the content of solid precipitation in snow water samples.

Key words: dust pollution, atmosphere, snow cover, satellite images, correlation analysis.

На космических снимках городских территорий отчетливо проявляется осаждение на снежный покров аэрозолей антропогенного происхождения. На них участки загрязненного снега выглядят как темные пятна и отражают атмосферную динамику процессов переноса пыли от источников [1-3]. В зимний период времени значительная часть территории города покрыта снегом и в следствие этого основные источники взвешенных веществ расположены над поверхностью земли и их выбросы носят организованный характер.

Контроль загрязнения атмосферы городов взвешенными веществами проводится на стационарных постах Государственной службы наблюдений за состоянием окружающей среды [4]. Поэтому при отборе проб снега по территории города следует отдавать предпочтение отбору вблизи постов, что создаёт возможности выявления корреляционных связей межсредового загрязнения

[5, 6]. В дальнейшем это позволит проводить анализ длительного загрязнения атмосферного воздуха территорий города по спутниковым снимкам.

Мониторинг загрязнения снежного покрова города. Отбор проб снега преимущественно проводился в конце зимних сезонов 2009-2011 гг. вблизи городских постов контроля загрязнения атмосферного воздуха г. Кемерово. Схема расположения стационарных пунктов наблюдения за загрязнением (ПНЗ) атмосферного воздуха представлена на рис. 1.

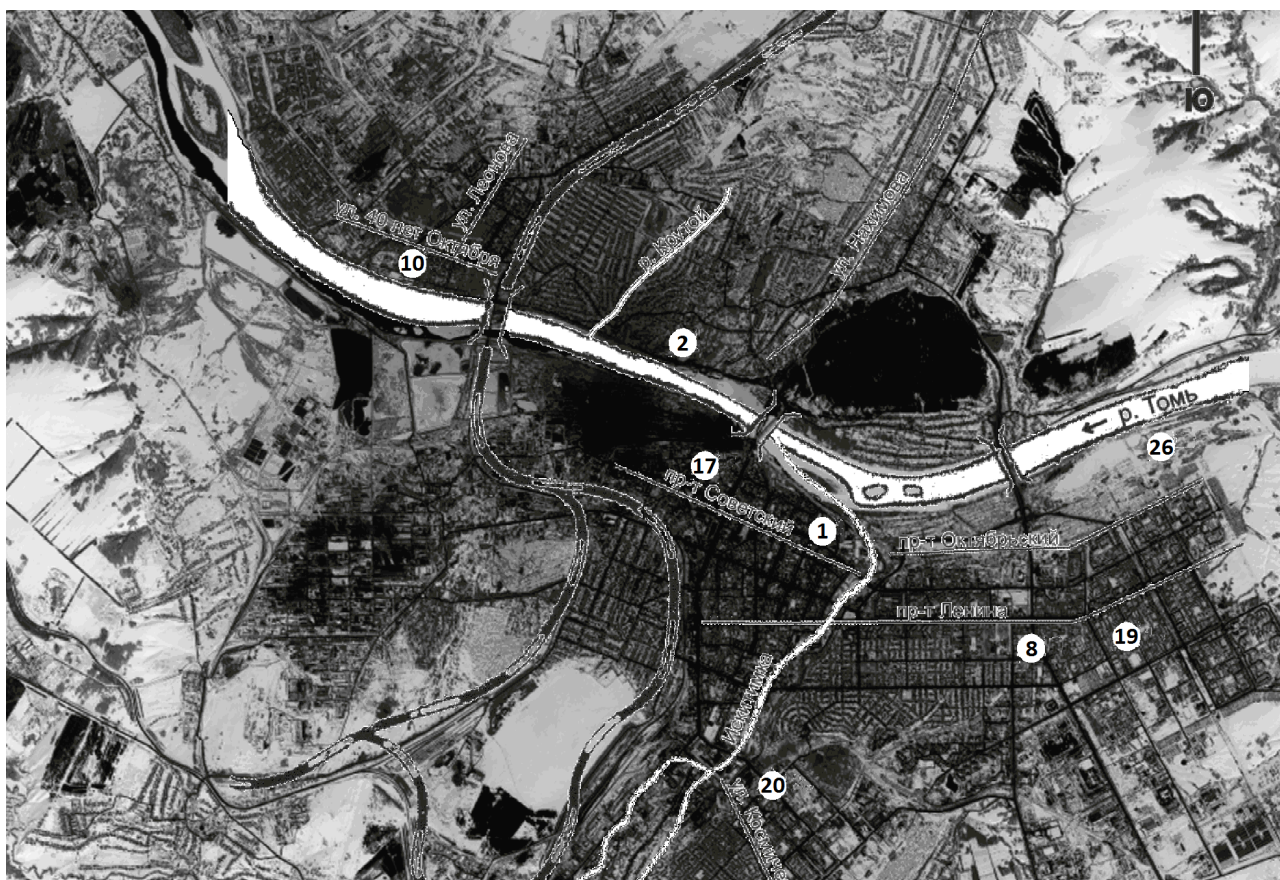


Рис. 1. Схема размещения постов контроля атмосферного воздуха г. Кемерово на оцифрованном спутниковом снимке от 26.03.2006 г.

Пробы отбирались с помощью пластмассовой трубы на открытых площадках неповреждённого снежного покрова на всю глубину. Анализ снежных проб выполняли в лаборатории после их топления по схемам в зависимости от природы определяемых компонентов [7]. Перед определением неорганических компонентов растопленную пробу пропускали через бумажный и мембранный фильтры с диаметрами пор 3-5 и 0,45 мкм соответственно. Анализу подвергали и осадки, и фильтрат. В фильтрате определяли анионный состав, в том числе нитрат-, нитрит- и сульфат-ионы с использованием методики на основе капиллярного электрофореза. Результаты лабораторных исследований твёрдого осадка в пробах снеготалой воды приведены в таблице.

Таблица

Концентрация твёрдого осадка (г/л) в пробах снеготалой воды для зимних сезонов 2008-2011 гг.

№ поста	Концентрация твёрдого осадка (г/л)		
	2008/09 г.	2009/10 г.	2010/11 г.
1	0.194	0.109	0.097
2	0.139	0.101	0.135
8	0.120	0.093	0.095
10	0.086	0.078	0.112
17	-	0.188	0.144
19	0.074	0.050	0.029
20	0.112	0.051	0.068
26	0.056	0.045	0.043

Анализ спутниковых снимков. В работе использовались снимки ИСЗ, полученные в панхроматическом диапазоне (Landsat, digitalglobe.com). В результате обработки снимка г. Кемерово от 26 марта 2006 г., заключающейся в дискретизации шкалы оттенков серого цвета, было получено оцифрованное изображение городских территорий (рис. 1, 2).

Это позволило выделить ореолы пылевых выпадений примесей от основных очагов загрязнения города (косохимический завод, ТЭЦ, крупные автомагистрали). Преобладающий вынос примесей происходит в направлениях на север и северо-восток от источников.

Анализ таблицы и рис. 1, 2 показывает, что значения рассматриваемых параметров загрязнения от поста к посту меняются вполне согласованно в значительных диапазонах изменения концентрации осадков в снеге и тональности территорий города на спутниковом снимке. Например, сравнение фрагмента снимка, с находящемся на нём постом № 10 и относящегося к промышленной зоне города, с фрагментом снимка спального района (пост № 26) показывает значительную контрастность оттенков серого цвета.

Аналогичная ситуация имеет место при сравнении концентраций осадков пробах снега на рассматриваемых постах.



Рис. 2. Фрагменты оцифрованного космоснимка г. Кемерово от 26.03.2006 г. в окрестностях постов № 10, 8, 19, 26

Результаты и обсуждение. Численная обработка результатов наземных и спутниковых исследований загрязнения снежного покрова г. Кемерово проводилась в рамках линейного корреляционного анализа. На рис. 3 представлены корреляционные зависимости между осадком пыли в пробах снега и тонами серого цвета на спутниковом снимке для зимних сезонов 2008 - 2011 г.г. на ПНЗ г. Кемерово. По вертикальной оси представлена интенсивность тона вблизи поста, по горизонтальной оси концентрация осадка (г/л) в пробе снеготалой воды, также отобранной возле этого поста.

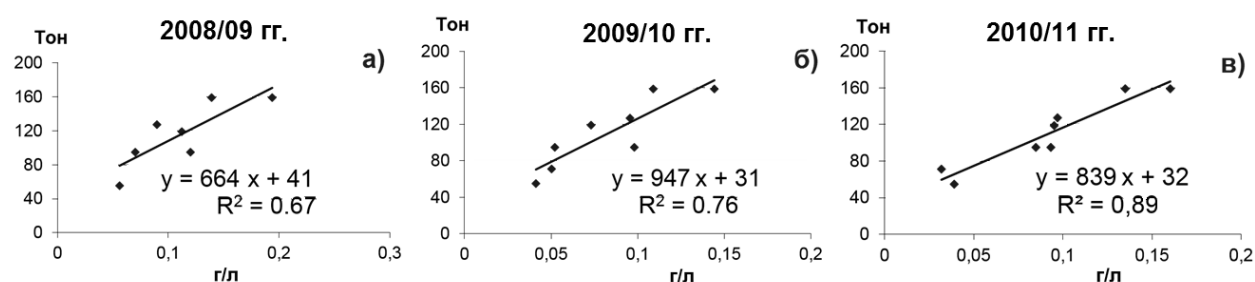


Рис. 3. Линейно-корреляционные зависимости между оттенками серого цвета на космоснимке г. Кемерово от 26.03.2006 г. и твёрдыми осадками в пробах снега для зимних сезонов: 2008-2009 гг. (а), 2009-2010 гг. (б), 2010-2011 гг. (в)

Максимальные значения тона и осадка в снеге достигаются для ПНЗ № 1, 2, 17, минимальное – для ПНЗ № 19, 26. Следует отметить, что ПНЗ № 1 расположен в центре города. Пост № 2 находится сравнительно не далеко от коксохимического завода и на направлении преобладающего от него сноса

загрязняющих примесей через р. Томь. Отметим также, что пересечение всех трёх линий регрессий на рис. 3 происходит несколько выше начала координат. Этот факт может означать, что сравнительно небольшая по массе часть мелкодисперсных фракций пыли при топлении снеговых проб переходит в растворённое состояние.

В целом, для всех трёх зимних сезонов уровень согласия измеренных концентраций осадка в снеготалой воде с данными тональности цвета на спутниковом снимке вполне удовлетворительный. Это позволяет сделать вывод о возможности создания для территорий города взаимно дополнительных систем наземного и дистанционного мониторинга и пересчета данных спутниковых наблюдений на загрязнение снежного покрова различных территорий г. Кемерово.

Заключение. Результаты линейного корреляционного анализа данных наземных и спутниковых наблюдений длительного загрязнения снежного покрова взвешенными веществами показали для территорий г. Кемерово достаточно высокий уровень согласия. Для рассмотренных зимних сезонов существует определённая стабильность размещения и функционирования основных источников выбросов взвешенных веществ в атмосферу города. Проведённое исследование показало возможность создания взаимно дополнительных систем мониторинга и получения на их основе более детальной оценки состояния длительного загрязнения снежного покрова города. Использование результатов сопряжённых исследований межсредового загрязнения атмосферного воздуха и снежного покрова на постах Росгидромета г. Кемерово позволит проводить оценки содержания в атмосфере взвешенных веществ по спутниковым снимкам и соответственно определять ингаляционные риски здоровью городского населения.

Работа выполнена при поддержке Программы РАН № 18.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Прокачева В.Г., Усачев В.Ф. Снежный покров как индикатор кумулятивного загрязнения в сфере влияния городов и дорог // Метеорология и гидрология. 2013. № 3. С. 94-106.
2. Василевич М.И., Шапов В.М., Василевич Р.С. Применение спутниковых методов исследования при оценке загрязнения снежного покрова вокруг промышленных предприятий в тундровой зоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 2. С. 50-60.
3. Дмитриев А.В., Дмитриев В.В. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса таяния снежного покрова в районе г. Омска по материалам 2007-2009 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 34-41.
4. Безуглая Э.Ю. Мониторинг состояния загрязнения атмосферы в городах. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 199 с.
5. Рапута В.Ф., Коковкин В.В., Девятова А.Ю. Сравнительная оценка состояния длительного загрязнения атмосферы и снегового покрова г. Новосибирска на сети стационарных постов Гидрометеослужбы // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 499-504.

6. Ярославцева Т. В., Рапута В. Ф. Закономерности длительного загрязнения атмосферы и снежного покрова г. Новосибирска // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 1. – С. 28–33.

7. Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л: Гидрометеиздат, 1985. 182 с.

© Т. В. Ярославцева, В. Ф. Рапута, 2016

УДК 528.8.042

КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ЗА ДЕФОРМАЦИЯМИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ ЭКИБАСТУЗСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Дмитрий Владимирович Мозер

Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры маркшейдерского дела и геодезии, тел. (7212)56-26-27, e-mail: dmitri-moser@yandex.ru

Айнур Дюсембаевна Каранеева

Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, преподаватель кафедры маркшейдерского дела и геодезии, магистр техники и технологии, тел. (7212)56-26-27, e-mail: aijarkyn83@inbox.ru

Гульсим Оразовна Исаинова

Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, преподаватель кафедры маркшейдерского дела и геодезии, магистр техники и технологии, тел. (7212)56-26-27, e-mail: fire_dragon@mail.ru

Асель Куандыковна Сатбергенова

Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, преподаватель кафедры маркшейдерского дела и геодезии, магистр техники и технологии, тел. (7212)56-26-27, e-mail: a.satbergenova@gmail.com

Айгерим Рахмановна Естаева

Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, магистрант кафедры маркшейдерского дела и геодезии, тел. (7212)56-26-27, e-mail: estaeva_a@mail.ru

В статье описывается метод исследования геодинамических процессов на Экибастузском месторождении. Расчеты деформации проводились на основе архивных радарных космических данных с японского спутника ALOS. Обработка данных производилась в программном комплексе ENVI, модуль SarScape Interferometric Stacking. В результате исследования были получены интерферограммы и графики сдвижений бортов разрезов на территории Экибастузского бассейна. В период наблюдения в некоторых точках выявлены деформации до 150 мм.

Ключевые слова: спутниковая радарная интерферометрия, временные ряды оседаний, дистанционное зондирование Земли.

SPACE MONITORING OF EARTH SURFACE DEFORMATION ON THE TERRITORY OF THE EKIBASTUZ DEPOSIT

Dmitry V. Moser

Karaganda state technical University, 100027, Republic of Kazakhstan, Karaganda, Boulevard of Peace, 56, senior lecturer of the Department of mine surveying and geodesy, Ph. D., tel. (7212)56-26-27, e-mail: dmitri-moser@yandex.ru

Ainur D. Karaneyaeva

Karaganda state technical University, 100027, Republic of Kazakhstan, Karaganda, Boulevard of Peace, 56, teacher of the Department of mine surveying and geodesy, master of engineering and technologies, tel. (7212)56-26-27, e-mail: aijarkyn83@inbox.ru

Gulsim O. Issainova

Karaganda state technical University, 100027, Republic of Kazakhstan, Karaganda, Boulevard of Peace, 56, teacher of the Department of mine surveying and geodesy, master of engineering and technologies, tel. (7212)56-26-27, e-mail: fire_dragon@mail.ru

Asel K. Satbergenova

Karaganda state technical University, 100027, Republic of Kazakhstan, Karaganda, Boulevard of Peace, 56, teacher of the Department of mine surveying and geodesy, master of engineering and technologies, tel. (7212)56-26-27, e-mail: a.satbergenova@gmail.com

Aigerim R. Yestayeva

Karaganda state technical University, 100027, Republic of Kazakhstan, Karaganda, Boulevard of Peace, 56, the Department of mine surveying and geodesy, tel. (7212)56-26-27, e-mail: estaeva_a@mail.ru

The article describes the method of research of the geodynamic processes in Ekibastuz. The deformation calculations are conducted based on the archived sar data from the japanese ALOS satellite. Data processing is performed in the software ENVI, SarScape Interferometric Stacking module. In the result of the study the interferograms and displacement graphs of the sides of the incision in the territory of the Ekibastuz basin. The results showed the presence of deformations in the period of observation at some points up to 120 mm.

Key words: satellite radar interferometry, time series of soil subsidence, remote sensing of the Earth.

Экибастузский каменноугольный бассейн, со значительными запасами в 12 миллиардов тонн каменного угля, является одним из самых перспективных районов добычи угля открытым способом в Республике Казахстан. Месторождение расположено в Павлодарской области, его площадь составляет 155 км².

Территория Экибастузского бассейна относится к промышленно развитой, где в настоящее время действуют разрезы по добыче угля: Богатырь, Северный и Восточный (рис. 1).



Рис. 1. Угольные разрезы «Богатырь», «Северный» и «Восточный»

Ежегодная большая добыча на карьерах приводит к сложной геотехнической ситуации, что может привести к деформациям бортов карьера. Для предотвращения деформаций необходимо проводить постоянный мониторинг за состоянием бортов карьеров, среди которых можно выделить новое направление, связанное с космическим радарным мониторингом [1].

Современные способы наблюдений за состоянием бортов карьеров весьма разнообразны. В последние годы актуальными являются методы дистанционного зондирования Земли с применением спутниковой радарной интерферометрии [2].

Актуальность проблемы состоит в том, что спутниковая радарная интерферометрия рассматривается как комплексный многоуровневый мониторинг для изучения сдвижения земной поверхности [3].

Организация космического мониторинга подразумевает сложную работу не только по получению космических снимков, но и их детальную обработку.

В данной статье рассматривается обработка архивных радарных данных с японского спутника ALOS по Экибастузскому месторождению. Работа по обработке радиолокационных данных производилась в программном комплексе ENVI модуль SarScape Interferometric Stacking сотрудниками научного технического центра «KazGeoScan» при КазГТУ. «KazGeoScan» осуществляет деятельность по предоставлению высокоточного прогноза состояния, больших по площади территорий, земной поверхности на основе дистанционного зондирования Земли [4].

В результате процесса обработки 15 радарных снимков, для каждой из пар в автоматизированном режиме были построены дифференциальные интерферограммы, выполнены фильтрация интерферометрической фазы, расчет когерентности и развертка фазы [5].

После анализа дифференциальных интерферограмм были выявлены участки, на которых образовались мульды оседания. Данные мульды оседаний поверхности расположены в районах добычи угля разрезов «Северный», в районе Северо-западной части, и «Богатырь».

По результатам обработки возможно построение временных рядов оседаний одной и той же точки. Так на территории Северо-западной части разреза

«Северный» был построен график оседаний земной поверхности по точке его максимального оседания, что составляет около 150 мм за исследуемый период. Оседание земной поверхности на территории Юго-западной части данного разреза составляет 140 мм (рис. 2).

Также результаты обработки радарных снимков показали образование оседаний земной поверхности на разрезе «Богатырь» в районе Южной части за период с января 2007 по ноябрь 2011 года, которое составляет порядка 120 мм (рис. 3).

По результатам обработки радарных данных со спутника ALOS в период с января 2007 по ноябрь 2011 года выявлено следующее:

- в районе Северо-западной части разреза «Северный» деформации достигают до 150 мм. Зона деформаций находится в непосредственной близости от зданий и сооружений;
- в районе Юго-западной части разреза «Северный» деформации достигают 140 мм;
- в районе Южной части разреза «Богатырь» деформации в верхней части карьера составляют 120 мм;
- в районе Южной части разреза «Богатырь» деформации в нижней части карьера составляют 140 мм.

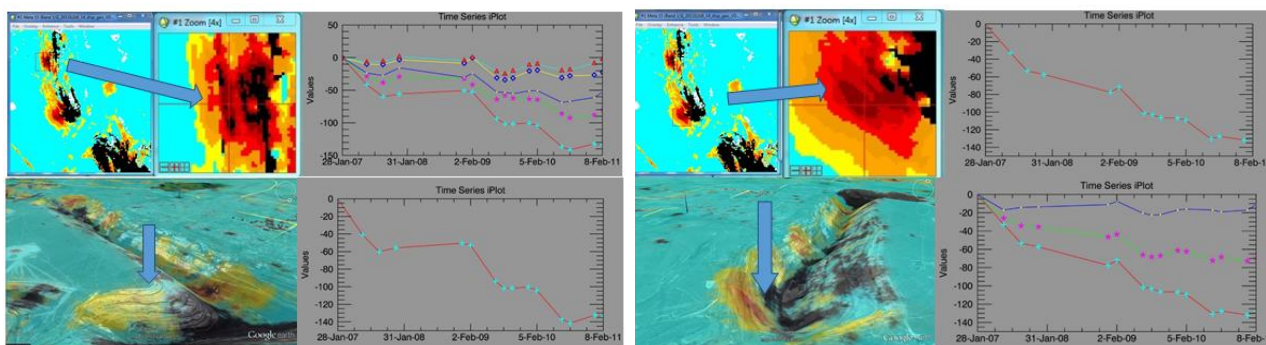


Рис. 2. Интерферограммы оседаний земной поверхности в Северо-западной и в Юго-западной частях разреза «Северный»

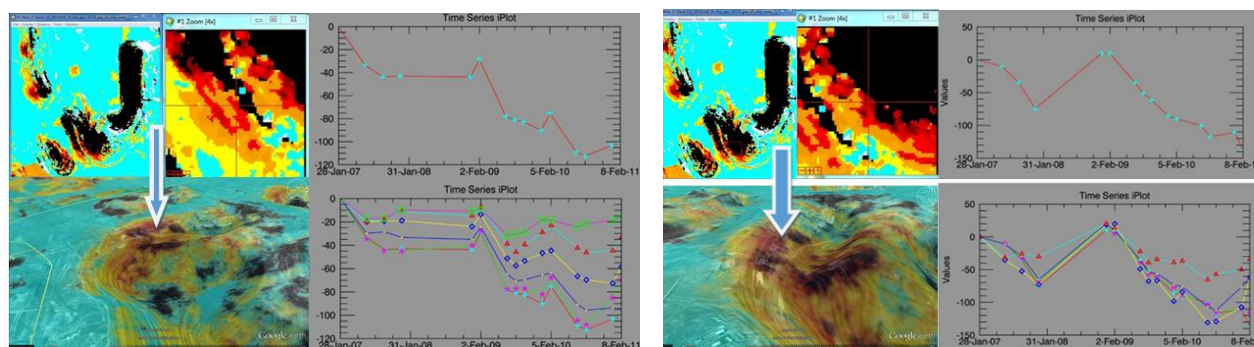


Рис. 3. Интерферограммы и графики оседаний земной поверхности в Южной части разреза «Богатырь»

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Низаметдинов Ф.К., Мозер Д.В., Гей Н.И., Туякбай А.С., Каранеева А.Д. Спутниковый радарный интерферометрический мониторинг подработанных территорий Карагандинского угольного бассейна. // Журнал Геоматика. – 2014. – №4. – С. 70-77.
2. Мозер Д.В., Каранеева А.Д., Гей Н.И. Определние сдвижений подработанных территорий шахты им. Т. Кузембаева Карагандинского угольного бассейна на основе использования современных технологий // Вестник ИРГТУ. – 2015. – №3 – С. 76-80.
3. Ожигина С.Б., Урдубаев Р.А., Ожигин Д.С., Ожигин С.Г. Мониторинг состояния бортов карьеров АО «ССГПО»//ИнтерЭкспо Гео-Сибирь – 2015г. – №2 – С. 210 –215.
4. Официальный сайт НТЦ «KazGeoscan» <http://kazgeoscan.kz/>.
5. Мозер Д.В., Левин Е.Л., Гей Н.И., Каранеева А.Д., Нагибин А.А. Мониторинг деформаций земной поверхности на территории Карагандинского угольного бассейна.// Геодезия и картография. – 2015. – № 6. – С. 21-26.

© Д. В. Мозер, А. Д. Каранеева, Г. О. Исаинова,
А. К. Самбергенова, А. Р. Естаева, 2016

УДК 004.93

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕЙРОСЕТОВОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГИЛЬБЕРТА – ХУАНГА

Артём Сергеевич Феоктистов

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, инженер-программист, e-mail: feoktistov.artem@gmail.com

Евгений Семенович Нежевенко

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск пр. Академика Коптюга, 1, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник лаборатории информационной оптики, e-mail: nedj@iae.nsk.su

Метод классификации изображения с предварительной трансформацией его к главным компонентам и использованием преобразования Гильберта – Хуанга исследуется на примере нейросетевой классификации гиперспектрального изображения. Показана его эффективность путем сравнения с традиционными методами нейросетевой классификации при использовании в качестве признаков спектральных компонент и главных компонент без привлечения пространственной информации.

Ключевые слова: классификация, гиперспектральное изображение, преобразование Гильберта – Хуанга.

NEURAL NETWORK CLASSIFICATION OF HYPERSPECTRAL IMAGES USING HILBERT-HUANG TRANSFORM EFFICIENCY STUDY

Artem S. Feoktistov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyga prosp., 1, software engineer, e-mail: feoktistov.artem@gmail.com

Evgeny S. Nejevenko

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyga prosp., 1. Ph. D., senior researcher, leading researcher, laboratory of information optics, e-mail: nedj@iae.nsk.su

Hyperspectral Image classification method with Hilbert – Huang Transform of principal components is studied. Effectiveness of neural network classification by comparison with the traditional methods is presented when using empirical modes of principal components as features.

Key words: classification, hyperspectral image, Hilbert – Huang transform.

Гиперспектральная съемка весьма эффективна при решении задач классификации земных объектов. Общеизвестно, что главным способом повышения эффективности классификации является привлечение дополнительных признаков, каковыми и являются множество спектральных компонент. Однако во многих работах показано [1], [2], что только спектральных компонент недостаточно, по многим причинам, изложенным в [1], они не дают хороших результатов при классификации площадных объектов на земле. Конструктивным решением этой проблемы является привлечение пространственной информации, что как показано в [1], существенно повышает качество классификации, определяемое вероятностью правильного распознавания площадных объектов, класс которых определен маршрутным исследованием. Однако в большинстве методов с использованием пространственной информации присутствует один существенный недостаток – способ обработки никак не связан с самим изображением. Ну, например, усреднение в окрестности пиксела, «Majority analysis» [3], сглаживание данных посредством медианной фильтрации, вейвлет анализ – все эти методы не зависят от характеристик самого изображения. Этот недостаток мы постарались преодолеть в работе [4] – мы использовали в качестве признаков параметры эмпирических мод, получаемых путем преобразования Гилберта-Хуанга (ННТ преобразование). Оно достаточно подробно описано в предыдущей работе, поэтому здесь мы только отметим, что путем ННТ преобразования изображение разлагается по системе функций, являющихся внутренними колебаниями, присущими анализируемому изображению, а не фиксированным набором частот или вейвлет функций. Функции базиса разложения называются эмпирическими модами (intrinsic mode function - IMF), их получение производится путем преобразования Хуанга. Эмпирические моды являются аналитическими сигналами, путем преобразования Гилберта из них вычисляются мгновенные амплитуды и частоты, которые могут быть использованы в качестве признаков распознавания объектов.

Однако в предыдущей работе мы для эксперимента взяли не гипер-, а мультиспектральное изображение, причем зоны интереса не соприкасались. Кроме того, обучающая выборка формировалась путем визуального (экспертного) анализа изображения. Мы получили совершенно неожиданный результат - 100 процентную вероятность правильного распознавания при использовании пятых мод главных компонент. Было сделано предположение, что результаты будут скорее всего не такие хорошие, если зоны интереса будут соприкасаться – повлияет «размаз» моды, который может привести к пересечению классов и, соответственно, не стопроцентной классификации. Для его проверки при экспериментальном исследовании были выбраны широко известные тестовые фрагменты гиперспектральных изображений, предлагаемых в открытом пакете

MultiSpec (эти же изображения использовались в работе [1]). Изображение получено в рамках программы AVIRIS (Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer) на опытном полигоне Индиан Пайс (штат Индиана, США). Фрагмент имеет размер - 145x145 пикселей, разрешение - 20 м/пикс., число каналов - 220 в диапазоне 0.4-2.5 мкм., при этом 20 каналов, содержащих высокий уровень шума, при проведении исследований удалены из рассмотрения. Обучающая выборка формировалась путем маршрутной съемки. Фрагмент изображения и маршрутная классификация его участков представлены на рис. 1. Они приведены для того, чтобы показать, что в отличие от фрагментов, классифицированных в работе [4], здесь участки разных классов вплотную примыкают друг к другу.

Это изображение было преобразовано к главным компонентам (ГК), после чего по критерию «каменистая осыпь» для классификации было отобрано 5 ГК, после которых кривая собственных значений выходит на пологий участок.

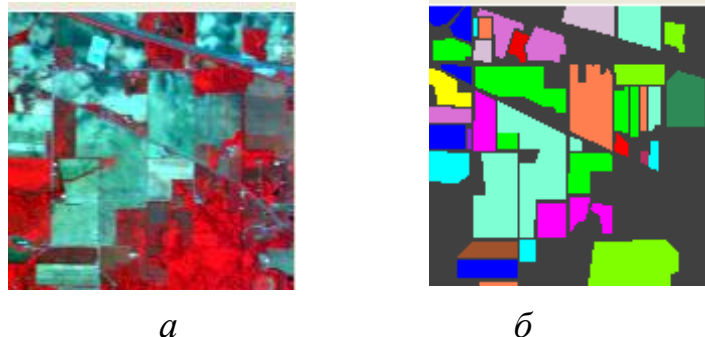


Рис. 1. а – классифицируемое изображение, б – карта классов

К каждой из ГК было применено ННТ, в результате для каждой ГК было отобрана 5 эмпирических мод. Преобразование ННТ было проведено в программе, которая была разработана в среде Matlab, основными модулями которой являются модули преобразования Хуанга и Гильберта, для поиска локальных экстремумов реализованы операторы морфологической реконструкции, а для построения огибающих реализована, как аппроксимация с помощью RBF функций, так и с помощью сплайнов.

Классификация проводилась в нейросетевом пакете программы STATSOFT. При этом конструировалось 10 нейронных сетей, из которых отбиралось 5 наилучших. Во всех случаях наилучший результат показывали нейронные сети на основе RBF функций. Каждый массив делился случайным образом на 3 выборки: обучающую, контрольную и тестовую. Контрольная выборка использовалась для остановки процесса обучения.

Таким образом, было получено 3 массива, подлежащих классификации: массив спектральных компонент (МСК), массив главных компонент (МГК) и массив эмпирических мод главных компонент (МЭМГК). Решаемая задача: определение вероятности правильной классификации на каждом из массивов, а затем выбор эффективной и наиболее экономичной системы признаков. Результаты обучения и классификации представлены вероятностями распознавания: на обучающей выборке - $P_{об}$, на тестовой - P_T . На МСК $P_{об}=0,916$,

$P_T=0,904$. Как видно, почти 10% пикселей классифицированы неправильно. На МГК $P_{об}=0,997$, $P_T=0,996$. Т.е. главные компоненты как признаки намного эффективнее исходных признаков. Но самые удивительные результаты получились при использовании пространственной информации - эмпирических мод. Для МЭМГК $P_{об}=0,999$, $P_T=0,995$. После получения такого результата мы решили выяснить, какие именно из 5 мод дают почти 100 процентную классификацию.

N	Архитектура	Производительность обуч.	Контр. производительность	Тест. производительность	Ошибки обуче.
4	РБФ 5:5-549-15:1	0,981268	0,964481	0,970726	0,07
5	РБФ 5:5-824-15:1	0,994732	0,983216	0,987900	0,06
8	РБФ 5:5-365-15:1	0,982439	0,975020	0,976971	0,07
9	РБФ 5:5-549-15:1	0,995902	0,986729	0,989071	0,06
10	РБФ 5:5-824-15:1	0,996683	0,991803	0,991023	0,04

Рис. 2. Скриншот результатов обучения в программе «Статистика»

Были перебраны самые разные комбинации мод и оказалось, что когда мы взяли только пятые моды главных компонент, результат классификации практически не изменился. (рис. 2): $P_{об}=0,997$, $P_T=0,992$. Следует сказать, что пятая мода - это фактически набор пятен вместо изображения. Одно из объяснений полученного результата: каждое из этих пятен сохраняет характеристики классов, т.е. соотношение преобразованных в соответствии с модами главных компонент, причем для всего участка, характеризующего класс.

Заключение

Таким образом, настоящей работой мы опровергли наше же предположение о причине стопроцентной классификации и подтвердили, что преобразование Гильберта-Хуанга в сочетании с главными компонентами – весьма эффективное преобразование гиперспектральных изображений с точки зрения классификации. Однако здесь еще требуются серьезные исследования для определения эффективного состава мод для разных типов изображений и зон интереса.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 13-07-12202.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Борзов С. М., Потатуркин А. О. Спектрально-пространственная классификация типов подстилающей поверхности по гиперспектральным данным // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 2. – С 13–17.
2. Plaza A., Benediktsson J.A., Boardman J.W., Brazile J., Bruzzone L., Camps-Valls G., Chanussot J., Fauvel M., Gamba P., Gualtieri A., Marconcini M., Tilton J.C., Trianni G. Recent

advances in techniques for hyperspectral image processing // Remote Sensing of Environment, 2009, V. 113. P.110–122.

3. Thomas M. Lillesand, Raiph W. Kiefer, Jonathan W. Chipman, Remote Sensing and Image Interpretation. – 2004. – John Wiley & Song, Inc. – 763 P

4. Феоктистов А. С., Нежевенко Е. С. Классификация гиперспектральных изображений с помощью преобразования Гильберта – Хуанга // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 2. – С. 23–27.

© А. С. Феоктистов, Е. С. Нежевенко, 2016

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ О ТРАЕКТОРИЯХ ДЫМОВЫХ ФАКЕЛОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ПОЛЕЙ ВЕТРА

Анатолий Александрович Леженин

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-64-50, e-mail: lezhenin@ommfao.sccc.ru

Татьяна Владимировна Ярославцева

Новосибирский НИИ гигиены Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Пархоменко, 7, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-61-51, e-mail: tani-ta@list.ru

Владимир Федотович Рапута

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)330-61-51, e-mail: raputa@sscc.ru

Предложен метод восстановления полей ветра в нижней атмосфере, основанный на использовании спутниковых наблюдений дымовых факелов от разновысоких труб промышленных предприятий. В качестве базовых соотношений привлекаются уравнения экмановского пограничного слоя. На примере г. Омска приведены результаты расчета вертикальных профилей компонентов скорости ветра и коэффициента турбулентного обмена. Обсуждаются возможности предлагаемого подхода для анализа процессов загрязнения атмосферы города.

Ключевые слова: атмосфера, дымовой факел, спутниковые наблюдения, обратная задача, численное моделирование.

USE OF SATELLITE INFORMATION ON TRAJECTORIES OF THE PLUMES OF SMOKE FOR THE CALCULATION OF WIND FIELDS

Anatoly A. Lezhenin

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, pr. Akad. Lavrentjeva, 6, senior researcher, tel. (383)330-64-50, e-mail: lezhenin@ommfao.sccc.ru

Tatyana V. Yaroslavtseva

FBSI «Novosibirsk scientific research institute of hygiene» of Rospotrebnadzor, 630108, Russia, Novosibirsk, Parhomenko, 7, senior researcher, tel. (383)330-61-51, e-mail: tani-ta@list.ru

Vladimir F. Raputa

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

A method to calculate the wind fields in the low atmosphere based on the use of satellite images of smoke plumes from the chimneys of industrial plants various heights is proposed. The model is based on Ekman layer equations. The results of calculations of the vertical profiles of wind velocity components and the coefficient of the turbulent exchange are given for the city of Omsk,

an example. Some possibilities of using approach to analyze the processes of pollution of urban atmosphere are discussed.

Key words: atmosphere, plumes of smoke, satellite images, inverse problem, numerical modeling.

Введение. На космических снимках прослеживаются дымовые загрязнения атмосферы на территориях городов и промышленных площадок [1]. Они отчётливо фиксируются по тону и рисунку изображения. Направления траекторий дымовых факелов совпадают с направлениями ветра на высотах выбросов. Данные о миграции и размерах дымовых загрязнений промышленного происхождения, полученные наземными методами, весьма ограничены. Космические изображения позволяют оперативно получать обширную картину распространения шлейфов дыма. Факела от крупных ТЭЦ визуализируются на расстояниях до нескольких десятков километров. При этом видимая ширина дымовых шлейфов может варьироваться в достаточно широких пределах [1].

В работе [2] с использованием методов математического моделирования проводится анализ спутниковых снимков факелов от продувок газовых скважин на газоконденсатных месторождениях. Непосредственный контроль полноты сгорания углеводородов весьма затруднителен, поскольку факел создает высокую температуру и имеет большую протяженность, его выбросы представляют значительную опасность здоровью населения. На основе решения обратной задачи подгонки к наблюдениям расчетной формы и оптической плотности шлейфа оценивались текущие параметры атмосферы и источника эмиссии.

Объекты и материалы исследования. Материалами исследований служили зимние спутниковые снимки территории г. Омска. На них хорошо просматриваются траектории дымовых выбросов от труб ТЭЦ и промышленных предприятий. Высота источников варьируется в широких пределах: от нескольких десятков до сотен метров.

На рис. 1 приведен снимок г. Омска с ИСЗ «Landsat-8» за 3 января 2015 г., предоставленный Сибирским центром ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «ПЛАНЕТА» (<http://www.rcpod.ru>). Анализ снимка показывает, что направления выносов примеси от разновысоких источников существенно различаются. Для сравнительно невысоких источников, например, предприятие «Техуглерод», вынос примеси происходит в северо-восточном направлении. Дымовые шлейфы от труб ТЭЦ-2 и ТЭЦ-5, имеющих высоты 265 м и 275 м соответственно, сносятся практически в восточном направлении. Следует также отметить, что в данных метеорологических условиях эффективная высота подъема газоаэрозольной примеси, выбрасываемой из этих труб, может превышать 400-500 м. Это означает, что дымовые струи находятся в верхней части зимнего пограничного слоя атмосферы. Как известно [3, 4], на таких высотах происходит правый поворот ветра, что и подтверждается космическим изображением на рис. 1.

Относительно направления приземного ветра угол поворота дымовых факелов от труб ТЭЦ-2 и ТЭЦ-5 примерно составляет 35 градусов.

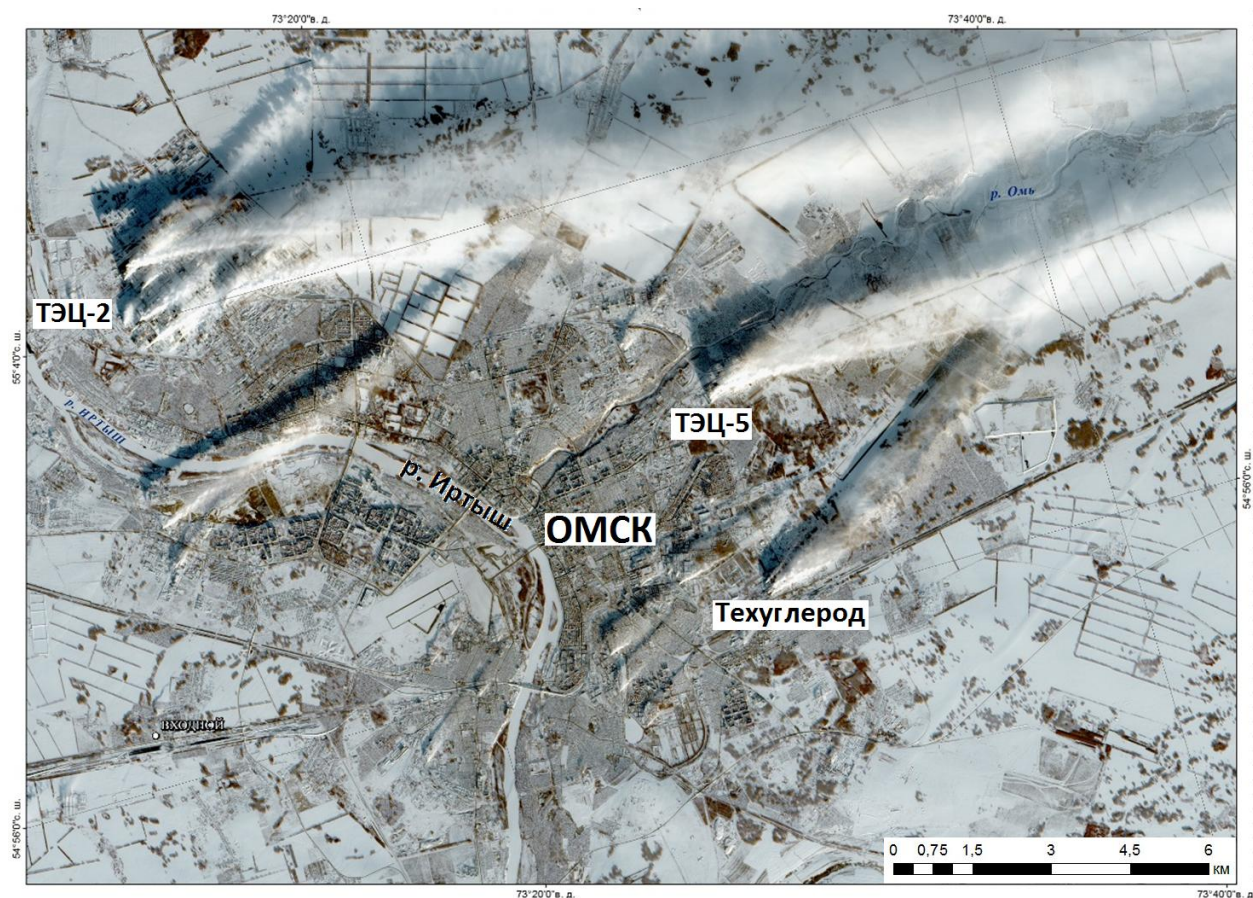


Рис. 1. Спутниковый снимок г. Омска от 3 января 2015 г. на 12 часов местного времени с ИСЗ «Landsat-8» (03.01.2015 г.)

Для анализа состояния атмосферы в течение 3 января 2015 г. использованы результаты измерений, полученные на аэрологической станции г. Омска. Станция расположена на высоте 90 м. над уровнем моря. В табл. 1, 2 представлены распределения по высоте основных метеорологических величин на рассматриваемый день: давления, температуры, направления и скорости ветра в 6 и 18 часов местного времени. Метеорологические условия в рассматриваемый период времени характеризуется низкими температурами у поверхности земли, наличием инверсии и слабыми приземными ветрами. Из табл. 1, 2 следует, что в течение дня в пограничном слое атмосферы наблюдались резкие изменения направления ветра.

Таблица 1

Метеорологические параметры в нижней атмосфере по данным аэрологической станции г. Омска на 06 часов местного времени 3 января 2015 г.

Высота над уровнем моря, м	Давление, hPa	Температура, град С	Направление ветра, град	Скорость ветра, м/с
90	1007	-30,7	270	1

137	1000	-27,1	270	2
536	947	-20,7	280	6
710	925	-20,5	285	7

Таблица 2

Метеорологические параметры в нижней атмосфере по данным аэрологической станции г. Омска на 18 часов местного времени 3 января 2015 г.

Высота над уровнем моря, м	Давление, hPa	Температура, град. С	Направление ветра, град.	Скорость ветра, м/с
90	1007	-26,5	135	3
171	1000	-24,1	180	3
215	994	-22,8	195	4
267	987	-21,3	204	5
426	966	-19,7	230	6
574	947	-18,3	237	7
749	925	-17,9	245	7

Модель оценивания вертикального профиля ветра. Аналитическое решение уравнений экмановского пограничного слоя имеет следующий вид [3]

$$U(z, \theta) = C_g \{1 - e^{-\theta z} \cos(\theta z)\}, \quad V(z, \theta) = C_g e^{-\theta z} \sin(\theta z). \quad (1)$$

Здесь U, V - горизонтальные компоненты скорости ветра в направлении осей x, y соответственно, ось z направлена вертикально вверх, C_g - скорость геострофического ветра, $\theta = \sqrt{\omega_z/k}$, ω_z - параметр Кориолиса, k - коэффициент вертикального турбулентного обмена.

Из соотношений (1) вытекает, что угол α между вектором геострофического ветра и вектором ветра на высоте h определяется из следующего выражения

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{V(h)}{U(h)} = \frac{e^{-\theta h} \sin(\theta h)}{1 - e^{-\theta h} \cos(\theta h)}. \quad (2)$$

Соотношение (2) позволяет оценить путём решения обратной задачи агрегированный параметр θ как по измерениям компонентов скорости ветра на высоте h , также и по измеренному значению угла α . Подставляя оценку параметра θ в уравнения (1), можно восстановить профили скорости ветра во всём пограничном слое.

Результаты и обсуждения. Для тестирования модели оценивания компонентов скорости ветра в пограничном слое атмосферы были использованы данные ветрового зондирования в г. Лейпциг [4]. Лейпцигский профиль ветра был получен для достаточно большого временного периода осреднения с привлечением шаропилотных наблюдений. На рис. 2а приведены результаты восстановления компонентов скорости ветра по модели (1), (2).

Оценивание параметра θ проводилось по компонентам скорости ветра на высоте $h=400$ м. Анализ рис.2а показывает вполне удовлетворительное согласие измеренных и восстановленных составляющих скоростей ветра.

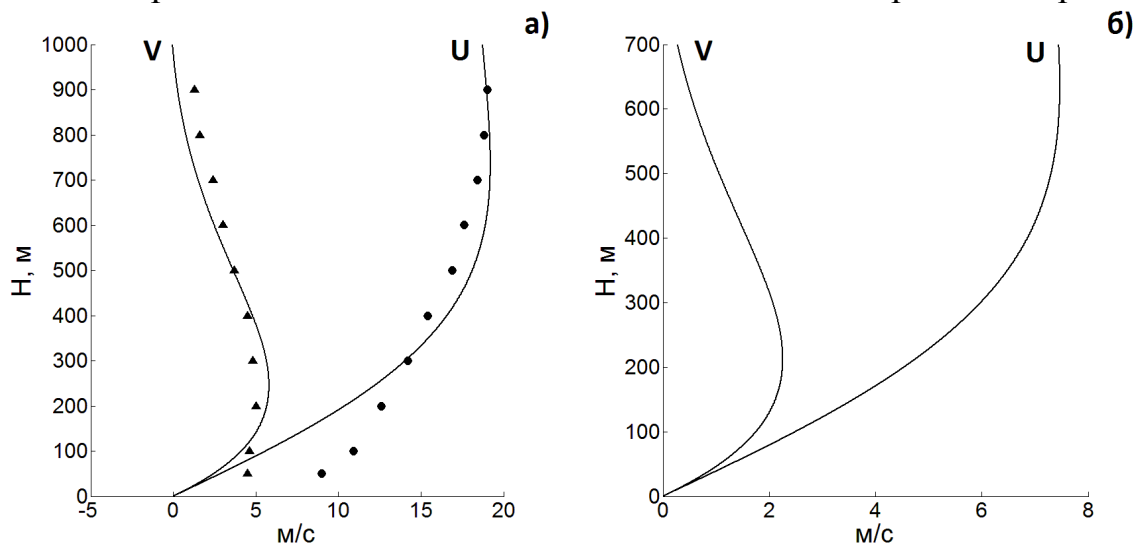


Рис. 2. Восстановленные с помощью модели (1), (2) компоненты скорости ветра с использованием данных лейпцигского эксперимента (а) и измерения угла на спутниковом снимке (б). ●, ▲ – обозначены измерения на различных высотах компонентов скорости ветра U , V соответственно

На рис. 2б представлены результаты восстановления U , V при скорости геострофического ветра $C_g = 7$ м/с и угле $\alpha = 35^\circ$, измеренным между направлениями переноса дымовых факелов ТЭЦ-5 и источников промпредприятия «Техуглерод».

