МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОСИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ»
(СГУГиТ)

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ

XIV Международный научный конгресс

Международная научная конференция

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

Т. 1

Сборник материалов

Новосибирск
СГУГиТ
2018

УДК 502:528.7
С26

Ответственные за выпуск:

Доктор технических наук, профессор, профессор-консультант кафедры
фотограмметрии и дистанционного зондирования СГУГиТ, Новосибирск
А. П. Гук

Доктор физико-математических наук, и.о. зав. лабораторией
математического моделирования процессов в атмосфере и гидросфере
Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск
Г. А. Платов

Доктор технических наук, профессор, зав. лабораторией
обработки изображений Института вычислительной математики
и математической геофизики СО РАН, Новосибирск
В. П. Пяткин

Доктор технических наук, зав. кафедрой
фотограмметрии и дистанционного зондирования СГУГиТ, Новосибирск
А. В. Комиссаров

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр., 23–27 апреля 2018 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. Т. 1. – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – 311 с.

В сборнике опубликованы материалы XIV Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь», представленные на Международной научной конференции «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» (секции «Современные методы анализа, обработки, интерпретации и визуализации геопространственных данных по материалам аэрокосмических, лидарных, радарных, тепловых, спектрозональных и гравиметрических съемок», «Мониторинг Земли: технологии, алгоритмическое и программное обеспечение обработки и анализа данных дистанционного зондирования», «Мониторинг и математическое моделирование процессов в атмосфере, гидросфере и литосфере Земли»).

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 502:528.7

© СГУГиТ, 2018

Сборник включен в систему РИНЦ.

УДК 528.88

РАСПОЗНАВАНИЕ ПАХОТНЫХ ЗЕМЕЛЬ НА ОСНОВЕ СЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

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

Елена Юрьевна Сахарова
Сибирский центр ФГБУ «НИЦ «Планета», 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Советская, 30, младший научный сотрудник, тел. (383)222-33-07, e-mail: elena.saharova27@gmail.com

При решении задач сельскохозяйственного производства часто возникает необходимость определения интенсивности и характера использования земель. Анализ сезонной изменчивости характеристик растительного покрова может использоваться в качестве вспомогательной информации при распознавании пахотных земель по спутниковым данным.

Ключевые слова: дешифрирование снимков, классификация изображений, региональный мониторинг земель сельскохозяйственного назначения.

ARABLE LANDS RECOGNITION ON THE BASIS OF SEASONAL VARIABILITY OF VEGETATION COVER CHARACTERISTICS

Ekaterina N. Kulik
Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor Department of Photogrammetry and Remote Sensing, phone: (913)926-82-57, e-mail: e.n.kulik@ssga.ru

Elena Yu. Sakharova
Siberian Center FGBU «SRC «Planeta», 30, Sovetskaya St., Novosibirsk, 630099, Russia, Junior Researcher, phone: (383)222-33-07, e-mail: elena.saharova27@gmail.com

Need of determination of intensity and the nature of use of lands arises at problem solving of agricultural production. The analysis of seasonal variability of vegetable cover characteristics can be used as auxiliary information at a discernment of arable lands on satellite data.

Key words: image interpretation, image classification, regional monitoring of agricultural land.

Достоверность спутникового мониторинга земель сельскохозяйственного назначения обеспечивается за счет привлечения разнообразной вспомогательной исходной информации, к которой можно отнести: данные о расположении сельскохозяйственных земель, интенсивность их использования, характер обработки земель, типы выращиваемых культур и пр. Для обеспечения спутникового мониторинга земель на региональном уровне при картографировании сельскохозяйственных земель применяются многозональные космические снимки как низкого, так и среднего пространственного разрешения. Среди дан-

ных среднего пространственного разрешения наиболее распространенными являются мультиспектральные данные спутника Landsat, обеспечивающие съемку территории с достаточным пространственным и временным разрешением, высокой оперативностью получения информации, а так же возможностью выполнения ретроспективного анализа данных [1, 2].