Заключение. На основе уравнений экмановского пограничного слоя разработана модель оценивания полей ветра и коэффициента турбулентного обмена. Тестирование модели выполнено на данных аэрологического зондирования в районе г. Лейпциг. Ее дальнейшая апробация проведена на данных спутниковых наблюдений дымовых факелов от высотных труб ТЭЦ г. Омска. Предложенный подход может быть использован для анализа процессов загрязнения атмосферы города и его окрестностей.

Работа выполнена при поддержке Программы РАН 18.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кондратьев К.Я., Григорьев Ал.А., Покровский О.М., Шалина Е.В. Космическое дистанционное зондирование атмосферного аэрозоля. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 216 с.
2. Балтер Б.М., Балтер Д.Б., Егоров В.В., Стальная М.В. Использование данных ИСЗ Landsat для определения концентрации загрязнителей в шлейфах от продувки газовых скважин на основании модели источника // Исследование Земли из космоса. 2014. № 2. С. 55-66.
3. Динамическая метеорология / Под ред. Д.Л. Лайхмана. Л: Гидрометеиздат, 1976. 608 с.

4. Браун Р.А. Аналитические методы моделирования планетарного пограничного слоя. Л: Гидрометеиздат, 1978. 151 с.

© А. А. Леженин, Т. В. Ярославцева, В. Ф. Рипута, 2016

УДК 528.852

ОБЛАЧНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ В ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Алексей Александрович Бучнев

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, старший научный сотрудник лаборатории обработки изображений, тел. (383)333-73-32, e-mail: baa@ooi.sccc.ru

Павел Алексеевич Ким

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, старший научный сотрудник лаборатории обработки изображений, тел. (383)333-73-32, e-mail: kim@ooi.sccc.ru

Валерий Павлович Пяткин

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, зав. лабораторией обработки изображений, тел. (383)333-73-32, e-mail: pvp@ooi.sccc.ru

Рассматривается макет Web-сервиса по выделению аномальных (линейных и кольцевых) структур на космических изображениях, который решает новую задачу предоставления услуг обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в рамках облачной модели SaaS. Макет сервиса реализован на платформе Windows.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, облачные вычисления, линеаменты, кольцевые структуры.

CLOUD COMPUTING IN EARTH REMOTE SENSING DATA PROCESSING

Aleksey A. Buchnev

Institute of the Computational mathematics and mathematical geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Acad. Lavrent'ev av., 6, lab of the images processing senior researcher, tel. (383)333-73-32, e-mail: baa@ooi.sccc.ru

Pavel A. Kim

Institute of the Computational mathematics and mathematical geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Acad. Lavrent'ev av., 6, lab of the images processing head, tel. (383)333-73-32, e-mail: kim@ooi.sccc.ru

Valeriy P. Pyatkin

Institute of the Computational mathematics and mathematical geophysics (ICM&MG) SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Acad. Lavrent'ev av., 6, lab of the images processing head, tel. (383)333-73-32, e-mail: pvp@ooi.sccc.ru

We consider the Web-service layout to detect anomalous (linear and circular) structures on the space images, which solves the problem of a new data processing services of Earth remote sensing (ERS) within the cloud SaaS model . Layout service implemented on the Windows platform.

Key words: remote sensing, cloud computing, lineaments, coils.

1. Введение

Программа прикладных дистанционных исследований Земли из космоса обширна и разнообразна [1]. Эффективность дистанционных исследований Земли из космоса во многом определяется используемыми методами тематической обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Функциональные возможности разработанного в ИВМиМГ СО РАН совместно с ФГБУ «НИЦ «Планета» Росгидромета РФ программного комплекса PlanetaMonitoring для обработки данных ДЗЗ дают возможность использовать при их обработке практически функционально полный набор операций. Одна из важных операций, реализованных в комплексе, – обнаружение объектов заданной формы (линеаментов и кольцевых структур) на космических снимках. Материалы

аэрокосмических съемок показали повсеместное распространение линейных и кольцевых образований в структуре земной коры, что обусловило широкий интерес к ним со стороны исследователей импактных кратеров на поверхности Земли и геологов. При обработке космических снимков с целью обнаружения на них объектов, представляющих интерес, в силу целого ряда причин предпочтение отдается статистическому подходу [2-4]. Основная причина состоит

в том, что вследствие случайного характера природных процессов данные дистанционных измерений (спектросовмещенные изображения) содержат много случайных вариаций, маскирующих различия значений яркости изображения

в точках области объекта и в точках области фона. В подобной ситуации надежные алгоритмы обнаружения могут быть построены только с помощью вероятностного (статистического) подхода. В настоящее время становится актуальным использование Internet-технологий для оперативной интеграции информационно-вычислительных ресурсов для решения задач обработки данных ДЗЗ. Новая парадигма облачных вычислений (cloud computing) даёт такую возможность [5]. Основная идея облачных вычислений – технологии распределённой обработки и хранения данных, в которых все необходимые ресурсы предоставляются пользователю как Internet-сервис. Концептуально технологию облачных вычислений делят на предоставление инфраструктуры в качестве сервиса (IaaS, Infrastructure as a Service), платформы в качестве сервиса (PaaS, Platform as a Service) или программного обеспечения в виде сервиса (SaaS, Software as a Service), а также многих придуманных и ещё не придуманных Internet-технологий для удалённых пользовательских

вычислений. В данной работе основное внимание будет уделено облачной концепции SaaS (Software as a Service, «программное обеспечение как услуга»). В работе рассматривается разработка макета Web-сервиса по выделению линейных и кольцевых структур, которая решает новую задачу предоставления услуг обработки данных ДЗЗ в рамках облачной модели SaaS. Макет сервиса реализован на платформе Windows и состоит из следующих компонент: вычислительной компоненты, созданной на основе разработанного ранее Windows-приложения Lineaments&Coils выделения линейных и кольцевых структур на спутниковых изображениях, и Web-интерфейса, выполненного на основе свободного Web-сервера Apache.

2. Вычислительная компонента

Вычислительная компонента облачной технологии выделения линеаментов и кольцевых структур является пакетным вариантом упомянутого выше Windows-приложения Lineaments&Coils. Все необходимые для работы соответствующих процедур данные собраны в текстовом файле, имя которого является фактическим параметром компоненты. Главными из этих данных являются размер выделяемого объекта (длина линеамента либо радиус круга, возможно задание интервала значений), допустимая вероятность ложного обнаружения объекта, расстояние от предполагаемого положения объекта для измерения значений пикселей.

Основная часть процедур состоит в вычислении статистик S^+ и S^- на основе анализа значений пикселей изображения вдоль нормалей к предполагаемому положению объекта [6]. Эти статистики определяются следующим образом. Для $i = 1, \dots, k$ обозначим через ς_i , ξ_{i1} , ξ_{i2} значения пикселей, наблюдаемых в точках проверяемого положения объекта и на линии i -й нормали к объекту слева и справа от него. Тогда $S^+ = \sum_{i=1}^k I\{\varsigma_i > \max(\xi_{i1}, \xi_{i2})\}$, $S^- = \sum_{i=1}^k I\{\varsigma_i < \min(\xi_{i1}, \xi_{i2})\}$, где $I\{\cdot\}$ - индикаторная функция события $\{\cdot\}$, равная 1 или 0 в зависимости от того, произошло или не произошло событие $\{\cdot\}$. Для каждого возможного положения решение о наличии объекта принимается по результату сравнения посчитанных значений статистик S^+ и S^- с предопределенными пороговыми значениями, полученными на основе входных параметров. При этом предполагается, что количество проверяемых позиций объекта k и расстояния вдоль нормалей для получения значений пикселей ξ_{i1} и ξ_{i2} таковы, что все величины могут рассматриваться как статистически независимые в совокупности, когда в поле зрения объект отсутствует.

Используемый для построения статистик S^+ и S^- анализ значений пикселей требует больших временных затрат при его последовательном выполнении. В связи с этим разработаны параллельные реализации алгоритмов обнаружения аномальных структур. Реализация достигается средствами ОС Windows на уровне потоков: количество запускаемых потоков равно

количеству логических процессоров. Каждый процесс (или поток), зная общее количество процессов и свой номер, определяет горизонтальную полосу изображения для обработки. При этом полосы у соседних процессов перекрываются, и глубина этого перекрытия зависит от размера обнаруживаемых объектов.

Вычислительная компонента передает в вызывающую среду код завершения, означающий либо успешное обнаружение объектов, либо ошибочный вызов (как правило, обнаруживаются неверные значения параметров). В случае успешного завершения формируются два файла с одним и тем же изображением обнаруженных объектов: один файл в формате BMP, второй в формате JPEG.

3. Web-интерфейс

Текущая реализация Web-интерфейса продолжает многолетнее развитие разрабатываемой в ИВММГ СО РАН концепции объединения в рамках единой программной оболочки разнородных алгоритмов для обработки изображений [7]. Таким образом, «сменные» вычислительные компоненты опираются на единообразный сетевой интерфейс, предусматривающий возможность реализации таковых компонентов на различных архитектурных платформах гетерогенной сети, включая многопроцессорные архитектуры Сибирского суперкомпьютерного центра. Обозначенная идеология успешно укладывается в облачный подход к развитию программного «софтвера», ориентируя на отказ от прямой адресации элементов сети в пользу гипертекстовых ссылок, что, в частности, облегчает пользовательское «обременение» обязательным знанием особенностей архитектуры вычислителя.

С учетом разнородности и обширности рынка пользовательских браузеров, используемых в Интернет-сети, WEB-интерфейс в макетном варианте реализован с применением минимальных средств гипертекстового языка HTML. Сервисная часть выполнена на Apache 2.2, но закладываемая в концепцию «многополярность» распараллеливания процессов не противоречит и другим платформам, типа IIS Windows.

Структурно в интерфейсе можно выделить следующие три части: подготовка параметров, вызов вычислителя, просмотр результата. Дальнейшая детализация приведет к более сложным структурам, образующим своего рода интерактивные технологические карты вычислительного процесса. О характере и сложности такой технологической карты можно получить представление на примере выбора обрабатываемого изображения, которое может оставаться неизвестным пользователю, ни в форме представления, ни в масштабе, ни в палитре. Аналогичные трудности встанут перед пользователем и при анализе результатов расчета...

В целях упрощения экспериментального эксплуатационного этапа тестирования макета, передача пользовательских изображений производится по анонимному входу в библиотеку сервиса по FTP-протоколу. Таким образом,

пользователь имеет возможность вести поиск «скрытых» объектов, как по архивным данным, так и по индивидуальным образцам изображений.

Естественность высоких требований к уровню сервиса автоматизированных информационных систем приводит к необходимости организации Службы сервиса, что диссонирует с желанием устранить человека из процессов информационной обработки, однако позволяет решить проблему «заторов» при сложившейся технологии пакетной обработки заданий в суперкомпьютерном центре.

4. Заключение

В заключение отметим, что успешный опыт реализации макета облачного Web-сервиса по выделению аномальных (линейных и кольцевых) структур на космических изображениях будет использован для предоставления услуг обработки данных ДЗЗ в рамках облачной модели SaaS и по другим программным модулям комплекса PlanetaMonitoring, в частности, блока распознавания.

Работа выполнена частично при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-07-00066) и Программы I.33П фундаментальных исследований Президиума РАН (проект № 0315-2015-0012).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.- Техносфера, 2010. – 560 с.
2. Салов Г.И. О мощности непараметрических критериев для обнаружения протяженных объектов на случайном фоне. //Автометрия. 1997. N 3. с. 60-75.
3. Пяткин В.П., Салов Г.И. Статистический подход к задаче обнаружения некоторых структур на аэрокосмических изображениях // Научно-технические технологии. – 2002. – №3. – т.3. – С. 52-58.
4. Бучнев А. А., Пяткин В. П., Салов Г. И. Выделение кольцевых структур на космических снимках // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Пленарное заседание : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. – С. 3–9.
5. Kim P. A., Kalantaev P. A., Pyatkin V. P. Cloud Multiagent System for the Database of Natural Resources.// Pattern Recognition and Image Analysis, 2015, Vol. 25, No. 2, pp. 220-222.
6. Салов Г.И. Новый статистический критерий для задач с двумя и тремя выборками, более мощный, чем критерии Вилкоксона и Уитни. //Автометрия. 2011. N 4. с. 58-70.
7. Бучнев А.А., Калантаев П.А., Ким П.А., Пяткин В.П., Системная поддержка процесса обработки цифровых изображений. // Математ. структуры и моделирование Сб.научн.трудов Омск.гос.ун-т 1999. -Вып.3. стр.42-46/МДИ-98

© А. А. Бучнев, П. А. Ким, В. П. Пяткин, 2016

МАЛЫЕ ГЛУБОКОВОДНЫЕ ОЗЕРА НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ – ВЕРОЯТНЫЕ ИМПАКТНЫЕ СТРУКТУРЫ ПЛЕЙСТОЦЕН-ГОЛОЦЕНОВОГО ВОЗРАСТА

Иван Иванович Амелин

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник лаборатории математического моделирования волн цунами, тел. (383)330-93-84, e-mail: aii@omzg.sccc.ru

Вячеслав Константинович Гусяков

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, зав. лабораторией математического моделирования волн цунами, тел. (383)330-70-70, e-mail: gvk@sscc.ru

Зоя Андреевна Ляпидевская

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, ведущий программист лаборатории математического моделирования волн цунами, тел. (383)330-95-23, e-mail: zliapid@ngs.ru

Холматжон Худайназарович Имомназаров

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории математических задач геофизики, тел. (383)330-83-52, e-mail: imom@omzg.sccc.ru

Приведена информация о вероятных импактных структурах на территории Новосибирской области плейстоцен-голоценового возраста. Объекты выделены на основании данных дистанционного зондирования Земли, топографических карт, геологической информации и результатов полевых исследований.

Ключевые слова: импактные структуры, астроблемовидные, малые глубоководные озера, Новосибирская область, топографические карты.

SMALL DEEP LAKES OF THE NOVOSIBIRSK REGION – PROBABLE IMPACT STRUCTURES OF PLEISTOCENE-HOLOCENE AGE

Ivan I. Amelin

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Acad. Lavrentjev av, 6, Ph. D., junior researcher of lab mathematical modeling of tsunami waves, tel. (383)330-93-84, e-mail: aii@omzg.sccc.ru

Vyacheslav K. Gusiakov

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Acad. Lavrentjev av, 6, D. Sc, head of lab mathematical modeling of tsunami waves, tel. (383)330-95-23, e-mail: gvk@sscc.ru

Zoya A. Liapidevskaya

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Acad. Lavrentjev av, 6, lead programmer of lab mathematical modeling of tsunami waves, tel. (383)330-95-23, e-mail: zliapid@ngs.ru

Kholmatzhon Kh. Imomnazarov

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Acad. Lavrentjev av, 6, D. Sc, leading researcher of lab mathematical problems of geophysics, tel. (383)330-83-52, e-mail: imom@omzg.sccc.ru

Information on the probable impact structures on the territory of the Novosibirsk region of Pleistocene-Holocene age is given. All objects allocated on the basis of data remote sensing, topographic maps, geological information and results of field studies.

Key words: impact patterns, astrobleme-like, topographic maps, small deep lakes, Novosibirsk region.

Одним из способов оценки частоты падений космических тел является изучение статистики уже произошедших событий в геологическом прошлом Земли [1-3], для чего были созданы специализированные каталоги импактных структур [4-7]. На сегодняшний день известно 188 структур, импактное происхождение которых признано научным сообществом [4], но если включить в рассмотрение вероятные и предполагаемые импактные кратеры, то число структур возрастет более чем в 5 раз [8]. Поскольку процесс поиска импактных кратеров на поверхности Земли до сих пор продолжается (по различным оценкам общее число кратеров на континентах не стертых эрозией и возможных для обнаружения имеющимися методами может составлять от 1500 до 3000), точность оценок частоты падений на сегодняшний день недостаточна. Особенно важно изучение структур плейстоцен-голоценового возраста, поскольку каждая новая находка существенно меняет оценку частоты падений космических тел на Землю на современном этапе ее геологической истории.

Доказательство импактного генезиса каждой структуры является трудоемким и долгим процессом и зачастую занимает несколько десятков лет, но для получения статуса вероятной импактной структуры требуется более ограниченный набор данных - круглая форма, наличие краевого вала, наличие/отсутствие карстующихся пород в окрестностях кратера. Такие сведения можно получить с помощью одного из картографических сервисов (SASPlanet, Google Earth) и геологических карт [9,10]. Поскольку изучаемые объекты имеют, как правило, небольшой размер (первые сотни метров), масштабы карт недостаточно подробны для получения исчерпывающей информации о рельефе (глубина котловины, углы и профиль склонов), и для получения дополнительной информации необходимы полевые исследования.

К перспективным районам для поиска вероятных импактных структур голоцен-плейстоценового возраста относится и Новосибирская область.

Основной причиной этому является отсутствие молодых горных систем, относительно слабая транспортная доступность и недостаточная геологическая изученность ряда территорий. В силу значительного количества осадков и малой испаряемости большинство замкнутых котловин Новосибирской области занято озерами. Некоторые из них отличаются значительными глубинами (10 м и более) при поперечнике 100-500 м. Озера с такими морфологическими характеристиками в Новосибирской области встречаются редко, поэтому мы назвали их малыми глубоководными озерами. Помимо особенных морфологических характеристик, подобные озера могут отличаться большой прозрачностью и химическим составом воды, с ними связаны произведения устного народного творчества [11].

Помимо значительной глубины, как правило, подобные озера расположены в замкнутых котловинах, имеют выраженную внутреннюю часть краевого вала, причем перепад высот между уровнем озера и верхней части краевого вала может превышать 5 м. В работе [12] предлагается называть подобные котловины астроблемовидными. Астроблемовидные котловины выявлены и на территории Западной Сибири известным болотоведом С.В. Васильевым, который объяснял их происхождение грязевым вулканизмом [13]. Помимо рекреационной и хозяйственной ценности подобные озера представляют и большой научный интерес, что обусловлено вопросами генезиса и возраста озер (приблизительно – плейстоцен-голоцен). Среди возможных причин образования подобных озер (карст, суффозия, пинго, грязевой вулканизм, импакт) в первую очередь рассмотрим импактную гипотезу.

Астроблемовидные озера Новосибирской области до настоящего времени специально не изучались. Чтобы их выявить мы использовали указанные выше морфологические критерии, доступные топографические карты (SasPlanet) и геологическую информацию [9,10]. В результате работы нами выявлено 8 астроблемовидных озер в восточной части Новосибирской области (рисунок). Размеры озерных котловин (D) и перепад высот между уровнем озера и верхней точки вала определили с помощью топографических карт SASPlanet.

Максимальную глубину котловины (H_0) определяли как сумму максимальной глубины озера (H_e) и перепада высот между зеркалом озера и кромкой вала (определяли по топографическим картам или при с помощью GPS). Максимальную глубину озер (H_e) определяли батиметрической съемкой. При съемках использовали эхолот Humminbird 767 и GPS, точность определения глубины составляла 0.1 м, а координат – 5-6 м. Результаты исследований представлены в таблице. Подробные батиметрические карты озер можно найти на веб-сайте “Батиметрия естественных озер России” [14].

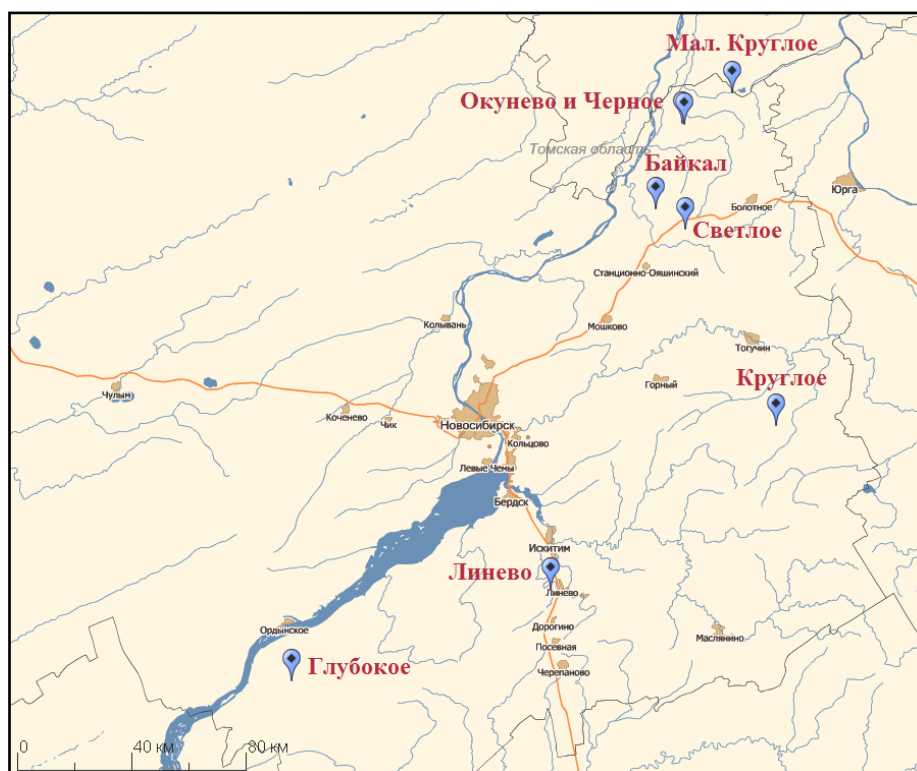


Рис. Местоположение астроблемовидных котловин
восточной части Новосибирской области

Таблица

Координаты и морфологические характеристики малых глубоководных озер
Новосибирской области

Название	Район, село	Коорд.	H_0 , м	H_b , м (сотрудники, проводившие измерения)	D , м
Глубокое	Сузунский, с. Ершово	54.1722 81.9179	16-23	11 (Амелин, Имомназаров)	500-600
Байкал	Болотнинский, с. Байкал	55.642 83.879	12-15	6.8*(Лужецкий, Амелин)	150-200
Черное	Болотнинский, с. Козловка	55.8985 84.0331	>10?	> 4 ?	550-600
Окунево	Болотнинский, с. Козловка	55.902 84.020	>25	19.7 (Лужецкий)	400
Круглое	Тогучинский, с. Пятилетка	54.9734 84.5237	~25	12 (Амелин, Лужецкий)	750x500
Малое Круглое	Болотнинский, с. Кунчурук	55.9927 84.2889	>10	?	700x500
Линево	Искитимский, п. Линево	54.4597 83.3098	15-17	12 (Амелин, Лужецкий)	800-900
Светлое	Болотнинский, с. Таганай	55.5772 84.0388	15-20	9 (Амелин, Лужецкий)	600x350
Данилово	Кыштовский, с. Малокрасноярка	56.4266 75.8383	22-25	17.3 (Амелин, Лужецкий)	1000x600

* - 40-50 лет назад озеро Байкал было значительно глубже [15]. При зондировании металлическим шупом толщина ила у берегов превышала 1-1.5 м.

В заключение отметим, что необходимо продолжить изучение малых глубоководных озер Новосибирской области с привлечение более широкого круга специалистов (минералогов, геологов-четвертичников, озероведов, палеоботаников, почвоведов и др.). Наиболее важным представляется определение возраста озер, для чего требуется изучение донных отложений, а также поиска осколков твердых пород основания и метеоритного вещества в поверхностных слоях краевых валов. Изучение астроблемовидных озер Новосибирской области имеет и практическое значение, поскольку позволит полнее использовать рекреационные ресурсы региона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Shoemaker E. M. Asteroid and comet bombardment of the Earth // Ann. Rev. Earth and Planet. Sci. 1983. N. 11. - P. 461–494. [Electron. resource]. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1983AREPS..11..461S>
2. Grieve R. A. F., Shoemaker E. M. The record of past impacts on Earth // Hazards due to comets and asteroids / Ed. by T. Gehrels. Tucson: The Univ. of Arizona Press. 1994. - P. 417–462.
3. Bland P. A., Artemieva N. A. The rate of small impacts on Earth // Meteoritics and Planetary Science. 2006. V. 41, N 4. - P. 607–631. [Electron. resource]. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1945-5100.2006.tb00485.x/pdf>
4. Spray D. Earth impact Database. 2016. [Electron. resource]. <http://www.passc.net/EarthImpactDatabase>
5. Moilanen J. Impact structures of the world. 2012. [Electron. resource]. <http://www.somerikko.net/impacts/database.php>
6. Rajmon D. Impact database. 2010. [Electron. resource] <http://impacts.rajmon.cz/index.html>
7. Ляпидевская З.А., Гусяков В.К., Амелин И.И. Экспертная база данных по импактным структурам Земли / Expert Database on Earth Impact Structures (EDEIS). 2016. [Electron. resource]. <http://tsun.sccc.ru/nh/edeis.html>
8. Амелин И.И., Гусяков В.К., Ляпидевская З.А. Методика оценки частоты импактных событий // Проблемы информатики. 2013. № 4. - С. 21-35.
9. OneGeology. Providing geoscience data globally [Electron. resource]. [www.onegeology](http://www.onegeology.org)
10. Геологический портал GeoKniga [Electron. resource]. www.geokniga.org
11. Чернобай Л.П. Гидрография и водные ресурсы Новосибирской области. Изд-во НГТУ, Новосибирск, 2013. 556 с.
12. Жидков М. П., Бронгулеев В. Вад., Макаренко А. Г. Астроблемовидные котловины – загадка Московского региона// Природа. Естественнонаучный журнал РАН. - М.: Наука. 2010. № 8. - С. 52-61
13. Васильев С.В. Лесные и болотные ландшафты Западной Сибири. Томск. НТЛ. 2007. 276 с.
14. Интернет-источник Батиметрия естественных озер России. [Electron. resource]. <http://lakemaps.org/ru/atlas-russia-novosibirsk.asp>
15. Муниципальная власть. Байкал держат женщины // Ведомости законодательного собрания Новосибирской области, 2005, №745.

© И. И. Амелин, В. К. Гусяков, З. А. Ляпидевская, Х. Х. Имомназаров, 2016

СПЕКТРАЛЬНО-ТЕКСТУРНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Сергей Александрович Рылов

Институт вычислительных технологий СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, ведущий специалист, тел. (383)334-91-55, e-mail: RylovS@mail.ru

Павел Владимирович Мельников

Институт вычислительных технологий СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, ведущий специалист, тел. (383)334-91-55, e-mail: pvm96@yandex.ru

Игорь Алексеевич Пестунов

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

Предложен метод спектрально-текстурной классификации гиперспектральных изображений высокого пространственного разрешения. Приводятся результаты экспериментов с модельными и реальными изображениями, подтверждающие эффективность предложенного метода.

Ключевые слова: гиперспектральные изображения, высокое пространственное разрешение, спектрально-текстурные признаки, классификация.

SPETRAL-TEXTURAL CLASSIFICATION OF HYPERSPECTRAL IMAGES WITH HIGH SPATIAL RESOLUTION

Sergey A. Rylov

Institute of Computational Technologies SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 Acad. Lavrentjev ave., leading specialist, tel. (383)334-91-55, e-mail: RylovS@mail.ru

Pavel V. Melnikov

Institute of Computational Technologies SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 Acad. Lavrentjev ave., leading specialist, tel. (383)334-91-55, e-mail: pvm96@yandex.ru

Igor A. Pestunov

Institute of Computational Technologies SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 Acad. Lavrentjev ave., head of Data Processing Laboratory, tel. (383)334-91-55, e-mail: pestunov@ict.nsc.ru

A method of spectral-textural classification of hyperspectral images with high spatial resolution is proposed. Experiments on models and real-world data are described proving the effectiveness of the method.

Key words: hyperspectral images, high spatial resolution, spatial and texture features, classification.

В последние годы в области аэрокосмического дистанционного зондирования Земли наблюдается активное внедрение гиперспектральных систем, обеспечивающих съемку в видимом и инфракрасном диапазонах спектра [1]. Поэтому в настоящее время появились потенциальные возможности использования высокоинформативных гиперспектральных изображений (ГСИ) для решения широкого круга научных и практических задач. Однако существенным сдерживающим фактором для реализации этих возможностей является отсутствие приемлемого инструментария для их автоматизированного анализа.

В работе [2] предложены схема и методы классификации ГСИ, для которых текстурные характеристики не несут существенной информации об объектах сцены и поэтому не учитываются при обработке. Но при классификации изображений высокого пространственного разрешения (4 м и лучше) в текстуре зачастую заключена основная информации об объектах сцены, вследствие чего игнорировать ее нельзя.

К настоящему времени известен целый ряд эффективных методов формирования текстурных признаков для полутонных изображений [3], но проблема спектрально-текстурной классификации мульти- и гиперспектральных изображений до сих пор остается открытой [4-6].

В докладе предлагается метод классификации гиперспектральных изображений высокого пространственного разрешения, учитывающий как спектральные, так и текстурные их характеристики. Эффективность предлагаемого метода демонстрируется на модельных и реальных изображениях.

Краткое описание метода. Применительно к мульти- и гиперспектральным изображениям, текстуру можно интерпретировать, как характер распределения векторов спектральных яркостей по полю изображения объекта, обусловленный взаимным закономерным расположением неоднородных составляющих объект элементов. Если произвести кластеризацию пикселей текстурного изображения только по спектральным признакам, ее результат будет представлять чрезмерно раздробленную картину. Но для текстур одного и того же типа процентное содержание пикселей из разных кластеров примерно одинаково, а для разных типов текстур, как правило, отличается. Эта закономерность справедлива для большинства текстур, соответствующих естественным объектам природного происхождения (например, лесным, болотным, тундровым и другим природным ландшафтам). Такой подход успешно применялся в работе [7] для автоматической сегментации мультиспектральных изображений.

Предлагаемый метод классификации гиперспектральных изображений высокого пространственного разрешения, основанный на использовании этого подхода, включает пять этапов.

Большое число каналов и высокое спектральное разрешение ГСИ приводят к значительной информационной избыточности. Поэтому на первом этапе производится выделение информативного набора спектральных признаков. Для

этих целей используется метод главных компонент (МГК) или его модификации (блочный МГК и метод минимизации шумовых помех), позволяющие на порядок сокращать число спектральных признаков без существенного снижения качества классификации [2].

На втором этапе производится сегментация исходного ГСИ по выделенному набору информативных спектральных признаков с помощью ансамблевого алгоритма кластеризации ЕССА [8]. Этот алгоритм обеспечивает выделение кластеров различной формы, размера и плотности. Кроме того, алгоритм ЕССА является сеточным и характеризуется высоким быстродействием.

На третьем этапе по полученной картосхеме вычисляются спектрально-текстурные признаки, описывающие мультиспектральную текстуру. Процедура вычисления признаков заключается в следующем. Предположим, что на втором этапе выделено K кластеров и построена соответствующая картосхема. Она разбивается на непересекающиеся квадратные фрагменты размером $h \times h$ пикселей (на краях изображения возможно появление прямоугольных фрагментов): $\{f_1, \dots, f_M\}$. Каждому фрагменту f_i сопоставляется вектор спектральных частот $z_i = (z_i^1, \dots, z_i^K)$, где $z_i^j = N_i^j / h^2$, где N_i^j – число элементов фрагмента f_i , относящихся к кластеру с номером j , $j = 1, \dots, K$.

Векторы спектральных частот $z_1, \dots, z_M$ описывают многомерную гистограмму фрагментов изображения. При этом их размерность равна числу кластеров, полученных при кластеризации по спектральным признакам, что на порядки меньше числа элементов, необходимых для описания многомерной гистограммы исходного изображения.

Расстояние между двумя векторами спектральных частот z_i и z_j задается с помощью манхэттенской метрики: $\mu(x, y) = 1/2 \sum_{i=1}^K |x_i - y_i|$. Эта метрика часто используется для сравнения гистограмм [5, 6].

На четвертом этапе алгоритма выполняется классификация фрагментов изображения посредством отнесения их к ближайшим представителям классов. Обучающие представители для классов задаются пользователем в виде набора пикселей с указанием класса, к которому они принадлежат. Для окрестности каждого помеченного пикселя вычисляется соответствующий вектор спектральных частот. Таким образом формируется список представителей классов.

Пофрагментная, а не попиксельная классификация обеспечивает высокую скорость обработки. Однако получаемые при этом классы характеризуются грубыми границами. Поэтому на заключительном этапе обработки выполняется попиксельная коррекция границ классов. Для этого рассматриваются все граничные фрагменты. Каждый пиксель, попадающий на границу, относится к тому классу, к которому ближе вектор спектральных частот фрагмента с центром в этом пикселе. При этом могут появиться новые граничные пиксели.

Процесс продолжается до тех пор, пока все граничные пиксели не будут рассмотрены.

Результаты экспериментальных исследований. Обработка данных проводилась на ПЭВМ с процессором Intel Core i7 (4 ядра, 3.3 ГГц). Во всех экспериментах при работе алгоритма ЕССА использовался ансамбль из восьми элементов.

На рис. 1 представлен пример классификации модельного RGB-изображения размером 622×622 пикселей, составленного из пяти цветных текстур. При этом две текстуры (верхняя левая и верхняя правая) имеют одинаковый средний цвет, что делает невозможным их корректное разделение без использования текстурных характеристик. Для каждого из классов задавалось по одной обучающей метке, размер фрагментов – 35×35 . Точность классификации с коррекцией границ составила 99.5 %, а без коррекции – 97.0 %.

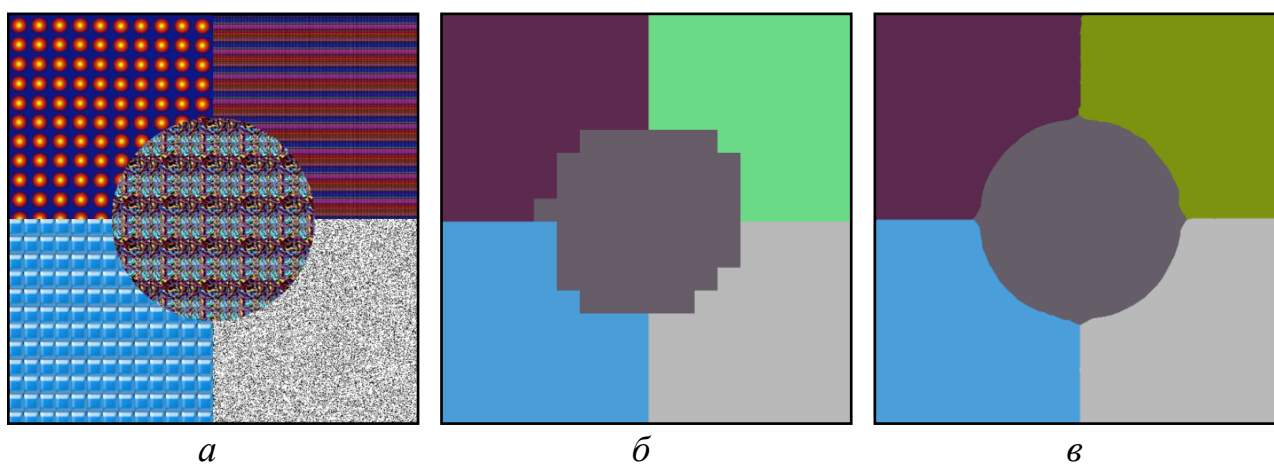


Рис. 1. а – исходное изображение; б, в – результаты классификации без коррекции границ и с коррекцией соответственно

На рис. 2, а представлен RGB-композит изображения, полученного августе 2011 г. гиперспектральным сенсором, разработанным НПО «Лептон» [9, 10]. Изображение содержит 87 спектральных каналов в диапазоне 404-1016 нм, пространственное разрешение – около 1 м, размер – 1000×350 пикселей. На изображении представлена тестовая территория Савватьевского лесничества (Тверская область). Для этого изображения имеется эталонная картосхема, полученная по результатам лесотаксационных исследований (рис. 2, б). Картосхема описывает видовой и возрастной составы лесных выделов. С момента создания картосхемы до момента съемки прошло много лет, поэтому специалистами была выполнена модификация картосхемы на основе визуального анализа изображения (рис. 2, в). Из оригинальной картосхемы были удалены (отнесены к классу-фону) сомнительные пиксели на границах классов.

Для классификации изображения были взяты первые четыре признака, выделенные МГК. Для семи классов на картосхеме было задано 25 обучающих

меток. На рис. 2, г представлены результаты спектрально-текстурной классификации с нанесенными обучающими метками при $h=35$.

Точность классификации составила 98.47% для модифицированной и 85.61% – для оригинальной картосхемы соответственно. График зависимости точности классификации от размера фрагмента h представлен на рис. 3. Время работы алгоритма кластеризации ЕССА составляет 8 с, дальнейшая спектрально-текстурная классификация занимает 0.5 с (при $h=35$).

Для демонстрации преимуществ гиперспектральных данных перед мультиспектральными на основе рассматриваемого изображения было создано синтезированное мультиспектральное изображение с восемью спектральными признаками. Значения спектральных яркостей вычислялись путем усреднения значений по всем каналам гиперспектральных данных, попадающим в диапазоны длин волн, которые соответствуют каналам сенсора WorldView-2.

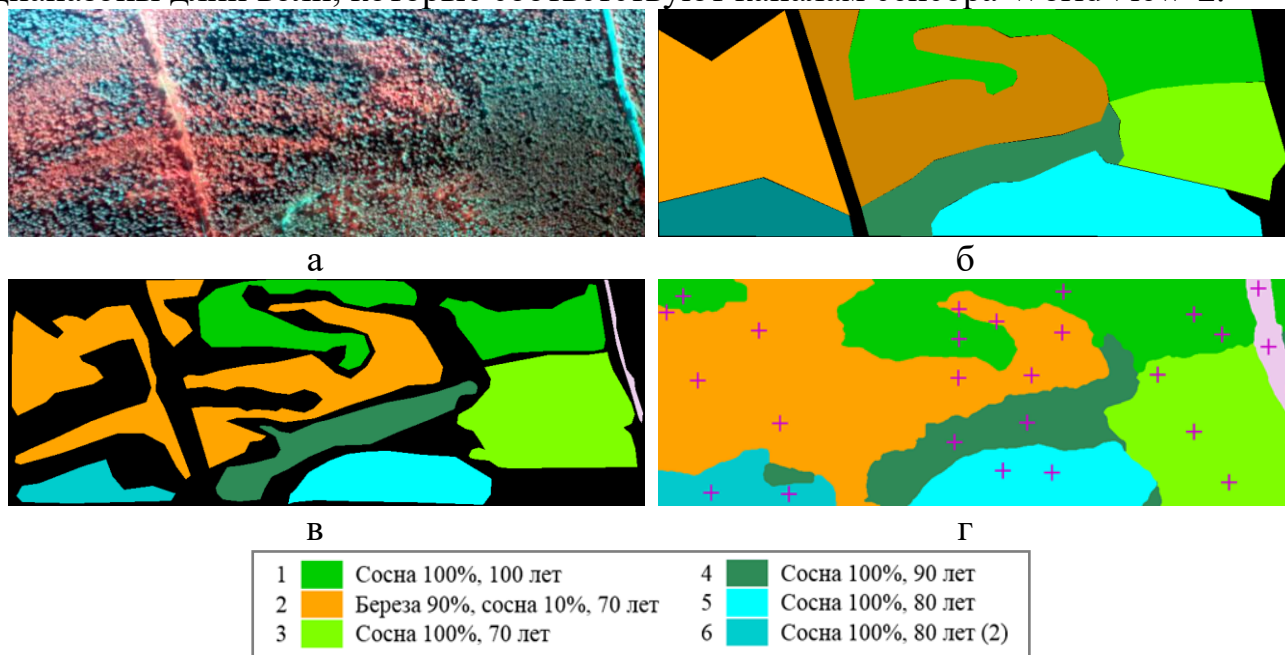


Рис. 2. а – RGB-композит исходного изображения (каналы 82, 19, 10); б, в – оригинальная и модифицированная картосхемы соответственно, г – результаты спектрально-текстурной классификации с нанесенными обучающими метками

Для сравнительного анализа использовалась упрощенная модификация предложенного метода (вместо векторов спектральных частот использовались вектора усредненных по фрагментам значений спектральных яркостей в различных каналах). При этом размерность векторов равнялась числу выбранных спектральных каналов, а предварительная кластеризация не требовалась. В таблице показана точность классификации модифицированным алгоритмом в зависимости от размера фрагмента для различного числа главных компонент, а также для синтезированного восьмиканального изображения VW-2 и изображения СИ-4, сформированного из четырех синтезированных каналов (соответствующих синему, зеленому, красному и ближнему инфракрасному диапазонам спектра).

Анализ полученных результатов показывает, что учет спектрально-текстурных признаков обеспечивает лучшие результаты классификации, по сравнению с усредненными спектральными характеристиками. Использование главных компонент гиперспектрального изображения обеспечивает более высокую точность по сравнению с мультиспектральным набором каналов из восьми каналов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-07-00249-а) и Российского научного фонда (грант № 14-14-00453).

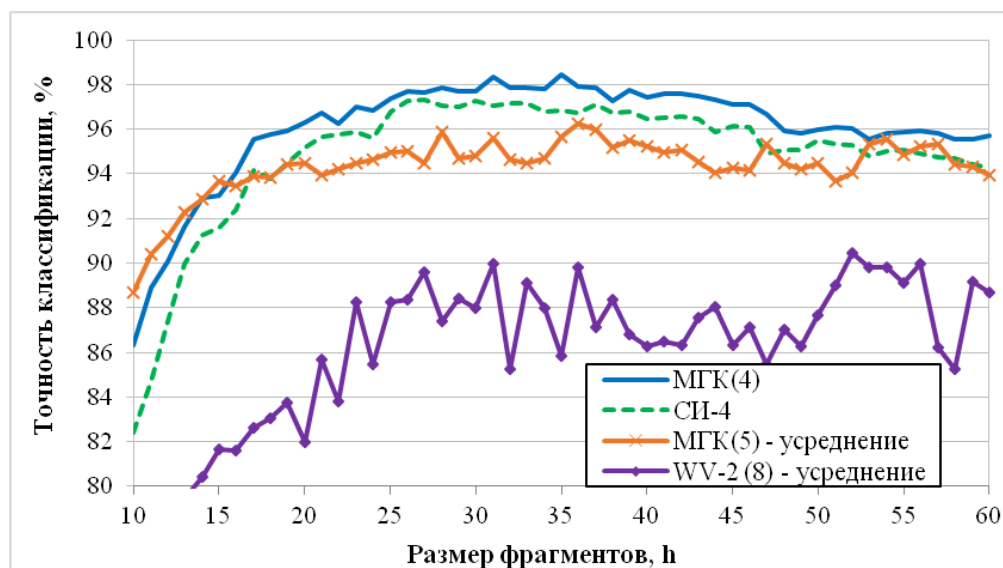


Рис. 3. Зависимость точности классификации от размера фрагмента для разных наборов признаков

Таблица

Зависимость точности классификации от размера фрагмента h

h	Точность классификации (%)		Точность классификации по средним значениям спектральных признаков (%)								
	МГК (4)	СИ-4	МГК (2)	МГК (3)	МГК (4)	МГК (5)	МГК (6)	МГК (8)	МГК (10)	СИ-4	VW-2 (8)
10	86.4	82.4	67.7	81.9	85.9	88.7	88.3	86.7	86.0	67.9	74.1
20	96.3	95.2	74.0	91.6	94.2	94.5	94.5	94.2	94.3	79.0	82.0
25	97.4	96.8	75.4	91.3	94.4	95.0	94.7	92.8	92.7	80.8	88.3
26	97.7	97.3	76.7	91.5	94.3	95.0	94.5	94.0	94.2	83.7	88.3
27	97.6	97.3	78.4	91.0	94.9	94.5	94.8	93.8	93.4	83.0	89.6
28	97.9	97.0	76.4	91.4	95.7	95.9	95.4	93.8	92.7	83.5	87.4
29	97.7	97.0	76.0	91.0	95.3	94.7	95.2	93.2	92.9	86.1	88.4
30	97.7	97.3	76.1	90.9	95.2	94.8	94.2	91.9	92.5	82.1	88.0
31	98.4	97.0	75.4	93.3	94.6	95.6	95.1	93.4	93.4	85.5	90.0
32	97.9	97.2	75.2	91.5	94.7	94.6	94.4	93.3	93.4	81.7	85.3
33	97.9	97.2	73.5	91.3	95.5	94.5	94.4	92.8	93.2	84.2	89.1
34	97.8	96.8	75.9	91.1	95.6	94.7	93.5	91.9	92.2	83.6	88.0

35	98.5	96.8	75.3	92.4	95.2	95.7	93.8	93.3	93.3	81.7	85.8
36	97.9	96.7	77.3	92.7	94.9	96.3	95.0	92.8	93.0	85.6	89.8
37	97.9	97.1	80.1	93.2	95.4	96.0	95.1	94.7	94.1	80.5	87.1
38	97.3	96.7	77.6	91.8	94.8	95.2	94.6	93.5	93.9	82.3	88.4
39	97.8	96.8	80.2	91.2	95.0	95.5	94.4	94.8	93.7	81.9	86.8
40	97.5	96.5	80.1	90.8	94.1	95.2	95.7	94.6	94.8	84.0	86.3
45	97.1	96.2	81.2	89.4	93.5	94.3	93.4	92.8	92.1	81.9	86.4
52	96.0	95.3	75.6	91.2	94.2	94.1	95.2	93.3	92.9	84.1	90.5
55	95.9	95.1	84.0	90.5	93.9	94.9	95.2	93.8	92.9	77.0	89.1
60	95.7	94.3	77.3	90.6	92.4	94.0	94.2	93.0	92.5	81.0	88.7
Max	98.5	97.3	84.0	93.3	95.7	96.3	95.7	94.8	94.8	86.1	90.5

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бондур В.Г. Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Исследование Земли из космоса. – 2014. – № 1. С. 4-16.
2. Борзов С.М., Федотов А.М., Мельников П.В., Пестунов И.А., Потатуркин О.И. Комплексная обработка гиперспектральных изображений на основе спектральной и пространственной информации // Вычислительные технологии. – 2016. – Т. 21. – № 1. – С. 25-39.
3. Petrou M., Gacia Sevilla P. Image processing: Dealing with texture. – 2006. 618 p.
4. Yuan J., Wang D. L., Li R. Remote sensing image segmentation by combining spectral and texture features // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, – 2014. – Vol. 52. – N. 1. – P. 16-24.
5. Mignotte M. A de-texturing and spatially constrained K-means approach for image segmentation // Pattern Recognition Letters. – 2011. – Vol. 32. – N. 2. – P. 359-367.
6. Nammalwar P., Ghita O., Whelan P. F. Integration of feature distributions for colour texture segmentation // Pattern Recognition. – 2004. – Vol. 1. – P. 716-719.
7. Пестунов И.А., Рылов С.А. Алгоритмы спектрально-текстурной сегментации спутниковых изображений высокого пространственного разрешения // Вестник КемГУ. – 2012. – № 4/2 (52). – С. 104-110.
8. 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.
9. Kozoderov V.V., Kondranin T.V., Dmitriev E.V., Sokolov A.A. Retrieval of forest stand attributes using optical airborne remote sensing data // Optics Express. – 2014. – Vol. 22. – N 13. – P. 15410-15423.
10. Kozoderov V.V., Kondranin T.V., Dmitriev E.V., Kamentsev V.P. Bayesian classifier applications of airborne hyperspectral imagery processing for forested areas // Advances in Space Research. – 2015. – Vol. 55. – N 11. – P. 2657-2667.

© С. А. Рылов, П. В. Мельников, И. А. Пестунов, 2016

СОКРАЩЕНИЕ РАЗМЕРНОСТИ ПРОСТРАНСТВА СПЕКТРАЛЬНЫХ ПРИЗНАКОВ ДАННЫХ ДЗЗ ВНУТРИ КЛАСТЕРОВ

Валерия Сергеевна Сидорова

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, научный сотрудник лаборатории обработки изображений, тел. (383)330-73-32, e-mail: svvs@ooi.sccc.ru

Рассматривается возможность сокращения размерности векторного пространства спектральных признаков внутри хорошо изолированных кластеров, полученных иерархическим гистограммным алгоритмом данных ДЗЗ с заданием предельной отделимости кластеров.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, кластеризация, многомерная гистограмма, кластерная разделимость, собственное пространство векторов.

REDUCING THE SPECTRAL FEATURES SPACE DIMENSION FOR REMOTE SENSING DATA INSIDE THE CLUSTERS

Valeria S. Sidorova

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Lavrentjev avenu, 6, scientific researcher, laboratory of Image Processing, tel. (383)330-73-32, e-mail: svvs@ooi.sccc.ru

Reducing the dimension of the vector space inside a well-isolated clusters with the detail choice for the spectral features clustering is considered. This is used in the hierarchical divisible histogram algorithm to cluster separability, not worse given. The application of the algorithm for the territory mapping of industrial waste pollution is illustrated on spectral features of the Earth satellite.

Key words: remote sensing, image processing, clustering, multidimensional histogram, cluster separability, own space vectors.

В настоящей работе рассматривается вопрос о размерности собственного пространства для каждого полученного кластера методом иерархического гистограммного алгоритма [1]. Ранее [2] было предложено сокращать размерность перед использованием алгоритма кластеризации. Пример: на рис. 1 представлено изображение района Улан-Удэ с целью выделения области загрязнения территории. Это семиспектральное изображение Бурятии со спутника “Landsat-8”, район Улан-Удэ. Исходный файл предоставлен сибирским центром ФГПУ НИЦ “ПЛАНЕТА”. Построение ковариационной матрицы спектральных данных для всего изображения и ее диагонализация показало, что можно рассматривать три измерения без существенной потери информации. Сокращение размерности приводит к экономии компьютерного времени. К преобразованным данным был применен делимый иерархический гистограммный алгоритм кластеризации с порогом отделимости кластера $d = 0,015$. Затем проведена глобальная сегментация, и полученная карта

унимодальных кластеров представлена на рис.2. Кластеры с фиолетовыми оттенками соответствуют загрязненным территориям, рассчитаны их площади, координаты, модальные вектора и др.

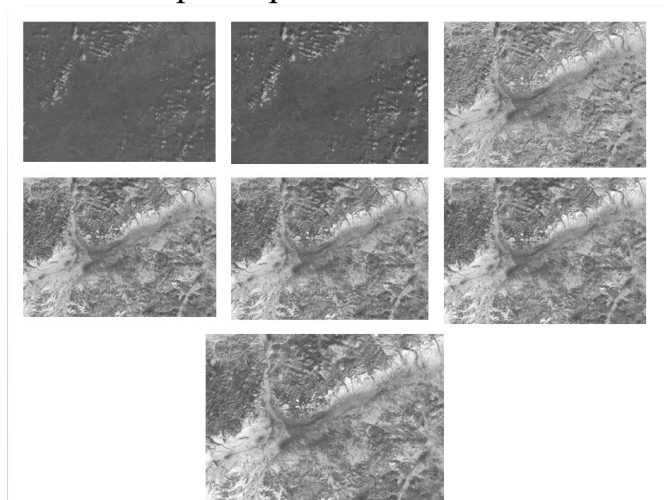


Рис. 1. Семиспектральное изображение со спутника “Landsat-8”, район Улан-Удэ

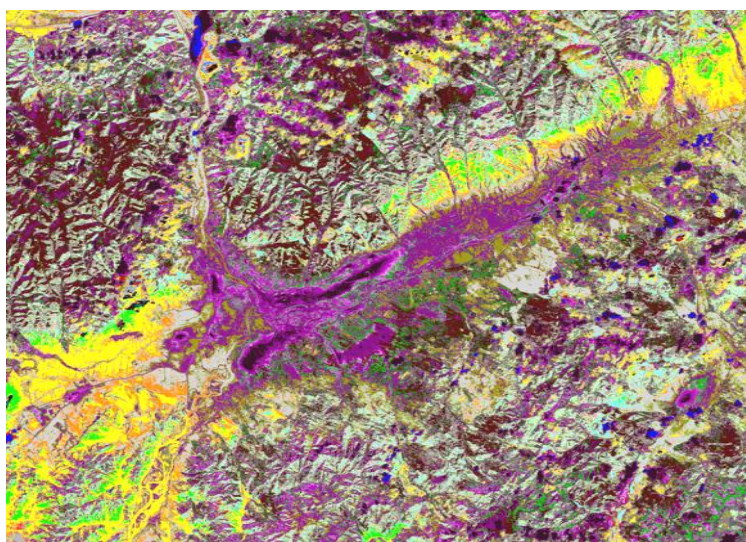


Рис. 2. Кластерная карта, полученная делимым иерархическим гистограммным алгоритмом. 15 этапов иерархии. $d=0,015$. 54 кластера (включая маленькие вплоть до 1 пикселя). Загрязнение: лиловые и темно-зеленые оттенки

В работе [2] алгоритм отбора наиболее информативных признаков описан достаточно подробно. Те же идеи используются и в новом алгоритме, только теперь рассматривается не все пространство векторов, а лишь часть его, относящаяся к каждому кластеру. Рассматриваемый алгоритм иерархический, и каждый кластер делится на подкластеры на каждом этапе иерархии в соответствии с изменением детальности представления данных, размерность каждого подкластера может измениться. Рассмотрим более подробно. Внутри каждого кластера применяется быстрый гистограммный кластерный алгоритм

Нарендры [3]. Этот алгоритм позволяет находить кластеры произвольной формы и размеров. Он не требует задания числа кластеров и вообще каких-либо предварительных предположений о форме распределений. Алгоритм находит скопления векторов, анализируя многомерную гистограмму и разделяя данные по унимодальным кластерам. Однако в этом алгоритме заранее определяется детальность кластеризации предварительным квантованием векторного пространства признаков. То есть, предварительно вектора группируются более простым правилом. Алгоритм Нарендры был реализован и описан в [3-7]. Детальность кластеризации в алгоритме определялась предварительным отсечением младших битов в каждом байте, соответствующем спектральному направлению. Предложенный иерархический алгоритм [1] предлагает автоматизировать процесс выбора детальности, учитывая разделимость кластеров, причем для разных областей данных будет получена свой порог наибольшей детальности, обеспечивающей заданную отделимость кластеров d . Для оценки отделимости используется ранее предложенная автором мера [7]. Ценность этих мер в том, что они позволяют сравнивать статистически распределения с тесно расположенными унимодальными кластерами, когда на их границах много общих векторов. Эти меры удовлетворяют условиям мер [6]. Кроме того, эти меры легко вычисляются, так как сравнивают скалярные значения гистограммы в центре и на границах кластеров.

Квантование пространства признаков может производиться по разным правилам. У Нарендры оно достигается отсечением младших битов в каждом спектральном канале. Каждое отсечение уменьшает число уровней квантования вдвое. В работе [4] был предложен другой способ, более плавный, но по-прежнему в каждом направлении число уровней квантования сохранялось одинаковым. Однако, в общем случае, данные вытянуты вдоль какого-то направления, и правило квантования, обеспечивающее наименьшую потерю информации, требует различного подхода в различных направлениях, а именно: квантование должно сохранять ячейку квантования в форме гиперкуба (а не гиперпараллелепипеда). Это условие будет выполнено, если число уровней квантования вдоль каждой оси собственного пространства пропорционально квадратному корню из соответствующего собственного числа. (Собственное число характеризует разброс данных вдоль оси), а именно:

$$\frac{N_{e1}}{S_{e1}} = \frac{N_{e2}}{S_{e2}} = K = \frac{N_{ek}}{S_{ek}}, \quad (1)$$

где N_{e1} , N_{e2} , ..., N_{ek} числа уровней квантования вдоль для соответствующих собственных векторов по k ортонормированным осям, а S_{e1}^2 , S_{e2}^2 , ..., S_{ek}^2 собственные числа.

Зададим максимальное число уровней квантования в собственном пространстве равным $N_{em}=255$, таково обычное число уровней серого для данных дистанционного зондирования по каждому измерению. Тогда, в соответствии

с пропорциями (1) может быть найдено число уровней квантования и по другим осям собственного пространства. Для задач кластеризации это число должно быть больше или равно 2, иначе эта компонента одинакова для всех векторов и никакой роли в кластеризации не играет. Таким образом, если отношение $S_{em}/S_{ex} < 2$, то соответствующая ось x может не рассматриваться, и мы получаем сокращение размерности пространства признаков.

При решении задачи внутри кластера (построении ковариационной матрицы) используется уже построенная ранее гистограмма признаков в виде определенным образом организованного списка. Рассмотрим пример. Анализируется изображение поверхности Земли со спутника NOAA 17 от 7.04.2003, полный кадр (1328x624) пикселей представлен в пяти спектральных каналах (один в видимой части спектра, остальные в инфракрасной), объем около 4 мегабайт. На рис.3 представлено изображение в одном из каналов. В нижней части снимка формирование вихря, озера; в верхней в основном – тающие снега, тайга Сибири. На рис. 4а кластерная карта без сокращения размерности собственного пространства пяти спектральных признаков. На рис. 4б при сокращении размерности по кластерам.

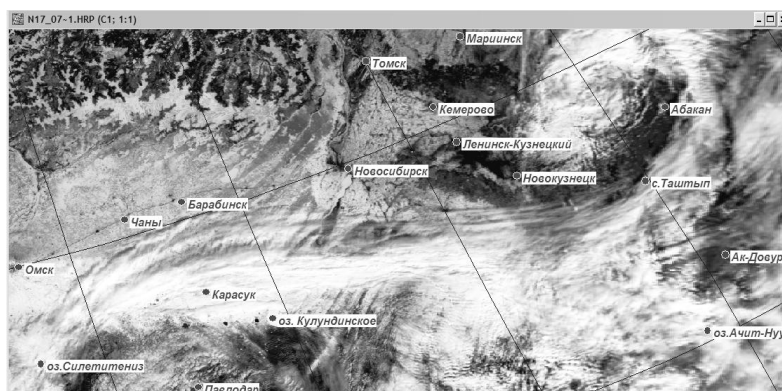


Рис. 3. Исходное изображение в видимой части спектра

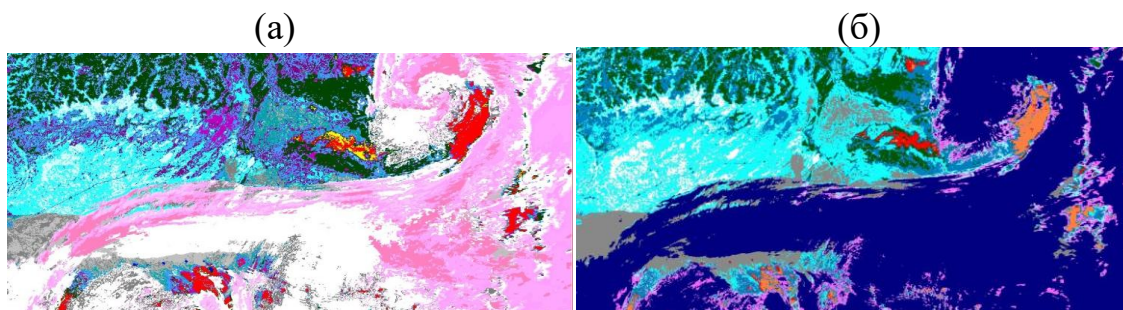


Рис. 4. а) Кластеризация по пяти спектральным признакам иерархическим гистограммным алгоритмом; 4 этапа иерархии; $d=0,1$; получено 22 кластера.

б) Кластеризация иерархическим гистограммным алгоритмом с поиском размерности по кластерам; 4 этапа иерархии; $d=0,1$; получено 10 кластеров

Кластеры с площадью меньше 100 пикселей в обоих случаях отнесены в фоновый. Из-за того, что новое число уровней квантования (детальность) рассчитывается по другому закону: с учетом разброса по соответствующим собственным осям пространства признаков, - унимодальные кластеры, соответствующие облакам при заданной отделимости $d=0,1$, не образовались, они соединились в один ложный темно-синий кластер. Для заданного числа 4 уровней иерархии при анализе размерности по кластерам получилось меньше кластеров. Однако, при задании большей детальности кластеризации, а именно семи этапов иерархии на рис. 5, кластер облаков делится на унимодальные подкластеры. Для большинства подкластеров размерность собственного пространства оказалась равна трем, как и для всех данных в целом, но некоторые подкластеры потребовали пятиспектрального рассмотрения. Таким образом, сокращение размерности произошло более точно, в зависимости от характера области данных. Время вычислений оказалось в три раза меньше, чем для пятиспектрального варианта и составило несколько минут на одноядерном компьютере РК 1.6 ГГц 512 МБ.

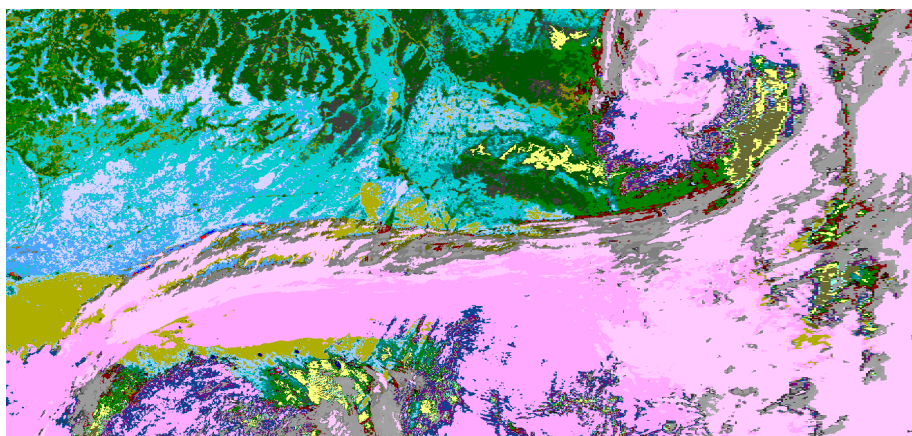


Рис. 5. Кластеризация иерархическим гистограммным алгоритмом с поиском размерности по кластерам; 7 этапов иерархии; задано $d=0,12$; получено 29 кластеров

Работа выполнена частично при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-07-00066) и Программы I.33П фундаментальных исследований Президиума РАН (проект № 0315-2015-0012).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. V.S. Sidorova. Detecting Clusters of Specified Separability for Multispectral Data on Various Hierarchical Levels // Pattern Recognition and Image Analysis. 2014, – Vol. 24, No. 1. – P. 151-155.

2. Сидорова В.С. Детальность кластеризации и сокращение размерности пространства спектральных признаков данных ДЗЗ. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 2. – С. 83–87.
3. Narendra P.M. and Goldberg M. A non-parametric clustering scheme for LANDSAT // Pattern Recognition. – 1977 – 9 – P. 207-215.
4. Сидорова В.С. Кластеризация многоспектральных изображений с помощью анализа многомерной гистограммы // Новосибирск. Сб. Математические и технические проблемы обработки изображений. СО АН СССР. – 1986 –. С. 52-57.
5. Сидорова В.С. Классификация многоспектральных космических изображений поверхности Земли с помощью разделения многомерной гистограммы по унимодальным кластерам // Ж. Вестник КазНУ., сер. географическая. – 2004 –. N 2(19) –. С. 206-210.
6. V. S. Sidorova. Separating of the Multivariate Histogram on the Unimodal Clusters. // Proceedings of the Second IASTED International Conference “Automation Control and Information Technology”. – Novosibirsk. – 2005. – P. 267–274.
7. Сидорова В.С. Оценка качества классификации многоспектральных изображений гистограммным методом // Автометрия. – 2007. – Том 43. – №1. – С. 37- 43.
8. Сидорова В.С. Новый гистограммный алгоритм с автоматическим выбором детальности кластеризации по заданной делимости кластеров // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 2. – С. 149–154/
9. Калиткин Н.Н. Численные методы. Москва. “ Наука ”. 1978. СС. 512.

© В. С. Сидорова, 2016

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ РАЗДЕЛЕНИЯ МАСШТАБОВ ДЛЯ НАПРАВЛЕННОГО МОНИТОРИНГА И ИССЛЕДОВАНИЯ КЛИМАТОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Владимир Викторович Пененко

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, зав. лабораторией, тел. (383)330-61-52, e-mail: penenko@sscc.ru

Представлен новый подход к исследованию природных процессов с использованием методов теории чувствительности математических моделей к вариациям различных факторов в сочетании с методами ортогональной декомпозиции многомерных функциональных полей, участвующих в технологии моделирования.

Ключевые слова: разделение масштабов природных процессов, математическое моделирование, вариационные методы теории чувствительности, ортогональная декомпозиция, прямые и сопряженные задачи.

APPLICATION OF SCALE DECOMPOSITION METHODS FOR TARGETED MONITORING AND STUDIES OF CLIMATE AND ECOLOGICAL PROCESSES

Vladimir V. Penenko

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 pr. Akademika. Lavrentjeva, Professor, Head of laboratory, tel. (383)330-61-52, e-mail: penenko@sscc.ru

A new approach to study the natural processes is presented. It uses variational methods in the sensitivity theory of mathematical models to perturbations of various factors in combination with the methods of orthogonal decomposition of multidimensional functional fields involved in the simulation technology.

Key words: decomposition of scales of natural processes, mathematical modeling, variational methods of adjoint sensitivity, orthogonal decomposition, direct and adjoint problems.

Динамика геофизических и климато-экологических систем является результатом взаимодействия широкого спектра процессов естественного и антропогенного происхождения с различными пространственно-временными масштабами. Получить их адекватное описание с помощью одной модели проблематично, поэтому требуется создавать многофункциональную информационно-вычислительную технологию на основе совместного использования данных мониторинга и математических моделей исследуемых процессов [3, 6-9].

Для конкретизации разрабатываемой нами системы моделирования будем рассматривать объединенные модели гидротермодинамики и химии атмосферы в четырехмерных пространственно-временных областях в атмосфере Земли. Основную часть этого комплекса составляют уравнения с операторами типа конвекции - диффузии - реакции, описывающие процессы переноса и трансформации многокомпонентных функций состояния. С этими уравнениями

связаны, в режиме двухсторонних взаимодействий, уравнения, представляющие процессы переноса и трансформации излучений в системе атмосфера - подстилающая поверхность [9].

К основным объектам системы моделирования относятся также данные мониторинга природно-техногенных процессов средствами контактных и дистанционных измерений наземного и аэрокосмического базирования. Для организации связей между моделями процессов и результатами мониторинга, мы определяем совокупность математических моделей наблюдений, описывающих образы измеряемых величин в терминах функций состояния моделей процессов. В целях усвоения данных наблюдений задаются функционалы, выражающие степень близости между измеряемыми величинами и их образами, рассчитанными с помощью моделей процессов и моделей наблюдений за их реальным поведением.

Следует иметь в виду, что все объекты имеют различного рода неопределенности. Для их оценок с использованием данных наблюдений мы вводим

в уравнения моделей процессов, наряду с функциями источников, новые искомые слагаемые, так называемые функции неопределенностей. Соответственно, в общую систему моделирования вводятся специальные функционалы, выражающие суммарную меру этих неопределенностей.

Чтобы достичь главных целей исследования – то есть обеспечивать решение оптимизационных задач управления качеством природной среды и оценок экологических перспектив и рисков, в систему моделирования вводится совокупность соответствующих целевых функционалов. Их содержание определяется целями исследований с учетом критериев экологической безопасности развития современного общества.

Теоретическую основу рассматриваемого подхода составляют вариационные принципы [6-9]. Они представляют универсальный инструмент для объединения всех мультивариантных и разномасштабных объектов, а именно, математические модели исследуемых процессов, все доступные данные измерений и целевые критерии диагностики и прогнозирования.

Для решения задач прогноза актуальной проблемой является также возможность организации направленного мониторинга исследуемых процессов и использование его результатов в режиме оперативного усвоения данных. Для этого надо создавать глобальную структуру всех объектов, включая математические модели процессов и критерии для прогнозирования ситуаций.

Основная цель стратегии направленного мониторинга состоит в идентификации регионов в пространственно-временной области исследуемых процессов, в которых желательно получать дополнительную информацию наблюдений, чтобы улучшать прогноз изменения состояний системы. Для выделения таких регионов применимы методы разделения масштабов и на их основе количественные методы выделения главных факторов. Значительный вклад в развитие концепции разделения масштабов внесли исследования, представленные в работах отечественных и зарубежных авторов (см [1, 3-5, 10-

12] и имеющиеся там литературные ссылки). В контексте настоящей статьи, главные факторы представляют собой совокупность многомерных ортогональных базисных подпространств, ранжированных в соответствии с заданным критерием их информативности. Такие объекты генерируются на основе пространств различных функциональных полей, участвующих и порождаемых в системе моделирования.

Основные элементы информационно-вычислительной технологии для исследования природных процессов

1. Формулировка основного вариационного принципа для объединения всех моделей исследуемых процессов, доступных результатов их мониторинга, также целевых функционалов прогнозирования и усвоения данных. Согласование всех агрегатов и функциональных пространств в рамках этого принципа.

2. Построение дискретных аналогов вариационного принципа с использованием методов декомпозиции функционалов и методов расщепления операторов моделей, а также функционалов, участвующих в организации методов усвоения данных.

3. Вариационные методы теории чувствительности. Построение на их основе операторов и функций чувствительности. Организация алгоритмов для расчета функций неопределенности.

4. Универсальные алгоритмы ортогональной декомпозиции многомерных пространств функций состояния, сопряженных функций и других количественных объектов и результатов в технологии моделирования.

5. Организация стратегий направленного мониторинга с использованием методов разделения масштабов и вариационных методов чувствительности.

Первые два раздела уже достаточно хорошо отработаны в мире и в нашей стране. Следующие три аспекта активно развиваются и до настоящего времени. Здесь мы представим разрабатываемую нами концепцию разделов 3-5 в общей системе моделирования [7-9,11].

Методы исследования чувствительности

Будем использовать определения функционалов вариационного принципа из разделов 1 и 2. Обозначим анонсированный в них расширенный функционал в дискретном представлении через $\Phi^h(\mathbf{X})$, где индекс h обозначает дискретный аналог, а вектор $\mathbf{X}$ - вектор функциональных аргументов всей системы моделирования. Его компоненты представляют: функции состояния моделей, сопряженные функции, совокупность входных параметров моделей, функции неопределенностей и др. Теоретическую и конструктивную основу методов чувствительности дает определение вариаций, в смысле Гато, этого расширенного функционала:

$$\delta^q \Phi^h(\mathbf{X}) = \left\{ \frac{\partial^q}{\partial \alpha^q} \Phi^h(\mathbf{X} + \alpha \delta \mathbf{X}) \right\} \Big|_{\alpha=0}, \quad q \geq 1, \quad (1)$$

где $\delta \mathbf{X}$ - вектор вариаций функциональных аргументов, α - вещественный параметр, q - порядок вариаций. Все операции в (1) при заданной структуре дискретного аналога вариационного функционала формально реализуются по аналогии с операциями дифференцирования классического анализа.

На основе вариаций (1) первого и второго порядков формируются алгоритмы для реализации необходимых и достаточных условий минимизации функционалов. В частности, из $\delta^1 \Phi^h(\mathbf{X})$ получаются системы основных и сопряженных уравнений; алгоритмы формирования оператора чувствительности и расчета функций чувствительности, а также расчета функций неопределенностей. Это алгоритмы первого порядка с прямыми и сопряженными операторами.

На основе вариаций (1) второго порядка, строятся алгоритмы второго порядка для расчета возмущений перечисленных выше функций. В них используются решения задач, полученных на основе вариаций первого порядка $\delta^1 \Phi^h(\mathbf{X})$. Ключевым элементом здесь является оператор Гессииана.

Универсальный алгоритм ортогональной декомпозиции

Представим совокупность исследуемых полей в виде матриц прямоугольной структуры:

$$\mathbf{A} = \left\{ \boldsymbol{\varphi}_i(\mathbf{x}, t) \equiv \boldsymbol{\varphi}_i(k), i = \overline{1, n}, k \in K \right\}, \quad (2)$$

где $\{\boldsymbol{\varphi}_i(\mathbf{x}, t) \in Q(D_t)\}^h$ – вектор-строка, содержащая набор характеристик исследуемых объектов, определенных в области $(\mathbf{x}, t) \in D_t$, n - число таких векторов, k - мультииндекс для идентификации мультивариантных и многокомпонентных объектов, K - множество значений мультииндексов.

Предполагается, что все элементы векторов-строк $\boldsymbol{\varphi}_i(k)$ с помощью соответствующих положительно определенных диагональных матриц приводятся к одной размерности и масштабируются таким образом, чтобы выполнялись условия нормировки $(\boldsymbol{\varphi}_i, \boldsymbol{\varphi}_i) = 1$, где скалярное произведение определяет энергетическую норму в Евклидовом пространстве или в дискретном аналоге Гильбертова пространства H на D_t^h .

Для построенных таким образом матриц используется техника сингулярных разложений [2]. Основные элементы этого алгоритма:

$$\mathbf{A} \mathbf{A}^T \mathbf{v} = \lambda \mathbf{v}; \quad \mathbf{u} = (1/\sigma) \mathbf{A}^T \mathbf{v}; \quad \lambda = \sigma^2,$$

где $\mathbf{v}$ - левые, а $\mathbf{u}$ - правые сингулярные векторы матрицы $\mathbf{A}$; $\mathbf{A} \mathbf{A}^T$ - $n \times n$

матрица. Векторы $\mathbf{u}$ имеют ту же структуру, что и векторы $\boldsymbol{\varphi}_i(k)$ в матрице (2). Наборы векторов $\{\mathbf{u}\}$ и $\{\mathbf{v}\}$ упорядочены по мере убывания собственных значений λ .

По существу $\{\mathbf{u}\}$ и $\{\mathbf{v}\}$ представляют собой две системы ортогональных базисов в пространстве исходных функций. Параметры λ имеют смысл меры информативности этих ортогональных базисов по отношению к анализируемому пространству векторов $\{\boldsymbol{\varphi}_i(k), i = \overline{1, n}, k \in K\}$.

В качестве анализируемых векторных пространств могут использоваться все поля функций, участвующие в системе моделирования. Построенные таким образом базисные пространства имеют широкую область применений для диагностических и практических задач. Для организации стратегий направленного мониторинга обычно используется их лидирующая часть, отвечающая большим по величине собственным значениям. Некоторые алгоритмы для этих целей представлены в работах [10,11].

Работа выполняется при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН I.33П и гранта РФФИ №14-01-00125-а.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Багров Н.А. Аналитическое представление последовательности метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих//Труды ЦИП. -1959. - Вып.74. - С. 3-24.
2. Годунов С.К., Антонов А.Г., Кирилюк О.П., Костин В.Н. Гарантированная точность решения систем линейных уравнений в евклидовых пространствах. – Новосибирск: Наука. Сиб.отд-ние.-1988.- 456 с.
3. Марчук Г.И. Сопряженные уравнения и анализ сложных систем - М.: Наука, 1992.- 334 с.
4. Мещерская А.В., Руховец Л.В., Юдин М.С., Яковлева Н.И. Естественные составляющие метеорологических полей . - Л.: Гидрометеиздат. -1970. -199 с.
5. Обухов А.М. О статистически ортогональных разложениях эмпирических функций// Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1960. -№ 3. - С. 432–439.
6. Пененко В.В. Методы численного моделирования атмосферных процессов. – Л: Гидрометеиздат. 1981. - 352 с.
7. Пененко В.В. О концепции природоохранного прогнозирования// Оптика атмосферы и океана. 2010. - Т.23. - №6. – С. 432-438.
8. Пененко, В.В., Цветова Е.А. Оптимальное прогнозирование природных процессов с оценкой неопределенности // ПМТФ. 2009. - №2. – С. 156-166.
9. В. В. Пененко, Е. А. Цветова, Пененко А. В. Развитие вариационного подхода для прямых и обратных задач гидротермодинамики и химии атмосферы// Известия РАН. Физика атмосферы и океана. - 2015. - Том 51. - № 3. - С. 358–367.
10. Buizza R., Montani A. Targeting observations using singular vectors// J. Atmos. Sci. - 1999. – V. 56. - P. 2965-2985.
11. Penenko V., Tsvetova E. Orthogonal decomposition methods for inclusion of climatic data into environmental studies // Ecol.modelling. - 2008. - V. 217. – P. 279–291.
12. Preisendorfer R.W. Principle component analysis in meteorology and oceanography. Amsterdam-Oxford: Elsevier. 1988. – 425 P.

ДИНАМИКА ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Дарья Александровна Константинова

Томский государственный университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, кандидат географических наук, доцент кафедры метеорологии и климатологии, тел. (3822)42-07-84, e-mail: da_konstantinova@mail.ru

Валентина Петровна Горбатенко

Томский государственный университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, доктор географических наук, профессор кафедры метеорологии и климатологии, тел. (3822)42-07-84, e-mail: vpgor@tpu.ru

В работе изучена многолетняя динамика количества дней с грозой по данным метеорологических станций Западной Сибири, выделены циклы грозовой активности разной периодичности.

Ключевые слова: грозовая активность, число дней с грозой, многолетняя изменчивость, цикличность.

DYNAMICS OF THUNDERSTORM ACTIVITY OVER WESTERN SIBERIA TERRITORY

Daria A. Konstantinova

Tomsk State University, 634050, Russia, Tomsk, 36 Lenin av., Ph. D., Associate Prof. of Department Meteorology and Climatology, tel. (3822)42-07-84, e-mail: da_konstantinova@mail.ru

Valentina P. Gorbatenko

Tomsk State University, 634050, Russia, Tomsk, 36 Lenin av., Ph. D., Prof. of Department Meteorology and Climatology, tel. (3822)42-07-84, e-mail: vpgor@tpu.ru

Long-term dynamics of the amount of thunderstorm days according to meteorological stations data in Western Siberia were investigated; thunderstorm activity cycles of different period were fined out.

Key words: thunderstorm activity, amount of thunderstorm days, long-term dynamics, cycle.

Изменения повторяемости экстремальных погодных явлений, связанных с развитием конвективной неустойчивости в атмосфере, до настоящего времени остаются актуальными в связи с проблемой глобального изменения климата. Среди таких опасных конвективных явлений как град, ливень и сильный ветер особое место занимаю грозы, так как наносят значительный материальный ущерб многим отраслям народного хозяйства [1, 2, 3].

Для решения задач мониторинга грозовой активности анализ многолетних данных визуальных наблюдений над грозами на сегодняшний день не имеет

альтернативы, несмотря на большое количество современных приборов и систем регистрации электромагнитных возмущений [4].

Целью настоящей работы является исследование многолетних рядов данных наблюдений за грозовой активностью для территории Западной Сибири.

В работе рассмотрена такая характеристика грозовой активности, как число дней с грозой. Обработывались данные наблюдений за грозами двадцати четырех метеорологических станций территории Западной Сибири. Информацией

о грозах послужили данные штормовых журналов Томского Центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды за период 1936-2015 гг.

Для анализа данных и полученных результатов в работе использовались стандартные методы математической статистики, для определения периодов цикличности грозовой активности применялись методы автокорреляции и быстрого разложения Фурье.

На рис. 1 представлены изменения грозовой активности за последние восемьдесят лет, среднее количество дней с грозой по 24 метеорологическим станциям исследуемой территории Западной Сибири.

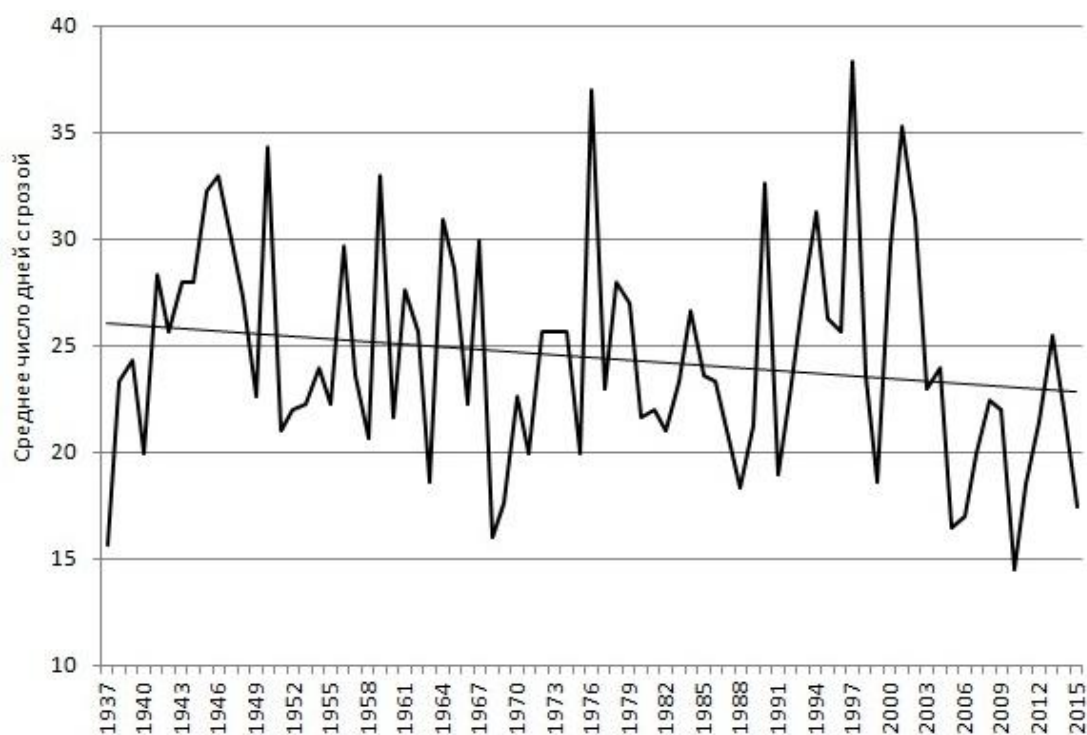


Рис. 1. Число дней с грозой, осредненное для исследуемой территории

На фоне наличия значительной межгодовой изменчивости отмечается слабая тенденция на уменьшение грозовой активности последних десятилетий, хотя в результате анализа температурного режима Сибири, выявлены районы

со скоростью потепления превышающей $0,5^{\circ}\text{C}/10$ лет, т.е. на порядок больше, чем для Северного полушария Земли в целом [5], что могло способствовать росту грозовой активности т.к. она тесно связана с характеристикой конвективного потенциала региона, зависящего в большой степени от температуры воздуха. Это противоречие объясняется тем, что потепление в регионах Северного полушария вызвано увеличением среднегодовых температур воздуха за счет зимнего периода, в то время как увеличение грозовой активности происходит в теплый период года.

Картина многолетних наблюдений за грозовой деятельностью отмечается синхронными изменениями среднего числа дней с грозой в различных частях исследуемой территории: северной, центральной и южной частях Западной Сибири (рис. 2), что подтверждают более ранние исследования [6].

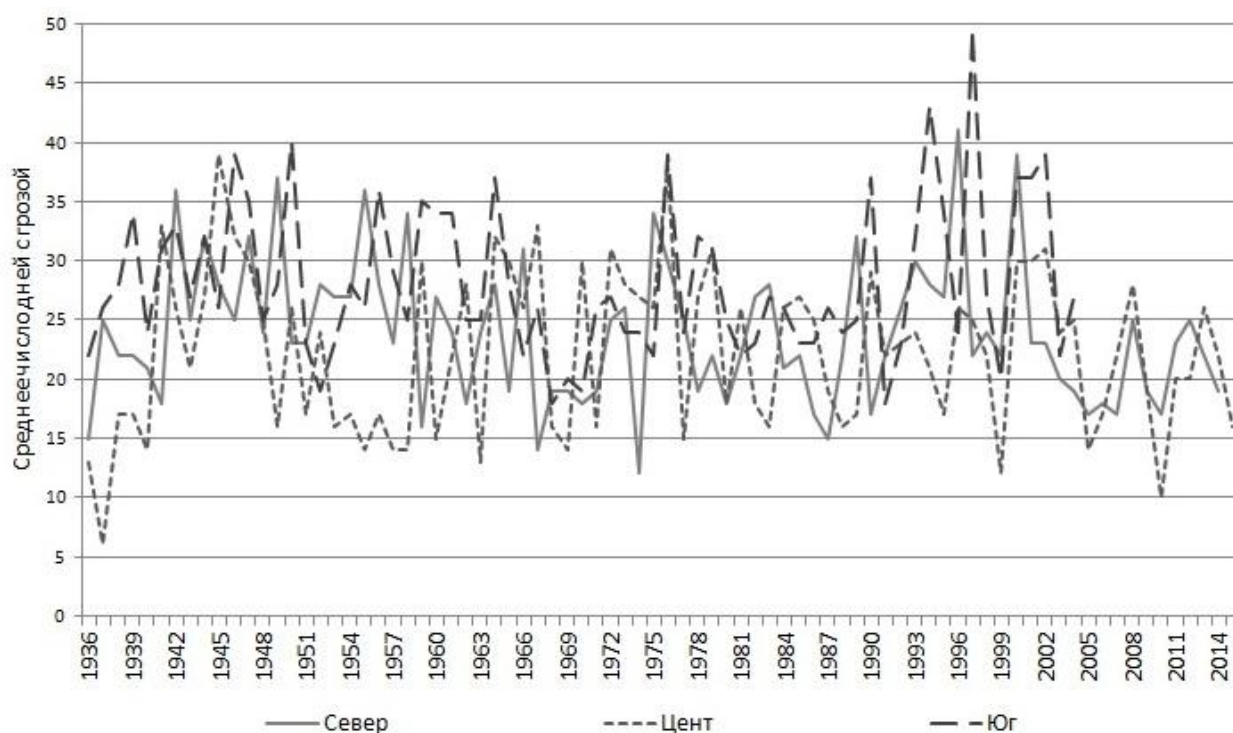


Рис. 2. Среднее число дней с грозой

При анализе данных многолетних наблюдений с помощью автокорреляционной функции и быстрого разложения Фурье выделены циклы различной периодичности грозовой активности для трех частей исследуемого региона (табл.), которые сравнивались с продолжительностью циклов для различных территорий [7].

Квазидвухлетние и четырехлетние циклы грозовой активности хорошо согласуются и объясняются циркуляционной цикличностью соответствующих периодов исследуемого региона. Также, анализируя графики на рис. 2, можно отметить квазитридцатилетние циклы, которые пока не могут быть выделены с помощью используемых методов анализа из-за недостаточной длины ряда данных наблюдений.

На основании приведенного материала можно заключить следующее:

- картина многолетних наблюдений за грозовой деятельностью отмечается синхронными изменениями среднего числа дней с грозой для территории Западной Сибири;
- в рядах грозовой активности обнаруживаются циклы разной продолжительности, но совпадают по продолжительности, в основном, квазидвухлетние, четырехлетние и долгопериодные;
- значимых тенденций в изменении уровня грозовой активности над Западной Сибирью за исследуемый период не выявлено.

Таблица

Периоды цикличности грозовой активности для различных территорий

Территория исследования	Обнаруженный период (число лет)							
	2-3	3-4	5-7	8-9	10-14	15-17	18-24	25-35
Север Западной Сибири	2	4				17	22	
Центр Западной Сибири	3		7		13	16		26
Юг Западной Сибири	3		6					
Красноярский край	3	4			11			
Прибайкалье	3	4			11			
Якутия			5	8				
Байкал			5	8				
Алтайский край		4	7		14	17	22	26, 34
Северный Казахстан	2			9			18	
Центральный Казахстан		4	6		11	17		
Южный Казахстан		4	7		10	16		34
Восточный Казахстан			5	8	11	15	22	25
Южная Германия		4	6	9			22	

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Константинова Д.А., Горбатенко В.П. Результаты регистрации молний над юго-восточной территорией Западной Сибири // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2011. – № 11/3. – С. 156-162.
2. Горбатенко В.П., Константинова Д.А. Золотухина О.И., Тунаев Е.Л. Термодинамические условия формирования мезомасштабной конвекции в атмосфере Западной Сибири // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2011. – № 11/3. – С. 148-155.
3. Константинова Д.А., Горбатенко В.П. Условия образования шквала над юго-восточной территорией Западной Сибири // Вестник Томского государственного университета – 2010. – № 337. – С. 189-193.
4. Горбатенко В.П., Ершова Т.В., Константинова Д.А. Пространственное распределение плотности разрядов молнии в землю над территорией Западной Сибири // Вестник Томского государственного университета. – 2009. – № 329. – С. 251-256.
5. Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Логинов С.В., Харюткина Е.В. Структура и динамика метеорологических полей на азиатской территории России в период интенсивного глобального потепления 1975-2005гг. // Журнал Сибирского Федерального университета. – 2008. – №1(4), С. 323-344.

6. Горбатенко В.П., Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Логинов С.В., Решетько М.В., Таранюк М.И. Анализ структуры временных рядов повторяемости форм атмосферной циркуляции и грозовой активности // Оптика атмосферы и океана. – 2002 – 15. – № 8. – С. 693-697.

7. Горбатенко В.П., Ершова Т.В. Молния как звено глобальной электрической цепи: монография. – Томск: Издательство ТГПУ, 2011. – 204 с.

© Д. А. Константинова, В. П. Горбатенко, 2016

УДК 551.511.32: 532.517.4

УРАВНЕНИЕ БАЛАНСА ДИСПЕРСИИ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПРОТИВОГРАДИЕНТНЫЙ ПЕРЕНОС ТЕПЛА В КОНВЕКТИВНОМ АТМОСФЕРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

Людмила Ивановна Курбацкая

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика 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, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)330-78-05, e-mail: kurbat@itam.nsc.ru

В работе проанализирована роль процессов турбулентной диффузии (моментов третьего порядка) для понимания механизма противогradientного потока тепла в нижней атмосфере. Использовано RANS приближение второго порядка замыкания моделирования развитой конвекции в атмосферном пограничном слое (АПС) над урбанизированной поверхностью. В этом приближении вертикальный турбулентный поток тепла включает «температурный противогradient», впервые проанализированный Дирдорфом (J. W. Deardorff) для горизонтально однородного конвективного АПС [1].

Ключевые слова: турбулентность, атмосфера, конвективный пограничный слой, температурный противогradient, моделирование.

THE EQUATION OF TEMPERATURE VARIANCE AND THE COUNTER-GRADIENT HEAT TRANSPORT IN THE CONVECTIVE ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER

Lyudmila I. Kurbatskaya

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, 630090, Russia, Novosibirsk, 6, prospect Akademika Lavrentieva, senior scientific researcher, tel. (383)330-61-52, e-mail: L. Kurbatskaya@ommgp.sccc.ru

Albert F. Kurbatskiy

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, 630090, Russia, Novosibirsk, 4/1, Institutskaya Str., D. Sc (Phys. and Math.), principal scientific researcher, professor, tel. (383)330-78-05, e-mail: kurbat@itam.nsc.ru

In this paper is analyzed a role of turbulent diffusion processes (the third-order moments) for understanding of the counter-gradient heat flux in the low atmosphere. It is used RANS approach of the second order closure for a modeling of the atmospheric boundary layer over the urbanized surface. In this approach the vertical turbulent heat flux include the temperature «counter-gradient»,

for the first time analyzed by J.W. Deardorff (1966) for horizontally homogeneous the convective boundary layer.

Key words: turbulence, atmosphere, convective boundary layer, temperature counter-gradient modeling.

1. Введение

В нижней атмосфере фиксируются области, в которых градиент потенциальной температуры $\partial\Theta/\partial z$ может быть слегка устойчив при направленном вверх потоке тепла [1]. Если для таких ситуаций определять вертикальный турбулентный поток тепла $\overline{w\theta}$, направленным по градиенту потенциальной температуры, $\langle w\theta \rangle = -K_H(\partial\Theta/\partial z)$, коэффициент турбулентной диффузии тепла K_H должен быть отрицательным и, следовательно, модель вихревой диффузии тепла по градиенту оказывается физически некорректной.

Для возможности использования градиентной модели диффузии тепла в [1] был предложен модифицированный вариант: $\overline{w\theta} = -K_H(\partial\Theta/\partial z - \gamma_c)$, где γ_c - так называемый “противоградиент”, положительно определенный параметр. Противоградиент был оценен в [1] из уравнения баланса для дисперсии турбулентных флуктуаций температуры $\overline{\theta^2}$ в виде отношения турбулентной диффузии дисперсии температуры $\partial/\partial z \langle w\theta^2 \rangle$ к потоку тепла $\langle w\theta \rangle$.

2. Коэффициент вихревой диффузии тепла в противоградиентной области.

Для численной модели атмосферного пограничного слоя такая стратегия описания противоградиентного вихревого переноса тепла малопригодна, поскольку включение в качестве искоемых моментов второго и третьего порядков приводит к громоздкой системе дифференциальных уравнений даже для горизонтально-однородных стратифицированных течений в атмосферных пограничных слоях [2-5]. Поэтому температурный противоградиент в вертикальном вихревом потоке тепла может быть введен в RANS приближении второго порядка замыкания через искоемые параметры: кинетическую энергию турбулентности (E), скорость её спектрального расходования (ε) и дисперсию температуры ($\overline{\theta^2}$) [6, 7]:

$$(\langle uw \rangle, \langle vw \rangle) = -K_M \left(\frac{\partial U}{\partial z}, \frac{\partial V}{\partial z} \right), \quad \langle w\theta \rangle = -K_H \frac{\partial \Theta}{\partial z} + \gamma_c,$$

где $\gamma_c = \frac{1}{D} \left\{ 1 + \frac{2}{3} \alpha_2^2 G_M + s_6 G_H \right\} \alpha_5 (\tau \beta g) \langle \theta^2 \rangle$ – температурный противоградиент,

$K_M = E \tau S_M$, $K_H = E \tau S_H$, $S_M = S_M(\tau, S, N)$, $S_H = S_H(\tau, S, N)$ – структурные функции, $(G_m, G_H) = f(\tau, N, S)$, $\tau = E/\varepsilon$, N – частота Брента-Вейселя и S – горизонтальный сдвиг скорости ветра.

3. Уравнение баланса дисперсии температуры и понимание противогradientного потока тепла.

Уравнение баланса дисперсии температуры $\langle \theta^2 \rangle$ может быть записано в виде

$$\frac{D}{Dt} \langle \theta^2 \rangle = P_{\theta 2} + D_{\theta 2} - 2\varepsilon_{\theta}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{\theta} = (1/2R) \overline{\theta^2} / \tau$ - деструкция, $R = \tau_{\theta} / \tau = 0,6$; $P_{\theta 2} \equiv -2\langle u_i \theta \rangle (\partial \Theta / \partial x_i)$ - генерация и $D_{\theta 2} = -\partial \langle u_i \theta^2 \rangle / \partial x_i$ - турбулентная диффузия.