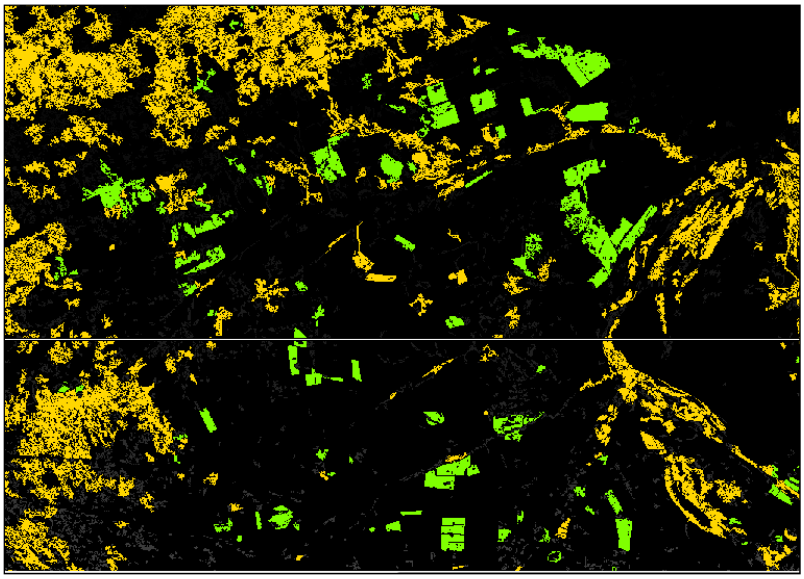
Большая изменчивость отражательных характеристик сельскохозяйственных земель на протяжении ряда лет связана с обеспечением севооборота на полях, то есть систематизированного чередования возделываемых культур и паровых полей. Информация о сезонном изменении характеристик растительного покрова может быть использована при распознавании пахотных земель по данным спутниковой съемки. К данной информации можно отнести резкий спад значений индекса вегетации на исследуемой территории, характерный для появления открытого почвенного покрова вследствие проведения вспашки полей. Высокая интенсивность обработки земли приводит к увеличению частоты появления открытого почвенного покрова [3]. Индикатором свежевспаханной почвы на снимке с рассчитанным значением индекса NDVI служит значение от 0,18 до 0,25, которое постепенно увеличивается по мере появления всходов растительности. Для реализации распознавания пахотных земель по спутниковым данным, в первую очередь, необходимо выявить временной промежуток, в котором наиболее часто встречается открытая почва. По материалам оперативной обработки спутниковых данных низкого пространственного разрешения Terra в течение вегетационного периода на тестовых участках ряда сельскохозяйственных предприятий Новосибирской области были проведены измерения индексов NDVI за четыре года. На основе анализа сезонного хода индекса NDVI были выявлены общие периоды и интервалы значений NDVI, характерные для проведения вспашки земель. В таблице приведены данные, представляющие интервалы значений индексов вегетации, обобщенные за четыре года исследования территории. Основываясь на данных материалах, по наиболее информативным временным промежуткам выполняется подбор спутниковых данных Landsat для проведения классификации снимков с целью выявления обрабатываемых пахотных земель.

Временной период спада значений NDVI по данным Terra

Временной период	22–27 мая	4–8 июня	21–30 июня	11-22 июля	3–8 августа
Интервал значений NDVI	0,20–0,30	0,25–0,35	0,28–0,45	0,28–0,40	0,25–0,40

В качестве основного параметра при классификации спутниковых данных используется значение индекса NDVI. Однако, указанным в таблице интервалам значений NDVI, помимо пахотных территорий соответствуют отдельные элементы дорожной сети, населенных пунктов, облачности. Для повышения достоверности выполнения классификации спутниковых изображений необходимо на основе использования соответствующих индексных вычислений исключить из обработки водные объекты, участки, покрытые снегом и облач-

ность. Постклассификационная обработка полученных результатов содержит исключение одиночных пикселей и объединение смежных классифицированных областей [4]. После этого к результатам классификации применяется ряд пороговых критериев отбора, таких как размер, округлость и протяженность площадного объекта. На рисунке представлен фрагмент обработанного снимка Landsat, на котором выделены пахотные земли и участки изображения, не соответствующие заданным параметрам отбора.



Фрагмент обработанного снимка Landsat

При наличии нескольких разновременных снимков на одну и ту же территорию после векторизации полученных результатов пространственные объекты, соответствующие пахотным сельскохозяйственным угодьям, объединяются, накапливая единый массив. Земли сельскохозяйственного назначения считаются брошенными при условии, что они не подвергались обработке более трех лет. При этом первые годы вывода земель из сельскохозяйственного оборота сопровождаются зарастанием полей сорными травами. В последующие годы помимо разнообразных трав поля также зарастают древесно-кустарниковой растительностью [5]. Поэтому для более полного и точного определения пахотных земель на заданной территории целесообразно выполнить обработку снимков не за один, а за ряд лет, например, за три года.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Спутниковый мониторинг состояния посевов зерновых культур с использованием индекса вегетации / Е. Ю. Сахарова, Л. А. Сладких, Е. Н. Кулик // 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.