Для двумерного вычислительного теста диффузионный член $D_{\theta 2}$ аппроксимируется градиентным выражением вида

$$D_{\theta 2} = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\nu_t}{\sigma_{\theta}} \frac{\partial \langle \theta^2 \rangle}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\nu_t}{\sigma_{\theta}} \frac{\partial \langle \theta^2 \rangle}{\partial z}, \quad (2)$$

где $\nu_t = c_{\mu} E^2 / \varepsilon$, $c_{\mu} = 0,09$, $\sigma_{\theta} = 0,68$ - стандартные представления двухпараметрической $E - \varepsilon$ модели турбулентности. В (2) использовано наиболее простое градиентное представление для момента третьего порядка $\langle u_i \theta^2 \rangle$. Можно построить и более аккуратное замыкание для момента $\langle u_i \theta^2 \rangle$, следуя общей концепции [2, 3] моделирования нелокальных процессов турбулентной диффузии (моментов третьего порядка). Однако это влечет за собой неизбежное усложнение моделирования диффузионного члена $D_{\theta 2}$, вовлекая в рассмотрение дополнительные уравнения переноса для старших моментов. Действительно,

в [4] для ковариации $\langle w \theta^2 \rangle$ сформулирована модель градиентного вида

$$\langle w \theta^2 \rangle = -(\tau_3 / C_7) \left[\langle w^2 \rangle \frac{\partial \langle \theta^2 \rangle}{\partial z} + 2 \langle w^2 \theta \rangle \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right], \quad (3)$$

где $\tau_3 \approx (1/5) E / \varepsilon \left[1 + H(N^2) (\pi/18) (E/\varepsilon)^2 \right]^{-1}$ и $H(N^2) = 0$, если $N^2 < 0$ и равно 1, если $N^2 \geq 0$; $N^2 = \beta g \partial \Theta / \partial z$ частота Брента-Вяйсяля.

Для ковариации третьего порядка в правой части (3) необходимо решать дифференциальное уравнение переноса [4].

Замыкающее выражение (2) при моделировании турбулентного переноса в мезомасштабных атмосферных течениях на основе RANS приближения высокого порядка замыкания может рассматриваться как удовлетворительное.

На рис. 1 показан профиль тройной корреляции $\langle w \theta^2 \rangle$, вычисленный на 12 часов полуденного времени по градиентной модели $\langle w \theta^2 \rangle = (\nu_t / \sigma_{\theta}) (\partial \langle \theta^2 \rangle / \partial z)$ в сечении с координатой $x = 30$ км (урбанизированная поверхность расположена в центре вычислительной области, между 45 км и 55 км, при горизонтальной протяженности области численного интегрирования, равной

120 км). На рис. 1 представлены также LES результаты [8, 9] (моделирования с выделением крупных вихрей). Зачерненными квадратами показаны данные измерений в области инверсионного слоя [10] (аналогичный профиль над урбанизированной поверхностью не показан из-за отсутствия как результатов расчетов по LES-методу, так и данных измерений). Результаты вычисления момента третьего порядка $\langle w\theta^2 \rangle$ по градиентному и LES – приближениям можно считать удовлетворительно согласующимися.

Рассмотрим статьи баланса в правой части уравнения (1). В локально равновесных ситуациях, когда генерация $P_{\theta 2}$ и деструкция $2\varepsilon_{\theta}$ в уравнении (1) почти сбалансированы, а турбулентная диффузия $D_{\theta 2}$ (тройная корреляция) пренебрежимо мала, поток тепла должен быть направлен вдоль по градиенту температуры.

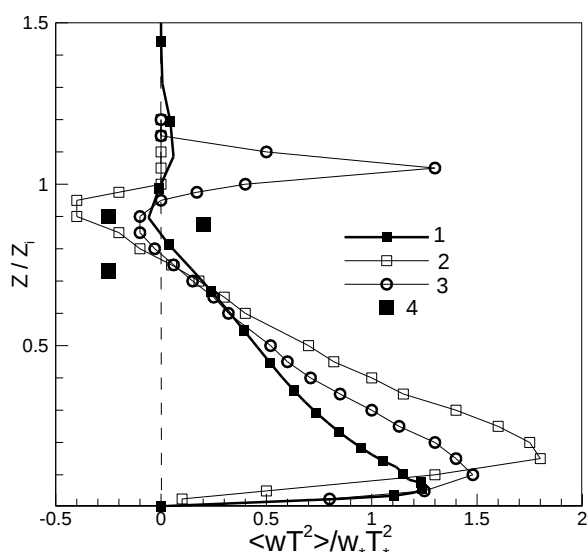


Рис. 1. Профиль вертикальной диффузии дисперсии температуры $\overline{\theta^2}$, вычисленный на 12 часов полуденного времени в сечении с координатой $x = 30$ км. Скорость геострофического ветра $U_G = 3$ м/с. Линия 1 - вычисления по градиентной модели, линия 2- LES данные [8], линия 3 – LES данные [9], крупные черные квадраты 4 – данные измерений в атмосфере (взяты из [10]), z_i - высота слоя инверсии, θ_* - масштаб температурного поля ('температура трения'), $w_* = (\beta g \overline{w\theta_0} z_i)^{1/3}$ - конвективный масштаб скорости, $\overline{w\theta_0}$ - вертикальный поток тепла на поверхности

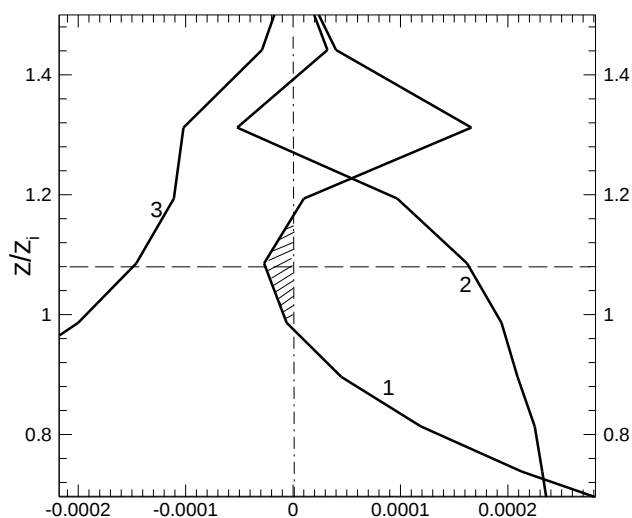


Рис. 2. Статьи баланса правой части уравнения (1) дисперсии флуктуаций потенциальной температуры в сечении с координатой $x = 50$ км (центре урбанизированной поверхности) на 12 часов полуденного времени численного моделирования структуры пограничного атмосферного слоя [11]. Скорость геострофического ветра $U_G = 3$ м/с

В атмосфере, в фиксируемой измерениями противогradientной области, все три статьи баланса в (1) оказываются важными. Поведение слагаемых $P_{\theta 2}$, $2\varepsilon_{\theta}$ и $D_{\theta 2}$, вычисленных в сечении $x=50$ км (центре урбанизированной поверхности) на 12 часов полуденного времени численного моделирования эволюции атмосферного пограничного слоя над урбанизированной поверхностью [11], показано на рис.2 в окрестности инверсионного слоя ($z/z_i \sim 1$; z_i - высота инверсионного слоя). Диффузионный член $D_{\theta 2}$ (кривая 2) в противогradientной области (заштрихована) положителен и уменьшается с высотой, а член генерации $P_{\theta 2}$ (кривая 1) - отрицателен. Деструкция $2\varepsilon_{\theta}$ (кривая 3) величина всегда положительная, в балансе (11) она играет роль члена, “сглаживающего” температурные флуктуации. Следовательно, когда диффузионный член положителен и превосходит сглаживающий член по величине, можно ожидать появление противогradientного переноса тепла. В этом случае генерация $P_{\theta 2}$ становится величиной отрицательной.

Закключение

Таким образом, в противогradientной области конвективного атмосферного пограничного слоя перенос тепла поддерживается интегральной диффузией, определяемой тройными корреляциями термогидродинамических полей.

Работа получила финансовую поддержку РФФИ (проект 13-05-00006-а, частично по проекту 14-01-00125-а).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. J.W. Deardorff. The counter-gradient heat flux in the lower atmosphere and in the laboratory // J. Atmos. Sci. – 1966. – V. 23. – P. 503-506.
2. Andre J.C., De Moor G., Lacarrere P., Therry G., Vachet R. du. Modeling the 24-Hour Evolution of the Mean and Turbulent Structures of the Planetary Boundary Layer. // J. Atmos. Sci. – 1978. – V. 35. – №. 10. – P. 1861–1883.
3. Курбацкий А. Ф. Моделирование нелокального турбулентного переноса импульса и тепла. – Новосибирск: Наука, – 1988. – 240 с.
4. Илюшин В.В., Курбацкий А.Ф. Новые модели для вычисления моментов третьего порядка в планетарном пограничном слое // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. – 1998. – 34 (6). – С. 772-781.
5. Canuto V.M., Minotti F., Ronchi C., Ypma R. M. Second-Order Closure PBL Model with New Third-Order Moments: Comparison with LES Data // J. Atmos. Sci. – 1994. – V. 51. – No. 12. – P. 1605-1618.
6. Cheng Y., Canuto V.M., Howard A.M. An Improved Model for the Turbulent PBL // J. Atmos. Sci. – 2002. – V. 59. – P. 1500–1565.
7. Курбацкий А.Ф., Курбацкая Л.И. О турбулентном числе Прандтля в устойчиво стратифицированном атмосферном пограничном слое // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. – 2010. – Т. 46. – № 2. – С. 187–196.
8. Moeng C.-H., Wyngaard J. C. Spectral analysis of large-eddy simulations of the convective boundary layer // J. Atmos. Sci. – 1988. – Vol. 45. – P. 3574–3587.

9. Nieuwstadt F. T. M. Direct and large-eddy simulation of free convection // Proc. 9th Internat. Heat Transfer Conference, Jerusalem 19-24 August 1990, Amer. Soc. Mech. Engineering., New York. V. 1. P. 37-47.

10. Lenshow D. H., Wyngaard J. C. Mean-Field and Second-Moment Budgets in a Baroclinic, Convective Boundary Layer // J. Atmos. Sci. – V. 37. – P. 1313-1326.

11. Курбацкий А. Ф., Курбацкая Л. И. Трехпараметрическая модель турбулентности для атмосферного пограничного слоя над урбанизированной поверхностью // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2006. – 46(2). – С. 476-494.

© Л. И. Курбацкая, А. Ф. Курбацкий, 2016

УДК 551.583+519.6

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА СИБИРИ В XXI В.

Виктор Иванович Кузин

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, профессор, зав. лабораторией, тел. (383)330-64-50, e-mail: kuzin@sscc.ru

Наталья Александровна Лаптева

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, младший научный сотрудник, тел. (383)330-64-50; Федеральное бюджетное учреждение науки «Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии "Вектор"», 630559, Россия, Новосибирская область, Новосибирский район, р. п. Кольцово, АБК, старший научный сотрудник, тел. (383)363-47-00, e-mail: lapteva@vector.nsc.ru

В статье обсуждаются результаты расчетов климатического речного стока для Сибирского региона. При верификации модели проводились расчеты стоков в XX в. на основе данных реанализа MERRA. Расчеты для XXI в. проводились по данным результатов шести моделей, участвующих в сценарии RCP 8.5 проекта CMIP5 IPCC за период 2006–2100 гг. Все модели показали положительный тренд за расчетный период. Для выяснения основных факторов, влияющих на увеличение стока были проанализированы составляющие гидрологических компонентов влагонаполнения для одной из моделей. В статье приводится анализ изменения характеристик для XXI в. по сезонам.

Ключевые слова: математическое моделирование, климатический речной сток сибирских рек в арктические моря.

ESTIMATE OF POSSIBLE VARIATIONS OF THE SIBERIAN HYDROLOGICAL REGIME IN THE XXI CENTURY

Victor I. Kuzin

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, prospect Akademika Lavrentjeva, 6, doctor, professor, Head of the Laboratory, tel. (383)330-64-50, e-mail: kuzin@sscc.ru

Natalya A. Lapteva

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, prospect Akademika Lavrentjeva, 6, junior Researcher, tel. (383)330-64-50; Federal Budgetary Research Institution «State Research Center of Virology and Biotechnology "Vector"»,

The paper discusses the results of calculations climatic river runoff for the Siberian region. For the verification of the model the MERRA reanalysis data for the XX century were used. For the XXI century calculations by the data of the six models of the scenario RCP 8.5 of the Project CMIP5 IPCC for the period 2006 -2100 were done. All the models show the positive trend. To study the key factors influencing this increasing of the runoff the different hydrological characteristics for one of the model were analyzed. The distributions of the characteristics for the seasons were presented in the paper.

Key words: mathematical modeling, climatic river runoff, Siberian rivers basins.

Введение

В последние десятилетия очевидным фактом стали климатические изменения, происходящие в гидрологии высоких и средних широт северного полушария. Важным следствием этих изменений является то, что эти процессы могут привести к откликам в глобальной климатической системе на основе механизмов обратных связей. Важной частью этих изменений является гидрологическая система Сибири и Арктики. Существенную роль здесь играет сток сибирских рек в Северный Ледовитый океан.

Основываясь на данных, приведенных в R-ArcticNET [<http://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/index.html>] суммарный сток одиннадцати основных рек оценивается величиной 1.7 тыс. куб. км в год.

Однако, из указанных данных также следует, что суммарный годовой расход сибирских рек за период второй половины XX века претерпевает существенные межгодовые вариации. Изменения для отдельных рек составляют от 25 до 40% и более. Существенную роль при этом, как можно предполагать, играет межгодовая климатическая изменчивость атмосферной циркуляции и характеристики поверхности.

Наряду с межгодовой изменчивостью в гидрологических характеристиках Сибирских рек наблюдаются устойчивые положительные тренды [1].

Анализ изменений гидрологической составляющей климатической системы Сибири в XX веке был получен на основе данных реанализа MERRA в работах [2, 3]. Далее была рассмотрена проекция развития гидрологических характеристик Сибири и, в частности, речного стока в XXI веке в работах [4, 5].

Настоящая статья посвящена рассмотрению отдельных аспектов проблемы климатических изменений гидрологии Сибири в XXI веке на основе данных расчетов по шести моделям проекта CMIP программы IPCC. Результаты речного стока показали устойчивый положительный тренд речного стока при ряде различий. Это инициировало исследование изменений внутренних гидрологических факторов в XXI веке, влияющих на сток сибирских рек на примере одной из моделей, входящих в проект CMIP5 программы IPCC. В качестве данных были выбраны результаты расчетов по модели MPI-ESM (Германия), являющейся одной из лидирующих моделей IPCC.

Результаты анализа.

Используемая для расчетов модель речного стока является линейной, резервуарной моделью типа Калинина-Милюкова [6, 7]. Поверхностный, грунтовый и речной сток определяется на основе последовательного решения обыкновенных дифференциальных уравнений, сведенных к интегралам свертки (Дюамеля). Конкретная реализация модели представлена в работах [2, 3, 8].

При проведении численных экспериментов по климатической модели речного стока было выбрано разрешение составляющее 1/3 градуса по широте и долготе соответственно. Модель речного стока покрывает Сибирский регион по долготе от Урала до Чукотки и по широте от Монголии до Северного Ледовитого океана. В модели учитывались бассейны рек: Обь - Иртыш, Енисей - Ангара, Лена, Пур-Таз, Хатанга, Анабар, Оленек, Яна, Индигирка, Колыма.

Для указанных бассейнов были сделаны численные расчеты по моделированию стока рек для периода 2006 - 2100 гг. на основе данных атмосферных характеристик по результатам расчетов моделей: INM-CM5 (ИВМ РАН, Россия), CNRM-CM5 (MeteoFrance), GFDL-ESM2M (Princeton, USA), MIROC5 (Japan), HadGEM-ES (Great Britain), MPI-ESM (Germany) участвующим в проекте CMIP5 сценария RCP-8.5, представленных в базах данных IPCC (cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5). Результаты расчетов речного стока, проведенных по этим данным показывают устойчивые положительные тренды для всех сибирских рек. На рис. 1 представлены гистограммы годового стока в Северный Ледовитый океан, осредненного за периоды 2006 - 2050 и 2051 - 2100 гг. Рисунок показывает наибольшее увеличение стока для модели MPI-ESM. Результаты расчетов по данным остальных моделей дают более низкие значения. Наименьшее увеличение стока наблюдается у модели INM-CM5.

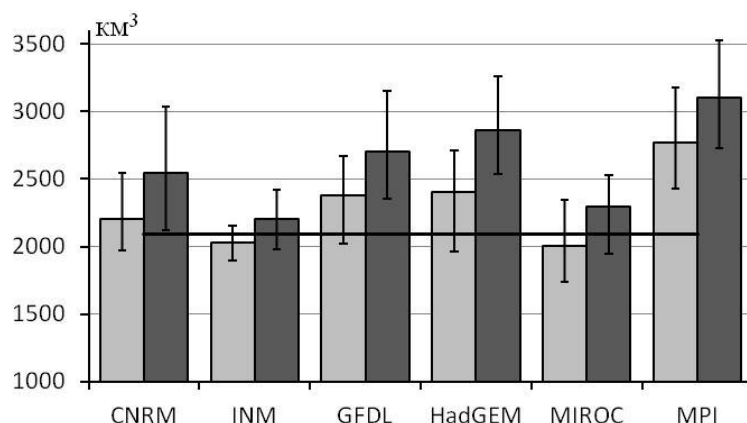


Рис. 1. Годовые стоки сибирских рек в СЛО в XXI веке для различных моделей. Справа - осреднение по периоду 2006 - 2050 гг., слева - 2051 - 2100 гг. Горизонтальная линия - осредненные данные измерений в XX веке. Вертикальные линии обозначают амплитуду межгодовых колебаний

Далее представляло интерес проанализировать за счет каких компонентов и в какие периоды гидрологического цикла года происходит максимальное увеличение притока воды в бассейны рек Сибири. Данные были

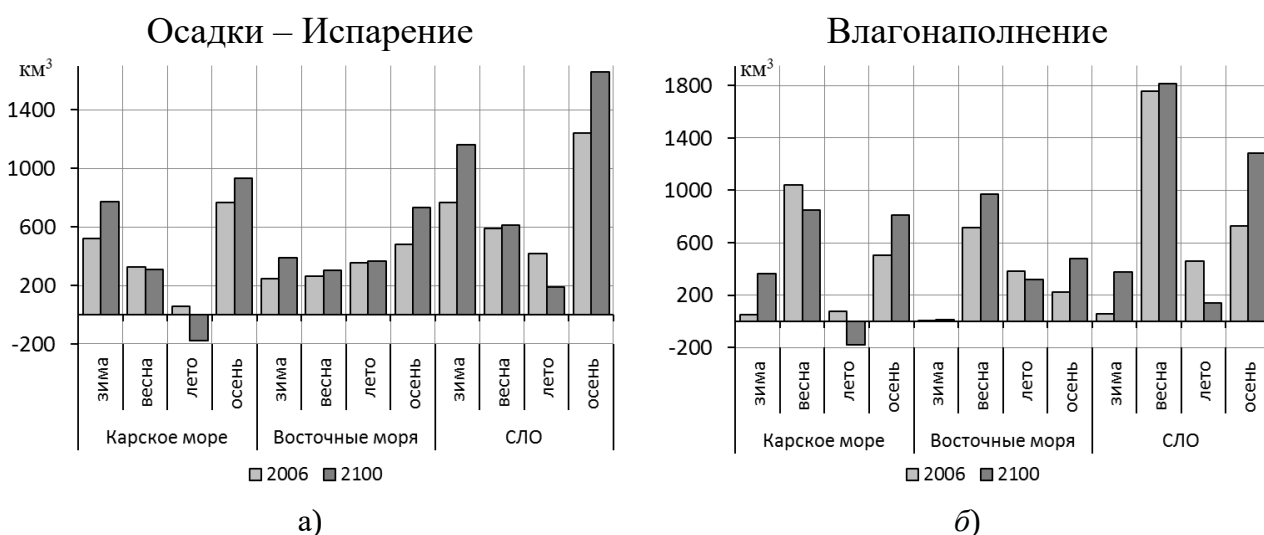
проанализированы на основе результатов модели MPI-ESM, поскольку в этой модели наиболее ярко выражено увеличение стока.

На рис. 2 представлены гидрологические характеристики для бассейнов, формирующих стоки в арктические моря СЛО для моментов 2006 и 2100 гг. Влагонаполнение в модели состоит из трех компонентов: осадки – испарение + приток воды за счет таяния снега.

Рис. 2, а представляет разность осадков и испарения, что описывает прямое поступление влаги на поверхность бассейна. Можно видеть, что происходит увеличение этой характеристики за исключением летнего сезона для бассейна Карского моря. Возможно это происходит за счет увеличения испарения из болотных систем Западной Сибири при увеличении температуры. Для всего бассейна притоков для Северного Ледовитого океана максимальные значения даёт осенний сезон.

На рис. 2, б представлено результирующее влагонакопление. В эту характеристику неявно включено поступление воды за счет таяния снега, что дает существенные максимумы весной в связи с паводками. Существенный пик также наблюдается осенью. Данные на рис. 2, а, б представлены в абсолютных величинах и количественная оценка изменений за анализируемый период затруднена. Отличия, формирующихся в течение столетия, представлены на рис. 2, в,

г, в виде разностей между абсолютными величинами характеристик. Изменения влагонаполнения имеют максимальные положительные значения для зимнего и осеннего периодов, достигающие до значений 300–450 куб. км. Умеренное увеличение наблюдается весной. Для лета существует уменьшение влагонаполнения за счет превышения испарения над осадками.



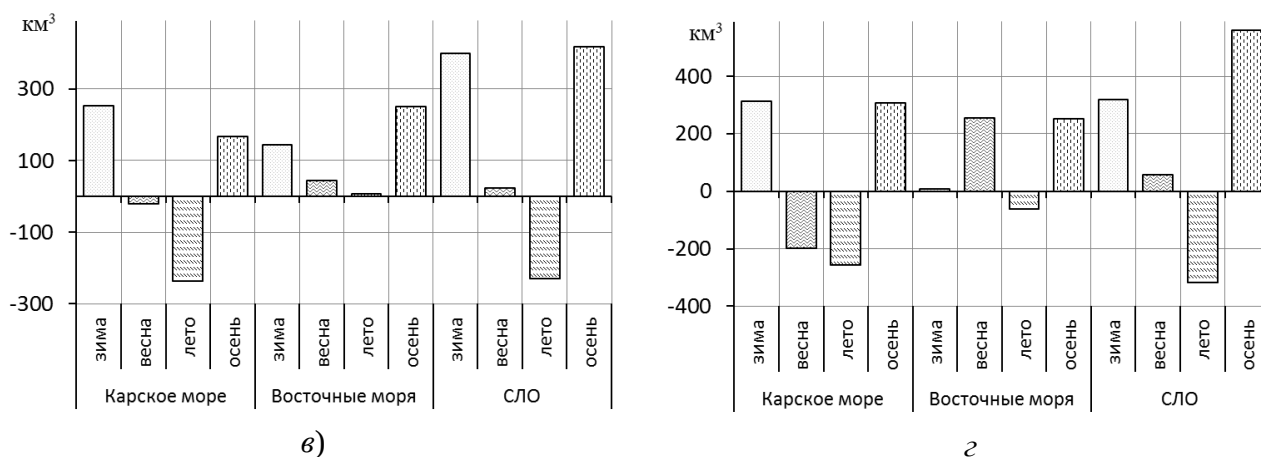


Рис. 2. Изменение гидрологических составляющих между 2006 и 2100 годами по сезонам

Закключение

В статье представлены результаты по анализу гидрологических характеристик бассейнов Сибирских рек в XXI веке. Первым этапом было проведение расчетов на основе проекции климатических изменений по сценарию RCP 8.5 проекта CMIP5 IPCC. В качестве входных данных были выбраны результаты расчетов по моделям INM-CM5, CNRM-CM5, GFDL-ESM2M, MIROC5, HadGEM-ES, MPI-ESM. Результаты расчетов показывают устойчивый положительный тренд для всех моделей. Наибольший рост притока дает модель MPI-ESM, наименьший - INM-CM5. Сток по другим моделям имеют средние значения. На втором этапе был проведен анализ гидрологических факторов, формирующих объем воды, поступающей в бассейны рек. Анализ показал, что наибольший вклад в увеличение гидрологических характеристик, формирующих сток, дают сезоны зима и осень при умеренном росте весной. Летний период характеризуется отрицательным трендом. Эти характеристики определяют общий положительный тренд речного стока в XXI веке

Работа выполнена при поддержке программы ОМН РАН 1.3.3-6., Президиума РАН 23.3-1. и гранта РФФИ 14-05-00730.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Peterson B.J., Holmes R.M., McClelland J.W., Vorosmarty C.J., Shiklomanov I.A., Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Rahmstorf S. Increasing river discharge to the Arctic Ocean // Science. - 2002. - V. 298. - P. 2171–2173.
2. Кузин В.И., Лаптева Н.А. Математическое моделирование климатического речного стока из Обь-Иртышского бассейна // Оптика атмосферы и океана. - 2012. - Т. 25. - № 06. - С. 539–543.
3. Кузин В.И., Лаптева Н.А. Математическое моделирование стока основных рек Сибири // Оптика атмосферы и океана. - Т. 27. - № 06. - 2014. - С. 525–529.

4. Кузин В.И., Платов Г.А., Лаптева Н.А. Оценка влияния межгодовой изменчивости стока Сибирских рек на циркуляцию Северного Ледовитого океана // Известия РАН. ФАО. - 2015. - Т. 51. - № 4. - С. 437-447.
5. Kuzin V.I., N.A. Lapteva Calculation of the East Siberian subarctic rivers runoff in the XXIst century // Bull. NCC Ser. Num. Model. in Atmosphere, Ocean and Environment Studies. – Novosibirsk: NCC Publisher – 2015. – Issue 15. – P. 23-28.
6. Кучмент Л.С. Математическое моделирование речного стока. - Л.: Гидрометеиздат, 1972. - 190 с.
7. Бураков Д.А. К оценке параметров линейных моделей стока // Метеорология и гидрология. - 1989. - № 10. - С. 89-95.
8. Hagemann S., Dumenil L. Hydrological discharge model // Technical report No 17, MPI, Hamburg. - 1998. - 42 p.

© В. И. Кузин, Н. А. Лаптева, 2016

ОСОБЕННОСТИ КОНВЕКЦИИ ПОДО ЛЬДОМ В ГЛУБОКОМ ОЗЕРЕ

Елена Александровна Цветова

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)330-61-52, e-mail: e.tsvetova@ommgp.sccc.ru

С помощью математической модели изучаются особенности процессов естественной и вынужденной конвекции подо льдом в глубоком озере. Численные эксперименты показывают, что естественная конвекция подо льдом интенсифицирует процесс обновления глубинных вод, запущенный случайными событиями всплытия и разложения метангидратов.

Ключевые слова: конвекция подо льдом, естественная и вынужденная конвекция, математическое моделирование, гидрат метана, обновление глубинных вод, Байкал.

FEATURES OF CONVECTION UNDER THE ICE IN A DEEP LAKE

Elena A. Tsvetova

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, prospect Lavrentieva 6, Ph. D., Leading Researcher, tel. (383)330-61-52, e-mail: e.tsvetova@ommgp.sccc.ru

Using mathematical models, we study the processes of natural and forced convection under the ice in a deep lake. Numerical experiments show that the natural convection under the ice intensifies the process of deep water renewal triggered by the occasional events of methane hydrate coming up and dissociation.

Key words: convection under ice, natural and forced convection, mathematical modelling, methane hydrate, deep water renewal, Baikal.

На космических снимках ледовой поверхности озера Байкал можно иногда увидеть темные кольца с диаметрами 4-7 км. Они появляются весной в разных районах озера после очищения поверхности льда от снега. Н.Г. Гранин [1] предположил, что причиной появления таких колец являются некие события, приводящие к внезапному всплытию гидратов метана, обнаруженных в больших количествах на дне озера. При поднятии гидраты включаются в гидродинамические и химические процессы, что в результате приводит к видимым проявлениям на ледовой поверхности. Это предположение привело к ряду теоретических и инструментальных исследований, среди которых существенную роль играют методы математического моделирования [2-4, 8].

Для моделирования гидротермодинамики воды в озере, как несущей среды, используется математическая модель в негидростатическом приближении. Она представлена системой уравнений в частных производных для трех компонентов вектора скорости, уравнения для температуры, уравнения состояния и уравнения неразрывности. Поведение фаз метана описывается системой уравнений типа конвекции-диффузии-реакции. Предполагается, что

растворенный метан движется со скоростью несущей среды, а газовая и твердая фазы получают дополнительные скорости подъема за счет сил плавучести. Термические эффекты, учитывающие скрытую теплоту перехода фаз, включены в уравнение для температуры. Система уравнений дополняется соответствующим набором краевых и начальных условий.

Результаты численных экспериментов с участием метана натолкнули нас на мысль, что метан играет существенную роль не только в появлении локальных кольцевых структур вблизи поверхности, но также участвует и в фундаментальных управляющих процессах в глубоких водах.

Из-за большой глубины озера (более 1 600 м), процессы вертикального водообмена в Байкале имеют свои особенности. Известно, что температура максимальной плотности воды существенно зависит от давления (глубины): она уменьшается на 0.21 градуса каждые 100 метров. Поэтому Байкал не перемешивается полностью в периоды весенней и осенней естественной конвекции, как это случается со всеми мелкими пресными водоемами. Конвективное перемешивание затрагивает лишь поверхностный 200-250 м слой.

Многолетними наблюдениями за температурой воды в озере было установлено, что толща воды ниже 250 м, не соприкасающаяся непосредственно с атмосферой и находящаяся далеко от деятельного поверхностного слоя, имеет небольшой, но постоянный градиент температуры, который указывает на непрерывный поток тепла вниз. Однако в течение многих десятилетий какого-либо потепления глубинных вод не было зарегистрировано [5]. Поэтому естественно предположить, что в Байкале реализуются какие-то компенсирующие механизмы, охлаждающие глубокие слои и (или) перемещающие холодные поверхностные воды на большие глубины. Доказательством существования таких механизмов являются внезапные появления низких температур и повышенных концентраций растворенного кислорода в данных наблюдений в самых глубоких слоях озера [6, 7, 9].

Эта загадка привлекла внимание ученых, и было выдвинуто несколько гипотез о возможных механизмах обновления вод. Не вызывал сомнения тот факт, что это есть результат действия эпизодических событий, тем или иным образом запускающих вынужденную глубокую конвекцию. Инструментальное подтверждение получила гипотеза о роли ветра определенной направленности, который способствовал, в результате Экмановского переноса, опусканию холодных водных масс по крутым подводным береговым склонам [6, 7]. Однако этот механизм может действовать только в условиях открытой воды и низких температур вблизи поверхности, то есть, либо поздней осенью, когда на Байкале еще нет льда, либо ранней зимой.

По данным наблюдений эпизоды внезапного охлаждения глубинных вод были зафиксированы также и в весенний период, когда озеро еще находится подо льдом [7]. Мы предполагаем, что причинами таких событий могут быть процессы с участием метана.

В описываемых сценариях рассматривались конкретные условия эпизода в апреле 2009, когда кольцо было обнаружено в западной оконечности Южного Байкала. Источником возмущений был одномоментный выпуск гидрата из предполагаемого источника на дне озера, расположенного под кольцом. В процессе всплытия, приблизительно на глубине 380 м, происходило разложение гидрата. Дальнейший быстрый подъем водных масс до твердой поверхности льда приводил к возникновению возвратных течений вниз, что и запускало глубокую конвекцию.

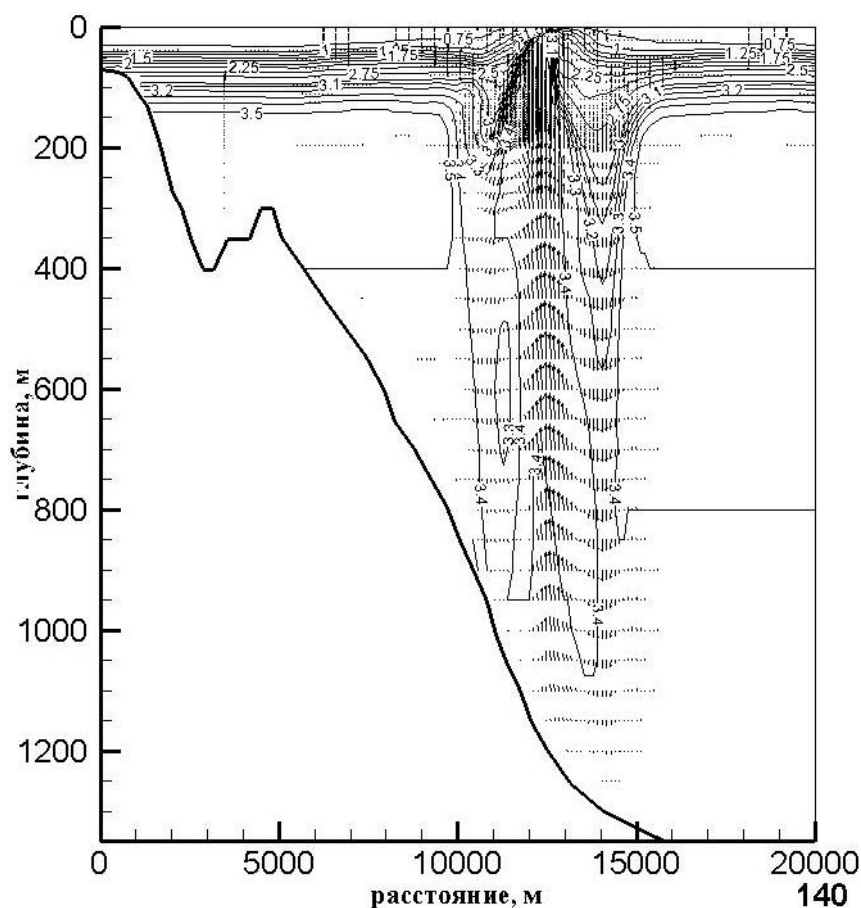


Рис. 1. Температура и течения на вертикальном разрезе области через центр струи через 14 часов после начала сценария без учета объемного поглощения тепла

Байкал славится не только своей чистой прозрачной водой, но и прозрачным льдом. Так как лед хорошо пропускает солнечную энергию, весенний прогрев воды подо льдом начинается задолго до таяния [5]. Поскольку температура вблизи нижней кромки льда меньше температуры максимальной плотности воды на этой глубине, приток тепла запускает естественную конвекцию в верхнем слое. То есть, к возвратным течениям вполне может присоединиться и процесс естественной конвекции подо льдом.

Математическое моделирование дает возможность сравнить результаты численных экспериментов по двум сценариям: без учета и с учетом объемного поглощения тепла в водной толще подо льдом.

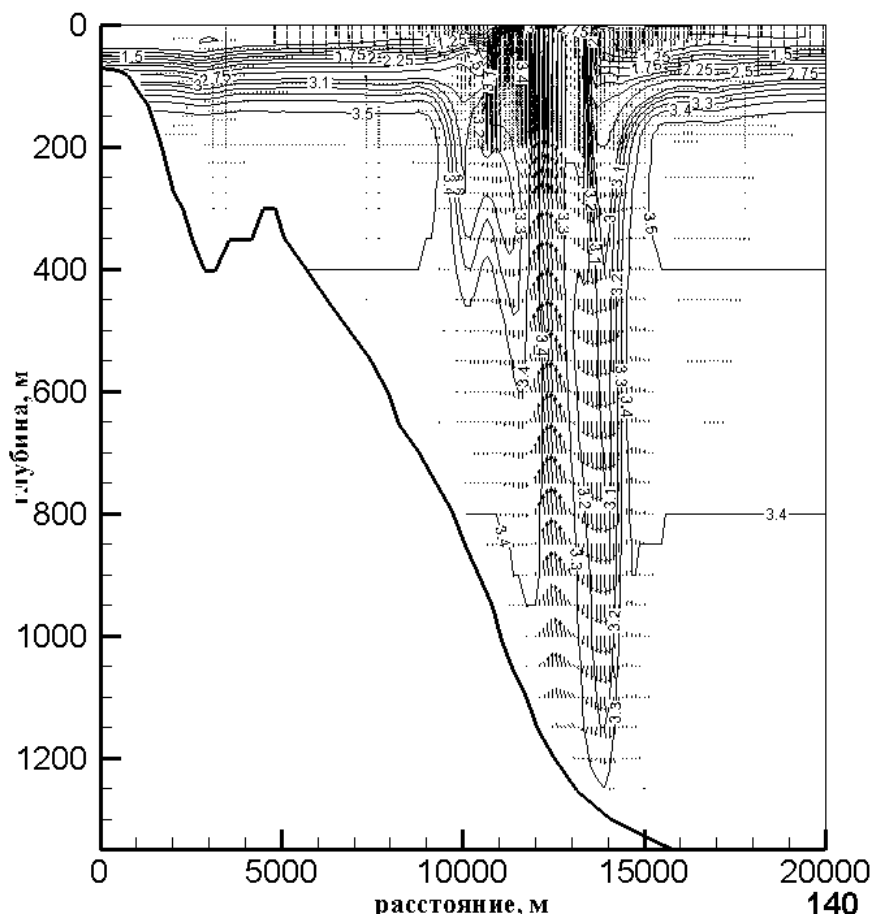


Рис. 2. Температура и течения на вертикальном разрезе области через центр струи через 14 часов после начала сценария с учетом объемного поглощения тепла

Из сравнения рис. 1 и 2 видно, что холодная вода в сценарии 2 (рис. 2) поступила в самые глубокие слои озера, то есть процесс обновления глубинных вод пошел более интенсивно по сравнению со сценарием 1 (рис. 1). Эти результаты объяснимы с физической точки зрения. Отличие двух сценариев - действие распределенного источника тепла. Температура воды подо льдом весной ниже температуры максимальной плотности, поэтому поступление тепла приводит к повышению температуры. Следовательно, плотность воды на этой глубине увеличивается, и более тяжелая вода, присоединяясь к возвратному течению, начинает проваливаться вниз, как это и полагается при конвекции. Далее она продолжит опускаться либо до дна, либо до той глубины, где её плотность сравняется с той, что имеет вода на этой глубине.

Вывод. Численные эксперименты показали, что естественная конвекция подо льдом интенсифицирует процессы вынужденной глубокой конвекции и способствует обновлению глубинных вод.

Работа выполняется при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН I.33П и гранта РФФИ №14-01-00125-а.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гранин Н.Г. Окольцованный Байкал. Гигантские кольца на льду Байкала. Объяснение ученых// Наука из первых рук.- 2009.- №3. - С. 22-23.
2. Гранин Н.Г., В.В. Козлов, Е.А. Цветова, Р.Ю. Гнатовский. Полевые исследования и некоторые результаты численного моделирования кольцевой структуры на льду озера Байкал // ДАН.- 2015.- Т. 461. - № 3. - С. 343–347.
3. Цветова Е.А. Моделирование локальных явлений, связанных с присутствием метана в водной толще озера Байкал //В сб. материалов 39 конференции « Математическое моделирование в проблемах рационального природопользования». - Ростов-на-Дону: Изд. ЮФУ. - 2011. - С. 230-234.
4. Цветова Е.А. Моделирование переноса и трансформации метана в Байкале // Современные проблемы математического моделирования. Сб. трудов XVI Всероссийской конференции-школы молодых исследователей.- Ростов-на- Дону: Изд ЮФУ.- 2015. - С. 178 – 185.
5. Shimaraev M. N., V. I. Verbolov, N. G. Granin, and P. P. Sherstyankin. Physical Limnology of Lake Baikal: A Review. -1994. – Irkutsk: Baikal Int. Cent. of Ecol. Res.- 81 P.
6. Schmid M., N. M. Budnev, N. G. Granin, M. Sturm, M. Schurter, and A. Wuest. Lake Baikal deepwater renewal mystery solved// Geophys. Res. Lett. -2008.- 35.- L09605, doi:10.1029/2008GL033223.
7. Tsimriti, C., B. Rockel, A. Wuest, N. M. Budnev, M. Sturm, and M. Schmid . Drivers of deep-water renewal events observed over 13 years in the South Basin of Lake Baikal// J. Geophys. Res. Oceans.- 2015. - V. 120. -P.1508–1526. doi:10.1002/2014JC010449.
8. Tsvetova E.A. Modeling of hydrodynamics of water-methane heterogeneous system // Proc. SPIE 9680, 21st International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics.- 2015.- 968075 (November 19, 2015); doi:10.1117/12.2205998.
9. Weiss, R. F., E. C. Carmack, and V. M. Koropalov. Deep-water renewal and biological production in Lake Baikal// Nature.-1991, - V. 349(6311).- P 665–669. doi:10.1038/349665a0.

© Е. А. Цветова, 2016

РАСЧЕТ ТЕЧЕНИЙ В НОВОСИБИРСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Виктория Викторовна Кравченко

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, младший научный сотрудник лаборатории математического моделирования процессов в атмосфере и гидросфере, тел. (913)905-18-81, e-mail: kravt@ommfao.sccc.ru

Разработана численная модель для вычисления течений в Новосибирском водохранилище. На основе метода расщепления по физическим процессам и метода конечных элементов, примененных к двумерному нелинейному уравнению вихря, получена схема с двумя этапами расщепления. После расщепления по физическим процессам для построения сеточных уравнений используются различные виды конечных элементов. В частности, на этапе, описывающем адвекцию-диффузию вихря, применяются неконформные конечные элементы.

Ключевые слова: двумерное нелинейное уравнение вихря, метод расщепления, метод смешанных конечных элементов, неконформные конечные элементы, Новосибирское водохранилище.

THE CALCULATION OF CURRENTS IN NOVOSIBIRSK RESERVOIR

Victory V. Kravtchenko

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, pr. Akademika Lavrentjeva, 6, Junior Researcher of the Laboratory of Mathematical Modelling of processes in Atmosphere and Hydrosphere, tel. (913)905-18-81, e-mail: kravt@ommfao.sccc.ru

Numerical model of planimetric currents in Novosibirsk Reservoir was developed. Based on the splitting in terms of physical processes and with respect to time and on a finite element method (FEM) as applied to a 2D nonlinear vorticity equation, a scheme with two splitting steps was obtained. For constructing FEM operators at the steps of splitting in terms of physical processes, different types of finite elements are used. In particular at the step, corresponding to the vorticity advection and diffusion, the non-conforming finite elements are used.

Key words: 2D nonlinear vorticity equation, splitting method, mixed finite element method, non-conforming finite elements, Novosibirsk Reservoir.

Новосибирское водохранилище – крупнейший искусственный водоем Западной Сибири. Созданное с основной целью выработки электроэнергии, водохранилище играло и продолжает играть важную роль и в других направлениях экономики региона. Изучение гидрологических, гидрохимических и гидробиологических процессов в водохранилище в период его формирования и в последующие годы проводилось многими институтами СО РАН.[1] Также ведется постоянный контроль за качеством воды.

Практическая значимость комплексного экологического мониторинга водохранилища связана с важной ролью водоема в оперативном регулировании энергоснабжения региона, регулировании крайне неравномерного в течение года стока реки Обь, обеспечении водой населения, сельского хозяйства и промышленности Новосибирской области и Алтайского края. В водохранилище ведется промысловый и любительский лов рыбы, на его берегах и акватории осуществляется туристическая и рекреационная деятельность.

В современных условиях создание математической модели при исследовании водного объекта стало обязательным в развитых странах. Центральным компонентом модельного ряда должен быть гидрологический блок. Успешность решения конкретных прикладных задач прямо связана с качеством воспроизведения структуры водообмена. Вместе с тем, надежной верифицированной гидродинамической модели Новосибирского водохранилища, обеспечивающей детализацию пространственной структуры потока, до настоящего времени не создано.

Новосибирское водохранилище (от г. Камень-на-Оби до плотины ГЭС) представляет собой неширокий вытянутый водоем протяженностью около 200 км.

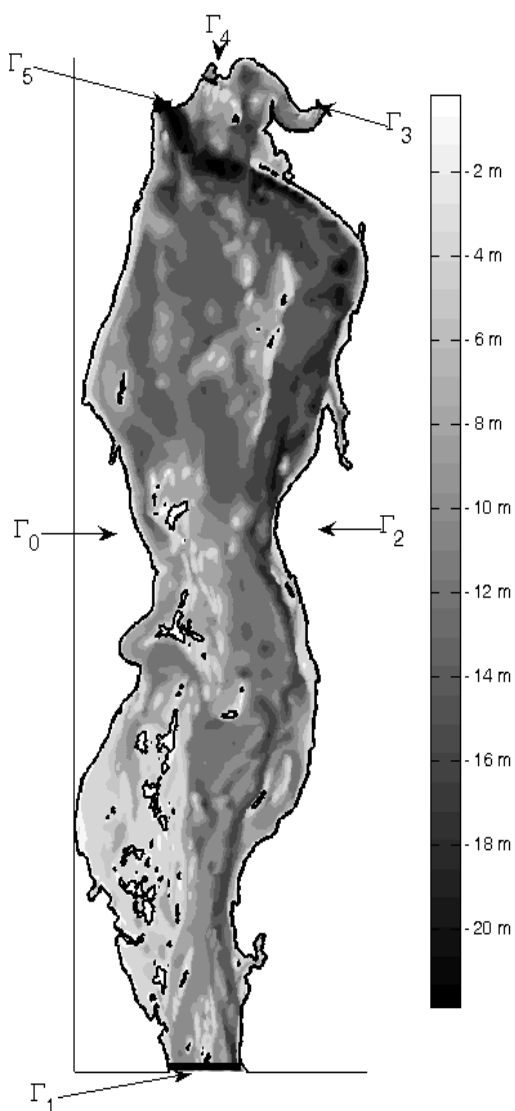


Рис. 1. Рельеф дна
Новосибирского водохранилища

Расчет проводился в нижней части водохранилища (от поселка Завьялово до плотины), представляющий собой озеровидный плес, вытянутый строго с юго-запада на северо-восток. По левобережной затопленной пойме располагаются многочисленные острова. Основное поступление воды (более 95 %) происходит через входной створ по реке Оби. На боковую приточность приходится менее 5 % общего объема притока, наибольшее влияние оказывает река Бердь, переходящая в Бердский залив.

На рис. 1 изображен рельеф дна, построенный на основании большой судоходной карты 1978 г для сетки с шагом около 120 м. В качестве жидких границ выбраны поперечный створ в районе села Завьялово (Γ_1), створ в районе прохождения Бердского шоссе через Бердский залив (Γ_2) и зона ГЭС (Γ_5). Есть намерения в будущем включить водосливную плотину с учетом дополнительных сбросов во время паводка.

Преобладающее направление ветра зимой и весной юго-западное, его средняя

скорость над водохранилищем 5,2 м/с. Преобладающим направлением в мае-июне и сентябре является юго-западное, в июле-августе – северное. Среднемесячная скорость ветра над водной поверхностью составляет 4,3-5,3 м/с.

Октябрь – самый штормовой месяц. Повторяемость ветра со скоростью 8 м/с и более от сентября к октябрю увеличивается почти на 10 %. В это время наблюдаются ветры юго-западного направления со скоростью 25-30 м/с, а иногда до 40 м/с. На рис. 2 приведены роза ветров и преобладающие скорости ветров, построенные на основе данных о повторяемости ветра на Новосибирском водохранилище в безледоставный период (15.04-15.11) за 1990-2010 гг., ГМО Обская [1].

На данный момент реализован расчет течений только для определенных направлений ветра с модельным фронтом в виде синуса, но в дальнейшем предполагается построение сценария со сменой ветра в реальном времени на основе статистических данных.

Для нахождения поля скоростей используется двумерное нелинейное уравнение вихря. На твердых границах поставлены условия непротекания и скольжения, на жидких значение функции тока вычисляется исходя из заданного расхода воды.

$$u = -\frac{1}{H} \Psi_y, \quad v = \frac{1}{H} \Psi_x$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\Delta_H \Psi) - \text{rot} \left(\frac{1}{H} \Delta_H \Psi \nabla \Psi \right) - \text{rot} \left(\frac{f}{H} \nabla \Psi \right) + R \Delta_H \Psi - \mu \Delta_H \Psi = F, \quad (1)$$

$$\text{rot} U = -(u)_y + (v)_x, \quad \Delta_H \Psi = \left(\frac{1}{H} \Psi_x \right)_x + \left(\frac{1}{H} \Psi_y \right)_y, \quad F = \frac{1}{\rho_0} \text{rot} \left(\frac{\tau}{H} \right)$$

$$\Psi|_{\Gamma_0} = 0, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial N} \Big|_{\Gamma_2, \Gamma_4} = 0, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial l} \Big|_{\Gamma_2, \Gamma_4} = 0, \quad \int_{\Gamma_i} \frac{\partial \Psi}{\partial N} dl = Q_i, \quad i = 1, 3, 5; \quad \Delta_H \Psi|_{\partial \Omega} = 0, \quad \Psi|_{t=0} = 0.$$

Здесь $U = (u, v)$ - скорость течения, Ψ - функция тока, $H(x, y) \geq H_0 > 0$ - глубина, f - параметр Кориолиса, p - давление, $\rho = \rho_0 = \text{const}$ - плотность, μ - горизонтальная турбулентная вязкость, R - коэффициент придонного трения, τ - напряжение трения ветра.

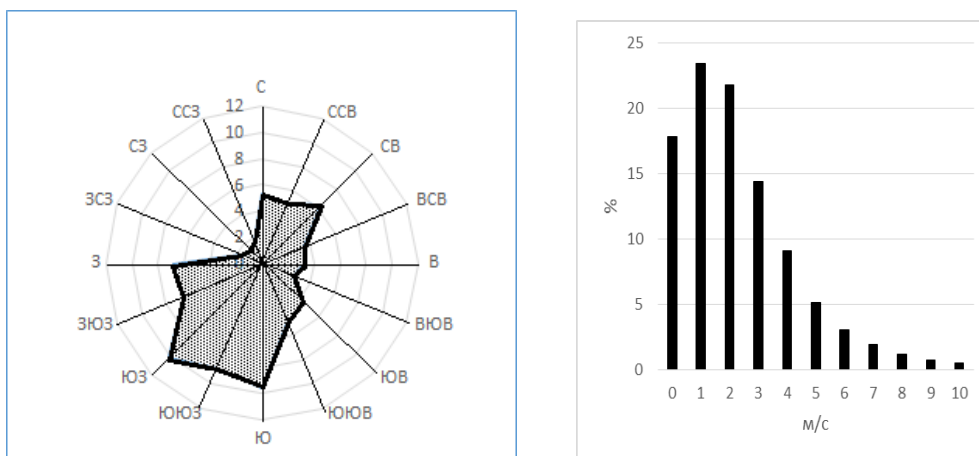


Рис. 2. Повторяемость ветра (%) по направлениям и по скорости (м/с) в безледоставный период за 1990-2010 гг.

Предлагаемая модель для решения уравнения (1) построена на основе расщепления в комбинации с методом конечных элементов (МКЭ). При этом расщепление проводится на различных этапах построения численной модели и включает в себя как расщепление по физическим процессам, позволяющее провести линеаризацию исходной задачи, так и расщепление по времени на одном из этапов. Неконформные элементы (рис. 3) применяются на первом этапе, описывающем адвекцию-диффузию вихря, получающегося в результате расщепления уравнения(1) по физическим процессам. На втором этапе для функции тока используются конформные конечные элементы (рис. 3). Вследствие подобного совместного применения конформных и неконформных элементов удастся сократить сеточный шаблон при переходе от одной характеристики к другой на этапах расщепления. Для более подробного описания модели см. [2, 3].

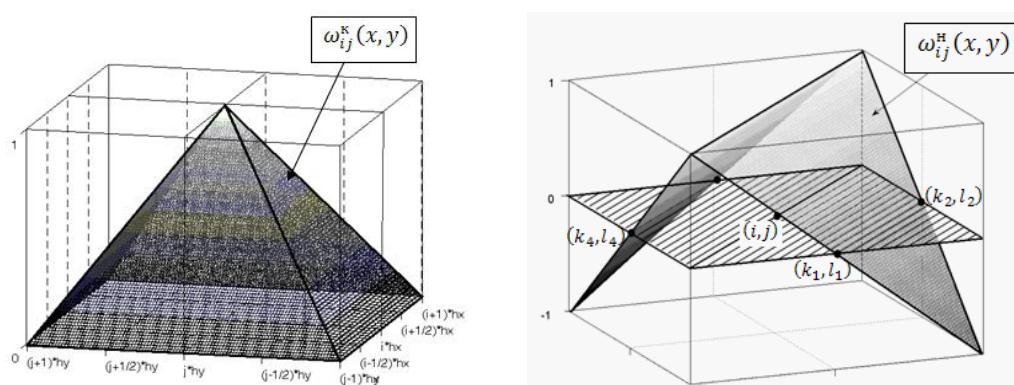


Рис. 3. Конформный (слева) и неконформный (справа) конечные элементы

Ниже приведены результаты для юго-восточного ветра со скоростью 4 м/с и для слабого и сильного притока. Хорошо просматривается характерное для

Новосибирского водохранилища стокое течение в районе затопленного русла, в пойменной части и у левобережья течения незначительные (рис. 4).

Для варианта: а) приращение между линиями тока $\Delta\Psi = 50 \text{ м}^3/\text{с}$; для варианта б) приращение $\Delta\Psi = 125 \text{ м}^3/\text{с}$.

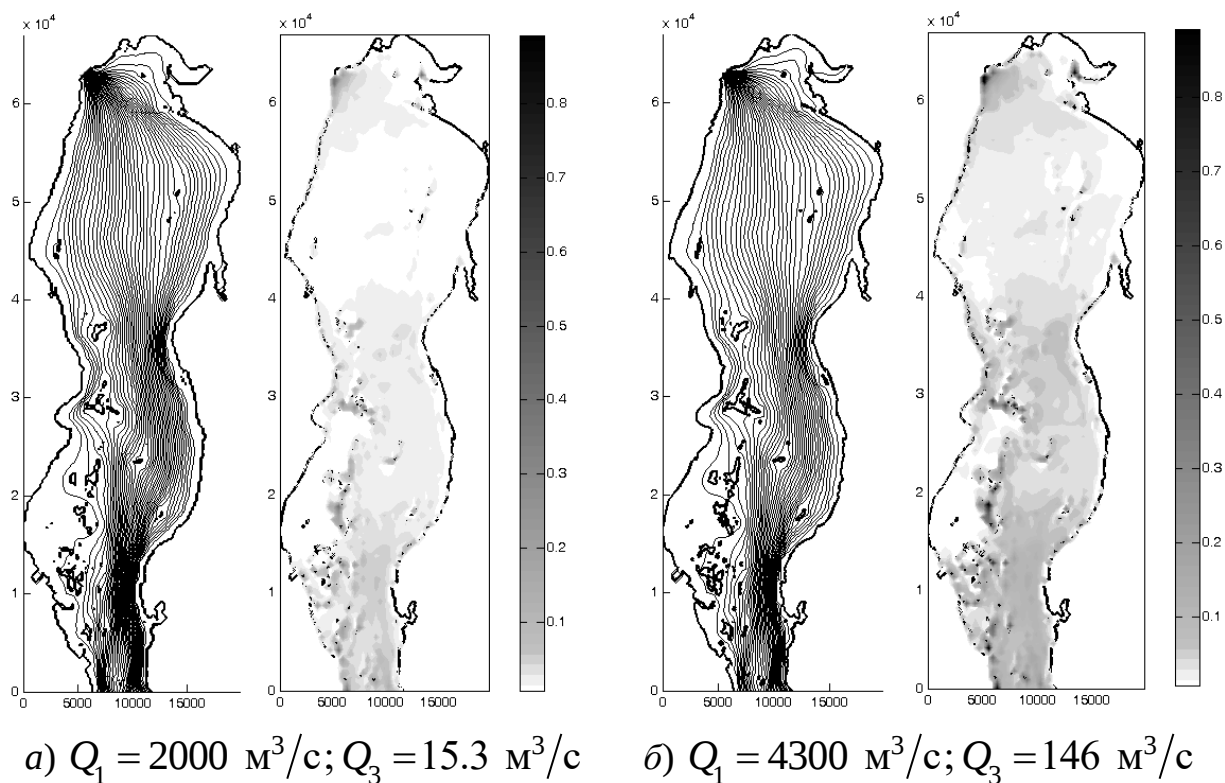


Рис. 4. Изолинии функции тока и распределение модуля скорости (м/с) для слабого (а) и сильного (б) притока

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савкин В. М. и др. Многолетняя динамика водно-экологического режима Новосибирского водохранилища : монография. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2014. – 393 с. + [вкл. 4 с.].
2. Кравченко В. В. Численная методика решения двумерного нелинейного уравнения вихря на основе смешанных конечных элементов // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск: СГГА, 2010. Т. 4, ч. 1. – С. 111–115.
3. V.I. Kuzin, V.V. Kravtchenko. Application of a mixed finite element method for solving 2D nonlinear vorticity equation in a variable bottom water basin. // Bulletin Of The Novosibirsk Computing Center, Numerical Modeling in Atmosphere, Ocean, and Environment Studies – 2012. - Issue 13 (2012). – P. 29-41.

© В. В. Кравченко, 2016

МОДЕЛИРОВАНИЕ СУБМАРИННЫХ ТАЛИКОВ НА ШЕЛЬФЕ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

Валентина Владимировна Малахова

Институт вычислительной математики и математической геофизики, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-64-50, e-mail: malax@sscc.ru

В работе приведены результаты математического моделирования эволюции подводной мерзлоты на арктическом шельфе с учетом возможного развития термокарстовых озер и формирования субмаринных таликов. Субмаринные талики, образованные при затоплении термокарстовых озер, являются дестабилизирующим фактором и важны при моделировании современного состояния подводной мерзлоты.

Ключевые слова: шельф моря Лаптевых, подводная мерзлота, талики, зона стабильности метангидратов, термокарстовые озера.

MODELING OF SUBMARINE TALIKS OF THE LAPTEV SEA SHELF

Valentina V. Malakhova

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Pr. Acad. Lavrentieva, 6, kandidat (Ph. D.) of Physical and Mathematical Sciences, Researcher, tel. (383)330-64-50, e-mail: malax@sscc.ru

We presented the results of mathematical modeling of the subsea permafrost on the Laptev Sea shelf, taking into account the possible development of the thermokarst lakes within shelf and the formation of submarine taliks. The submarine taliks formed by thermokarst lakes are a destabilizing factor and are important for modeling the subsea permafrost current state.

Key words: the Laptev Sea shelf, subsea permafrost, taliks, methane hydrate stability zone, thermokarst lakes.

Море Лаптевых является одной из акваторий Северного Ледовитого океана, где развита подводная мерзлота и выполняются условия для существования газогидратов метана на мелководном шельфе. Формирование субаквальной мерзлоты в донных отложениях определяется глубоким промерзанием на субэкральных этапах развития шельфа, когда он становился сушей и отрицательной температурой придонной воды в современных субаквальных условиях [1]. В результате деградации подводной мерзлоты происходит нарушение термобарических условий стабильности метангидратов. Образованные сквозные талики в мерзлых донных отложениях создают пути для потоков газа из разрушенных гидратов, что может приводить, или уже приводит к повышенной эмиссии метана в атмосферу данного региона [2, 3]. Поэтому, состояние мерзлоты арктических шельфов является фактором, контролирующим стабильность метангидратов.

Данные о состоянии субаквальной мерзлоты под дном моря Лаптевых, полученные на основании буровых профилей, имеются в ограниченном

количестве. Для изучения состояния подводной криолитозоны широко используется математическое моделирование [4, 5]. Процессы оттаивания многолетнемерзлых пород шельфа является длительными и в разных районах арктического шельфа протекают с различной скоростью [4]. Полученные ранее результаты численных расчетов динамики субаквальной мерзлоты на шельфе морей восточной Арктики с учетом экстремального сценария потепления RCP8.5 показали, что газогидратный слой остается изолированным от поверхности морского дна слоем мерзлого грунта до 2100 года. При полученных скоростях деградации мерзлоты зона стабильности (ЗСТ) метана останется изолированной еще несколько тысяч лет после 2100 г. [5].

Значимую роль для состояния субаквальной мерзлоты играет влияние процессов термокарста, которые не были учтены в предыдущем исследовании [5]. При потеплении в период голоцена шельф Восточной Арктики, который был осушен во время регрессии моря, подвергался процессам озерного термокарста [6]. Это приводило к затоплению морской водой территорий, подвергшихся термокарсту. В результате, сформированные до затопления шельфа озера и термокарстовые лагуны создают благоприятные условия для развития нисходящих таликов под отепляющим влиянием озера.

В настоящей работе проводится моделирование современного состояния подводной мерзлоты с учетом влияния подоцерных таликов, сформированных на шельфе до момента его затопления. Моделирование динамики толщи субаквальных мерзлых пород шельфа моря Лаптевых проводилось с помощью математической модели, которая описывает перераспределение тепла в системе атмосфера - океан - осадочный слой морского дна. Для исследования динамики мерзлоты и определения ее мощности использовался палеогеографический сценарий, учитывающий изменения уровня океана и формирование мерзлых толщ в субаэральных условиях на протяжении 120 тысяч лет. Более подробное описание используемой модели подводной мерзлоты и детали палеогеографического сценария представлены автором ранее в работе [5].

Был проведен расчет для шельфа восточной части моря Лаптевых для современной изобаты 20 м. Верхние граничные условия задавались в виде изменения температуры грунта по времени. По выбранному сценарию 117 тысяч лет назад (т.л.н.) начиналось осушение шельфа, и расчёт проводился в субаэральных условиях. В процессе расчета температура на верхней границе соответствовала значениям температуры воздуха. За начальный момент протаивания ледового комплекса и образования озера принималось время 13 т.л.н. После образования термокарстового озера температура на верхней границе повышалась и принимала значение $+2^{\circ}\text{C}$ [6]. В ходе последующей трансгрессии океана, 5 т.л.н., она приравнивалась к температуре придонных слоев морской воды, $-1,8^{\circ}\text{C}$. Считалось, что как только точка шельфа переходит от субаквальных условий к субаэральным, или наоборот, температура меняется скачком. Принималось, что на месте озера происходит понижение рельефа до 30 м и

накопление засоленных морских отложений, температура замерзания которых составила $-1,8^{\circ}\text{C}$. Отложение разреза ниже 30 м считалось незасоленным с температурой замерзания 0°C . На нижней границе модельной области задавался геотермический поток 60 мВт/м^2 .

Результаты расчетов представлены на рис. 1 в виде графиков изменений температур в донных отложениях для глубин 0, 100, 200, 300, 500 м под дном моря на шельфе. К началу образования озера (13 т.л.н.) подошва мерзлых отложений находится на глубине порядка 680 м под морским дном в результате длительного промерзания этой части шельфа в субаэральных условиях. Изменение палеогеографических условий на поверхности в результате образования озера приводит к росту температуры в донных отложениях для всех представленных глубин. В верхних 115 м температура повышается до положительных значений, что приводит к разрушению мерзлого слоя донных отложений и образованию несквозного талика, рис. 2. Сокращение мощности мерзлоты в период существования озера происходит и со стороны нижней границы за счет геотермического потока со скоростью $1,8 \text{ см в год}$. При этом температура в слое мерзлого грунта повышается до 0°C , что соответствует заданной температуре фазовых переходов. Температурный профиль в слое мерзлых донных отложений становится безградиентным.

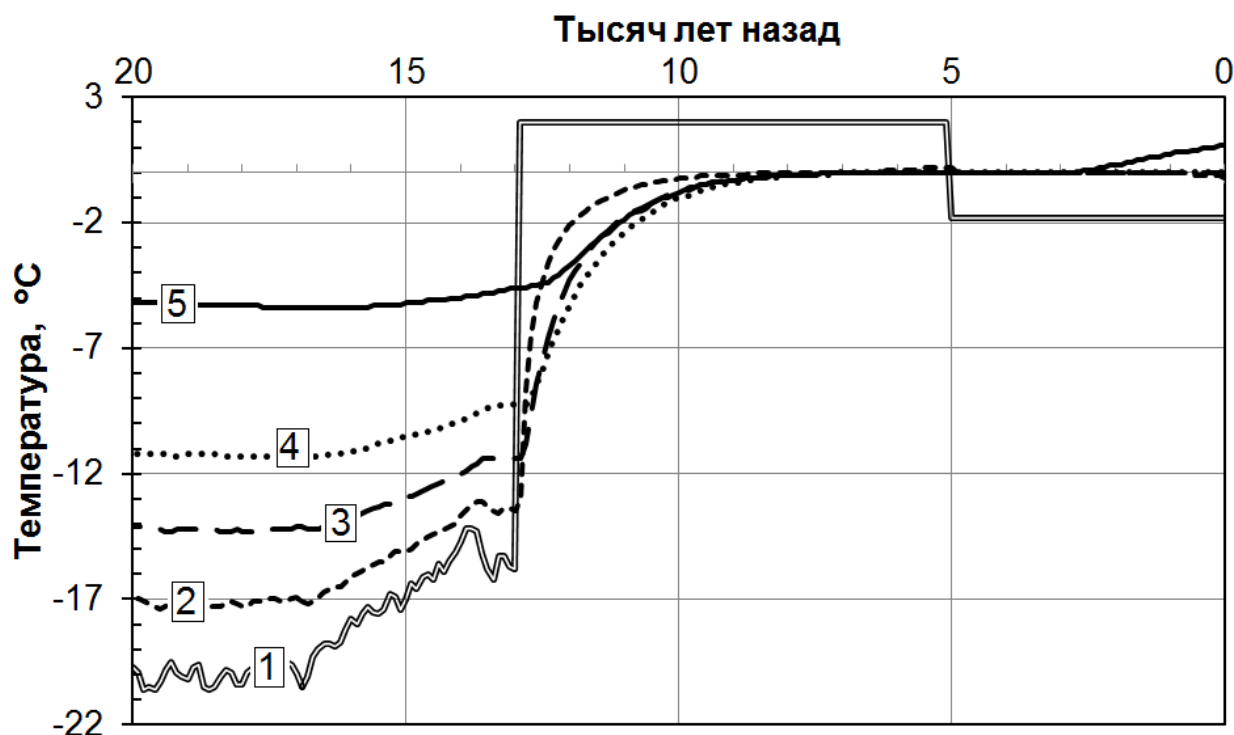


Рис. 1. Результаты моделирования для восточной части моря Лаптевых при глубине моря 20 м. Ход температур в донных отложениях для глубин под дном моря: (1) — поверхность дна, (2) — 100 м, (3) — 200 м, (4) — 300 м, (5) — 500 м

В процессе трансгрессии и последующего затопления озера морской водой происходит дальнейшее разрушение мерзлоты со стороны нижней границы со

скоростью до 2 см/год и промерзание в верхнем слое донных отложений под озером со скоростью 2,1 см/год, рис. 2. В сценарном эксперименте глубина промерзания талика составила порядка 104 м, тогда как верхняя граница мерзлых пород находится на глубине 115 м. Талым остается и верхний 30 м слой донных осадков, который предполагается сложенным морскими засоленными отложениями. В результате численного эксперимента получено, что подводная мерзлота состоит из перемежающихся слоев талых и охлажденных пород, рис. 2.

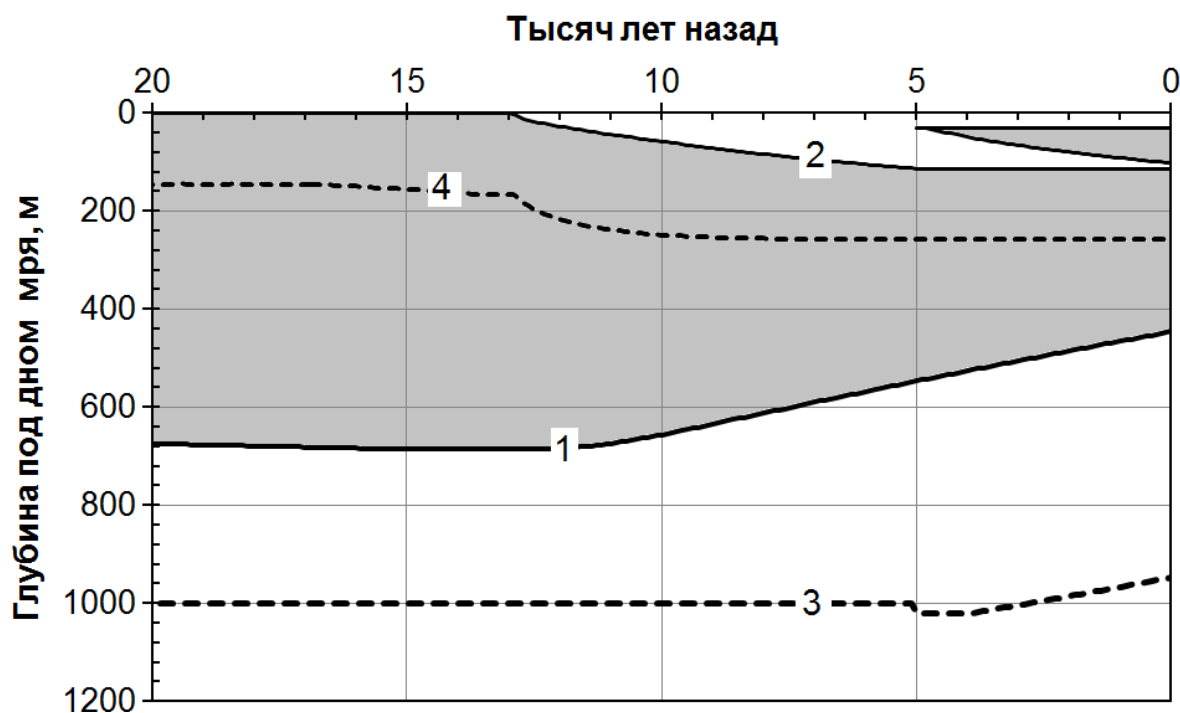


Рис. 2. Результаты моделирования для восточной части моря Лаптевых при глубине моря 20 м. Динамика мощности мерзлоты и ЗСГ метана на шельфе с 20 т.л.н. до настоящего времени (в м): (1) – изменение положения нижней границы мерзлоты, (2) – верхней границы мерзлоты, (3) – нижней границы ЗСГ метана, (4) – верхней границы ЗСГ метана

В данном исследовании проводился расчет зоны стабильности гидратов метана на основе учета термобарических условий дна и поддонного грунта. В условиях подводной мерзлоты ЗСГ метана мощностью 700 м существует по всей области шельфа моря Лаптевых. Верхняя граница этой зоны находится внутри мерзлой толщи, а нижняя - ниже подошвы мерзлоты. Значительные изменения с ЗСГ происходят при повышении температуры в донных отложениях и уменьшении мощности мерзлого слоя во время образования озера и трансгрессии моря, рис. 2. Однако уменьшение мощности ЗСГ метана происходит более медленно, чем криолитозоны, что объясняется дополнительным стабилизирующим фактором - возрастанием гидростатического давления за счет повышения уровня моря в период трансгрессии. В результате опускания верхней границы ЗСГ метана на 80 м, и

возможного разложения гидратов может происходить накопление свободного метана в охлажденных слоях донных отложений. Потоки газа в вышележащие слои и придонную воду будут контролироваться только состоянием мерзлого слоя.

Таким образом, в разных частях арктического шельфа состояние мерзлых толщ может быть различно. Так, субмаринные талики, образованные вследствие затопления термокарстовых озер в процессе трансгрессии, нарушают сплошность верхних слоев подводной мерзлоты, приводят к увеличению скорости ее деградации и могут создавать дополнительные каналы для выхода газа внутри мерзлых пород. Потоки газа в местах таких таликов могут приводить к обогащению метаном придонного слоя воды и эмиссии метана в атмосферу на шельфе моря Лаптевых [2, 3].

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов РФФИ (№ 14-05-00730 А, № 15-05-02457 А).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Романовский Н.Н., Тумской В.Е. Ретроспективный подход к оценке современного распространения и строения шельфовой криолитозоны восточной Арктики // Криосфера Земли. 2011. Т. XV. № 1. С. 3–14.
2. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Rekant P., Salyuk A., Kosmach D. Geochemical and geophysical evidence of methane release from the inner East Siberian Shelf // J. Geo-phys. Res. 2010. V.115. C08007, doi:10.1029/2009JC005602.
3. Малахова В.В., Голубева Е.Н. О возможной эмиссии метана на шельфе морей Восточной Арктики // Оптика атмосферы и океана. – 2013. Т. 26, № 06. С. 452–458.
4. Разумов С.О., Спектор В.Б., Григорьев М.Н. Модель позднекайнозойской эволюции криолитозоны шельфа западной части моря Лаптевых // Океанология. 2014. Т.54. № 5. – С. 679-693.
5. Малахова В.В., Голубева Е.Н. Оценка устойчивости состояния мерзлоты на шельфе Восточной Арктики при экстремальном сценарии потепления в XXI в. // Лёд и Снег. 2016. Т.56. №1. С.61-72. DOI:10.15356/2076-6734-2016-1-61-72
6. Касымская М.В. Реликтовый термокарстовый рельеф и талики восточной части шельфа моря Лаптевых. Автореф. дисс. М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2010. 28 с.

© В. В. Малахова, 2016

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО МАКСИМУМА ТЕМПЕРАТУРЫ В КАНАДСКОМ БАССЕЙНЕ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА

Дина Фаруковна Якишина

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, младший научный сотрудник, тел. (383)330-64-50, e-mail: yusupova.dina.f@gmail.com

Елена Николаевна Голубева

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)330-64-50, e-mail: elen@ommfao.sccc.ru

Изучаются возможные причины формирования подповерхностного максимума температуры в водах Северного Ледовитого океана, покрытых льдом в летний период. Результаты численного эксперимента показывают, что основным физическим механизмом является коротковолновая радиация, проникающая под ледяной покров в верхний слой моря.

Ключевые слова: Арктика, вертикальная структура вод, изменение климата, морской лед, Северный Ледовитый океан, численное моделирование.

THE STUDY OF MECHANISMS OF THE NEAR-SURFACE TEMPERATURE MAXIMUM FORMATION IN THE CANADA BASIN OF THE ARCTIC OCEAN

Dina F. Iakshina

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, prospect Akademika Lavrentjeva, 6, junior scientist, tel. (383)330-64-50, e-mail: yusupova.dina.f@gmail.com

Elena N. Golubeva

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, prospect Akademika Lavrentjeva, 6, Dr. Phys.-Math. Sci., leading scientist, tel. (383)330-64-50, e-mail: elen@ommfao.sccc.ru

We study the possible causes of the formation of subsurface temperature maximum in the waters of the Arctic Ocean covered by ice in summer. Numerical experiment results show that the basic physical mechanism is a short-wave radiation penetrating under the ice cover in the upper layer of the sea.

Key words: Arctic Ocean, numerical modeling, sea ice, climate change, ocean water stratification.

Введение

Одной из характеристик вертикальной стратификации вод Северного Ледовитого океана (СЛО) является приповерхностный температурный максимум (ПТМ), регистрирующийся в океанических областях, покрытых льдом

в летний период. Данные наблюдений, полученных на основе использования замороженных в лед буев, имеющиеся в открытом доступе (<http://www.whoi.edu/page.do?pid=20781>), регистрируют возникновение ПТМ в летний период и его дальнейшее исчезновение. Механизм формирования ПТМ на основе анализа данных наблюдений обсуждался в работах [1, 2]. В работе [1] он был определен как наименее глубоко расположенный температурный максимум $T_{\max}$, который удовлетворяет трём следующим критериям: критерий 1 - температура $T_{\max}$ выше точки замерзания должна быть более 0.2°C ; критерий 2 - температура $T_{\max}$ выше точки замерзания должна быть более чем на 0.1°C выше, чем у температурного минимума, расположенного в непосредственной близости в нижележащих слоях; критерий 3 - соленость должна быть менее 31 ‰. В представляемой работе исследуются возможные физические процессы, приводящие к образованию ПТМ на основе трехмерной численной модели СЛО.

Метод исследования

Для проведения численных экспериментов используется трехмерная региональная численная модель СЛО и Северной Атлантики ИВМиМГ СО РАН [3-5]. Для определения потоков на поверхности океана и морского льда используются данные атмосферного реанализа NCEP/NCAR [6]. В ходе численного эксперимента моделируются изменения, происходящие в состоянии вод и морского льда, определяемые изменчивостью атмосферной циркуляции в период с 1948 по 2012 гг.

Результаты моделирования и данные наблюдений

Численные эксперименты проводились следующим образом. Начальный расчет был проведен на 30 лет с учетом меняющихся потоков на поверхности океана, рассчитанных для состояния атмосферы в 1948 г. [6] и ледового покрытия, равного 2 м в точках области с температурой ниже -1.8 . Два численных эксперимента были проведены с использованием полученного модельного состояния в качестве начальных полей для температуры, солености и поля льда.

В первом эксперименте учитывалось проникновение коротковолновой солнечной радиации на открытой поверхности и под ледяной покров в верхний слой моря на основе подхода [7]. Во втором эксперименте считалось, что вся поступающая коротковолновая солнечная радиация поглощается в верхнем 2,5 метровом слое океана. Оба эксперимента были просчитаны на период с 1948 по 2012 гг.

Полученные в результате численных экспериментов модельные поля отражают пространственно-временную изменчивость водных масс и морского льда СЛО. Критерии существования подповерхностного максимума температуры, определенные в работе [1], были применены к оценке модельных полей. На основе этих критериев были выделены точки, в которых

присутствует подповерхностный максимум в вертикальном распределении температуры. На рис. 1 показана временная изменчивость вертикальной структуры температуры и солёности верхнего слоя океана, а также толщина льда для одной из таких точек. В первом эксперименте при учете проникающей радиации появление подповерхностного максимума температуры происходит в летний период при сокращении толщины льда до двух метров. Его постепенное разрушение (рис. 2, а) происходит в течение осеннего сезона за счет процесса интенсивного вертикального перемешивания, обусловленного охлаждением поверхности и высвобождением соли при образовании льда.

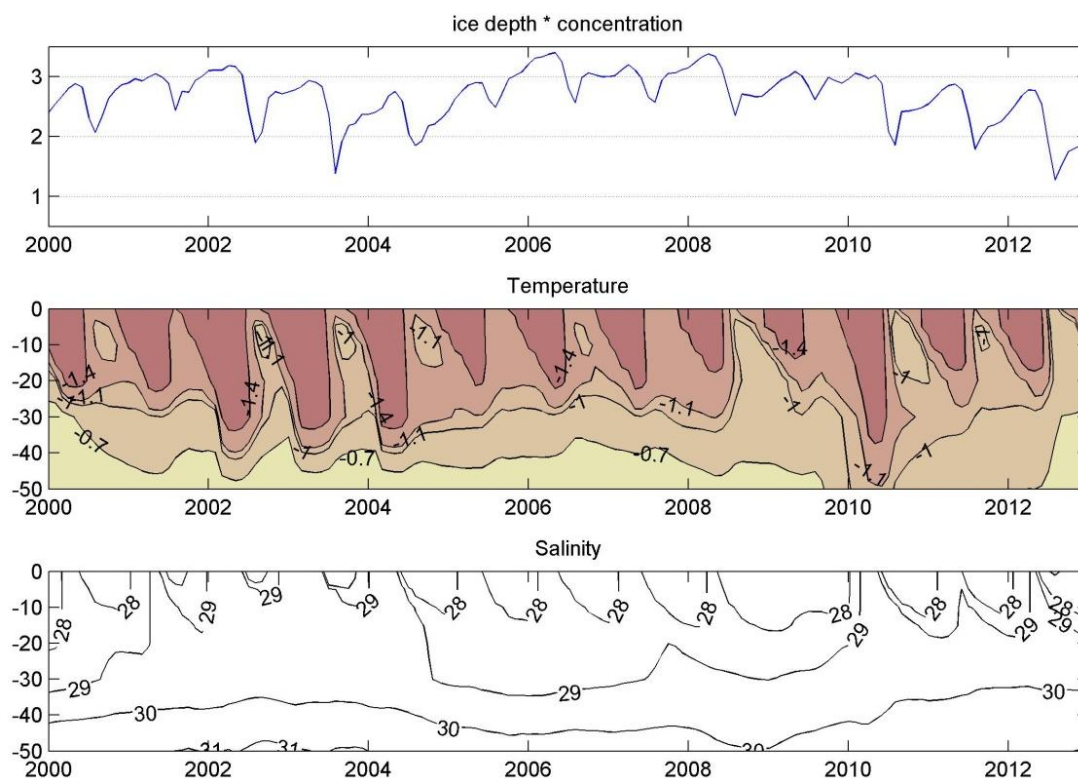


Рис. 1. Временной ход температуры, солёности и толщины льда в Эксперименте 1

Во втором эксперименте, где не учитывалась возможность проникновения коротковолновой радиации в верхний слой океана под ледовым покровом, тепло сконцентрировано ближе к поверхности, а в подповерхностные слои распространяется за счет процессов вертикальной адвекции и диффузии (рис. 2, б, рис. 3).

В этом случае поверхность океана сильнее нагревается, что способствует более интенсивному таянию льда в летний период. Явно выраженный температурный максимум, соответствующий критериям 1-3, не регистрируется.

По результатам проведенного моделирования подповерхностный максимум температуры может также образовываться за счет горизонтальной адвекции тепла из близлежащих регионов, свободных ото льда в летний период.

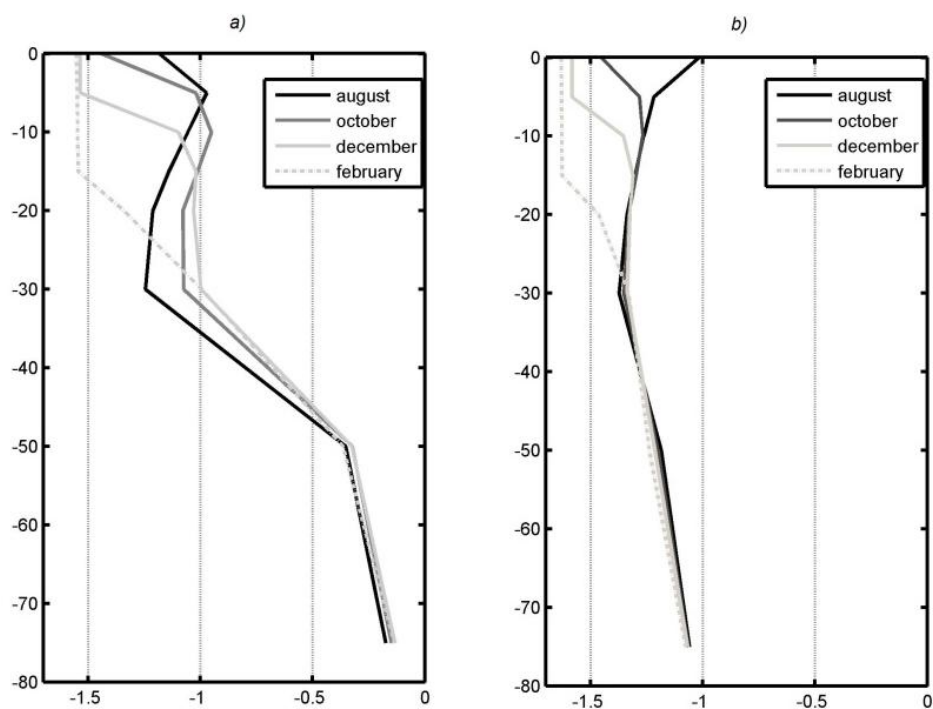


Рис. 2. Изменение вертикального профиля температуры:
а) Эксперимент 1, б) Эксперимент 2

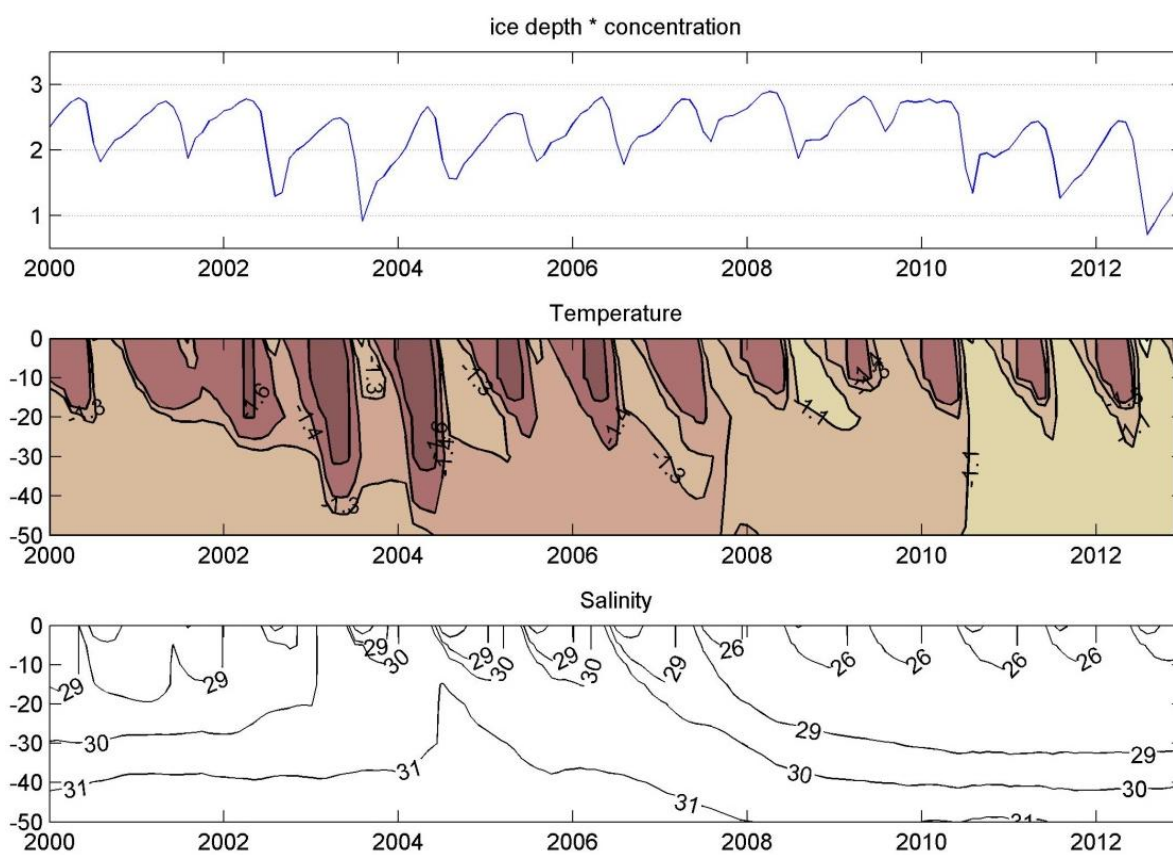


Рис. 3. Временной ход температуры, солёности и толщины льда в Эксперименте 2

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№16-05-00558, №14-05-00730, №16-35-00439).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Jackson, J. M., E. C. Carmack, F. A. McLaughlin, S. E. Allen, and R. G. Ingram (2010), Identification, characterization, and change of the near-surface temperature maximum in the Canada Basin, 1993–2008, *J. Geophys. Res.*, 115, C05021, doi:10.1029/2009JC005265.
2. Jackson, J.M., S.E. Allen, F.A. McLaughlin, R.A. Woodgate, and E.C. Carmack. 2011. Changes to the near-surface waters in the Canada Basin, Arctic Ocean from 1993-2009: A basin in transition, *Journal of Geophysical Research*, 116, C10008, doi:10.1029/2011JC007069.
3. Golubeva, E. N., and G. A. Platov. On improving the simulation of Atlantic water circulation in the Arctic Ocean. // *J. Geophys. Res.* 2007. 112. doi:10.1029/2006JC003734.
4. Голубева Е.Н. Численное моделирование динамики Атлантических вод в Арктическом бассейне с использованием схемы QUICKEST // *Вычислительные технологии*, 2008, т. 13, № 5, стр. 11-24.
5. Hunke E.C., Dukowicz J.K. An elastic-viscous-plastic model for ice dynamics // *J. Phys. Oceanogr.* 1997. V. 27. № 9. P. 1849-1867.
6. <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>.
7. Jerlov, N. G. (1976), *Marine Optics*, Elsevier Oceanogr. Ser., vol. 14, Elsevier, New York.

© Д. Ф. Якина, Е. Н. Голубева, 2016

РЕЗУЛЬТАТЫ ПЯТНАДЦАТИЛЕТНЕГО МОНИТОРИНГА КОНЦЕНТРАЦИЙ БИОГЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ В АЭРОЗОЛЕ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ В П. КЛЮЧИ В ОКРЕСТНОСТИ Г. НОВОСИБИРСКА

Александр Сергеевич Сафатов

Федеральное бюджетное учреждение науки «Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии "Вектор"», 630559, Россия, Новосибирская область, Новосибирский район, р. п. Кольцово, доктор технических наук, зав. отделом биофизики и экологических исследований, тел. (383)363-47-00 (доб. 26-20), e-mail: safatov@vector.nsc.ru

Галина Алексеевна Буряк

Федеральное бюджетное учреждение науки «Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии "Вектор"», 630559, Россия, Новосибирская область, Новосибирский район, р. п. Кольцово, научный сотрудник отдела биофизики и экологических исследований, тел. (383)363-47-00 (доб. 25-77), e-mail: buryak@vector.nsc.ru

Сергей Евгеньевич Олькин

Федеральное бюджетное учреждение науки «Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии "Вектор"», 630559, Россия, Новосибирская область, Новосибирский район, р. п. Кольцово, зав. лабораторией отдела биофизики и экологических исследований, тел. (383)363-47-00 (доб. 22-55), e-mail: olkin@vector.nsc.ru

Ирина Константиновна Резникова

Федеральное бюджетное учреждение науки «Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии "Вектор"», 630559, Россия, Новосибирская область, Новосибирский район, р. п. Кольцово, старший научный сотрудник отдела биофизики и экологических исследований, тел. (383)363-47-00 (доб. 22-56), e-mail: reznikova@vector.nsc.ru

Владимир Александрович Вечканов

Федеральное бюджетное учреждение науки «Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии "Вектор"», 630559, Россия, Новосибирская область, Новосибирский район, р. п. Кольцово, младший научный сотрудник отдела биофизики и экологических исследований, тел. (383)363-47-00 (доб. 26-30), e-mail: vechkanov_va@vector.nsc.ru

Валерий Иванович Макаров

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт химической кинетики и горения имени В. В. Воеводского» СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3, кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории дисперсных систем, тел. (383)333-07-87, e-mail: makarov@kinetics.nsc.ru

Светлана Анатольевна Попова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт химической кинетики и горения имени В. В. Воеводского» СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3, младший научный сотрудник лаборатории дисперсных систем, тел. (383)333-07-87, e-mail: popova@kinetics.nsc.ru

В статье приведены результаты 15-летнего мониторинга концентраций биогенных компонентов в аэрозоле приземного слоя атмосферы в п. Ключи в окрестности г. Новосибирска. Обсуждаются долгосрочное и сезонное изменение этих величин.

Ключевые слова: атмосферные аэрозоли, суммарный белок, жизнеспособные микроорганизмы, органический/неорганический углерод, тренды концентраций.

THE RESULTS OF 15-YEARS MONITORING OF BIOGENIC COMPONENTS CONCENTRATIONS IN BOUNDARY LAYER ATMOSPHERIC AEROSOL IN KLYUCHI SETTLEMENT IN THE VICINITY OF NOVOSIBIRSK

Alexander S. Safatov

Federal Budgetary Research Institution «State Research Center of Virology and Biotechnology "Vector"», 630559, Russia, Koltsovo, Novosibirsk region, Head of department of Biophysics and Ecological, tel. (383)363-47-00 (доб. 26-20), e-mail: safatov@vector.nsc.ru

Galina A. Buryak

Federal Budgetary Research Institution «State Research Center of Virology and Biotechnology "Vector"», 630559, Russia, Koltsovo, Novosibirsk region, Staff scientist of department of Biophysics and Ecological, tel. (383)363-47-00 (доб. 25-77), e-mail: buryak@vector.nsc.ru

Sergei E. Olkin

Federal Budgetary Research Institution «State Research Center of Virology and Biotechnology "Vector"», 630559, Russia, Koltsovo, Novosibirsk region, Head of laboratory of department of Biophysics and Ecological, tel. (383)363-47-00 (доб. 22-55), e-mail: olkin@vector.nsc.ru

Irina K. Reznikova

Federal Budgetary Research Institution «State Research Center of Virology and Biotechnology "Vector"», 630559, Russia, Koltsovo, Novosibirsk region, Senior staff scientist of department of Biophysics and Ecological, tel. (383)363-47-00 (доб. 22-56), e-mail: reznikova@vector.nsc.ru

Vladimir A. Vechkanov

Federal Budgetary Research Institution «State Research Center of Virology and Biotechnology "Vector"», 630559, Russia, Koltsovo, Novosibirsk region, Junior researcher of department of Biophysics and Ecological, tel. (383)363-47-00 (доб. 26-30), e-mail: vechkanov_va@vector.nsc.ru

Valerii I. Makarov

Federal State Budgetary Research Institution Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion of Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 630090, Russia, Novosibirsk, Institutskaya, 3, Leading researcher of laboratory of Disperse Systems, tel. (383)333-07-87, e-mail: makarov@kinetics.nsc.ru

Svetlana A. Popova

Federal State Budgetary Research Institution Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion of Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 630090, Russia, Novosibirsk, Institutskaya, 3, Junior researcher of laboratory of Disperse Systems, tel. (383)333-07-87, e-mail: popova@kinetics.nsc.ru

The results of the 15-years monitoring of biogenic components concentrations in boundary layer atmospheric aerosol in Klyuchi settlement in the vicinity of Novosibirsk are presented in this paper. Here are discussed its long-term and seasonal trends of these values.

Key words: atmospheric aerosols, total protein, culturable microorganisms, organic/elemental carbon, concentrations trends.

1. Введение

Биоаэрозоли являются неотъемлемой частью атмосферного аэрозоля, достигая 95 % от его счетной концентрации [1, 2]. Известно, что биоаэрозоли, как

и другие аэрозоли в атмосфере, оказывают воздействие на климат, перераспределяя радиационные потоки в атмосфере и участвуя в процессах нуклеации

в облаках [3]. Также как и другие аэрозоли, биоаэрозоли могут оказывать токсическое действие на человека, животных, растения и др. компоненты экосистем [4, 5], и, кроме этого, вызывать в них инфекционные заболевания [4-7]. Однако до последнего времени атмосферным биоаэрозолям и их компонентам

в мире уделялось мало внимания [3], а их мониторинг практически нигде не проводился или проводился непродолжительное время.

Настоящая работа посвящена обсуждению результатов 15-летнего мониторинга концентраций биогенных компонентов в аэрозоле приземного слоя атмосферы в п. Ключи в окрестности г. Новосибирска. Основное внимание уделяется их долгосрочному изменению, годовому ходу, разнообразию присутствующих в атмосферных биоаэрозолях жизнеспособных микроорганизмов.

2. Материалы и методы

Отбор аэрозолей осуществлялся на площадке в п. Ключи (пригород Новосибирска, координаты 54°50,2' с.ш., 83°14,2' в.д.) путем прокачки воздуха насосом в течение суток через волокнистые фильтры типа АФА-ХА-20 (для анализа массы осажденного аэрозоля и содержания суммарного белка в нем) с объемной скоростью 13 м³/ч и через стекловолоконные фильтры (для определения содержания органического и неорганического углерода в пробах) с объемной скоростью 1,8 м³/ч. Серия наблюдений для каждого сезона составляла 30 суток и начиналась 20 января, 20 апреля, 20 июня и 20 сентября. Кроме того, в течение 7 последовательных дней на импинджеры МЦ-50 осуществлялся отбор проб атмосферного воздуха объемом 1,5 м³ для выявления в нем жизнеспособных микроорганизмов. В качестве сорбирующей жидкости в импинджеры заливалось 50 мл бесцветного раствора Хенкса (ICN Biomedicals). Масса осажденного аэрозоля определялась гравиметрическим методом и пересчитывалась в массовые концентрации аэрозоля (РМ). Массы суммарного белка (ТР) в пробах определялись с использованием флуоресцентного красителя по методу, описанному в [8]. Концентрации органического (ОС) и неорганического углерода (ЕС) - методом реакционной газовой хроматографии, описанным в [9]. Концентрации жизнеспособных микроорганизмов в пробах определялись в лаборатории культуральными методами [2].