2. Иванов, М. А. Методические аспекты картографирования типов землепользования по данным космической съемки [Текст] / М. А. Иванов // География и регион : материалы междунар. науч.-практ. конф. (23–25 сентября 2015 г.) : в 6 т. / Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2015. – Т. IV. Гидрометеорология. Картография и геоинформатика. – С. 203–208.

3. Рухович, Д. Измерение интенсивности землепользования пахотных земель [Текст] / Д. Рухович // Земля из космоса. – 2016. – № 7 (23). – С. 22–30.

4. Чабан, Л. Н. Автоматизированная обработка аэрокосмической информации при картографировании геопространственных данных : учебное пособие [Текст] / Л. Н. Чабан / – М.: МИИГАиК, 2013. – 96 с.

5. Терехин, Э.А. Оценка спектрально-отражательных свойств залежных земель с использованием спутниковых данных [Текст] / Э. А. Терехин // Научные ведомости БелГУ. – Серия: Естественные науки. – 2017. – №4 (253). – Выпуск 38. – С. 161–168.

© Е. Н. Кулик, Е. Ю. Сахарова, 2018

УДК 528.88

ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННОГО ЭТАПА РАЗВИТИЯ СРЕДСТВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Александр Петрович Гук
Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. (913)734-60-35, e-mail: guk_ssga@mail.ru

Мария Михайловна Шляхова
Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. (960)779-62-25, e-mail: plazma_space@mail.ru

Рассмотрены вопросы современного состояния систем дистанционного зондирования, формирующих изображение. Отмечается быстрая смена технических и программных средств получения и обработки снимков и опережающие темпы развития систем сбора информации. В связи с этим основная проблема заключается в обработке получаемой информации и совершенствовании методов съемки. В ближайшее время следует ожидать совершенствования аппаратуры для съемки с БПЛА и методов обработки материалов съемки. Важным этапом является развитие гиперспектральных систем, формирующих изображения. Возможно, ожидать появление гибридных систем ДЗ, состоящих из съемочных систем различного типа. Особое внимание следует обратить на фундаментальное образование в области выполнения съемок и обработки данных, полученных с использованием БПЛА.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, системы, формирующие изображения, БПЛА, развитие и перспективы методов ДЗ.

ASPECTS OF THE MODERN STAGE OF DEVELOPMENT OF REMOTE SENSING INSTRUMENT

Alexander P. Guk
Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, Department of Photogrammetry and Remote Sensing, phone: (913)734-60-35, e-mail: guk_ssga@mail.ru

Maria M. Shlyakhova
Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Photogrammetry and Remote Sensing, phone: (960)779-62-25, e-mail: plazma_space@mail.ru

The problems of the current state of remote sensing systems creation the image are considered. There is a rapid change in the technical and software tools for obtaining and processing images and information collection systems. In this regard, the main problem is the processing of the information obtained and improvement of the survey methods. In the near future, we should expect the improvement of methods and equipment for surveying with UAV. An important stage is the development of hyperspectral systems creating images.

It is possible to expect the emergence of hybrid remote sensing systems consisting of different types of surveying systems.

It is marked that, fundamental education in the field of surveying with UAV and processing of captured data is an important issue.

Key words: remote sensing, surveying systems, UAV, development and future trends of remote sensing.

Дистанционное зондирование буквально означает – получение информации об объекте бесконтактным методом. Понятно, что этот термин охватывает чрезвычайно широкий круг методов. Даже в привычном для нас употреблении этого термина как метода исследования окружающей среды это слишком большая область для анализа в одном докладе. Введем еще более узкое определение ДЗ – как метода исследования поверхности Земли и расположенных на ней объектов с использованием съемочных систем формирующих изображение. Однако, при этом еще более ограничим круг анализа, отделив методы связанные с глобальными исследованиями Земли и ее атмосферной, которые получили название Earth Observation. Таким образом, выделяется сравнительно узкий класс методов ДЗ, который, тем не менее, наиболее широко используется практически.

Даже введя такие ограничения, мы сталкиваемся с большим разнообразием технических средств, методов и технологий ДЗ, которые стремительно развиваются и соответственно расширяется сфера их использования.