3. Результаты и обсуждение

Среднегодовые значения величин концентраций РМ, ОС, ЕС, ТР и жизнеспособных микроорганизмов (СМ) рассчитанные для 2001 – 2015 гг., приведены на рисунке. Обнаружено, что среднегодовая величина РМ в целом имеет тенденцию к росту. Ее максимальное значение достигается в 2015 г., когда весной достигнуто наибольшее за сезон значение массовой за все время наблюдения, превышающее даже значение РМ во время лесных пожаров. В среднем за время проведения наблюдений величина РМ в атмосфере составила $42,8 \pm 9,9$ мкг/м³. Среднегодовая концентрация ОС в атмосфере также имеет тенденцию к росту, а среднегодовая концентрация ЕС – к падению, тогда как среднегодовая концентрация ТР остается практически постоянной, составляя в среднем за время проведения наблюдений соответственно $5,2 \pm 2,1$; $2,9 \pm 1,2$ и $0,47 \pm 0,28$ мкг/м³. Подобные уровни значений концентраций ОС и ЕС зарегистрированы и для крупных городов Европы [10]: для долгосрочных средних $3,5 - 7,8$ и $1,3 - 3,8$ мкг/м³ соответственно, хотя по данным работы [11] диапазон единичных измерений концентраций значительно шире. Наблюдаемые большие различия значений концентраций ОС и ЕС в этой работе [11] объясняются расположением части точек проведения измерений вблизи напряженных автомагистралей, а части – в пригородах городов, в том числе и приморских.

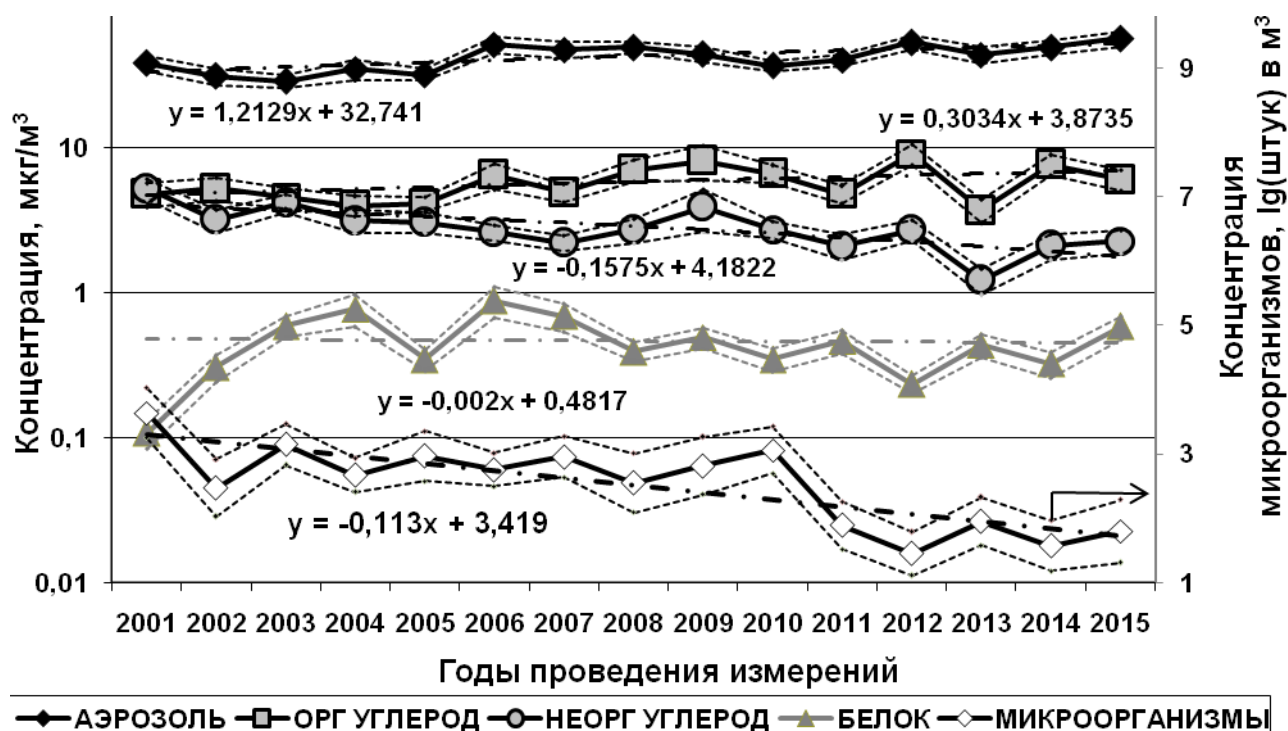


Рис. Среднегодовые значения величин концентраций РМ, ОС, ЕС, ТР (левая шкала) и СМ (правая шкала)

Доля ОС в общей массе аэрозоля в период наблюдений остается практически постоянной, тогда как доли ЕС и ТР имеют тенденцию к слабому падению. Сравнение выявленных зависимостей с опубликованными в [2] для высот

500 - 7000 м показывает их существенное различие. Для слоя атмосферы 500 - 7000 м в тот же период наблюдается тенденция падения как для концентрации РМ, так и ТР, содержащегося в нем, а доля ТР в полной массе аэрозоля

в тот же период растет. Вероятно, эти различия объясняются как влиянием локальных источников биоаэрозолей, так и различием движений воздушных масс, перемещающих аэрозоли из удаленных источников.

Величины сезонных изменений концентраций РМ, ОС, ЕС, ТР и СМ, усредненные за 15 лет наблюдений на юге Западной Сибири (таблица), показывают, что концентрации РМ и ОС достигают максимума весной, ЕС – зимой-весной, ТР – весной-летом, и СМ – летом. Также ТР и СМ имеют выраженный зимний минимум. При этом сезонная амплитуда изменений концентраций РМ, ОС, ЕС, ТР составляет примерно 1,5 – 2 раза, а для СМ – немногим менее порядка величины.

Таким образом, анализ данных долгосрочного мониторинга позволил выявить тенденции долгосрочных и сезонных изменений концентраций РМ, ОС, ЕС, ТР и СМ.

Таблица

Сезонные изменения концентраций величин РМ, ОС, ЕС, ТР и СМ, нормированных на среднегодовые значения, на юге Западной Сибири, усредненные за период 2001 – 2015 годы (средние $\pm$ 95 % доверительный интервал)

Сезон наблюдений	Величины				
	РМ, мкг/м ³	ОС, мкг/м ³	ЕС, мкг/м ³	ТР, мкг/м ³	СМ, Log10(#)/м ³
Весна	1,36 $\pm$ 0,09	1,55 $\pm$ 0,14	1,35 $\pm$ 0,14	1,37 $\pm$ 0,05	-0,04 $\pm$ 0,19
Лето	1,01 $\pm$ 0,05	0,87 $\pm$ 0,05	0,68 $\pm$ 0,04	1,67 $\pm$ 0,11	0,36 $\pm$ 0,16
Осень	0,75 $\pm$ 0,04	0,76 $\pm$ 0,05	0,66 $\pm$ 0,05	0,74 $\pm$ 0,04	0,09 $\pm$ 0,21
Зима	0,89 $\pm$ 0,03	0,82 $\pm$ 0,05	1,31 $\pm$ 0,10	0,18 $\pm$ 0,01	-0,41 $\pm$ 0,15

4. Заключение

В работе представлены уникальные данные 15-летнего мониторинга в п. Ключи Новосибирской области массовой концентрации атмосферного аэрозоля, концентраций ОС, ЕС, ТР и СМ в нем. Обнаружен возрастающий тренд в концентрациях РМ и ОС, спадающий тренд концентраций ЕС и СМ. Обнаружены сезонные изменения этих величин. Сопоставление полученных результатов с литературными данными для других регионов выявило как хорошее соответствие одних величин и тенденций, так и существенные различия для других. Причина наблюдаемых различий в настоящее время надежно не выяснена.

Работа выполнена при частичной поддержке междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 35-2011 и проекта МНТЦ № 3275.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Artaxo P., Maenhaut W., Stroms H., Van Grieken R. Aerosol characteristics and sources for the Amazon basin during the wet season // *J. Geophys. Res.* – 1990. – Vol. 95, N D10. – P. 16971-16985.
2. Safatov A.S., Buryak G.A., Andreeva I.S., Olkin S.E., Reznikova I.K., Sergeev A.N., Belan B.D., Panchenko M.V. Atmospheric bioaerosols // *Aerosols – Science and Technology* / Ed. I. Agranovski. – Weinheim: Wiley – VCH, 2010. – P. 407-454.
3. Després V.R., Huffman J.A., Burrows S.M., Hoose, C., Safatov A.S., Buryak G.A., Fröhlich-Nowoisky J., Elbert W., Andreae M.O., Pöschl U., Jaenicke R. Primary biological aerosols in the atmosphere: Observations and relevance // *Tellus B. Chem. Phys. Meteorol.* – 2012. – Vol. 64. – P. 1-58. doi: 10.3402/tellusb.v64i0.15598.
4. Douwes J., Thorne P., Pearce N., Heederik D. Bioaerosols health effects and exposure assessment: Progress and prospects // *Ann. Occup. Hyg.* – 2003. – Vol. 47, N 3. – P. 187-200.
5. O’Gorman C.M., Fuller H.T. Prevalence of culturable airborne spores of selected allergenic and pathogenic fungi in outdoor air // *Atmos. Environ.* – 2008. – Vol. 42, N 18. – P. 4355-4368.
6. Nicas M., Nazaroff W.W., Hubbard A. Toward understanding the risk of secondary airborne infection: Emission of respirable pathogens // *J. Occup. Environ. Hyg.* – 2005. – Vol. 2, N 3. – P. 143-154.
7. Roy C.J., Milton D.K. Airborne transmission of communicable infection – The elusive pathway // *N. Engl. J. Med.* – 2004. – Vol. 350, N 17. – P. 1710-1712.
8. You W.W., Haugland R.P., Ryan D.K., Haugland R.P. 3-(4-Carboxybenzoyl)quinoline-2-carboxaldehyde, a reagent with broad dynamic range for the assay of proteins and lipoproteins in solution // *Anal. Biochem.* – 1997. – Vol. 244, N 2. – P. 277-282.
9. Попова С.А., Макаров В.И., Башенхаева Н.В., Ходжер Т.В. Сравнение результатов измерения содержания углерода в атмосферных аэрозолях методами реакционной газовой хроматографии и сухого сжигания // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2007. – № 1. – С. 97-103.
10. Pio C., Cerqueira M., Harrison R.V., Nunes T., Mirante F., Alves C., Oliveira C., Sanchez de la Campa A., Artiñano B., Matos M. OC/EC ratio observations in Europe: Re-thinking the approach for appointment between primary and secondary organic carbon // *Atmos. Environ.* – 2011. – Vol. 45, N 34. – P. 6121–6132.
11. Cheng Y., He K.-b., Duan F.-k., Zheng, M., Du Z.-y., Ma Y.-l., Tan J.-h. Ambient organic carbon to elemental carbon ratios: Influences of the measurement methods and implications // *Atmos. Environ.* – 2011. – Vol. 45, N 12. – P. 2060–2066.

© А. С. Сафатов, Г. А. Буряк, С. Е. Олькин, И. К. Резникова,
В. А. Вечканов, В. И. Макаров, С. А. Попова, 2016

АНАЛИЗ АЭРОЗОЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Владимир Федотович Рапута

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)330-61-51, e-mail: raputa@sscc.ru

Татьяна Владимировна Ярославцева

Новосибирский НИИ гигиены Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Пархоменко, 7, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-61-51, e-mail: tani-ta@list.ru

Обсуждаются результаты мониторинга загрязнения снежного покрова тяжелыми металлами и химическими элементами в окрестностях г. Москвы. На основе модели реконструкции полей регионального переноса примесей проводится численный анализ данных наблюдений. С использованием акустических измерений повторяемости направлений ветра за пятилетний период времени в слое воздуха 40-500 м над Москвой выполнена оценка пространственных выпадений цинка.

Ключевые слова: атмосфера, снежный покров, загрязнение, тяжёлые металлы, модель, оценка.

THE ANALYSIS OF AEROSOL POLLUTION OF SNOW COVER IN THE MOSCOW REGION

Vladimir F. Raputa

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

Tatyana V. Yaroslavtseva

Novosibirsk scientific research institute of hygiene of Rospotrebnadzor, 630108, Russia, Novosibirsk, Parhomenko, 7, researcher, tel. (383)330-61-51, e-mail: tani-ta@list.ru

We discuss the results of the monitoring of snow cover pollution by heavy metals and chemical elements in the vicinity of Moscow. Based on the model of reconstruction of regional pollution fields numerical analysis of observational data is held. By using acoustic measurement of repeatability of wind directions for the five years in the air layer of 40-500 m above Moscow the spatial fallouts of zinc was estimated.

Key words: atmosphere, snow cover, pollution, heavy metals, model, estimation.

Введение. Аэрозольные выпадения примесей в окрестностях городов являются значимым источником поступления соединений тяжёлых металлов и химических элементов в почвы сельскохозяйственного назначения [1]. Уровень загрязнения и качество сельхозпродукции в окрестностях крупного города зависят от интенсивности и химического состава атмосферных

выпадения примесей. Причём антропогенные загрязнения могут влиять на растения непосредственно при воздушном поступлении. Атмосферный перенос химических загрязнений за пределы города может изменять и состав поверхностных вод. Особенно это может проявляться в период весеннего снеготаяния, когда большой объём снеготалых вод поступает в водоёмы. По содержанию химических соединений в снеговом покрове можно оценивать степень загрязнения атмосферного воздуха [2, 3].

Материалы и методы. Для численного анализа полей загрязнения снежного покрова в окрестностях г. Москвы использовались результаты мониторинговых исследований, проводившихся в 2009, 2012 и 2013 гг. на 20 участках почвы Московской области [4]. Схема отбора снеговых проб представлена на рис. 1.

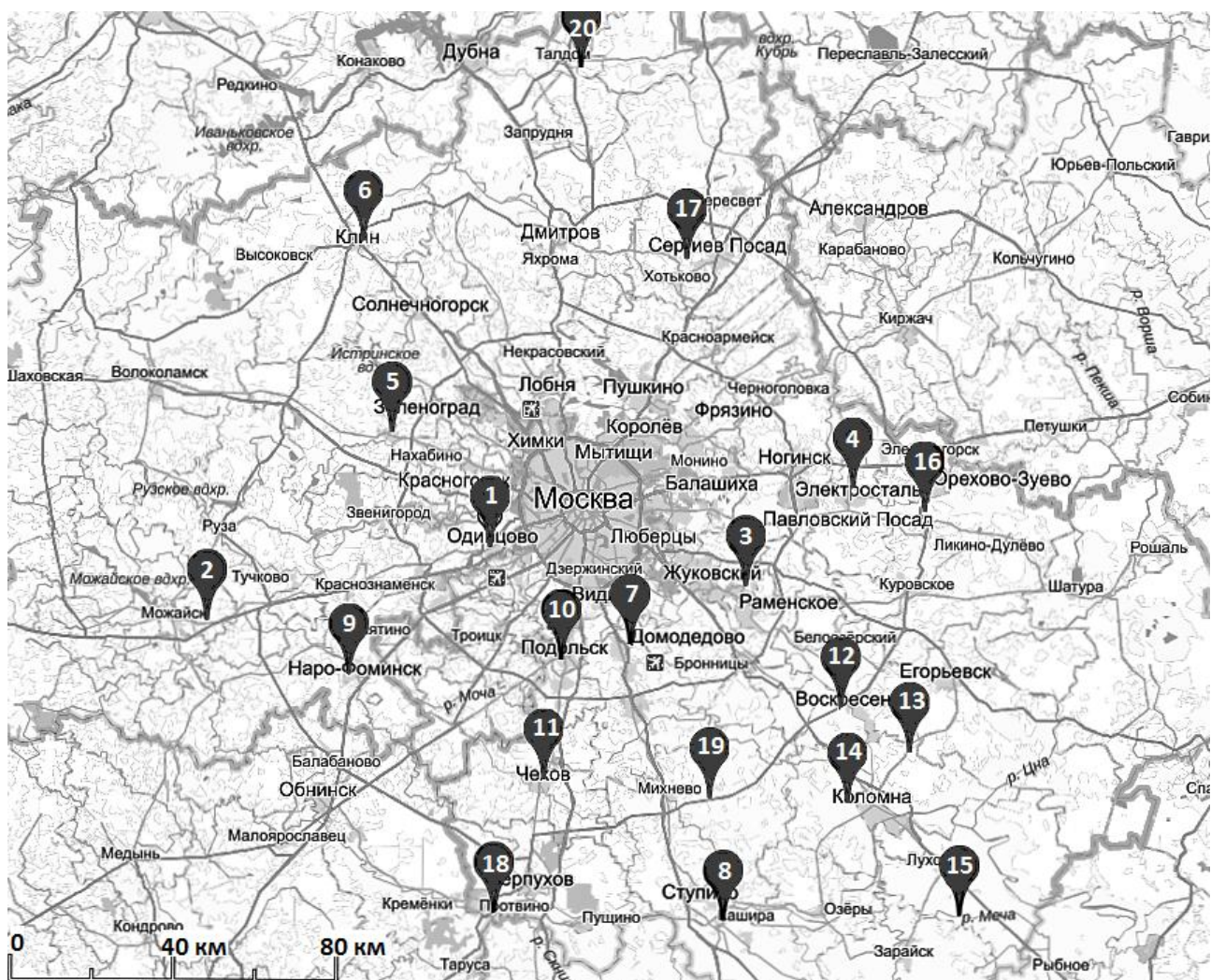


Рис. 1. Схема отбора проб снега в 20 районах Московской области

В табл. представлены максимальные содержания цинка (мкг/л) в водорастворимой форме в снеговых пробах за рассматриваемые зимние сезоны. В таблице приведены также данные о расстояниях до точек отбора проб снега и

зимняя повторяемость выноса примесей от центра Москвы за период времени с 2004 по 2008 год [5].

Таблица

Содержание цинка (мкг/л) в водорастворимой форме в снеговых водах
на территории Московской области

Номер точки	Концентрация, мкг/л	Расстояние от центра города, км	Повторяемость выноса, %
1	22	24,1	3,2
2	46	96,5	3,2
3	83	43,8	5,7
4	124	66,1	8,7
5	33	50,6	2,4
6	76	84,6	3,2
7	62	35,7	4,8
8	79	108,3	4,8
9	81	70,9	2,7
10	72	37,5	3,9
11	52	67,9	3,9
12	140	79,9	5,2
13	90	100,4	5,2
14	84	97,6	5,2
15	16	137,3	5,2
16	74	83,9	8,7
17	102	65,8	12,6
18	28	102,6	3,9
19	12	78,1	4,8
20	68	106,9	7,7

Модель оценивания региональных выпадений примеси от площадного источника. Описание полей концентраций примесей в атмосфере на значительных удалениях от источника допускает значительные упрощения. Экспериментальные и теоретические исследования показывают, что, в зимнее время, начиная с расстояний порядка 5-7 км от источника, расположенного в пограничном слое атмосферы, распределение концентрации примеси выравнивается по высоте. Для таких расстояний влияние ряда параметров становится не существенным. К ним следует отнести высоту источника, скорость оседания аэрозольных частиц, коэффициент вертикального турбулентного обмена и т.д. В этом случае для оценивания регионального загрязнения территорий площадным источником S следует использовать достаточно компактное и вполне адекватное описание [6]:

$$Q(x, y) = \theta \cdot P \left(\arctg \frac{y - \mu}{x - \lambda} + 180^\circ \right) / \sqrt{(x - \lambda)^2 + (y - \mu)^2} , \quad (1)$$

$$\theta = M/2\pi uH, \quad M = \iint_S m(\xi, \eta) d\xi d\eta, \quad (2)$$

где M – суммарное поступление примеси с территории S , $m(\xi, \eta)$ – эмиссия примеси из точки (ξ, η) , принадлежащей S , $P(\varphi)$ – роза ветров за рассматриваемый промежуток времени на высотах пограничного слоя атмосферы, u и H – средняя скорость ветра и высота слоя перемешивания. Предполагается, что точка (x, y) удалена от S на расстояние более 7-10 км. Функция же $m(\xi, \eta)$, как правило, неизвестна.

Анализ зависимости (1) показывает, что для определения функции $Q(x, y)$ достаточно оценить неизвестные параметры θ , λ , μ , используя, например, данные наблюдений. Ситуация может быть еще упрощена, если задано на территории города положение эффективного центра выбросов примеси.

В этом случае $\lambda = x_0$, $\mu = y_0$, где (x_0, y_0) – координаты эффективного источника.

Результаты и обсуждение. Регрессионная зависимость (3) позволяет выполнить восстановление полей выпадений цинка в направленных от центра города маршрутах отбора проб, используя для оценивания неизвестного параметра θ одну из точек наблюдений на выбранном маршруте. В качестве пробных маршрутов могут быть выбраны, например, следующие: южный (точки № 10, 11, 18), юго-восточный (точки № 3, 12-15), северный (точки № № 17, 20). На рис. 2 представлены результаты численного восстановления концентраций цинка в выбранных направлениях.

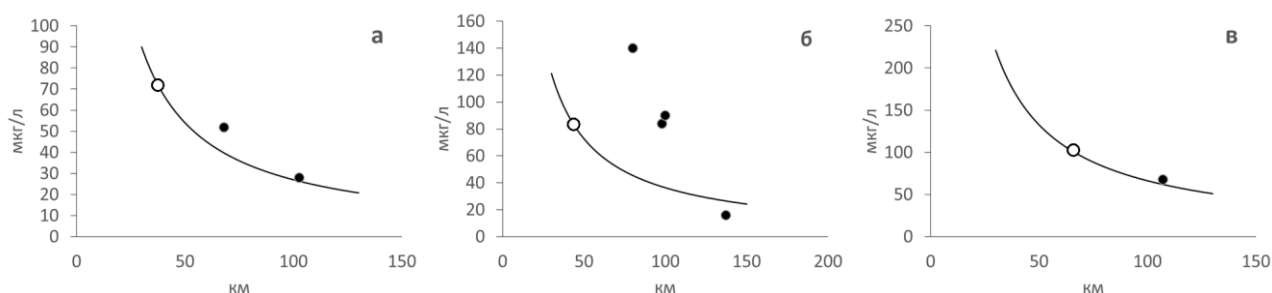


Рис. 2. Измеренная и восстановленная концентрация цинка (мкг/л) в южном (а), юго-восточном (б) и северном (в) направлении. $\circ$, $\bullet$ – опорные и контрольные точки измерений

В целом, существует определённое согласие между измеренными и восстановленными концентрациями цинка в снеготалой воде. Это позволяет сделать вывод о возможности оценивания пространственной картины региональных выпадений цинка в окрестностях Москвы, используя модель (1). На рис. 3 представлены результаты сопоставления измеренных концентраций цинка

к вычисленным во все 20-ти точках наблюдений. Данные о повторяемости выноса примеси в направлении от центра города к пунктам наблюдений взяты в работе [6]. Оценивание параметра θ проводилось по измерению концентрации цинка в точке № 10 (опорной точке). Остальные точки измерений использовались для контроля уровня согласия восстановленных в них концентраций с экспериментальными данными.

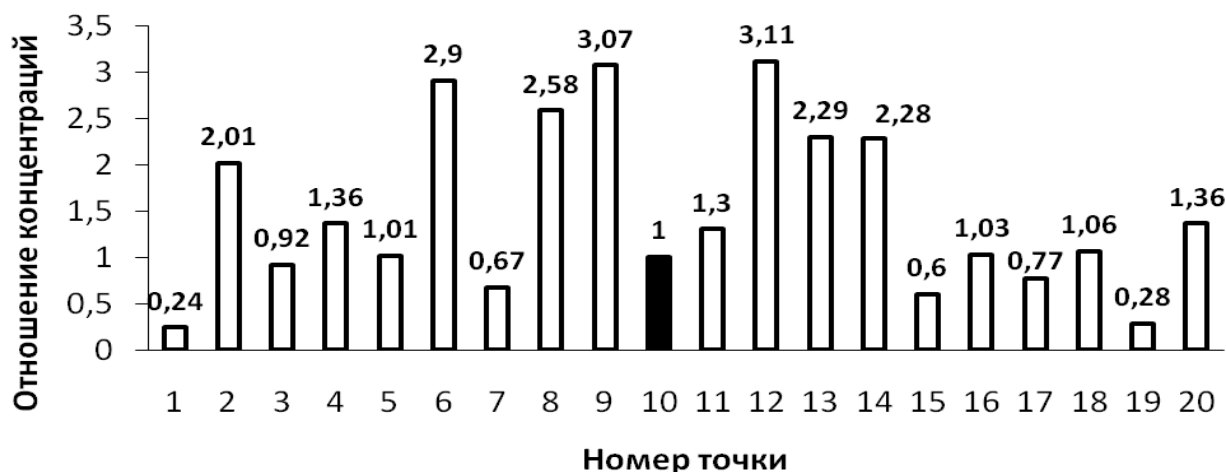


Рис. 3. Отношения измеренных к восстановленным по модели (1) концентраций цинка в точках отбора проб снега на территории Московской области

Заключение. Результаты проведённого численного анализа данных мониторинга загрязнения снежного покрова Московской области показали существование количественных закономерностей формирования полей аэрозольных выпадений цинка. Основным выброс примеси производится г. Москвой, как площадным источником. Для численного восстановления полей выпадений могут быть использована регрессионная зависимость (1). Следует отметить, что для проведения оценивания полей выпадений требуется весьма ограниченное количество опорных точек наблюдений.

Работа выполнена при поддержке Программы РАН № 18.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Прокачева В.Г., Усачев В.Ф. Снежный покров как индикатор кумулятивного загрязнения в сфере влияния городов и дорог // Метеорология и гидрология. 2013. № 3. С. 94-106.
2. Боев В.М., Верещагин Н.Н., Дунаев В.Н. Определение атмосферных загрязнений по результатам исследования снегового покрова // Гигиена и санитария. 2003, № 5. С. 69-11.
3. Степанова Н.В., Хамитова Р.Я., Петрова Р.С. Оценка загрязнения городской территории по содержанию тяжёлых металлов в снежном покрове // Гигиена и санитария. 2003, № 2. С. 18-21.
4. Ермаков А.А., Карпова Е.А., Малышева А.Г., Михайлова Р.И., Рыжова И.Н. Мониторинг содержания тяжёлых металлов и элементов в снеговом покрове почвы сельскохозяйственного назначения // Гигиена и санитария. 2015. № 5. С. 31-36.

5. Локощенко М.А. Направление ветра в Москве // Метеорология и гидрология. 2015. № 10. С. 5-15.

6. Рапута В.Ф., Олькин С.Е., Резникова И.К. Методы численного анализа данных наблюдений регионального загрязнения территорий площадным источником // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21, № 6. С. 558-562.

© В. Ф. Рапута, Т. В. Ярославцева, 2016

УДК 551.511.42.001.572(571.14)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ В РАЙОНЕ Г. СЕВЕРСК (ТОМСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Светлана Юрьевна Артамонова

Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, тел. (913)481-13-27, e-mail: svet2004@ngs.ru

Владимир Федотович Рапута

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)330-61-51, e-mail: raputa@sscc.ru

Анна Юрьевна Девятова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, доцент, тел. (913)745-53-79, e-mail: DevyatovaAY@ipgg.sbras.ru

В статье представлены результаты полевых наблюдений за зимний период 2009–2010 гг., лабораторных исследований и численного анализа процессов загрязнения снегового покрова в окрестностях г. Северска. Показано, что аэрозоли в районе исследований обогащены группой редкоземельных элементов, U и Th. На основе полученных экспериментальных данных пыле-аэрозольной нагрузки предложена математическая модель аэрозольных выпадений примесей. Апробация модели показала достаточную сходимость с экспериментальными данными.

Ключевые слова: примесь, атмосфера, снежный покров, численное моделирование, реконструкция.

EXPERIMENTAL STUDY AND NUMERICAL ANALYSIS OF THE TECHNOGENIC POLLUTION IN THE AREA OF SEVERSK (TOMSK REGION)

Svetlana Yu. Artamonova

Institute of Geology and Mineralogy Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptug ave. 3, scientific researcher, tel. (913)481-13-27, e-mail: svet2004@ngs.ru

Vladimir F. Raputa

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

Anna Yu. Devyatova

The article presents the results of field observations of the winter 2009–2010, at laboratory and numerical modeling of the snow cover pollution in the vicinity of Seversk. It is shown that the aerosols in the study area enriched rare earth group, U and Th. Aerosols studied area are enriched rare earth elements group, U and Th. Basis on the experimental mathematical model of aerosol pollution was calculated. These models showed reasonable agreement with experimental data.

Key words: impurity, atmosphere, snow, numerical modeling, reconstruction.

Город Северск является спутником г. Томска. В нём находятся предприятия по обращению с ядерными материалами, а также крупная теплоэлектроцентраль. Техногенное загрязнение в окрестностях г. Северска изучалось рядом исследователей [1-5]. На основе геохимического анализа состава твердых осадков в снежном покрове были выделены элементы-индикаторы выбросов и основные формы их нахождения. В плане дальнейшего понимания процессов загрязнения актуальной является проблема численной интерпретации полученных экспериментальных данных.

Экспериментальные исследования. Пробы снега отбирались в конце зимнего периода 2009-2010 гг. по трем основным направлениям ССЗ, С и СВ (рис. 1). Полученные пробы анализировались следующими методами: снеготалые воды - атомно-эмиссионным методом с индуктивно-связанной плазмой (ICP-AES) на спектрометре IRIS Advantage (США), а отфильтрованные взвешенные частицы – методом РФА-СИ, на станции VEPP в Институте ядерной физики.



Рис. 1. Схема отбора снеговых проб. Концентрация пыли (мг/л) в точках измерений

Результаты экспериментальных исследований. Основу минеральной части аэрозолей формируют: SiO_2 , Al_2O_3 и Fe_2O_3 , доли которых составляют в среднем 64 %, 21.7 %, 7.65 % соответственно, и эти соотношения макроэлементов отличаются в целом постоянством для всех проб. Тогда как содержание микроэлементов в исследованных пробах аэрозолей изменяется в широком диапазоне (табл.) и часто существенно превышает кларки земной коры (Кзк) [6]:

- халькофильные: Cd – максимально в 117.3 и в среднем в 19.8 раз, Bi – в 97 и 19 раз соответственно, Sb – в 36.5 и 14.9 раз, Mo – в 34.1 и 6.8 раз, Zn – 15.4 и 4.8 раз, Cu – 10.7 и 3.4 раза, Pb – 9.1 и 5.9 раз, Ni – 6.5 и 2.1 раз, Co – 2.1 и 1.1 раза;

- литофильные: Sn – максимально в 6.4 и в среднем в 2.7 раз, W – в 2.7 и 1.6 раз, Ba – в 2.6 и 1.9 раз, Nb – в 2.3 и 1.6 раз, Y – в 2.1 и 1.7 раз, Sr – в 1.8 и 1.3 раза, радионуклидами Th – в 2.3 и 1.7 раза, U – в 3.6 и 2.6 раз;

- редкоземельные элементы (РЗЭ): легкие лантаноиды максимально в 2.4 и в среднем в 1.7 раз, тяжелыми лантаноиды максимально в 3.5 и в среднем 2 раза (таблица).

Таким образом, с уверенностью можно сказать, что именно выбросы ТЭЦ г. Северска формирует основную пыле-аэрозольную нагрузку в районе исследований.

Таблица

Микроэлементный состав аэрозолей, ICP-MS, ppm

№	Pb	Zn	Sb	Co	Ni	Cu	Cd	Bi	Mo	W	Sn	Sr	Ba	Y	Nb
4	152	1033	14	36	304	130	10.6	15.5	38	5.1	6.3	452	1401	39	18
5	89	247	5.2	14	112	299	1.19	4.9	16	2.6	4.0	255	919	23	14
6	109	274	5.4	15	61	80	0.76	1.42	3.0	2.7	4.1	343	1079	28	14
8	117	178	5.3	24	83	77	0.84	1.70	3.5	2.7	5.7	588	1620	44	28
7	65	165	3.4	17	66	54	0.50	1.06	2.6	2.8	3.7	435	1228	37	21
9	103	198	5.5	19	70	70	0.88	1.58	3.0	2.5	4.6	428	1263	36	21
3	106	273	6.2	20	79	66	0.95	1.57	2.9	2.4	5.1	478	1355	38	22
2	90	242	4.9	20	89	67	0.81	1.42	2.5	2.5	4.7	489	1373	37	21
1	154	472	8.1	16	69	67	1.07	1.62	2.3	2.0	5.8	348	1018	28	16
10	64	335	3.4	16	65	100	1.26	1.74	4.9	4.7	13	359	1033	29	15

№	La	Ce	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	Th	U	Tl
4	59	116	9.17	1.33	9.50	1.90	5.77	5.30	0.77	15.6	9.1	0.78
5	43	64	5.54	0.76	5.40	1.09	3.33	2.61	0.40	14.1	4.3	0.38
6	43	78	5.65	0.90	6.22	1.30	4.01	3.07	0.57	14.2	5.4	0.30
8	68	131	9.93	1.42	10.25	2.07	6.20	6.00	0.88	24	9.8	1.73
7	55	107	7.82	1.11	8.58	1.74	5.13	4.98	0.72	18.7	7.5	1.13
9	56	107	7.96	1.14	8.57	1.73	5.00	4.75	0.71	19.6	7.5	0.90
3	58	111	8.14	1.22	8.89	1.75	5.14	5.12	0.72	20	7.9	1.36
2	57	106	8.25	1.14	8.61	1.71	5.14	5.01	0.73	19.6	7.2	0.94
1	43	83	6.20	0.86	6.53	1.26	3.81	3.59	0.53	14.3	5.6	0.84
10	44	83	6.11	0.94	7.22	1.39	4.02	2.63	0.62	16.0	6.1	0.51

Модель оценивания поля региональных выпадений пыли. Для корректного использования модели переноса примеси необходимы данные о массе вещества, выброшенного из техногенного источника (трубы) за определенный период времени, о скорости осаждения выброшенных частиц в атмосфере, параметры турбулентности воздушных потоков и т.п., которые далеко не всегда представляется возможным измерить. Использование же постановок обратных задач позволяет определить параметры краевой задачи, описывающие коэффициенты турбулентного обмена, положение и мощность источника,

характеристики дисперсного состава по результатам замеров концентрации примеси в атмосфере и дополнительной априорной информации.

Описание полей концентраций примесей в атмосфере на значительных удалениях от источника допускает значительные упрощения. Экспериментальные и теоретические исследования показывают, что, в зимнее время, начиная с расстояний порядка 5-7 км от источника, расположенного в пограничном слое атмосферы, распределение концентрации примеси выравнивается по высоте. Для таких расстояний влияние ряда параметров становится не существенным. К ним следует отнести высоту источника, скорость оседания аэрозольных частиц, коэффициент вертикального турбулентного обмена и т.д. В этом случае поле осредненной за длительный промежуток времени концентрации от точечного источника описывается соотношением [7]

$$\bar{q}(r, \varphi) = \frac{M \cdot g(\varphi)}{2\pi \cdot u \cdot h \cdot r}, \quad (1)$$

где r, φ - полярные координаты расчетной точки с началом в месте расположения источника, $g(\varphi)$ - вероятность противоположного φ направления ветра на высотах пограничного слоя атмосферы, M - мощность источника, u, h - средняя скорость ветра и толщина слоя перемешивания.

Полагая плотность аэрозольных выпадений пропорциональной концентрации примеси в воздухе, получим

$$\Phi(r, \varphi) = \frac{\theta \cdot g(\varphi)}{r}. \quad (2)$$

Здесь $\theta = \lambda \cdot M / (2\pi \cdot u \cdot h)$, λ - коэффициент взаимодействия примеси с подстилающей поверхностью.

Замечание. Соотношение (2) можно представить в несколько ином виде, учитывая, что в данном случае значения u и h имеют смысл некоторых средних характеристик пограничного слоя атмосферы. Действительно, если задать функцию $B(u', h')$, описывающую совместную плотность вероятности распределения u', h' в заданном направлении φ от источника за рассматриваемый промежуток времени, то для плотности осадка имеет место выражение

$$\Phi(r, \varphi) = \frac{\lambda \cdot M g(\varphi)}{2\pi r} \iint_{\Omega} \frac{B(u', h')}{u' \cdot h'} d\Omega = \frac{\theta' \cdot g(\varphi)}{r}, \quad \theta' = \frac{\lambda \cdot M}{2\pi} \iint_{\Omega} \frac{B(u', h')}{u' \cdot h'} d\Omega.$$

Тогда в силу обобщенной интегральной теореме о среднем [8] получим

$$\iint_{\Omega} \frac{B(u', h')}{u' \cdot h'} d\Omega = \frac{1}{u \cdot h} \iint_{\Omega} B(u', h') d\Omega = \frac{1}{u \cdot h} .$$

Численный анализ результатов исследований. На рис. 2, 3 представлены результаты реконструкции полей выпадений пыли по модели (2) и данным наблюдений, представленным в табл. Сравнительный анализ полученных результатов численного моделирования с экспериментальными данными показывает их вполне удовлетворительное согласие. Заметные отклонения измеренных и вычисленных значений концентраций пыли в точках № 2, 3 могут быть обусловлены дополнительным влиянием локальных источников (автотрассы, пылящие поверхности и др.). В соответствии с розой ветров максимум выноса пыли произошёл в северо-северо-восточном направлении от ТЭЦ.

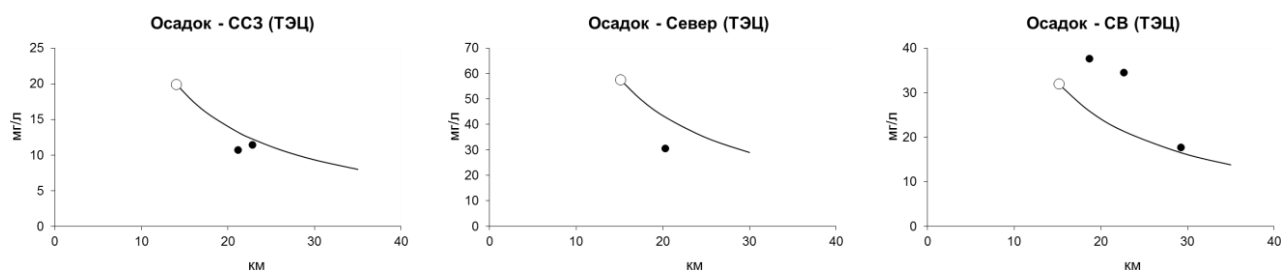


Рис. 2. Восстановленные с использованием зависимости (2) концентрации пыли (мг/л) по направлениям выноса в зимнем сезоне 2009/10 г.
○, ● - опорные и контрольные точки измерений

Анализ результатов моделирования, представленных на рис. 2, 3 показывает, что основной вынос пыли от Северной ТЭЦ произошёл в направлении на северо-северо-восток. В направлении же на северо-северо-запад от ТЭЦ этот вынос оказался в три раза ниже, что указывает на значительную контрастность розы ветров в данном районе.

Заключение. Применение методов численного анализа данных мониторинга снегового покрова в окрестностях техногенных источников является эффективным способом восстановления полей длительного загрязнения местности. Процедура агрегирования неизвестных параметров существенно

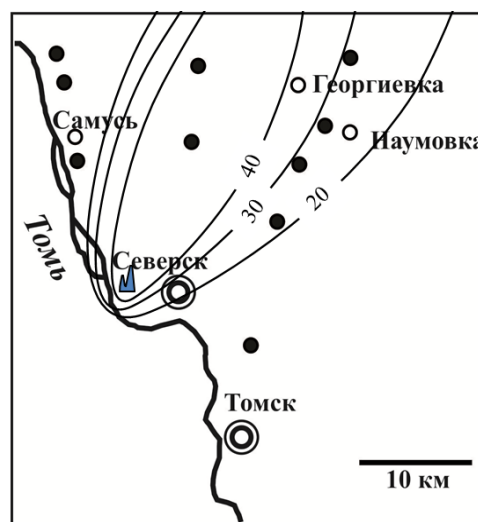


Рис. 3. Восстановленное по модели (2) поле выпадений пыли (мг/л) в окрестностях Северной ТЭЦ

повышает эффективность решения обратных задач переноса примесей. По небольшому количеству точек измерения и с учетом весьма ограниченной входной информации показана возможность построения количественных моделей длительного аэрозольного загрязнения местности техногенными источниками. Сопоставление рассчитанных значений концентраций с измерениями в контрольных точках, показало их удовлетворительное согласие.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Язиков Е.Г. Экогеохимия урбанизированных территорий юга Западной Сибири. Автореф. дис. докт. геол.-мин. наук. Томск, 2006. 47 с.
2. Язиков Е.Г., Таловская А.В., Жорняк Л.В. Оценка эколого-геохимического состояния территории г. Томска по данным изучения пылеаэрозолей и почв. Томск: изд-во Томского политехнического университета, 2010. 264 с.
3. Жорняк Л.В., Язиков Е.Г. Редкие, редкоземельные и радиоактивные элементы в почвенном покрове урбанизированных территорий (на примере г. Томска) // Известия ВУЗов. Геология и разведка. 2008. № 4. С. 82-84.
4. Артамонова С.Ю. Геохимические особенности аэрозольного загрязнения в районе Сибирского химического комбината // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. Т. 20. С. 405-418.
5. Артамонова С.Ю. Химический и фазовый состав техногенных аэрозолей в районе Сибирского химического комбината (Томская область) // Химия в интересах устойчивого развития. 2014. Т. 22. С. 229-240.
6. Tessier A., Cardigan R., Dubreul B., Rapin F. Portioning of zinc between the water column and the oxic sediments in lakes // Geochim. Cosmochim. Acta. 1989. N. 3. P. 1511-1522.
7. Рапута В.Ф., Олькин С.Е., Резникова И.К. Методы численного анализа данных наблюдений регионального загрязнения территорий площадным источником // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21, № 6. С. 558-562.
8. Камынин Л.И. Курс математического анализа. – М.: Изд-во МГУ, 1995. Т. 2. 624 с.

© С. Ю. Артамонова, В. Ф. Рапута, А. Ю. Девятова, 2016

МОНИТОРИНГ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРЕСТНОСТЕЙ АВТОТРАССЫ ПО СОСТАВУ СНЕЖНОГО ПОКРОВА

Василий Васильевич Коковкин

Институт неорганической химии им. А. В. Николаева СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 3, кандидат химических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)316-56-32, e-mail: basil@niic.nsc.ru

Владимир Федотович Рапута

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)330-61-51, e-mail: raputa@sscc.ru

Обсуждаются результаты полевых и химико-аналитических исследований аэрозольных выпадений загрязняющих примесей в районе Советского шоссе – крупной автомагистрали г. Новосибирска. Приводятся данные по ионному составу снеготалых вод и величине аэрозольных выпадений взвешенных веществ. Представлены результаты численного анализа полученных результатов с использованием моделей аэрозольного линейного источника в приближении монодисперсной примеси.

Ключевые слова: снежный покров, ионный состав, численное моделирование, оценка.

MONITORING HIGHWAY ENVIRON CONTAMINATION ON SNOW COVER CHEMICAL COMPOSITION

Vasily V. Kokovkin

Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry im. A. V. Nikolaev of SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Academician Lavrentiev avenue, senior researcher, tel. (383)316-56-32, e-mail: basil@niic.nsc.ru

Vladimir F. Raputa

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6, Academician Lavrentiev avenue, leading researcher, tel. (383)330-61-51, e-mail: raputa@sscc.ru

The results of field and chemical analytical laboratory investigation of aerosol sediment contamination impurities in region of Sovetskoe highway in Novosibirsk city are discussed. The data on melted snow water ionic composition and a value of aerosol sediment suspended matter is given. The results of numerical analysis of data obtained using models of linear source in mono disperse admixture approximation are presented.

Key words: snow cover, ionic composition, numerical modeling, estimation.

Введение. Автомобильный транспорт является одним из основных загрязнителей воздушной среды г. Новосибирска [1]. Характерными загрязняющими веществами являются оксиды серы и азота, тяжелые металлы, в частности, свинец, органические продукты неполного сгорания компонентов топлива, например, полиароматические углеводороды (ПАУ). Также нельзя

недооценивать

и выбросы пыли, поднимаемой с поверхности дорог движущимися автомобилями. В составе пыли идентифицируются вещества, которыми посыпают дорогу, в частности, в зимний период для борьбы с гололедом. Их элементный состав включает натрий, кальций, магний, хлорид, кремний и др.

В последние годы многое делается для того, чтобы снизить уровень загрязнения г. Новосибирска от автомобильных выбросов, однако из-за многопараметричности процессов эффективность мероприятий часто оказывается неоднозначной и непредсказуемой. Представляется целесообразным вести постоянный контроль за динамикой загрязнения в окрестностях магистралей с интенсивным движением. В качестве индикатора загрязнения территории наиболее удобно использовать снежный покров [2, 3].

Целью данной работы является продолжение исследований пространственной динамики загрязнения снежного покрова основными компонентами выбросов автотранспорта в период после реконструкции.

Полевые исследования. В качестве объекта исследования нами было выбрано Советского шоссе [3], расположенное в левобережной части Советского района г. Новосибирска, которое в последние несколько лет (2009 – 2014 гг.) было кардинально реконструировано.

Маршрутная снегосъемка проводилась в конце зимнего сезона 2014/15 г. в окрестностях участка автотрассы Советского шоссе, расположенного перпендикулярно ветрам юго-западного направления. Это направление ветров является наиболее характерным для зимнего периода [4]. С наветренной стороны дороги были отобраны пробы в 7 точках, с подветренной стороны — в 2 точках. Данные по их удаленности от автотрассы содержатся в табл. Отбор проб снега производился пластмассовой трубкой Ø 100 мм на всю глубину снежного покрова.

Химический анализ снеговых проб. После топления проб использовали две схемы пробоподготовки в зависимости от природы определяемых компонентов. Перед определением неорганических компонентов растопленную пробу фильтровали через фильтр «синяя лента» и мембранный фильтр с диаметром пор Ø 0,45 мкм. Полученные осадки сушили на воздухе. Анализу подвергали

и осадки, и фильтрат. В фильтрате определяли следующие параметры макрокомпонентного состава: содержание натрия, калия, кальция, магния, хлоридов, нитратов и сульфатов. Для определения натрия, калия, кальция, магния использовали методику с атомно-абсорбционным спектрофотометром с зеемановской коррекцией фона Z 8000 (Hitachi, Япония) с атомизацией аналитов в пламени воздух-ацетилен. Детектирование натрия и калия проводили в варианте эмиссии излучения, детектирование кальция и магния — в варианте абсорбции излучения от ламп с полым катодом. Для определения неорганических анионов (хлоридов, нитратов и сульфатов) использовали методику на основе системы капиллярного электрофореза Agilent G1600 с косвенным фотометрическим детектированием. В качестве

электрофоретического буферного раствора использовали смесь хромата калия и диэтаноламина при $pH = 9$. Разделение анионов проводили в кварцевом капилляре с внутренним диаметром 56 мкм при напряжении 25 кВ. Основными микроэлементами, определяемыми в осадках и фильтрах были Pb, Cu, Zn. Их определение проводили с использованием атомно-эмиссионного спектрометра PGS-2 (Германия) в дуге постоянного тока и регистрацией многоканальным анализатором эмиссионных спектров (МАЭС), разработанного ООО «ВМК-Оптоэлектроника» (г. Новосибирск).

Органические компоненты (ПАУ) определяли после их трехкратного экстракционного концентрирования в предварительно перегнанный хлористый метилен из всего объема нефилтрованной пробы. После сбора экстрактов их осушали безводным сульфатом натрия. Далее растворитель упаривали на ротационном испарителе при температуре 35 °С до сухого осадка и полученный осадок растворяли в небольшом объеме ацетона (1 – 5 мл). Полученный раствор анализировали на содержание ПАУ с использованием газового хроматографа Hewlett-Packard 6890. Для идентификации соединений использовали библиотеку масс-спектров NIST 2002.

Полученные данные по ионным макрокомпонентам в растворенной части снеготалых вод и основным микроэлементам суммарно в растворенной части и твердом осадке представлены в таблице.

Таблица

Содержание макрокомпонентов в растворенной части снеготалых проб

№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Расстояние, м	20	30	40	55	70	100	145	-30	-55
Концентрации ионов, мг/л									
Фторид	0.35	0.06	0.02	0.22	0.13	0.03	0.08	0.15	0.67
Хлорид	35.4	33.9	19.0	17.8	12.5	9.70	4.07	1.47	1.63
Нитрат	2.42	2.32	2.34	2.43	1.95	2.06	3.01	2.72	3.06
Сульфат	2.67	2.49	2.43	2.56	2.01	1.68	1.61	1.61	1.38

Видно, что для всех параметров химического состава проб с удалением от автотрассы наблюдается, в целом, монотонное уменьшение концентрации. Качественно это согласуется с тем, что источником выбросов является автотрасса. Уровни выпадений с наветренной стороны дороги гораздо выше, чем с подветренной стороны, что является следствием повторяемости направлений ветра в зимний период времени [4].

Модель оценивания аэрозольных выпадений полидисперсной примеси. При расчете средней концентрации примеси в приземном слое атмосферы определяющее значение имеют часто встречающиеся метеорологические условия. К ним относятся так называемые нормальные метеоусловия, для которых применима степенная аппроксимация скорости

ветра и коэффициента вертикального турбулентного обмена [5]. Использование этих аппроксимаций, асимптотик полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии позволяет в явном и достаточно компактном виде выразить плотность выпадений монодисперсной примеси за длительный промежуток времени.

Оценивание поля концентрации монодисперсной примеси в заданном в перпендикулярном направлении от источника проводится с использованием следующей регрессионной зависимости [4]

$$C(r, \vec{\theta}) = \theta_1 r^{\theta_2} \exp\left(-\frac{2r_{\max}}{r}\right). \quad (1)$$

Здесь r - расстояние от источника (км), $r_{\max}$ - константа (км) определяется эффективной высотой источника. Неизвестные параметры θ_1, θ_2 оцениваются с использованием метода наименьших квадратов по данным измерений.

Соотношение (1) удобным интерполянтом поля выпадений монодисперсной примеси. В параметрах θ_1, θ_2 агрегирован достаточно сложный набор характеристик, оказывающих основное влияние на процессы длительного распространения примеси в приземном слое атмосферы.

Численный анализ результатов экспериментальных исследований. Участок автотрассы, в окрестности которой проводился отбор снеговых проб, направлен с юго-востока на северо-запад. Это позволило использовать для проведения оценивания полей аэрозольных выпадений примесей упрощенную модель (1), поскольку среднезимняя повторяемость ветров южного, юго-западного и западного направления составляет около 70% [4]. Соответственно ветра северного, северо-восточного и восточного направлений составляют всего лишь 14%, что условно позволяет выделить “подветренную” и “наветренную” стороны и определить доли выноса примеси по обе стороны от автотрассы, как 5:1.

На рис. 1 приведены результаты оценивания на основе модели (1) полей концентраций ионов натрия и хлоридов. Результаты численного восстановления поля концентрации вполне согласуются с данными измерений в контрольных точках. Некоторое расхождение измеренных и вычисленных значений в точке № 3, на наш взгляд, обусловлено недостаточным учётом пространственной структуры источника.

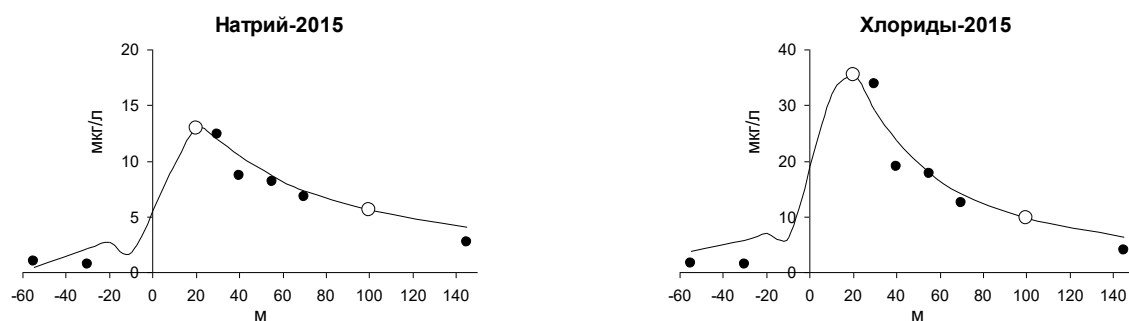


Рис. 1. Измеренные и восстановленные концентрации в снеге Na^+ и Cl^- . О - опорные, ● - контрольные точки наблюдения

Как следует из рис. 1, модельная кривая, параметры которой оценены по двум экспериментальным точкам, хорошо описывает спад концентрации натрия по обе стороны от автотрассы. Для сульфат-ионов прямые оценки параметров модели из экспериментальных данных дали систематическое отклонение в точках с наветренной стороны дороги. Вычет фоновой концентрации привел к лучшему совпадению экспериментальных точек с модельной кривой.

На рис. 2 представлены корреляционные зависимости между концентрациями в пробах Na^+ и Cl^- , а также осадками и фенантrenom.

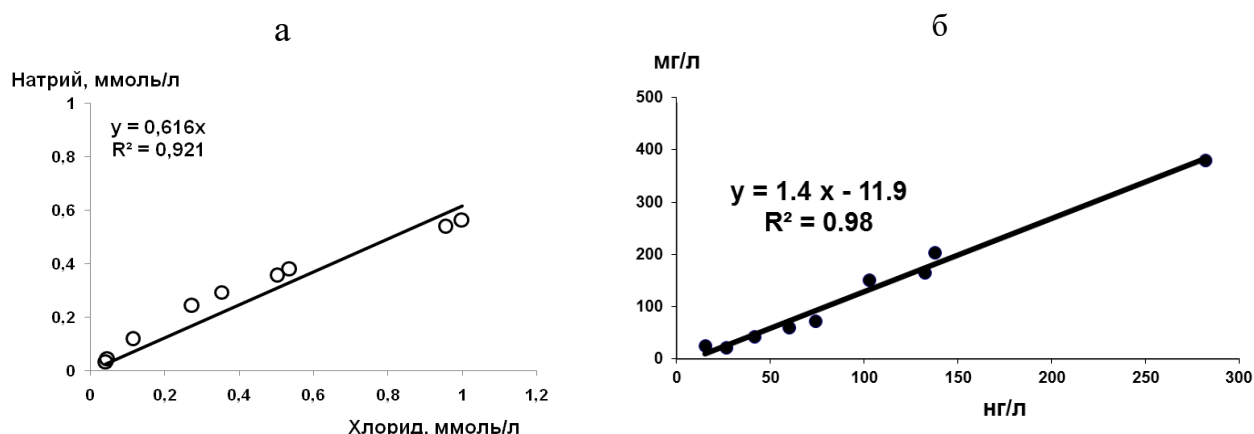


Рис. 2. Линейные корреляции между концентрациями Na^+ и Cl^- (ммоль/л) (а) и между содержанием осадков (мг/л) и фенантреном (нг/л) (б) в пробах снеготалой воды

Из рис. 2 следует, что между сопоставляемыми переменными наблюдаются корреляции с высокими коэффициентами. В случае натрия и хлорида это значит, что оба иона входят в состав смеси для обработки дорог в зимний период, а в случае фенантрена и осадка высокая корреляция говорит, по-видимому, о распространении ПАУ в составе пыли. Следует также отметить, что при сравнении с данными 2010 года уровни концентраций определяемых компонентов остаются достаточно высокими.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Александров В.Ю., Кузубова Л.И. Яблокова Е.П. Экологические проблемы автомобильного транспорта. Аналитический обзор. Выпуск 34. Изд-во ГПНТБ СО РАН, Новосибирск, 1995.
2. В.Н. Василенко, И.М. Назаров, Ш.Д. Фридман. Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 182 с.
3. Рапута В.Ф., Коковкин В.В., Морозов С.В. Экспериментальные исследования и численный анализ процессов загрязнения снегового покрова в окрестностях крупной автомагистрали г. Новосибирска // Химия в интересах устойчивого развития. 2010. Т. 18, № 1. С. 63-70.
4. Климат Новосибирска. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 221 с.
5. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. 272 с.

© В. В. Коковкин, В. Ф. Рапута, 2016

УДК 504.064

КРИТЕРИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИНФОРМАЦИИ СТАНЦИЙ КОНТРОЛЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

Сергей Владимирович Михайлюта

Сибирский федеральный университет, 660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (923)280-47-80, e-mail: mikhailuta@gmail.com

Анатолий Александрович Леженин

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-64-50, e-mail: lezhenin@ommfao.sccc.ru

Сформулированы и показаны основные критерии релевантности, которым должны отвечать первичные данные, получаемые с городских станций контроля загрязнения атмосферного воздуха. На примере г. Красноярска и некоторых районов США проведено сравнение характеристик контролируемых территорий и показателей загрязнения. Приведены примеры несоответствия получаемых данных параметрам эмиссии вследствие недостаточного учета особенностей воздухообмена и переноса загрязняющих веществ внутри квартальных территорий, предложены пути и методы решения выявленных проблем при организации наблюдений за состоянием и загрязнением атмосферного воздуха в городах.

Ключевые слова: загрязнение атмосферного воздуха, выбросы в атмосферу, мониторинг, роза ветров, загрязняющие вещества, концентрации, возвратные траектории.

URBAN AIR POLLUTION MONITORING STATIONS, THE INFORMATION QUALITY EVALUATION

Sergey V. Mikhailuta

Siberian Federal University, 660041, Russia, Krasnoyarsk, 79, pr. Svobodny, Ph. D., senior researcher, tel. (923)280-47-80, e-mail: mikhailuta@gmail.com

Anatoly A. Lezhenin

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6, pr. Akad. Lavrentjeva, Ph. D., senior researcher, tel. (383)330-64-50, e-mail: lezhenin@ommfao.sccc.ru

The main criteria of relevancy are stated and showed on the basis of effective regulatory documents. Initial data that are obtained from city control stations of air pollution monitoring shall comply with these criteria. Comparison of the controlled parameters in the territory and pollution indices are given by the example of Krasnoyarsk City and some areas of the USA. Examples of the obtained data inconsistency with parameters of emission are given which are caused by insufficient consideration of air exchange peculiarities and transfer of pollutants within the district areas. Ways and methods are proposed in order to solve the revealed problems when organizing monitoring over the state and pollution of atmospheric air in cities.

Key words: atmospheric air pollution, emissions to atmosphere, monitoring, wind diagram, pollutants, concentration, reverse paths.

Введение. До настоящего времени в РФ не установлены целевые индикаторы эффективности государственной экологической политики в области охраны атмосферного воздуха, учитывающие информацию системы мониторинга о качестве воздуха в городах [1].

При этом, в развитых странах информация со станций мониторинга атмосферного воздуха является базисом экологической политики [2]. Центральным вопросом, определяющим ее эффективность, является правильное использование релевантных данных, получаемых в ходе измерений.

Основными документами, регламентирующими порядок и организацию измерений концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе в населенных пунктах и в районах расположения источников загрязнения, остаются РД 52.04.186-89 и РД 52.18.770-2012. В этих документах, в соответствующих разделах неявно заложены требования обеспечения релевантности первичных данных, путем регламентации выбора перечня контролируемых показателей, мест расположения пунктов наблюдения, режимов выполнения измерений и отбора проб.

Релевантность, по отношению к первичным данным получаемых в ходе любых измерений при выполнении задач мониторинга загрязнения атмосферного воздуха, определяет их качество, а именно, способность отображать парциальные или интегральный вклады различных источников (по фактическим объемам эмиссии) в загрязнение контролируемых территорий и зависимость этих вкладов от метеорологических условий.

В данной работе на основе действующих нормативных документов сформулированы и показаны основные критерии релевантности для первичных данных, получаемых со станций контроля загрязнения атмосферного воздуха.

1. Актуальные цели и задачи систем наблюдений. Государственное управление в области охраны атмосферного воздуха основывается принципах,

сформулированных в Федеральном Законе [3]. При этом все эти принципы напрямую зависят от качества первичных данных получаемых в ходе любых измерений и наблюдений. Иными словами, на практике, Закон об охране атмосферного воздуха, поправки к нему и иные акты обязаны обеспечивать систему и единый подход для всех субъектов и организаций, как оказывающих влияние, так и защищающих воздух.

При этом система мониторинга в первую очередь должна соответствовать следующим основным целям:

1. Своевременно представлять достоверные (релевантные) данные о загрязнении воздуха.
2. Поддерживать соответствие между стандартами качества атмосферного воздуха и объемами эмиссии.
3. Поддерживать исследования загрязнения воздуха для охраны здоровья населения.

Для достижения этих целей необходимо выполнение специальных требований, как к параметрам измерительных систем, так и к расположению пунктов наблюдения и станций контроля для обеспечения необходимого качества данных измерений.

Так, например, в процессе внедрения требований Clean Air Act семь основных типов станций или сетей для измерения загрязнения воздуха были разработаны и внедрены в США [4]. Это позволяет поддерживать качество воздуха, в населенных пунктах, где выполняются измерения, на относительно безопасном для здоровья уровне. Например, максимальная концентрация бенз(а)пирена, зарегистрированная в США в городе Grand Junction, составляет $0,28 \text{ нг/м}^3$ [5], в то время как в Красноярске – $30,2 \text{ нг/м}^3$ [6].

Ниже показано, с чем связаны такие большие расхождения в показателях состояния и загрязнения атмосферного воздуха.

2. Примеры не релевантности данных. Важность соблюдения условий, обеспечивающих адекватность (сопоставимость с параметрами эмиссии и метеорологическими режимами) получаемых в ходе мониторинга данных можно продемонстрировать на простых примерах. Например, анализ розы ветров на станциях контроля расположенных в городской застройке г. Красноярска показывает [7], что все станции характеризуются только ограниченными секторами направлений ветра и, соответственно, не информативностью для получаемых данных.

Под воздействие застройки ветровой режим в городе существенно искажается, возникают устойчивые направления ветра не типичные для набегающего на город ветрового потока. Это требует специальных процедур и измерений для выяснения вопросов о том, какую информацию приносят эти “новые”, “искаженные ветра”.

Следствием таких изменений является результат, при котором данные получаемые со станций оказываются не согласованными с параметрами эмиссии загрязняющих веществ.

Так, доминирующим источником фтористого водорода в г. Красноярске является алюминиевый завод. Официальная информация об инвентаризации выбросов, представленная в государственных докладах [8, 9], показывает, что объем выбросов фтористого водорода связан (коэффициент корреляции 0,8) с общим объемом эмиссии алюминиевого предприятия (Рисунок 1а).

В свою очередь изменение выбросов фтористого водорода должно отражаться на регистрируемых значениях концентрации этого загрязняющего вещества (Рис. 1б). Но на рис. 1б мы видим совершенно иную картину. Несмотря на значительное уменьшение выбросов HF, данные с постов мониторинга не показывают снижение уровня загрязнения атмосферного воздуха фтористым водородом в Красноярске. Данный пример несогласованности данных, связан с нарушением правил размещения станций контроля.

Другим примером несоответствия параметров системы мониторинга целям и задачам управления качеством воздуха и, как следствие, не релевантности получаемых данных являются несогласованность показателей.

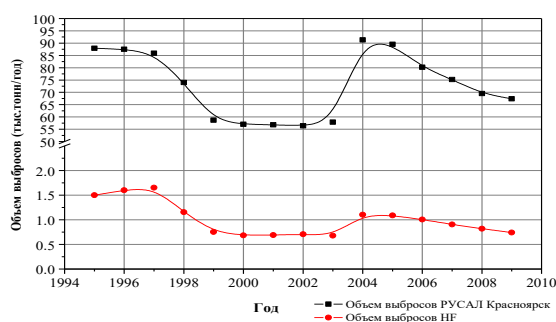


Рис. 1а. Объемы эмиссии загрязняющих веществ РУСАЛ Красноярск (валовый и HF)

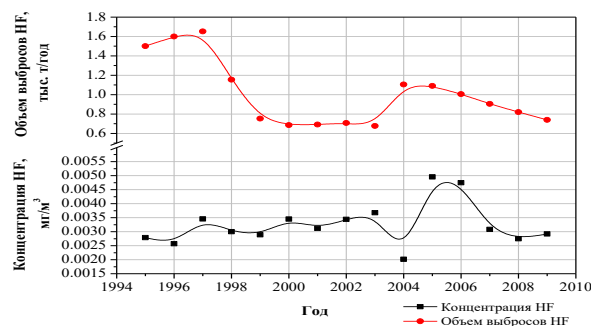


Рис. 1б. Изменение объема выбросов HF и соответствующие среднегодовые концентрации фтористого водорода в атмосфере г. Красноярска [9]

Так, приказ МПР РФ №579 [10] определяет перечень веществ, подлежащих государственному учету и нормированию. Рассеиваясь в атмосферном воздухе эти вещества, могут создавать значительные, опасные для здоровья уровни загрязнения. При этом на сетях мониторинга могут контролироваться только несколько общераспространенных веществ, не отражающих специфику промышленных выбросов на контролируемых территориях.

Если сравнивать г. Красноярск [9, 11] с некоторыми районами США [5], охваченными государственной системой мониторинга атмосферного воздуха по концентрациям наиболее распространенных загрязняющих веществ (бенз(а)пирен, формальдегид, этилбензол), то можно увидеть следующее: - г. Красноярск, в отличие от районов США, в которых организованы наблюдения в целях управления качеством атмосферного воздуха, характеризуется не сопоставимо высоким объемом выбросов от автотранспорта

(64,5

тыс.

тонн

в год на 400 тысяч автомобилей). Это явно свидетельствует об неадекватных оценках этих объемов, что в свою очередь, не позволяет оценить соотношение вкладов в загрязнение атмосферного воздуха в системе промышленные источники – автотранспорт. При этом высокие уровни загрязнения не обоснованно могут приписываться не тем источникам.

3. Критерии релевантности и пути их обеспечения. Можно сформулировать три основных критерия релевантности, которым должны отвечать станции контроля загрязнения атмосферного воздуха:

1. Правильный выбор мест размещения станций, характеризующих всю подконтрольную территорию. Для этого нужны специальные процедуры для уточнения параметров воздухообмена на контролируемых территориях.

2. На станциях должны измеряться концентрации именно тех веществ, которые выбрасываются в атмосферный воздух от источников, в зоне воздействия которых расположены измерительные станции.

Так, например, на государственных сетях мониторинга состояния и загрязнения атмосферного воздуха в США в перечень контролируемых показателей входят [5]: 61 показатель летучих органических соединений, 80 предшественников озона, 22 полициклических органических соединения, 11 металлов

и шестивалентный хром. Это позволяет формировать по результатам измерений объективную информацию и обосновывать целевые показатели для эффективных источников загрязнения.

3. Данные получаемые со станций контроля обязаны соответствовать параметрам эмиссии загрязняющих веществ, на которые ориентированы станции (соответствие концентраций объемам эмиссии). Это достигается за счет выбора режимов выполнения наблюдений и измерений при определённых метеорологических условиях.

Заключение. Существующая практика и подходы, реализуемые при проведении наблюдений за концентрациями загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городов, значительно уступают современным представлениям о физических закономерностях в переносе и распределении примесей на неоднородной урбанизированной территории. Как следствие результаты такого мониторинга могут вводить в заблуждение и не отражать реальное состояние и загрязнение атмосферного воздуха, а также роль источников в этом процессе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пешков Ю.В. Сеть мониторинга состояния и загрязнения атмосферного воздуха. Проблемы и перспективы // Труды научно-практической конференции «Загрязнение атмосферы городов». – Санкт-Петербург: ГГО им. А.И. Воейкова, 2013. – С. 9.

2. Michelle L. Bell (2011) et. al. Quantifying the human health benefits of air pollution policies: Review of recent studies and new directions in accountability research // Environmental science & policy. – 2011. – V. 14. – P. 357–368.
3. Федеральный закон от 04.05.1999 N 96-ФЗ (ред. от 13.07.2015) “Об охране атмосферного воздуха”
4. EPA-454/B-13-003. QA Handbook for Air Pollution Measurement Systems. Volume II. Ambient Air Quality Monitoring Program, May, 2013. – 348 p.
5. EPA-454/R-13-007a. National Monitoring Programs Annual Report (UATMP, NATTS, CSATAM). Volume 1: Main. Eastern Research Group, Inc. Morrisville, NC 27560, August 2013. – 1203 pp.
6. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды в красноярском крае в 2014 году. МПР КР, 2015. – 297 с.
7. Михайлюта С.В., Леженин А.А., Тасейко О.В., Битехтина М.А. Экологическая индустрия: ветровые потоки в городской застройке Красноярска // Инженерная экология. – 2012. – №3. – С. 26-37.
8. Государственные доклады (1999-2011) «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае за 1998 – 2010 гг.». – Красноярск. 1999 – 2011 гг.
9. Ежегодники (1995-2011) «Состояние загрязнения атмосферного воздуха городов на территории Красноярского края, республик Хакасия и Тыва в 1994-2010 гг.», Красноярский ЦГМС-Р, Красноярск, 1995-2011 гг.
10. Приказ Минприроды России от 31.12.2010 N 579 (ред. от 18.07.2013)
11. Сводные тома предельно допустимых выбросов для городов Красноярского края, 2012 год URL: <http://www.krasecology.ru/About/PDV>

© С. В. Михайлюта, А. А. Леженин, 2016

УДК 504.064.37

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЯМЫХ АЛГОРИТМОВ УСВОЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ДАННЫХ В МОДЕЛЯХ ТРАНСПОРТА АТМОСФЕРНОЙ ХИМИИ

Алексей Владимирович Пененко

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)330-61-52, e-mail: a.penenko@yandex.ru

В работе представлено численное сравнение эффективности двух безытерационных (прямых) алгоритмов усвоения данных распределенных измерений концентрации химических веществ в атмосфере. Первый алгоритм основан на вариационном подходе и схеме расщепления. Второй алгоритм основан на непосредственном учете результатов измерений

в решении. Он проще в реализации, однако, в представленных условиях, время работы алгоритмов схоже. Вариационный алгоритм показал более высокую точность восстановления.

Ключевые слова: усвоение данных, атмосферная химия, схема расщепления, вариационный подход, модель адвекции-диффузии, распределенные измерения.

NUMERICAL STUDY OF DIRECT DATA ASSIMILATION ALGORITHMS FOR DISTRIBUTED MEASUREMENTS IN ATMOSPHERIC CHEMISTRY TRANSPORT MODELS

Alexey V. Penenko

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, prospect Akademika Lavrentjeva, 6, Ph. D., Researcher, tel. (383)330-61-52, e-mail: a.penenko@yandex.ru

A numerical comparison of two direct data assimilation algorithms for distributed measurements has been presented. The first algorithm is based on the variational approach and splitting scheme. The second one is based on the direct insertion of measurement data to the solution. The second algorithm is easier to implement but in the numerical experiments computation time of both algorithms turned out to be almost the same while the variational algorithm has shown better accuracy.

Key words: data assimilation, atmospheric chemistry, splitting method, variational approach, advection-diffusion model, distributed measurements.

Усвоение данных атмосферной химии накладывает существенные требования на вычислительную эффективность алгоритмов в силу высоких размерностей рассматриваемых численных моделей [1, 2]. В этой связи особый интерес представляют алгоритмы усвоения данных, которые не требуют итерации.

В последнее время становятся доступны спутниковые изображения полей концентраций химических и аэрозольных компонентов атмосферы. С математической точки зрения такие изображения содержат информацию о значениях концентраций на некоторых регулярных сетках. В силу этого естественно использовать прямой алгоритм усвоения, в которых данные непосредственно включаются в соответствующие элементы функций состояния моделей. Как альтернативу рассмотрим алгоритм вариационного усвоения данных, в котором усвоение производится на отдельных стадиях расщепления [3,4]. Целью работы является сравнение указанных алгоритмов на численном примере.

Рассмотрим прямоугольную пространственно – временную область:

$$\overset{r}{x} = (x_1, x_2) \in \Omega = [0, l_1] \times [0, l_2], t \in [0, T], \Omega_T := \Omega \times [0, T] \in \check{Y}^2,$$

с границей $\partial\Omega_T = \partial\Omega \times [0, T]$. В нашей работе для усвоения данных мы используем в качестве управляющей переменной функцию неопределенности в источниках примесей. Рассмотрим следующую модель транспорта химических веществ в атмосфере:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \operatorname{div}(\overset{r}{u} \varphi - \mu \operatorname{grad} \varphi) = \mathcal{P}_+ r, (\overset{r}{x}, t) \in \Omega_T. \quad (1)$$

$$\mu_1 \cos(n_1, x_1) \frac{\partial \varphi}{\partial x_1} + \mu_2 \cos(n_2, x_2) \frac{\partial \varphi}{\partial x_2} + \beta \varphi = g, (\overset{r}{x}, t) \in \partial\Omega_T, \quad (2)$$

$$\varphi = \varphi^0, \dot{x} \in \Omega, t = 0, \quad (3)$$

где $\varphi(\dot{x}, t)$ – функция состояния, соответствующая концентрации рассматриваемого химического вещества в точке $(\dot{x}, t) \in \Omega_T$, $\dot{u} = (u_1(\dot{x}, t), u_2(\dot{x}, t))$ – вектор скоростей ветра, $\dot{\mu} = (\mu_1(\dot{x}, t), \mu_2(\dot{x}, t))$ – диагональный тензор диффузии, $\dot{n}$ – направление внешней нормали на границе $\partial\Omega$, $\dot{f}; g, \varphi^0$ – априорные значения источников и начальных данных r – управляющая функция (неопределенность). Прямая задача состоит в том, чтобы определить φ из (1)-(3) по известным $\dot{f}; g, \varphi^0, r$.

Введем оператор H , определяющий связь функции состояния модели с данными измерений. Предположим, что нам доступны значения концентраций на некоторой сетке $\{\dot{x}_m\}_{m=1, \dots, M}$ со значениями $\{\Psi_m\}_{m=1, \dots, M}$ в заданные моменты времени $\{t_m\}_{m=1, \dots, M}$. Измерения могут содержать погрешности $\{\eta_m\}_{m=1, \dots, M}$.

$$\Psi_m = \varphi(\dot{x}_m, t_m) + \eta_m, \quad m = 1, \dots, M. \quad (4)$$

Предположим, что все функции и модельные параметры достаточно гладкие, чтобы решения существовали и преобразования имели смысл. Задачу определения φ для $t > t^*$ по (1)-(3) и (4) при заданных функциях $\dot{f}; g, \varphi^0$ и результатах измерений $\{\Psi_m\}_{m=1, \dots, M}$ таких, что $0 < t_m < t^*$ назовем задачей усвоения данных.

Для решения многомерных задач применяется метод расщепления. Мы будем использовать аддитивно усредненные схемы расщепления из [5]. Вводя временную сетку $\omega_t = \{0 < t_1 < \dots < t_j < \dots < t_{N_t} = T\}$. На каждом временном интервале $[t_{j-1}, t_j]$ аппроксимируем общую модель конвекции-диффузии (1)-(3) схемой расщепления по пространственным переменным, порожденной разбиением $\gamma_1 + \gamma_2 = 1, \gamma_k > 0$.

Рассмотрим шаги расщепления, соответствующие одномерным по пространству моделям процессов транспорта:

$$\gamma_k \frac{\partial \varphi^{(k)}}{\partial t} + \frac{\partial(u_k \varphi^{(k)})}{\partial x_k} - \frac{\partial}{\partial x_k} \mu_k \frac{\partial \varphi^{(k)}}{\partial x_k} = \gamma_k \dot{f}_k + r^{(k)}, \quad \varphi^{(k)}(., t_{j-1}) = \varphi(., t_{j-1}), \quad (5)$$

при $k = 1, 2$ с соответствующими краевыми условиями. Введем в пространственной области сетку с узлами $\omega_x = \{(x_i, x_s) | i = 1, \dots, Nx_1, s = 1, \dots, Nx_2\}$. Будем считать, что точки измерений также взяты на некоторой регулярной подсетке $\omega_x \times \omega_t$. Рассмотрим при $k = 1$ и некотором заданном x_s аппроксимацию модели трехдиагональной неявной схемой:

$$-a_i \varphi_{i+1}^j + b_i \varphi_i^j = \varphi_{i-1}^{j-1} + \Delta t (f_i^j + r_i^j), \quad i = 1; \quad (6)$$

$$-a_i \varphi_{i+1}^j + b_i \varphi_i^j - c_i \varphi_{i-1}^j = \varphi_{i-1}^{j-1} + \Delta t (f_i^j + r_i^j), \quad i = 2, \dots, N_{x_k} - 1; \quad (7)$$

$$b_i \varphi_i^j - c_i \varphi_{i-1}^j = \varphi_{i-1}^{j-1} + \Delta t (f_i^j + r_i^j), \quad i = N_{x_k}; \quad (8)$$

где $\varphi_i^j = \varphi^{(1)}(x_i, x_s, t_j)$, $f_i^j = \gamma_k \dot{f}(x_i, x_s, t_j)$, $r_i^j = r^{(1)}(x_i, x_s, t_j)$. В качестве решения задачи усвоения данных рассмотрим точку минимума целевого функционала

$$J(\varphi^j, r^j) = \alpha \sum_{i=1}^{N_{x_k}} (\varphi_i^j - \Psi_i^j)^2 M_i^j + \sum_{i=1}^{N_{x_k}} (r_i^j)^2,$$

при ограничениях (6)-(8). Здесь α - параметр усвоения, M_i^j - характеристическая функция измерений, равная 1, если в узле в (x_i, x_s, t_j) есть измерение, иначе она равна 0. Аналогично Ψ_i^j равно результату измерения, если в узле с координатами (x_i, x_s, t_j) есть измерение, иначе оно равно 0. Решение задачи оптимизации для $k=1, 2$ будет даваться матричным уравнением [4,5], которое можно решить прямым методом матричной прогонки

$$-A_i \Phi_{i+1}^j + B_i \Phi_i^j = F_i^j, \quad i = 1; \quad (9)$$

$$-A_i \Phi_{i+1}^j + B_i \Phi_i^j - C_i \Phi_{i-1}^j = F_i^j, \quad i = 2, K, N_{x_k} - 1; \quad (10)$$

$$B_i \Phi_i^j - C_i \Phi_{i-1}^j = F_i^j, \quad i = N_{x_k}; \quad (11)$$

где

$$A_i = \begin{bmatrix} a_i & 0 \\ 0 & c_{i+1} \end{bmatrix}, \quad B_i = \begin{bmatrix} b_i & -\Delta t \\ \alpha M_i^j \Delta t & b_i \end{bmatrix}, \quad C_i = \begin{bmatrix} c_i & 0 \\ 0 & a_{i-1} \end{bmatrix};$$

$$\Phi_i^j = \begin{bmatrix} \varphi_i^j \\ \dot{\varphi}_i^j \end{bmatrix}, \quad F_i^j = \begin{bmatrix} \varphi_{i-1}^{j-1} + \Delta t \dot{\varphi}_{i-1}^{j-1} \\ \alpha M_i^j \Psi_i^j \Delta t \end{bmatrix}, \quad \Delta t = t_j - t_{j-1};$$

Аналогично решаются задачи на других этапах расщепления по пространству. Оценкой состояния на шаге t_j будет

$$\varphi(\bar{x}, t_j) = \sum_{k=1}^2 \gamma_k \varphi^{(k)}(\bar{x}, t_j).$$

Также рассмотрим алгоритм прямого учета данных измерений. Для шагов, на которых доступны измерения, в качестве оценки состояния системы будем рассматривать

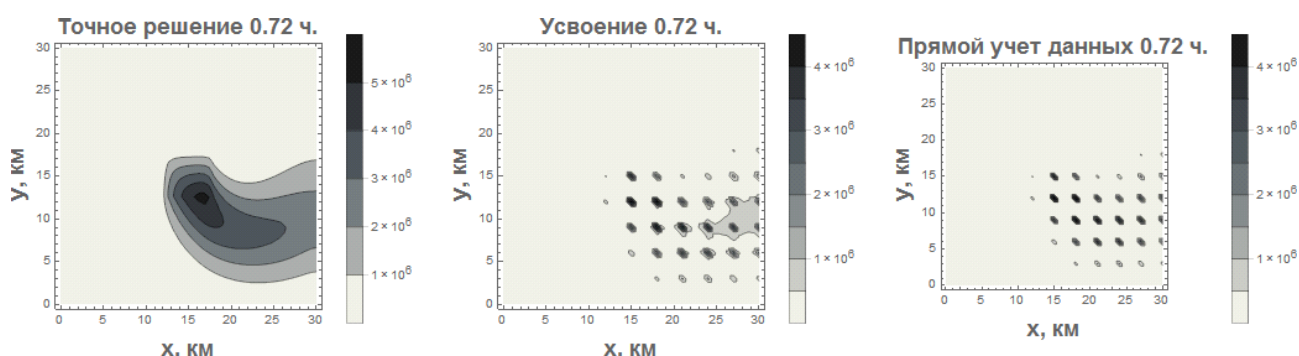
$$\varphi(\vec{x}, t_j) = (1 - M(\vec{x}, t_j))\phi(\vec{x}, t_j) + M(\vec{x}, t_j)\Psi(\vec{x}, t_j),$$

где $\phi(\vec{x}, t_j)$ - решение прямой задачи (1)-(3) при $r = 0$. Алгоритм прямого учета данных проще в реализации, чем алгоритм вариационного усвоения: требуется только решение прямой задачи. Сравним эффективность алгоритмов численно.

На рис.1 приведен пример решения задачи усвоения данных, когда в модели, генерирующей «точное распределение концентраций» задан дополнительный источник в центре области (квадратной формы), «неизвестный» для системы усвоения данных. Расчетный интервал по времени 3 часа (2001 точка по времени), по пространству 30 км в каждом направлении (по 50 точек по пространству). Измерения даны на пространственной сетке, которая в 5 раз грубее, чем расчетная сетка модели. Данные измерений доступны через каждые 7 мин (то есть каждые 80 шагов временной сетки). Погрешности измерений отсутствуют. Коэффициент диффузии $2000 \text{ м}^2/\text{сек}$, скорость переноса 10 м/сек .

В данном численном эксперименте можно отметить хорошее качественное соответствие между точным решением и решением с усвоением обоими методами. При этом вариационный алгоритм имеет большую область влияния измерений, что более соответствует диффузионному характеру решения. Это отражается в ошибках решения на рис. 2. Среднее время на шаг алгоритма по времени: у вариационного алгоритма - 0.033 сек , у алгоритма прямого учета данных - 0.031 сек .

Таким образом, можно заключить, что в рассмотренном примере для процессов транспорта, оба алгоритма показывают сходные результаты по скорости вычислений. Вариационный алгоритм сложнее в реализации, однако его точность оказалась выше.



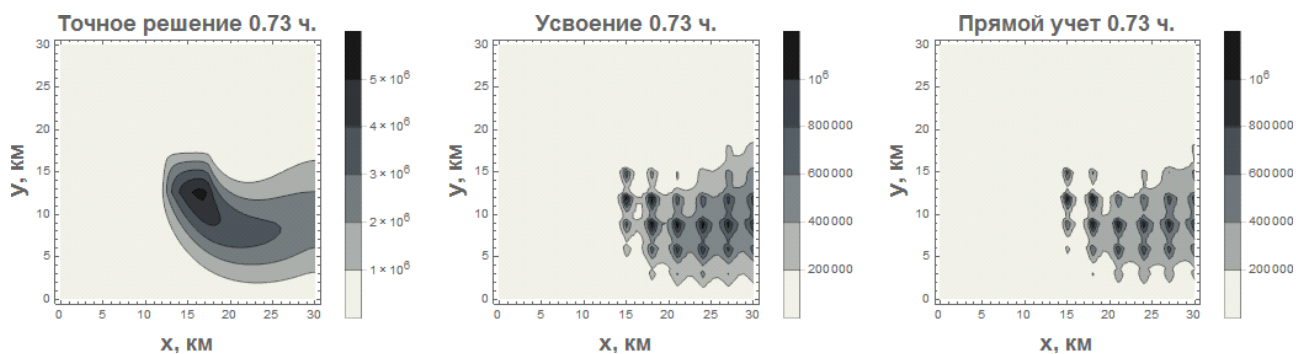


Рис. 1. Сопоставление «точного решения» (слева), решения задачи вариационного усвоения данных (центр) и решения, полученного прямым учетом данных измерений (справа). В верхней строке представлено решение на шаге, на котором имеются данные измерений, на нижней – решение на последующем шаге по времени уже без данных измерений

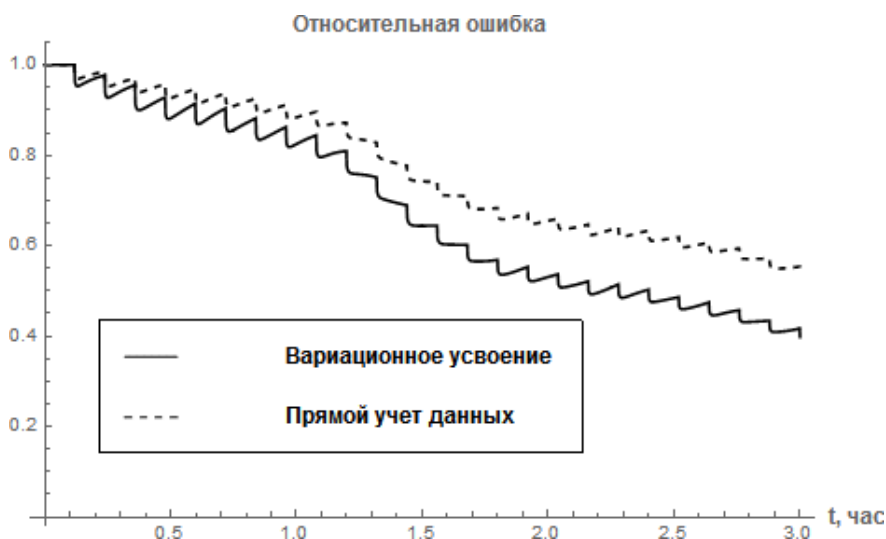


Рис. 2. Относительная ошибка решения задачи усвоения данных в зависимости от времени

Благодарности. Работа выполнена при частичной поддержке грантов МК-8214.2016.1, РФФИ 14-01-31482, 14-01-00125 и Программы Президиума РАН I.33П.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. M. Bocquet et. al. Data assimilation in atmospheric chemistry models: current status and future prospects for coupled chemistry meteorology models // *Atmos. Chem. Phys.* – 2015 – (15) – С. 5325–5358.
2. A. Sandu and T. Chai. Chemical DataAssimilation–An Overview // *Atmosphere* – 2011– (2) – С. 426–463.
3. V. V. Penenko Variational methods of data assimilation and inverse problems for studying the atmosphere, ocean, and environment // *Num. Anal. and Appl.* – 2009 – No 4 (2) – С. 341–351.
4. А.В. Пененко, В.В. Пененко Прямой метод вариационного усвоения данных для моделей конвекции-диффузии на основе схемы расщепления, // *Вычислительные технологии*

– 2014 – №4(19) – С. 69-83.

5. А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич Вычислительная теплопередача – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 785 с.

© А. В. Пененко, 2016

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ МЕТОД ПОИСКА В АТМОСФЕРЕ НЕИЗВЕСТНОГО ЛИНЕЙНОГО ИСТОЧНИКА ГАЗОВ И АЭРОЗОЛЕЙ

Борис Михайлович Десятков

Федеральное бюджетное учреждение науки «Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии "Вектор"», 630559, Россия, Новосибирская область, Новосибирский район, р. п. Кольцово, АБК, кандидат физико-математических наук, зав. лабораторией, тел. (383)363-47-00, e-mail: dbm@vector.nsc.ru

Наталья Александровна Лаптева

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, младший научный сотрудник, тел. (383)330-64-50; Федеральное бюджетное учреждение науки «Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии "Вектор"», 630559, Россия, Новосибирская область, Новосибирский район, р. п. Кольцово, АБК, старший научный сотрудник, тел. (383)363-47-00, e-mail: lapteva@vector.nsc.ru

Предложен метод поиска нескольких скрытых точечных источников примесей в атмосфере, имеющих различные мощности и расположенных в различных точках пространства. Метод основан на использовании сопряженного уравнения турбулентной диффузии. Выполнен анализ влияния количества используемых контрольных точек измерения концентрации примесей и неизбежных ошибок измерения концентрации на точность искомых параметров источников. Приводятся результаты тестовых расчетов.

Ключевые слова: пограничный слой атмосферы, неизвестные точечные источники примесей, сопряженное уравнение.

A MATHEMATICAL METHOD OF SEARCHING IN AN ATMOSPHERE OF UNKNOWN POINT SOURCES OF GASES AND AEROSOLS

Boris M. Desyatkov

Federal Budgetary Research Institution «State Research Center of Virology and Biotechnology "Vector"», 630559, Russia, Novosibirsk region, Koltsovo, Head of laboratory of department of Biophysics and Ecological, tel. (383)363-47-00, e-mail: dbm@vector.nsc.ru

Natalya A. Lapteva

Institute of Computational Mathematical and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, prospect Ac. Lavrentjeva, 6, junior Researcher, tel. (383)363-47-00; Federal Budgetary Research Institution «State Research Center of Virology and Biotechnology "Vector"», 630559, Russia, Novosibirsk region, Koltsovo, Senior staff scientist of department of Biophysics and Ecological, tel. (383)330-64-50, e-mail: lapteva@vector.nsc.ru

A method of searching for a hidden point sources of impurities in the atmosphere having a different power and located at different points in space is proposed. The method is based on the using of the conjugate equation of turbulent diffusion. The effect of the number of control points used in measuring the concentration of admixture and the inevitable errors in the accuracy of measuring the concentration to the accuracy of parameters of the sources are done. The results of test calculations are provided.

Key words: boundary layer of the atmosphere, unknown point sources of admixture, conjugate equation.

Введение

Актуальность решения обратных задач обусловлена необходимостью поиска источника, например, промышленного предприятия, совершившего несанкционированный, скрытый выброс в атмосферу вредных для здоровья человека веществ. Не менее важной является задача определения местоположения источника и массы выброшенного вещества при возможном применении газов и биологически активных аэрозолей при террористических актах.

В работах [1-5] подробно изучается эта проблема и предлагаются алгоритмы поиска точечных источников. В реальной ситуации неизвестным может быть и линейный источник. Примером такого источника может быть движущийся в городе автомобиль, движущийся поезд, беспилотный летательный аппарат и др. В этом случае возникает необходимость обобщить разработанные в [1-5] алгоритмы на случай линейного источника.

В данной работе предлагается алгоритм поиска местоположения неизвестного линейного источника и определения его характеристик.

Описание метода.

Метод основан на совместном использовании полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии примесей в атмосфере и соответствующего сопряженного уравнения. Идея использования сопряженного уравнения турбулентной диффузии в экологических задачах впервые предложена в [6].

Подробное описание этого метода применительно к алгоритму поиска точечных источников дано в работе [5]. Здесь отметим лишь особенности алгоритма, обусловленные поиском линейного источника. Необходимые для расчетов метеорологические поля вычисляются с использованием модели [7].

Выполнив интегрирование исходных уравнений по времени и по пространственным переменным с учетом краевых условий с последующими математическими преобразованиями, подробно описанными в [5], получаем следующий функционал

$$J = \text{abs}(D(\xi, \eta, h) - Q \sum (x_i, y_i, z_i) D^*(x_i, y_i, z_i, \xi, \eta, h)) \quad (1)$$

Он связывает между собой измеренное значение интегральной концентрации $D(\xi, \eta, h)$ в точке с пространственными координатами (ξ, η, h) , значения функции Грина в точках расположения искомого источника (x_i, y_i, z_i) и Q –массу выброшенного вещества. Функция Грина является решением сопряженного уравнения при задании для него в качестве входной информации измеренного значения интегральной концентрации $D(\xi, \eta, h)$. В формуле (1) суммирование проводится по координатам всех точек линейного источника. Он образован набором рядом расположенных точечных источников, каждый из

которых мгновенно выбрасывает количество вещества, равное Q , далее называемым линейным (удельным) расходом.

Очевидно, что функционал (1) будет равняться нулю при точном задании всех входящих в него величин. Это условие позволяет получить следующую систему алгебраических уравнений:

$$D_k(R_k) = Q \sum (D * (X_i, R_k)) \quad (2)$$

где X_i – обобщенная координата i -й точки источника, т.е. $X_i = (x_i, y_i, z_i)$, R_k – обобщенная координата k -й контрольной точки измерения концентрации, т.е. $R_k = (\zeta_k, \eta_k, h_k)$. Суммирование в (2) проводится по всем значениям индекса i .

Для решения системы уравнений (2) и нахождения линейного источника (определение координат составляющих его точек и его линейный расход) был разработан следующий алгоритм. Пусть линейный источник состоит из I рядом расположенных точечных источников; K – число контрольных точек, в которых измеряется концентрация примесей. Предполагаем, что линейный источник расположен только в горизонтальной плоскости. Рассматриваем все варианты расположения источника в горизонтальной плоскости и все возможные размеры линейного источника: по 2 точки ($I = 2$), по три точки, по четыре точки и т.д. Пусть N – общее число таких теоретически возможных вариантов, а n – номер такого варианта. При известных значениях функции Грина в предполагаемых точках источника и измеренных значениях интегральной концентрации вещества в k -й контрольной точке из системы уравнений (2) вычисляем значение Q_{nk} – возможное значение линейного расхода для n -го варианта источника и для k -ой контрольной точки. Такие вычисления выполняем для всех вариантов источника и для всех контрольных точек. Для каждого n -го варианта источника будем иметь K значений Q_{nk} . Очевидно, что только в одном из N вариантов, в котором находится искомый источник, вычисленные таким образом значения Q_{nk} будут одинаковыми. Во всех остальных вариантах значения Q_{nk} будут различными. Для каждого варианта источника вычисляем относительную погрешность δ_n

$$\delta_n = \sum \text{abs}(Q_{ncp} - Q_{nk}) / Q_{ncp}, \quad Q_{ncp} = (\sum Q_{nk}) / K. \quad (3)$$

В этих формулах суммирование производится по всем значениям индекса k . Очевидно, что для того значения n , где находится источник, величина δ_n будет минимальна. Соответствующее значение величины Q_{ncp} будет искомым значением линейного расхода источника, а соответствующий вариант источника (количество точек и их координаты) будет искомым источником.

Результаты и обсуждение.