Постоянно расширяется количество стран, имеющих национальные космические системы ДЗЗ. Так в начале 90-х годов XX века таких стран было 7, в 2000 году около 20, а в настоящее время более 30 (это касается только оптико-электронных съемочных систем) [1].

Выделим несколько классов съемочных систем: космические, аэросъемочные, системы, устанавливаемые на БПЛА, системы устанавливаемые на движущихся платформах (автомобили, суда), а так же стационарные системы, устанавливаемые на точках поверхности земли [2, 3].

Наличие широкого круга съемочных систем, возможность устанавливать их на носителях того или иного типа, позволяют выбирать необходимую полосу обзора, точность, детальность и заданный период обзора поверхности (возможность выполнять повторные съемки объекта при мониторинге).

Так, если взять группу космических съемочных систем для исследования природных ресурсов можно отметить, что их разрешающая способность составляет от 30 до 0,3 метра на местности, а полоса обзора от 100 до 8 км. Соответственно точность картографирования лежит в пределах от масштаба 1:100000 до масштаба 1:2000. Кроме того, в последнее время появилась возможность получать космические стереоснимки, позволяющие строить высокоточные пространственные модели местности.

На первый взгляд все обстоит просто великолепно и что же еще нужно пользователю данными ДЗ?

Отвечая на этот вопрос, остановимся на существенных изменениях в средствах ДЗ и технологиях съемки.

Во-первых, отметим, что многоспектральные космические съемки приобрели некоторым образом определенную типовую структуру: съемочные системы имеют панхроматический, синий, зеленый и красный, ближний ИК и сред-

ний ИК каналы, а в некоторых случаях и тепловой канал. Такой набор спектральных каналов имеют большинство многоспектральных съемочных систем. Также развиваются «специализированные» многоспектральные системы для исследования конкретных типов объектов, которые имеют дополнительные каналы, например два синих (голубой и синий) – для анализа водных объектов, два красных (ближний и дальний красные каналы) и, например два ближних ИК – для изучения растительности. С другой стороны развивается новая тенденция – создание группировок спутников, несущих многоспектральную съемочную аппаратуру и дополняющих друг друга, что позволяет вести детальный мониторинг. В качестве примера можно привести группировку спутников RapidEye [4].

Другое важное достижение в области современных космических съемочных систем – это получение снимков высокого разрешения (от 2,5м до 1м: SPOT-5, SPOT-6, SPOT-7, ALOS-2 и т.д.), и сверхвысокого разрешения (от 1м до 0,3м: GeoEye, WORLDVIEW-3, Ikonos, Quik Bird, ALOS-3, PLEIADES-1A, PLEIADES-1B, KOMPASAT -5 и т.д.) [2, 3].

Российские космические съемочные системы хозяйственного назначения к сожалению отстают от зарубежных, однако в последнее время этот разрыв сокращается. Запущены космические многоспектральные съемочные системы «Канопус-В» (с разрешением 2,1м в панхроматическом и 10м в спектральных каналах) и Ресурс Дк-1 (1м, 2-3 м соответственно), а также Ресурс-П» (разрешение 1 м и спектральное разрешение 3-4 метра), имеющий 6 спектральных каналов (в том числе 2 красных и два ближних ИК канала). В ближайшее время планируется вывести на орбиту группировку спутников серии «Обзор-О» с расширенным набором спектральных каналов и улучшенным пространственным разрешением. Так же на борту устанавливается радарная съемочная система «Обзор-Р». Необходимо обеспечить стабильную работу этих спутников и тогда практически будет, достигнут уровень зарубежных стран в плане получения спектральной информации высокого разрешения. В свою очередь, необходимо в ближайшее время создать и развивать космические съемочные системы сверхвысокого разрешения (свыше 1 метра) открытые для широкого доступа [5, 3].

Что следует ожидать в ближайшее время? Конечно, для России важным этапом в развитии космических спутниковых систем станет создание полнофункциональной коммерческой многоспектральной съемочной системы сверхвысокого разрешения. Надеемся, что это произойдет в ближайшее время.

Так же, на наш взгляд, возможно ожидать лишь незначительного увеличения разрешающей способности коммерческих спутников, хотя вероятно, что в настоящее время, достигнут некоторый предел, и потребуется технологический скачек для существенного повышения разрешающей способности.

Необходимым для современного этапа развития ДЗ является создание надежных гиперспектральных космических систем большого формата. Эти системы должны формировать изображения, содержащие достаточно большое количество элементов, например 6000 х 6000 или 10 000 х 10 000. Это принципиально изменит возможности исследования поверхности Земли в оптиче-

ском диапазоне и позволит получать принципиально новую качественную информацию.