Для проверки предложенного метода, алгоритмов и программ было проведено большое количество расчетов с различной длиной линейного

источника,

с различным расположением его в пространстве и с различным количеством контрольных точек. Расчеты проводились следующим образом. По заданным значениям параметров линейного источника моделировалось распространение примеси в атмосфере и вычислялись концентрации в заданных контрольных точках, которые интерпретировались как “измеренные”. По этим значениям решалась обратная задача – из сопряженного уравнения вычислялась функция Грина и, по описанному выше алгоритму, находилось местоположение линейного источника (координаты составляющих его точек) и линейный расход вещества

В различных вариантах расчетов мгновенный линейный источник был расположен на высотах от 5 м до 100 м, расстояние между соседними точками источника задавалось равным 1 км и 100 м в зависимости от размеров рассмотренной области распространения примесей и от шагов разностной сетки. Длина источника изменялась от двух до семи шагов разностной сетки. Выброс вещества в каждой точке источника (“удельный расход”) был задан равным 10^3 г. Контрольные точки, в которых проводилось “измерение” концентрации, располагались с подветренной стороны от источника на высоте 5 м. Расстояние между контрольными точками варьировалось от 1 шага разностной сетки до нескольких шагов. Было рассмотрено два варианта области распространения примесей в атмосфере. В первом варианте размеры области были 24 км × 24 км по горизонтали и 200 м по вертикали. Она покрывалась сеткой с шагами 1 км по горизонтали и 5 м по вертикали. Во втором варианте горизонтальные размеры были 2400 м × 2400 м и 200 м по вертикали с шагами сетки 100 м по горизонтали и 5 м по вертикали.

Было проведено три серии расчетов. В первой серии вычисленные значения концентрации задавались точно, без погрешностей. Во второй и третьей сериях вычисленные значения концентрации задавались с некоторыми погрешностями – исследовалось влияние неизбежных погрешностей в измеренных значениях концентрации на точность восстановления параметров источника.

В первой серии расчетов (96 вариантов) вычисленное местоположение источника и его удельный расход точно совпадали с исходными значениями. Эти результаты показывают, что ни в методе, ни в программе ошибок нет.

Во второй серии расчетов (576 вариантов) во всех контрольных точках задавались одинаковые относительные погрешности в значениях концентрации: 5%, 10% и 20%. В этом случае во всех вариантах относительная ошибка в линейном расходе соизмерима с задаваемой относительной погрешностью в концентрации. Координаты источника совпадали с исходными значениями.

В третьей серии расчетов (1700 вариантов) относительные погрешности в значениях концентрации задавались различными (5%, 10%, 20%) для разных контрольных точек и в различных комбинациях. Были рассмотрены варианты линейного источника с тремя, четырьмя и пятью точками и с различным расположением источника по отношению к направлению ветра. Количество

контрольных точек равнялось 3 и 5. В таблице приведены результаты на примере

3 контрольных точек: относительные ошибки в определения линейного расхода вещества, суммарного выброса вещества, длины источника (количество составляющих его точек) и местоположения его (сдвиг центра источника по горизонтали).

Таблица

Результаты вычисленных значений параметров линейного источника
для трех контрольных точек

N	Длина источника	20% > δ > 0%		40% > δ > 20%		Δ > 40%	
		100 м	1000 м	100 м	1000 м	100 м	1000 м
		Относительная ошибка определения линейного расхода, %					
1	3 точки	39	63	11	15	50	22
2	4 точки	67	65	22	19	11	16
3	5 точек	35	64	30	15	35	21
		Относительная ошибка определения суммарного количества выброшенного вещества, %					
4	3 точки	28	72	33	11	39	17
5	4 точки	33	69	28	14	39	17
6	5 точек	6	75	29	18	65	7
		Относительная ошибка определения длины источника, %					
7	3 точки	22	91	0	6	78	3
8	4 точки	39	92	11	7	50	1
9	5 точек	23	79	12	6	65	15
		Величина сдвига найденного источника					
		Нет сдвига		Сдвиг на 1 шаг сетки		Сдвиг на 2 и более шага сетки	
10	3 точки	12	83	44	17	44	0
11	4 точки	6	84	22	16	72	0
12	5 точек	6	90	12	10	82	0

Примечание. В таблице приведено количество вариантов (в %), ошибки которых, попадают в диапазоны 20% > δ > 0%, 40% > δ > 20% и δ > 40% при использовании разностной сетки с шагом 100 м и 1000 м. Для расчетов 10 – 12 приведено количество вариантов (в %), в которых наблюдается сдвиг источника на заданную величину.

Относительные ошибки линейного расхода примеси, суммарного количества выброшенного вещества и точность определения длины источника практически не зависят от количества точек, составляющих линейный источник.

При относительной ошибке в значениях концентрации, находящейся в пределах 0%–20%, точность определения первых трех характеристик

источника для шага 100 м выше, чем для шага сетки 1000 м. А для относительной ошибки больше 20%, точность для шага 100 м меньше, чем для шага сетки 1000 м.

Точность определения местоположения источника (величина его пространственного сдвига) для ошибки в пределах 0%–20% существенно меньше для шага сетки 100 м, чем для шага сетки 1000 м. А для значений ошибки больше 20% точность определения местоположения источника существенно меньше для шага сетки 1000 м, чем для шага сетки 100 м.

Для пяти контрольных точек точность вычисления всех параметров источника существенно выше, чем для трех контрольных точек и примерно одинаковая как для шага разностной сетки 1000 м, так и для шага 100 м.

Выводы

Предложен математический метод поиска неизвестного линейного источника примесей в пограничном слое атмосферы. Он является устойчивым по отношению к неизбежным погрешностям в измеренных значениях концентрации. Относительные ошибки в определении линейного расхода вещества и его суммарного количества по порядку величины совпадают с относительными погрешностями концентраций, а ошибки определения местоположения и длины источника в большинстве случаев не превосходят одного – двух пространственных шагов разностной сетки. Очевидно, такую точность результатов можно считать вполне удовлетворительной.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Han Young-Ji, Holsen T.M., Hopke P.K., Cheong Jang-Pyo, Kim Ho, Seung-Muk Yi. Identification of source locations for atmospheric dry deposition of heavy metals during yellow-sand events in Seoul, Korea in 1998 using hybrid receptor models // *Atmospheric Environment*. - 2004. - № 38. - P. 5353–5361.
2. Wimolwattanapun W., Hopke P. K., Pongkiatkul P. Source apportionment and potential source locations of PM_{2.5} and PM_{2.5–10} at residential sites in metropolitan Bangkok // *Atmospheric Pollution Research*. - 2011. - V 2. - № 2. - P.172–181.
3. Панасенко Е.А., Старченко А.В. Определение городских районов-загрязнителей атмосферного воздуха по данным наблюдений // *Оптика атмосферы и океана*. - 2009. - Т. 22. - № 03. - С. 279–283.
4. Пененко В.В., Цветова Е.А. Моделирование процессов переноса примесей в прямых и обратных задачах климатозоологического мониторинга и прогнозирования // *Оптика атмосферы и океана*. - 1999. - Т. 12. - № 06. - С. 482–487.
5. Десятков Б.М., Лаптева Н.А., Шабанов А.Н. Математический метод поиска в атмосфере неизвестных точечных источников газов и аэрозолей // *Оптика атмосферы и океана*. - 2015. - Т. 28. - № 02. - С. 159–162.
6. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М: Наука, 1982. - 320 с.
7. Десятков Б.М., Сарманаев С.Р., Бородулин А.И. Численно-аналитическая модель переноса аэрозолей в термически стратифицированном пограничном слое атмосферы // *Оптика атмосферы и океана*. - 1996. - Т. 9. - № 6. - С. 815–820.

© Б. М. Десятков, Н. А. Лаптева, 2016

НЕКОТОРЫЕ СЦЕНАРНЫЕ ОЦЕНКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ЮГО-ВОСТОКА ЗАБАЙКАЛЬСКОГО КРАЯ ВЫБРОСАМИ БЫСТРИНСКОГО ГОКА

Эльза Андреевна Пьянова

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математический наук, научный сотрудник, e-mail: pianova@ngs.ru

Лариса Михайловна Фалейчик

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, 672014, Россия, г. Чита, ул. Недорезова, 16а, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, e-mail: lfaleychik@bk.ru

Представлены некоторые результаты численного моделирования переноса атмосферных примесей в Юго-Восточном Забайкалье. На основе математического моделирования локальных атмосферных процессов и сценарного подхода получены предварительные оценки возможного загрязнения воздуха после введения в эксплуатацию Быстринского горно-обогатительного комбината. Результаты расчетов по зимним сценариям с северо-западным ветром показали, что факел «легких» пассивных примесей от выбросов Быстринского ГОКа может проходить над северной частью Борзинского заказника.

Ключевые слова: гидротермодинамика и качество атмосферы, математическое моделирование атмосферных процессов, природоохранное прогнозирование.

SCENARIOS OF ATMOSPHERIC POLLUTION BY EMISSIONS FROM THE BYSTRINSKY MINING COMPLEX IN THE SOUTH-EASTERN TRANSBAIKALIE

Elza A. Pyanova

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, prospect Akademika Lavrentjeva, 6, Ph. D., e-mail: pianova@ngs.ru

Larisa M. Faleychik

Institute of Natural Resources, Criology and Ecology SB RAS, 672014, Russia, Chita, Nedorezov st., 16a, Ph. D., e-mail: lfaleychik@bk.ru

The results of numerical modeling of pollutant transport in the South-Eastern Transbaikalie are presented. On the basis of mathematical modeling of atmospheric processes and a scenario approach a preliminary assessment of possible air pollution and changes in air quality produced by the construction of the Bystrinsky Mining Complex is made. The results of winter scenario calculations with north-western wind have shown that a cloud of passive pollutant from the Bystrinsky Complex can reach Borzinsky refuge.

Key words: atmospheric dynamics, air quality, mathematical modeling of atmospheric processes, environmental prediction.

В настоящее время почти вся территория Юго-Востока Забайкальского края (ЮВЗ) вовлечена в развитие его горнопромышленного комплекса. В первоначальном варианте здесь планировалось создание Забайкальского территориального горно-металлургического комплекса, включающего в себя

строительство пяти ГОКов на базе Быстринского, Бугдаинского, Култуминского, Лугоканского и Солонеченского месторождений, освоение других месторождений территории.

Одним из первых объектов будет Быстринский ГОК, ввод в эксплуатацию которого запланирован на конец 2017 года. Добыча золото-медной руды предполагается открытым способом. Это означает проведение взрывных работ, создание отвалов пустых пород, хвостохранилищ, обогатительной фабрики, котельной и других объектов. Все эти промышленные объекты являются источниками различных выбросов вредных веществ. В связи с этим возникает риск загрязнения окружающей среды близлежащих территорий, в частности за счет атмосферного переноса загрязнений. Актуальность этого вопроса усиливается тем, что наиболее «освоенные» узлы и планируемые крупные ГОКи сосредоточены как раз в непосредственной близости от существующих особо охраняемых природных территории (ООПТ) (рис. 1) или особо ценных природных территорий [1]. К северо-западу и северо-востоку от Быстринского месторождения расположены Туровский и Урюмканский заказники. Но ближе всего от промышленных площадок ГОКа – Борзинский заказник.

Ряд исследований и оценки увеличения антропогенной нагрузки на природную среду при освоении минерально-сырьевой базы ЮВЗ представлены в работах [1, 2]. Некоторые сценарные оценки зимнего атмосферного переноса выбросов котельной Быстринского ГОКа опубликованы в [3, 4]. В настоящей работе авторы продолжают исследования возможных сценариев распространения загрязнений в атмосфере месторождения и его окрестностях в результате ввода в эксплуатацию Быстринского ГОКа.

Зимний период для Забайкальского края характеризуется установлением над его территорией Сибирского антициклона, что, в свою очередь, приводит к частым температурным инверсиям и маловетренной погоде [5]. Инверсионное распределение температуры по вертикали, когда с увеличением высоты температура атмосферы возрастает, а не падает, способствует застойным явлениям

в котловинах. При таких сценариях атмосферный перенос загрязняющих выбросов затруднен, примеси локализуются и оседают недалеко от источников выбросов. Такой сценарий был рассмотрен в работе [4].

Наряду с преобладанием в зимнее время штилевых условий для Забайкалья в этот период характерны так же несильные ветра западного, северо-западного и юго-западного направлений [5]. Сценарии переноса примеси от котельной Быстринского ГОКа при юго-западном ветре были рассмотрены в работе [3]. Численные эксперименты показали, что при фоновом юго-западном ветре 4 м/с основные концентрации примесей остаются в пределах долины реки Ильдикан, где и находятся основные объекты горно-обогатительного комплекса. Существенного переноса загрязнений в сторону Урюмканского заповедника, находящегося по направлению ветрового потока в рассматриваемом сценарии, в численных экспериментах не наблюдалось.

В данной работе мы рассмотрим еще один сценарий, характерный для изучаемой территории: перенос загрязняющих примесей при северо-западном фоновом ветре 4 м/с. Как и в работе [3], численные расчеты проводились на основе мезомасштабной негидростатической модели динамики атмосферы и переноса примеси [6, 7] для расчетной области $100 \times 100 \text{ км}^2$ (рис. 1).

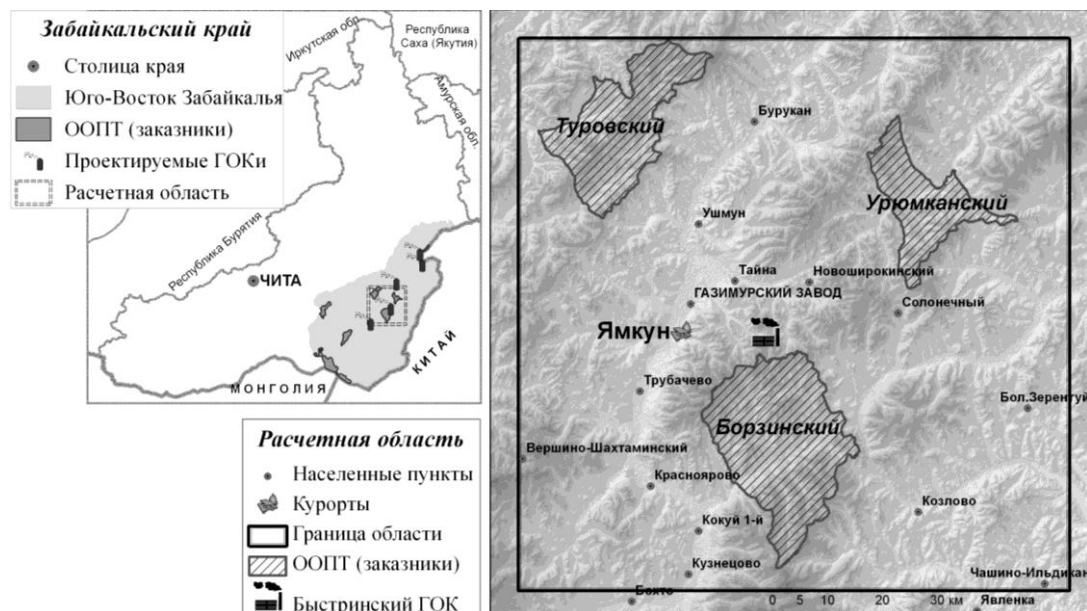


Рис. 1. Территория Юго-Востока Забайкальского края и расчетная область

Модель адаптирована к орографическим условиям ЮВЗ. На основе численного моделирования воспроизводился суточный ход метеорологических параметров над рассматриваемой территорией. То есть рассчитывались поля вектора скорости ветра, температуры, влажности и т.д. Расчет переноса загрязняющих примесей осуществлялся на основе вычисленных динамических полей. Построение численных схем для задачи атмосферной динамики и переноса пассивной примеси осуществлялось на основе аппроксимации интегрального тождества вариационной формулировки модели [6]. Полученные схемы аппроксимируют исходные дифференциальные уравнения со вторым порядком точности по пространству, являются энергетически сбалансированными. Для аппроксимации конвективно-диффузионных операторов задачи использовались монотонные дискретно-аналитические схемы [8]. Вариационный подход обеспечивает точный учет естественных краевых условий на границах области моделирования. Это особенно важно на нижней границе воздушных масс в условиях сложного рельефа подстилающей поверхности. Более подробное описание используемой модели и методов построения конечно-разностных уравнений можно найти в работах [6, 7, 9].

Численные расчеты проводились на сетке $251 \times 251 \times 50$ узлов с шагами сетки по горизонтали $\Delta x = \Delta y = 400 \text{ м}$. Вертикальный шаг Δz задавался равным 30 м в нижних слоях сетки, выше размер шага постепенно увеличивался до 50, 100, 150 и 200 м. При моделировании в начальный момент времени предполагалось, что атмосфера находится в состоянии покоя. На верхней

границе задавался северо-западный фоновый поток ветра. Температура поверхности в начальный момент времени, альbedo поверхности и другие параметры модели задавались в соответствии с климатическими характеристиками выбранного региона. Расчеты первых модельных суток рассматривались как приспособление фонового ветрового потока к подстилающей поверхности и к ее суточному неравномерному прогреву. Опытным путем было установлено, что к началу вторых расчетных суток модель выходит на квазипериодический режим, описывающий суточный ход метеорологических параметров. Поэтому перенос примесей моделируется с момента начала вторых расчетных суток. В качестве источника выбросов в наших сценариях рассматривалась котельная с высотой трубы 60 м. В экспериментах моделировалось распространение двух видов пассивной примеси: «легкой» (невесомой) и «тяжелой». К первой можно отнести СО и др., вторая может имитировать неорганическую пыль, составляющую значительную долю всех выбросов котельной. В начальный момент времени поле примеси полагалось нулевым во всей расчетной области. Во всех экспериментах мощность источника задавалась как 1 условная единица выброса за единицу времени $\Delta t = 60$ с.

Ниже на рисунках представлены изолинии полей «тяжелой» и «легкой» примесей на высоте 30 м над подстилающей поверхностью. Анализ результатов численных экспериментов показал, что основные концентрации как «тяжелой», так и «легкой» примесей локализуются в радиусе 1-1.5 км от трубы котельной (рис. 2).

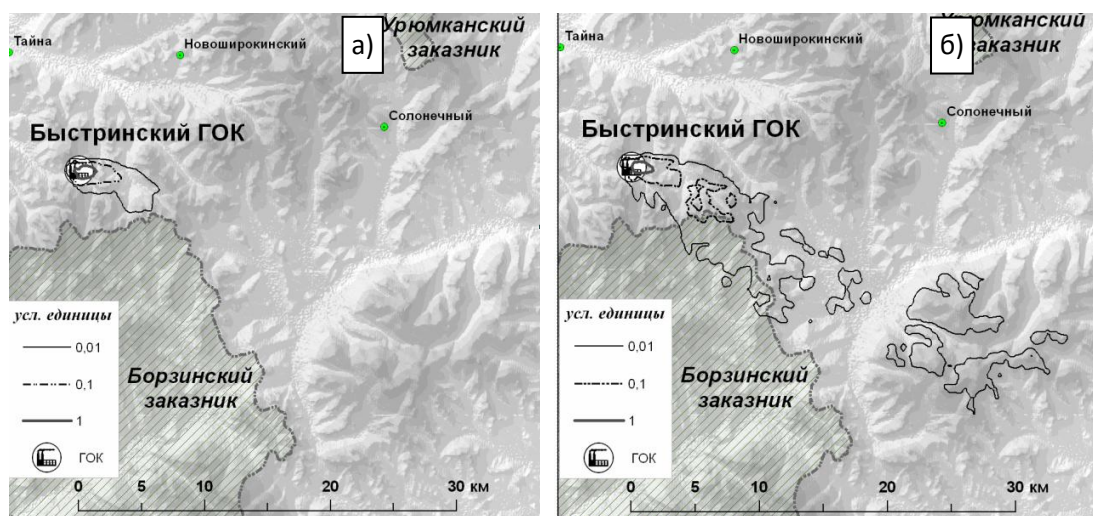


Рис. 2. Изолинии пассивных примесей на высоте приземного слоя через 16 ч с начала работы источника. а) «тяжелая» примесь, б) – «легкая» примесь

Изолиниям со значением 1 усл. ед. соответствуют концентрация пыли 0.7 мг/м^3 и концентрация СО 0.51 мг/м^3 , если предположить по оценочным данным, что мощность источника пыли 57 г/сек, а СО – 40.4 г/сек. Такое распределение полей примесей объясняется зимними инверсионными условиями, которые затрудняют вертикальный перенос загрязнений и дальнейшее горизонтальное рассеивание. Подобное поведение примесей

наблюдалось и в зимних сценариях с юго-западным фоновым ветром [3]. Но в отличие от юго-западного северо-западный фоновый поток способствует переносу загрязнений к границам Борзинского заказника, что за продолжительный период времени может привести к значительному негативному антропогенному воздействию на природный комплекс заказника. В случае «тяжелой» примеси, как показали численные расчеты, границ особо охраняемой природной территории могут достигать только очень незначительные концентрации (рис. 2 а). Расчеты полей концентрации «легкой» примеси указывают на вероятность того, что достигать территории Борзинского заказника могут концентрации порядка 0.03 мг/м^3 (0.1 усл. ед.). В расчетах и оценках учитывалась только работа котельной Быстринского ГОКа, пыление отвалов и проведение взрывных работ не рассматривалось в данном сценарии. Учет других источников загрязнения атмосферы может привести к увеличению концентраций примесей вблизи границ заказника.

По результатам представленного зимнего численного эксперимента можно предположить, что северо-западный фоновый поток в зимнее время является неблагоприятным с точки зрения переноса загрязнений в направлении особо охраняемой природной территории – Борзинского заказника. Этот вопрос требует более детального изучения и учета при планировании работ горно-обогатительного комплекса.

Работа выполняется при частичной поддержке проекта РФФИ № 14-01-00125-а, проекта IX.88.1.6 Фундаментальных исследований Сибирского отделения РАН. Расчеты выполнены на ССКЦ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Помазкова Н. В., Фалейчик Л. М., Кирилюк О. К. Геоэкологическая оценка воздействия разработок минерального сырья на экосистемы Юго-Востока Забайкалья // Устойчивое развитие горных территорий. – 2012. – № 3. – С. 183-189.
2. Фалейчик Л. М., Кирилюк О. К., Помазкова Н. В. Опыт применения ГИС-технологий для оценки масштабов воздействия горнопромышленного комплекса на природные системы Юго-Востока Забайкалья // Вестник ЗабГУ. – 2013. – № 6 (97). – С. 64-79.
3. Пьянова Э. А., Фалейчик Л. М. Сценарные оценки влияния объектов ГПК юго-восточного Забайкалья на качество атмосферы // Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики – 2015. Труды Междунар. конф., посв. 90-лет. со дня рожд. ак. Г.И. Марчука ИВМиМГ СО РАН (Новосибирск. 19-23 октября 2015 г.). [Электрон. ресурс]. – Новосибирск: Абвей, 2015. – С. 611-617.
4. Пьянова Э. А., Фалейчик Л. М. Сценарное моделирование процессов переноса примеси в районе Быстринского ГОКа // Экология, экономика, информатика. Сб. стат.: в 3 т. Т. 2: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2015. – С. 620-627.
5. Носкова Е. В., Обязов В. А. Ветровой режим Забайкальского края // Учёные записки ЗабГУ. – 2015. – № 1 (60). – С. 115-121.
6. Пененко В. В., Алоян А. Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. – 256 с.
7. Пьянова Э. А. Исследование трансформации воздушного потока над термически и орографически неоднородной подстилающей поверхностью // Вычислительные технологии. – 2005. – Т. 10. – № S3. – С. 106–111.

8. Penenko V., Tsvetova E. Discrete-analytical methods for the implementation of variational principles in environmental applications // J. of Computation and Applied Mathematics. – 2009. – Vol. 226, – iss. 1. – P. 319-330.

9. Пьянова Э. А., Фалейчик Л. М. Информационно-вычислительная технология для сценарных оценок динамики и качества атмосферы // Вычислительные технологии. –2012. – Т. 17. – № 1. – С. 109–119.

© Э. А. Пьянова, Л. М. Фалейчик, 2016

УДК 539.374

АНАЛОГИ ФОРМУЛ К. ТЕРЦАГИ И А. СКЕМПТОНА ДЛЯ ПОРИСТЫХ СРЕД, ОПИСЫВАЕМЫХ ТРЕМЯ УПРУГИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Холматжон Худайназарович Имомназаров

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)330-83-52, e-mail: imom@omzg.sccc.ru

В статье получена формула для тензора деформации, связывающая тензор напряжений и поровое давление в насыщенных жидкостью пористых средах. Также получена формула для массы поровой жидкости на единицу объема материала через девиатор тензора напряжений и порового давления. Показано, что в этих формулах коэффициенты выражаются через три упругих параметра пористой среды (скорости быстрой и медленной продольных волн, а также скорость поперечной волны). Получена формула для коэффициента Скемптона B , выражающаяся через три упругих параметра пористой среды.

Ключевые слова: пористая среда, насыщающая жидкость, упругие параметры, вязкость, парциальная плотность.

AN ANALOG OF TERZAGHI'S AND SKEMPTON'S FORMULAS FOR POROUS MEDIA DESCRIBED BY THREE ELASTIC PARAMETERS

Kholmatzhon Kh. Imomnazarov

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Lavrentiev Ave, 6, Doctor of Science, Leading Researcher, tel. (383)330-83-52, e-mail: imom@omzg.sccc.ru

In this paper, the formula for the strain tensor connecting the stress tensor and the pore pressure in a saturated porous media fluid is obtained. Also, a formula for the mass of the pore fluid per volume unit of material through the stress tensor deviator and the pore pressure is obtained. It is shown that in these formulas, the coefficients are expressed in terms of three parameters of a porous elastic medium (fast and slow velocities of longitudinal waves as well as of the shear wave velocity). The formula for the Skempton coefficient B , expressed in terms of three elastic parameters of a porous medium is derived.

Key words: porous medium, saturated fluid, elastic parameters, viscosity, partial density.

Моделирование двухфазных потоков через гетерогенные пористые среды широко используется в нефтедобыче. Например, моделирование бассейна призвано восстановить геологическую историю осадочного бассейна и, в особенности, перемещение компонентов углеводорода в геологическом

масштабе времени. Такое моделирование бассейна направлено на понимание и предсказание движения потоков в процессе нефтедобычи. С другой стороны, моделирование двухфазных потоков через пористые среды играет важную роль для прогноза землетрясений, так как процесс подготовки землетрясений является энергонасыщенным [1].

Коллекторы углеводородов это, как правило, осадочные горные породы, содержащие поры и трещины. Такие среды можно рассматривать как композитные среды. Неоднородностями таких композитных сред являются частицы твердого вещества, а так же пустоты, заполненные флюидом (нефтью, пластовой жидкостью). Вещественный состав породы (минеральный состав, тип флюида, заполняющего поровое пространство), форма, ориентация и взаимное расположение неоднородностей определяют макроскопические физические свойства породы. Этот факт используется в разведочной геофизике для поисковых работ на углеводороды.

Задача вычисления эффективных свойств [2] пористых материалов возникает в геологической разведке при анализе свойств образцов материала (кернов), слагающего пласты месторождения для последующего использования в моделировании процессов, происходящих в процессе разработки.

Тензоры напряжений и деформаций играют фундаментальную роль в геодинамике и тектонофизике. Горная порода характеризуется своими определяющими соотношениями, устанавливающими связь между тензорами напряжений σ_{ij} и деформаций ε_{ij} . По геофизическим измерениям определяется, в основном, тензор деформаций.

Математическую модель, описывающую взаимовлияние течения флюида и изменение напряженно-деформированного состояния поровой матрицы, впервые предложил К. Терцаги [3, 4] для вычисления коэффициента проницаемости глины. В этих работах К. Терцаги ввел эффективный тензор напряжений σ_{ij}^{ef} , зависящей от деформации матрицы и давления флюида

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{ef} - \alpha_e p \delta_{ij}. \quad (1)$$

В формуле (1) δ_{ij} — компоненты единичной матрицы.

Био в [5, 6] обобщил это соотношение на пороупругие среды

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{ef} - \alpha_e p \delta_{ij}, \quad (2)$$

где σ_{ij}^{ef} — тензор эффективных (по Нуру) напряжений, который зависит от тензора деформаций. Иногда соотношение (2) называют соотношением Терцаги-Био. Оно фактически является определением трещиновато-пористой среды. В ней есть скелет и насыщающая его жидкость. Отличие от тождественного нуля тензора σ_{ij}^{ef} означает существование связного скелета. Коэффициент α_e показывает, во сколько раз поровое давление снижает действие суммарного напряжения на скелет.

В работах [7-10] получена формула, связывающая тензор напряжений с тензором деформации и поровое давление

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \bar{\lambda}\varepsilon_{kk}\delta_{ij} - \left(1 - \frac{K}{\alpha\rho^2}\right)p\delta_{ij}, \quad (3)$$

$$p = (K - \alpha\rho\rho_s)\varepsilon_{kk} - \alpha\rho\rho_l e_{kk}, \quad (4)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right), \quad e_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right),$$

где $u = (u_1, u_2, u_3)$ и $U = (U_1, U_2, U_3)$ - векторы перемещений упругой матрицы и насыщающей жидкости с соответствующими парциальными плотностями ρ_s и ρ_l , $\rho = \rho_l + \rho_s$, $\bar{\lambda} = \lambda - (\alpha\rho^2)^{-1}K^2$, $K = \lambda + \frac{2}{3}\mu$, $\lambda, \mu, \alpha\rho^2$ - упругие параметры пористой среды [11]. Упругие параметры K, μ, α выражаются через скорость распространения поперечной волны c_s и две скорости продольных волн c_{p_1}, c_{p_2} [12, 13].

Из (3) выразим тензор деформации ε_{ij} через тензор напряжений σ_{ij} и поровое давление p . Имеем

$$2\mu\varepsilon_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{\bar{\lambda}}{3\bar{\lambda} + 2\mu}\sigma_{kk}\delta_{ij} + \frac{2\mu}{3\bar{\lambda} + 2\mu}\left(1 - \frac{K}{\alpha\rho^2}\right)p\delta_{ij}, \quad (5)$$

Сравнивая поровое давление (4) с поровым давлением из [7-10], получим выражение для определения одного из четырех параметров Био $R = -\alpha\rho\rho_l$. Повторяя рассуждения из [14] и учитывая термодинамическое тождество для пористых сред, с учетом (5) из (2) [14] получим

$$v - v_0 = \frac{1}{3\bar{\lambda} + 2\mu}\left(1 - \frac{K}{\alpha\rho^2}\right)\sigma_{kk} - \frac{1}{\alpha\rho\rho_l}p \quad (6)$$

Следуя [14] масса $m = \rho v$ порового флюида в единице объема материала может быть выражена из (2) [14] в линейном приближении

$$m - m_0 = (\rho - \rho_0)v + \rho_0(v - v_0) =$$

$$= \rho_0 \frac{v_0}{K_f} p + \rho_0 \left[\frac{1}{3\bar{\lambda} + 2\mu} \left(1 - \frac{K}{\alpha\rho^2}\right) \sigma_{kk} - \frac{1}{\alpha\rho\rho_l} p \right], \quad (7)$$

где индексом нуль обозначено равновесное значение соответствующих переменных. При этом зависимость плотности от давления примем в виде [15]:

$$\rho/\rho_0 = 1 + \frac{p - p_0}{K_f},$$

где K_f - коэффициент сжимаемости флюида.

Далее под «сухой деформацией» мы понимаем $\Delta m = 0$. В этом случае из соотношения (7) получим аналог формулы Скемптона [16] для первоначального индуцированного порового давления и общего гидростатического напряжения

$$\Delta p = -B \frac{\Delta \sigma_{kk}}{3}, \quad (8)$$

$$B = \frac{1 - \frac{K}{\alpha \rho^2}}{\left(\tilde{\lambda} + \frac{2}{3}\mu\right) \left[\frac{v_0}{K_f} - \frac{1}{\alpha \rho \rho_l}\right]}.$$

Выражение для «сухого коэффициента Пуассона ν_u » может быть получено путем замены из (8), для Δp , в (5) и сравнения коэффициентов, полученных с определением тензора напряжений для упругого тела

$$2\mu\Delta\varepsilon_{ij} = \Delta\sigma_{ij} - \frac{\nu_u}{1+\nu_u}\Delta\sigma_{kk}\delta_{ij},$$

что приводит к следующему выражению

$$\nu_u = \frac{v + \frac{B}{2}\left(1 - \frac{K}{\alpha \rho^2}\right)(1-2v)}{1 - \frac{B}{2}\left(1 - \frac{K}{\alpha \rho^2}\right)(1+2v)}.$$

При выводе этой формулы мы воспользовались следующими формулами, связывающими коэффициент Пуассона и упругие параметры пористой среды

$$\nu = \frac{\tilde{\lambda}}{2(\tilde{\lambda} + \mu)}, \quad \frac{\tilde{\lambda}}{3\tilde{\lambda} + 2\mu} = \frac{\nu}{1+\nu}, \quad \frac{2\mu}{3\tilde{\lambda} + 2\mu} = \frac{1-2\nu}{1+\nu}.$$

Иногда удобно использовать B и ν_u вместо α , K , и $\frac{v_0}{K_f}$, так как они являются удобными для физических интерпретаций. В самом деле, мы можем либо рассчитать B и ν_u по другим параметрам, или просто брать их непосредственно из эксперимента, в котором измеряются коэффициент Пуассона и поровое давление. В терминах этих коэффициентов, формулы (5) и (7) можно представить в виде

$$2\mu\varepsilon_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{\nu}{1+\nu}\sigma_{kk}\delta_{ij} + \frac{3(\nu_u - \nu)}{B(1+\nu)(1+\nu_u)}p\delta_{ij},$$

$$m - m_0 = \frac{3\rho_0(\nu_u - \nu)}{2\mu B(1+\nu)(1+\nu_u)}\left[\sigma_{kk} + \frac{3}{B}p\right].$$

Отметим, что эти формулы похожи по форме на [14], но есть существенное отличие, а именно, коэффициент Пуассона для пористой среды выражается через три упругих параметра среды. Это в свою очередь приводит к зависимости коэффициента Скемптона B от трех параметров пористой среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жабборов Н.М., Имомназаров Х.Х. Теорема о среднем для неоднородной системы пористоупругости // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics 2009, 2(4), с. 394-400.
2. Победра Б.Е. Механика композиционных материалов — М.: Изд-во МГУ, 1984.-336 с.

3. Terzaghi K. Die Berechnung der Durchlässigkeitsziffer des Tonen aus dem Verlauf der hydrodynamischen Spannungsercheinungen // Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien Math. Naturwiss. Kl., Abt. 2A, 1923, v.132, pp. 105–124.
4. Terzaghi, K., The shearing resistance of saturated soils // Proc. Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. 1st, 1936, pp. 54-55.
5. Biot, M. A., General theory of three-dimensional consolidation // J. Appl. Phys., 1941, v. 12, pp.155-164.
6. Biot, M. A., Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid // J. Appl. Phys., 1955, v. 26, pp.182-185.
7. Imomnazarov Kh.Kh. Concentrated force in a porous half-space // Bulletin of Novosibirsk Computing Center, ser. Geophysics, 1998, issue 4, pp. 75-77.
8. Грачев Е.В., Жабборов Н.М., Имомназаров Х.Х. Сосредоточенная сила в упруго-пористом полупространстве // Доклады РАН, 2003, т. 391, NО. 3, с. 331-333.
9. Grachev E., Imomnazarov Kh., Zhabborov N. One nonclassical problem for the statics equations of elastic-deformed porous media in a half-plane // Applied Mathematics Letters, Vol. 17, Issue 1, 2004, P. 31-34.
10. Жабборов Н.М., Имомназаров Х.Х. Некоторые начально-краевые задачи механики двухскоростных сред. Ташкент, 2012., 212 с.
11. Blokhin A.M., Dorovsky V.N. Mathematical modelling in the theory of multivelocity continuum. –New York: Nova Science, 1995.
12. Имомназаров Х.Х. Несколько замечаний о системе уравнений Био // Доклады РАН – 2000. – Т. 373. – № 4. – С. 536–537.
13. Imomnazarov Kh.Kh. Some Remarks on the Biot System of Equations Describing Wave Propagation in a Porous Medium // Appl. Math. Lett. – 2000. – Vol. 13. – № 3. – P. 33–35.
14. Rice J.R., Cleary M.P. Some basic stress diffusion solutions for fluid-saturated elastic porous media with compressible constituents // Rev. Geophys. Space Phys., 1976, v. 14, pp. 227-241.
15. Агеев П.Г., Колдоба А.В., Гасилова И.В., Повещенко Н.Ю., Якобовский М.В., Ткаченко С.И. Комплексная модель отклика пласта на плазменно-импульсное воздействие // Mathematica montisnigri, 2013, v. 28, pp. 75-98.
16. Skempton, A. W. The pore-pressure coefficients A and B // Geotechnique, 1954, v. 4, pp.143-147.

© Х. Х. Имомназаров, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

1. <i>М. П. Шагаев, Е. Н. Кулик.</i> Автоматизированное формирование базы данных оперативной геоинформации гидрологических постов Сибирского федерального округа.....	3
2. <i>Е. П. Хлебникова, М. Т. Абишева.</i> Особенности обнаружения изменений инженерно-технических сооружений при интерпретации и анализе космических изображений	9
3. <i>Т. А. Хлебникова, О. А. Опритова.</i> Экспериментальные исследования технологии моделирования геопространства по материалам аэрофотосъемки.....	15
4. <i>Е. Ю. Сахарова, Л. А. Сладких, Е. Н. Кулик.</i> Идентификация сельскохозяйственных культур на основе использования данных дистанционного зондирования Земли.....	20
5. <i>Ю. С. Отмахов.</i> Спектральная отражательная способность растительного покрова Сузунского бора.....	24
6. <i>И. Г. Казанцев.</i> Прямая задача формирования многоспектральных изображений в эмиссионной томографии и один частный случай ее обращения.....	27
7. <i>С. А. Жилева, Е. Н. Кулик.</i> Мониторинг вулканической активности на основе данных дистанционного зондирования.....	32
8. <i>К. Т. Кошеков, Н. В. Астапенко.</i> Систематизация и выбор методов распознавания поверхности для автоматизированной информационной системы мониторинга зернохранилища.....	38
9. <i>А. А. Бучнев, В. П. Пяткин.</i> Кластеры с объемными прототипами в распознавании спутниковых данных	43
10. <i>Е. В. Русин.</i> Технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли на гибридном кластере НКС-30Т+GPU.....	46
11. <i>Т. В. Ярославцева, В. Ф. Рапута.</i> Использование космоснимков и наземных наблюдений для анализа полей длительного загрязнения снежного покрова города.....	50
12. <i>Д. В. Мозер, А. Д. Каранеева, Г. О. Исаинова, А. К. Сатбергенова, А. Р. Естаева.</i> Космический мониторинг за деформациями земной поверхности на территории Экибастузского месторождения.....	55
13. <i>А. С. Феоктистов, Е. С. Нежевенко.</i> Исследование эффективности нейросетевой классификации гиперспектральных изображений с использованием преобразования Гильберта – Хуанга.....	59
14. <i>А. А. Леженин, Т. В. Ярославцева, В. Ф. Рапута.</i> Использование спутниковой информации о траекториях дымовых факелов для расчета полей ветра.....	63

15. А. А. Бучнев, П. А. Ким, В. П. Пяткин. Облачные вычисления в обработке данных дистанционного зондирования Земли.....	68
16. И. И. Амелин, В. К. Гусяков, З. А. Ляпидевская, Х. Х. Имомназаров. Малые глубокоководные озера Новосибирской области – вероятные импактные структуры плейстоцен-голоценового возраста	73
17. С. А. Рылов, П. В. Мельников, И. А. Пестунов. Спектрально-текстурная классификация гиперспектральных изображений высокого пространственного разрешения	78
18. В. С. Сидорова. Сокращение размерности пространства спектральных признаков данных ДЗЗ внутри кластеров	85
19. В. В. Пененко. Применение методов разделения масштабов для направленного мониторинга и исследования климатоэкологических процессов.....	91
20. Д. А. Константинова, В. П. Горбатенко. Динамика грозовой активности над территорией Западной Сибири	96
21. Л. И. Курбацкая, А. Ф. Курбацкий. Уравнение баланса дисперсии температуры и противогradientный перенос тепла в конвективном атмосферном пограничном слое.....	100
22. В. И. Кузин, Н. А. Лаптева. Оценка возможных изменений гидрологического режима Сибири в XXI в.	105
23. Е. А. Цветова. Особенности конвекции подо льдом в глубоком озере.....	110
24. В. В. Кравченко. Расчет течений в Новосибирском водохранилище	115
25. В. В. Малахова. Моделирование субмаринных таликов на шельфе моря Лаптевых.....	120
26. Д. Ф. Якишина, Е. Н. Голубева. Исследование механизмов формирования подповерхностного максимума температуры в Канадском бассейне Северного Ледовитого океана.....	125
27. А. С. Сафатов, Г. А. Буряк, С. Е. Олькин, И. К. Резникова, В. А. Вечканов, В. И. Макаров, С. А. Попова. Результаты пятнадцатилетнего мониторинга концентраций биогенных компонентов в аэрозоле приземного слоя атмосферы в п. Ключи в окрестности г. Новосибирска	130
28. В. Ф. Рапута, Т. В. Ярославцева. Анализ аэрозольного загрязнения снежного покрова Московской области.....	136
29. С. Ю. Артамонова, В. Ф. Рапута, А. Ю. Девятова. Экспериментальное исследование и численный анализ техногенного загрязнения в районе г. Северск (Томская область).....	141
30. В. В. Коковкин, В. Ф. Рапута. Мониторинг загрязнения окрестностей автотрассы по составу снежного покрова.....	147
31. С. В. Михайлюта, А. А. Леженин. Критерии для оценки качества информации станций контроля загрязнения атмосферного воздуха	152

32. <i>А. В. Пененко.</i> Численное исследование эффективности прямых алгоритмов усвоения распределенных данных в моделях транспорта атмосферной химии	157
33. <i>Б. М. Десятков, Н. А. Лаптева.</i> Математический метод поиска в атмосфере неизвестного линейного источника газов и аэрозолей	163
34. <i>Э. А. Пьянова, Л. М. Фалейчик.</i> Некоторые сценарные оценки загрязнения атмосферы юго-востока Забайкальского края выбросами Быстринского ГОКа	169
35. <i>Х. Х. Имомназаров.</i> Аналоги формул К. Терцаги и А. Скемптона для пористых сред, описываемых тремя упругими параметрами	174

CONTENTS

1. <i>M. P. Shagaev, E. N. Kulik.</i> Automated database formation via operational geodata obtained on Siberian federal district hydrometric stations net	3
2. <i>E. P. Khlebnikova, M. T. Abisheva.</i> Features detection of changes engineering and technical installations at interpretation and analysis of space images	9
3. <i>T. A. Khlebnikova, O. A. Opritova.</i> Pilot studies of technology of modelling of geospace for aerial photography materials	15
4. <i>E. Yu. Sakharova, L. A. Sladkikh, E. N. Kulik.</i> Crops identification based on remote sensing data usage	20
5. <i>Yu. S. Otmakhov.</i> The spectral reflectance of vegetation of the Suzun forest	24
6. <i>I. G. Kazantsev.</i> A forward problem of Multispectral images formation in emission tomography and partial case of its inversion	27
7. <i>S. A. Zhilyaeva, E. N. Kulik.</i> Volcanic activity monitoring based on remote sensing data	32
8. <i>K. T. Koshekov, N. V. Astapenko</i> Classification and selection of methods of recognition of the automated information monitoring system of granary	38
9. <i>A. A. Buchnev, V. P. Pyatkin.</i> Clusters with volume prototypes in recognition of satellite data	43
10. <i>E. V. Rusin.</i> Technologies for the processing of Earth remote sensing data on NKS-30T+GPU hybrid cluster	46
11. <i>T. V. Yaroslavtseva, V. F. Raputa.</i> Using satellite imagery and ground surveillance for the analysis of long-term pollution fields of city snow cover	50
12. <i>D. V. Moser, A. D. Karaneyeva, G. O. Issainova, A. K. Satberganova, A. R. Yestayeva.</i> Space monitoring of Earth surface deformation on the territory of the Ekibastuz deposit	55
13. <i>A. S. Feoktistov, E. S. Nejevenko.</i> Neural network classification of hyperspectral images using Hilbert-Huang transform efficiency study	59
14. <i>A. A. Lezhenin, T. V. Yaroslavtseva, V. F. Raputa.</i> Use of satellite information on trajectories of the plumes of smoke for the calculation of wind fields	63
15. <i>A. A. Buchnev, P. A. Kim, V. P. Pyatkin.</i> Cloud computing in Earth remote sensing data processing	68
16. <i>I. I. Amelin, V. K. Gusiakov, Z. A. Liapidevskaya, Kh. Kh. Imomnazarov.</i> Small deep lakes of the Novosibirsk region – probable impact structures of pleistocene-holocene age	73

17. S. A. Rylov, P. V. Melnikov, I. A. Pestunov. Spectral-textural classification of hyperspectral images with high spatial resolution.....	78
18. V. S. Sidorova. Reducing the spectral features space dimension for remote sensing data inside the clusters.....	85
19. V. V. Penenko. Application of scale decomposition methods for targeted monitoring and studies of climate and ecological processes	91
20. D. A. Konstantinova, V. P. Gorbatenko. Dynamics of thunderstorm activity over Western Siberia territory.....	96
21. L. I. Kurbatskaya, A. F. Kurbatskiy. The equation of temperature variance and the counter-gradient heat transport in the convective atmospheric boundary layer	100
22. V. I. Kuzin, N. A. Lapteva. Estimate of possible variations of the Siberian hydrological regime in the XXI century	105
23. E. A. Tsvetova. Features of convection under the ice in a deep lake.....	110
24. V. V. Kravtchenko. The calculation of currents in Novosibirsk reservoir	115
25. V. V. Malakhova. Modeling of submarine taliks of the Laptev Sea shelf	120
26. D. F. Iakshina, E. N. Golubeva. The study of mechanisms of the near-surface temperature maximum formation in the Canada basin of the Arctic Ocean.....	125
27. A. S. Safatov, G. A. Buryak, S. E. Olkin, I. K. Reznikova, V. A. Vechkanov, V. I. Makarov, S. A. Popova. The results of 15-years monitoring of biogenic components concentrations in boundary layer atmospheric aerosol in Klyuchi settlement in the vicinity of Novosibirsk.....	130
28. V. F. Raputa, T. V. Yaroslavtseva. The analysis of aerosol pollution of snow cover in the Moscow region.....	136
29. S. Yu. Artamonova, V. F. Raputa, A. Yu. Devyatova. Experimental study and numerical analysis of the technogenic pollution in the area of Seversk (Tomsk region)	141
30. V. V. Kokovkin, V. F. Raputa. Monitoring highway environ contamination on snow cover chemical composition	147
31. S. V. Mikhailuta, A. A. Lezhenin. Urban air pollution monitoring stations, the information quality evaluation	152
32. A. V. Penenko. Numerical study of direct data assimilation algorithms for distributed measurements in atmospheric chemistry transport models.....	157
33. B. M. Desyatkov, N. A. Lapteva. A mathematical method of searching in an atmosphere of unknown point sources of gases and aerosols.....	163
34. E. A. Pyanova, L. M. Faleychik. Scenarios of atmospheric pollution by emissions from the Bystrinsky Mining complex in the South-Eastern Transbaikalie	169
35. Kh. Kh. Imomnazarov. An analog of Terzaghi's and Skempton's formulas for porous media described by three elastic parameters	174