Аэросъемочные системы в настоящее время представлены цифровыми съемочными камерам кадрового и сканерного типа. Основной недостаток цифровых камер – небольшой формат снимка (6х6 см). Как отмечает профессор Г.Конечный «Мы мечтаем о цифровой камере с матрицей ПЗС, содержащей 900 млн. пикселей с размером пикселя 7 мкм, а имеем DMC с кадром 8000х14000 элементов и пикселем 12 мкм; Vexcel Ultra CamD – 7500 х 11500 элементов; ApplanixDSS – 4092 х 4077 пикселей.

Этот недостаток частично устранен созданием многокамерных съемочных систем (например, многокамерная съемочная система DIMAC, состоящая из 4 камер DMC форматом 4080 х 5440 элементов). В настоящее время создаются многокамерные системы, содержащие 6-8 камер. Таким образом, следует ожидать как увеличения количества элементов в матрице приемника (что связано с решением ряда проблемам физического плана), так и увеличения количества камер, смонтированных в одном корпусе. Это уже реализовано в настоящее время, хотя и имеются сложности в конструкции камер и методах монтирования единого изображения. Но основная проблема это конечно стоимость».

Конкурентами кадровых камер являются сканерные съемочные системы, которые, однако, имеют очень существенный недостаток, связанный с изменением угловых элементов внешнего ориентирования и скоростью движения носителя, в процессе формирования изображения. Этот недостаток устраняется двумя путями:

- путем стабилизации угловых колебаний и стабилизацией путевой скорости носителя;

- путем измерения угловых элементов ориентирования носителя (с помощью INS, IMU и линейных элементов внешнего ориентирования с помощью ГЛОНАСС, GPS) и последующего учета этих параметров в процессе формирования изображения.

Таким образом, совершенствование систем навигации носителя и стабилизации камер приведет к появлению высококачественного изображения, сравнимого с геометрической точки зрения с кадровыми камерами. Современные сканеры имеют до 8 спектральных каналов, высокое разрешение, и большую полосу обзора.

Перспективным направлением развития аэросъемочных систем является создание гибридных съемочных систем, например комбинация цифровой съемочной системы и лазерного сканера, размещенных в одном корпусе (RCD 100) или комбинацией линейного цифрового сканера и многокамерной цифровой системы [6, 7]. Это направление позволяет создавать прорывные технологии сбора и фотограмметрической обработки данных, существенно расширяющих возможности ДЗ.

Получение полноформатных гиперспектральных изображений позволит существенно расширить возможности методов дистанционного зондирования.

Наконец, съемки с БПЛА. Это «модное», но в тоже время и весьма перспективное направление развития средств ДЗ. Появились принципиально новые возможности детальной съемки объектов. Съемка с БПЛА незаменима при создании 3D моделей, ортофотопланов и реальных фотопланов небольших участков; при выполнении кадастровых работ, съемке архитектурных сооружений, интерьеров и т.д.

Наиболее важным событием в развитии технологий БПЛА стало создание прецизионных фотограмметрических камер для БПЛА (например, RCD-100), а также возможность установления на БПЛА совместно с цифровой камерой лазерной сканирующей системы.

В то же время некорректное использование средств БПЛА привело к большим проблемам в области сбора и обработки данных. Непрофессиональные пользователи выполняют работы по съемке отдельных участков, зданий и сооружений без надлежащего соблюдения требований инструкции и правильной оценки точности, выполненных работ. Большинство таких «ошибок» происходит из-за незнания принципов ДЗ и особенностей методов получения и обработки данных.

Это принципиально важный момент при внедрении в широкую практику новых технических средств и технологий, особенно при массовом их применении недостаточно подготовленными пользователями. Это может привести к тяжелым, с а порой катастрофическим последствиям (недавний пример – пожар в Кемерово).

Заключение.

1. Современные космические съемки обеспечивают получение широкого спектра данных с заданной точностью и периодичностью, необходимых при решении практически любых задач по мониторингу поверхности Земли в различных масштабах.

2. Требуется разработать специальную программу исследования существующих и перспективных аэрокосмических съемочных систем России, с целью исследования их качественных свойств и определения возможных сфер применения.

3. Наибольшее развитие средств ДЗ следует ожидать в направлении развития космических гиперспектральных съемочных систем.

4. Основной проблемой эффективного использования средств ДЗ является обработка больших объемов поступающих данных. В настоящее время используется не более 10% от всего потока поступающей информации, именно в этом направлении следует ожидать в ближайшее время положительных изменений, связанных с развитием методов, алгоритмов и программного обеспечения обработки данных. Таким образом, основное направление в развитии методов ДЗ – это разработка автоматических алгоритмов обработки данных, автоматическое распознавание образов на снимках, автоматическое создание карт и ортофотопланов по снимкам, построение 3D моделей и поверхности рельефа на основе автоматической идентификации точек на снимке. Этому направлению посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных авторов. В каче-

стве примера приведем ссылки на статьи, посвященные различным разделам обработки данных ДЗ, чтобы показать масштабность выполняемых работ [9-19]. Достигнуты значительные успехи в отдельных областях обработки данных ДЗ, однако до полной автоматизации обработки, а следовательно, до создания в значительной степени автоматизированных и тем более автоматических эффективных систем мониторинга еще очень далеко.

5. В области применения БПЛА для ДЗ следует разработать профессиональный регламент их использования, технологии съемки, методы обработки, алгоритмы и программное обеспечение. Поэтому в ближайшее время необходимо разработать технологии выполнения съемки (планирование съемки) с БПЛА, и технологию обработки снимков с соответствующей системой контроля.

6. Предлагается создать в СГУГиТ (на базе кафедры фотограмметрии и ДЗ) профессиональный центр по разработке технологий съемки и обработке данных, получаемых с использованием БПЛА, а также сертифицированный центр обучения с присвоением соответствующей квалификации, и открыть направление подготовки магистров «Применение БПЛА для построения высокоточных 3D моделей местности».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дворкин Б.А. Дудкирн С.А. Новейшие и перспективные спутники дистанционного зондирования Земли // Геоматика. – 2013. – № 2. –С.16–36.

2. Fabio Remondino, Markus Gerke. Oblique Aerial Imagery -A Review // Photogrammetric Week'15, Ed. d. fritsch, Wichmann, Berlin/Offenbach. – 2015. – P. 75-84.

3. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование методы и модели обработки изображений – Москва. – 2010. – Техносфера. – 560 с.

4. Дуглас К., Хайнен М. Rapideye: космическая съемка Земли и не только // Геоматика. – 2010. – № 4. – С. 64–67.

5. Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуации «Канопус-В» с космическим аппаратом «Канопус-В»№1», ФГУП «НПШ ВНИИЭМ». 2011. – 109 с.

6. N. Maiellaro, M. Zonno, P. Lavalle Laser scanner and camera-equipped uav architectural surveys // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W4, 2015. – P. 381–386.

7. J. Li, B. Yang, W. Wu, W. Dai, C. Chen, X. Zou, M. Tiana 3D mobile mapping with a low cost uav system// The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W8, 2017 5th International Workshop LowCost 3D – Sensors, Algorithms, Applications, 28–29 November 2017, Hamburg, Germany. – P. 127–132.

8. M. A. Altyntsev, S. A. Arbuzov, R. A. Popov, G. V. Tsoi, and M. O. Gromov UAV aerial survey: accuracy estimation for automatically generated dense digital surface model and orthothoto plan//The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B6, 2016, XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic. – P. 155-159

9. Чибуничев А.Г. Автоматическое построение плотного облака точек по множеству снимков на основе полуглобального метода отождествления соответственных точек // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 2. – С. 14–18.

10. Гук А. П. Автоматизация дешифрирования снимков. Теоретические аспекты статистического распознавания образов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 55. – С. 166–169.

11. Гук А. П., Шляхова М. М. Анализ эффективности применения метода главных компонент при использовании непараметрического статистического подхода к дешифрированию снимков // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. IV Междунар. науч. конф. (Красноярск, 12–15 сентября 2017 г). – Красноярск, 2017. – С. 90–93.

12. Fawcett D., Schneider F.D., Schaepman M.E., Damm A., Verhoef W., Schläpfer D. Advancing retrievals of surface reflectance and vegetation indices over forest ecosystems by combining imaging spectroscopy, digital object models, and 3d canopy modeling // Remote sensing of environment. – 2018. – V. 204. – P. 583-595

13. Джоел ван Кроненброк, Шляхова М. М. Геозондирование окружающего мира в эпоху цифрового представление изображения Земли // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Пленарное заседание : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. – С. 3–12.

14. Чибуничев А. Г., Гук А. П. Фотограмметрия: вчера, сегодня, завтра // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2016. – № 2. – С. 3–9.

15. Чибуничев А.Г., Михайлов А.П., Старшов В.В. Автоматическое построение плотного облака точек по множеству снимков на основе полуглобального метода отождествления соответственных точек // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 2. – С. 14–18.

16. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.

17. Гук А. П., Евстратова Л. Г., Алтынцев М. А. Разработка методики определения изменений границы леса по разновременным разномасштабным аэрокосмическим снимкам // Геодезия и картография. – 2015. – № 12. – С. 32–39.

18. A. Murtiyoso, P. Grussenmeyer, and N. Börlin Reprocessing close range terrestrial and uav photogrammetric projects with the dbat toolbox for independent verification and quality control // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W8, 2017 5th International Workshop LowCost 3D – Sensors, Algorithms, Applications, 28–29 November 2017. – Hamburg, Germany. – P. 171-177

19. Helmut Mayer. from Orientation to functional Modeling for Terrestrial and UAV Images // Photogrammetric Week'15, Ed. d. fritsch, Wichmann. – Berlin/Offenbach. – 2015. – P. 165-174.

© А. П. Гук, М. М. Шляхова, 2018

УДК 528.8:69.001.5

О ВОЗМОЖНОЙ ИНТЕГРАЦИИ МЕТОДОВ ФОТОГРАММЕТРИИ И BIM-ТЕХНОЛОГИИ

Лариса Геннадьевна Евстратова
Государственный университет по землеустройству, 105064, Россия, г. Москва, ул. Казакова, 15, кандидат технических наук, доцент кафедры картографии, тел. (499)261-5386, e-mail: lge_21@mail.ru

Отмечается быстрое развитие и распространение BIM-технологии и роль фотограмметрии в формировании 3D-моделей, являющихся пространственной основой BIM. Показано, что современные методы фотограмметрии позволяют решать большую часть задач построения 3D-моделей. Подчеркивается необходимость подготовки специалистов-фотограмметристов для обеспечения огромного объема работ при использовании BIM-технологии.

Ключевые слова: BIM-технология, фотограмметрия, реалистичные измерительные трехмерные модели городов, информационная модель объекта строительства, подготовка специалистов.

ON THE POSSIBLE INTEGRATION OF PHOTOGRAMMETRIC TECHNIQUES AND BIM TECHNOLOGIES

Larisa G. Evstratova
State University of land use planning, 15, Kazakova St., Moscow, 105064, Russia, Ph. D., Associate Professor, phone: (499)261-53-86, e-mail: lge_21@mail.ru

There has been a rapid development and spread of BIM technology and the role of photogrammetry in the creation of 3D models which is the spatial basis for BIM. It is shown that modern photogrammetry methods allow us to solve most of the problems of creation 3D models. It emphasizes the need for training photogrammetry specialists to provide a huge amount of work using BIM technology.

Key words: BIM technology, photogrammetry, realistic measuring 3D city models, the information model of construction object, training of specialists.

С внедрением в России технологии информационного моделирования объектов строительства – BIM (Building Information Modeling) технологии, которая направлена на эффективное управление различной по типу информацией в течение всего жизненного цикла (проектирование, строительство, эксплуатация, реконструкция, капитальный ремонт, снос) здания или сооружения, наступает этап цифрового моделирования объектов массового строительства на различных стадиях жизненного цикла. BIM технология позволяет практически исключить ошибки, незапланированное увеличение затрат при проектировании, строительстве зданий (сооружение) и понизить эксплуатационные расходы [1].

Во многих странах мира (Германия, Великобритания, США, Франция, Финляндия, Сингапур, Китай и др.) разработаны стандарты BIM технологии и происходит бурное внедрение их при поддержке правительства [2]. В Германии Федеральное министерство транспорта и цифровой инфраструктуры планирует

до 2020 года поэтапное внедрение нового стандарта BIM для транспортно-инфраструктурных проектов, который направлен на полный переход к цифровому проектированию и строительства [3]. Для реализации BIM технологии требуются сбор и обработка огромного объема данных для создания базового проекта, а затем получение и обработка также больших объемов информации для обновления и детализации исходного проекта. Это требует развития принципиально новых подходов и технологий в проектировании и строительстве зданий и объектов инфраструктуры.

Одним из принципиальных отличительных этапов BIM технологии является трехмерная визуализация объектов строительства с семантической информацией всех элементов этого проектируемого, строящегося здания. На этапе проектирования и строительства трехмерная модель объекта, позволяет объединить в единую модель множество компонентов этого объекта (каркас и экстерьер здания, внутренняя планировка, сети инженерно-технического обеспечения и т.п.) созданных специалистами различных отделов, организаций и согласовывать их. Таким образом, трехмерная визуализация дает возможность на лету в привычном для человека ракурсе проверить и удостовериться в качестве работ всех задействованных специалистов. Это в свою очередь, позволяет на всех этапах работ выявлять ошибки, недостатки и благодаря раннему обнаружению и устранению их, вести бесперебойный ход строительства. Таким образом, для развития BIM технологии необходимо использовать современные цифровые фотограмметрические технологии.

Наземная фотограмметрия уже давно применяется в архитектуре и строительстве. Например, фотограмметрический метод позволяет быстро произвести обмер зданий, сооружений и получить их проекции на горизонтальную или вертикальную поверхность. Так в 1935 году А.М. Валуев стереофотограмметрическим методом выполнил задачу точного обмера деталей четырех башен Московского Кремля [4].

Определение и слежение за деформацией инженерных сооружений, проектирование оптимальной трассы на местности при изыскании дорог, контроль точности монтажа крупнопанельных сооружений, подсчет объемы добычи угля открытым способом, определение параметров динамических процессов (движение водного потока) вот только некоторые задачи, которые решаются посредством методов стереофотограмметрии [4, 5].

Методы фотограмметрии основаны на возможности построения по снимкам пространственной модели, измерения которой обеспечивают высокую точность определения пространственных координат точек (элементов) объектов, его размеров, формы и пространственного положения, а также рельефа. С переходом на цифровые технологии для решения этих прикладных задач создаются фотограмметрическим способом и визуализируются цифровые измерительные реалистичные трехмерные модели (3 D модели) [6-9]. Для получения данных используются новейшие съемочные системы, в которых реализована одновременная фиксация данных о местности методами лазерного сканирования и стереофотосъёмки (например, Leica RCD30 Oblique), так и съемка с беспилотных

летательных аппаратов (БПЛА). Для обработки снимков разработаны достаточно эффективные автоматические алгоритмы идентификации соответственных точек (Global Matching и Semi Global Matching), обеспечивающие построение ЦМР и ЦМП.

Классический метод сбора информации для построения 3D моделей основан на процессах стереонаблюдения и стереовекторизации, которые выполняются операторами. Однако, в настоящее время широкое применение находят технологии построения 3D моделей основанные на формирование плотного «облака» точек по перекрывающимся фотоизображениям. Это обеспечивает практически полную автоматизацию процессов создания 3D моделей. В то же время, проблемой остается автоматическое дешифрирование плотного «облака» точек, т.е. отнесения каждой точки к заданному классу (основание здания, крыша, конек крыши, дымоход, растительность, рельеф и т.д.). Это узкое место данной технологии, которое требует дальнейшего исследования и развития.

Вне зависимости от выбранного фотограмметрического метода сбора координатной информации об объектах местности для создания реалистичной измерительной 3D модели необходимо сформировать реалистичные текстуры всех необходимых для визуализации объектов местности [10-12].

Выполненные автором экспериментальные исследования рассмотренных двух фотограмметрических методов построения реалистичных измерительных 3D моделей городской территории по различным материалам аэросъемки и возможности решения некоторых прикладных задач, позволяют выделить важные детали.

Положительным аспектом этих технологий является получение в процессе создания измерительных 3D моделей городов цифровых моделей: рельефа, местности, объектов (зданий, сооружений) по отдельности и ортофотопланов, которые сами являются самостоятельными продуктами и для многих исследователей представляют интерес.

На практике, возникает задача освободить 3D модель от второстепенных, мешающих деталей, то есть автоматизация процесса фильтрации плотного «облака» точек на этапе создания 3D моделей и автоматической коррекции фототекстуры. Эта задача является из одной наиболее важных и востребованных на этапе применения 3D моделей.

Рассмотрим пример, мониторинг строительных работ, для этого создается трехмерная модель всей площадки строительства, на которой присутствует строительная техника, различные места скопления материалов, мусора и тени различного происхождения (облака, деревья), т.е. все, что мешает восприятию объекта исследования, так называемые «шумы». Другим примером мониторинг состояния дорожного полотна, «шумом» будут являться автомобили.

При переходе к программным продуктам, которые позволяют визуализировать 3D модели, построенные фотограмметрическим методом и к продуктам, с помощь которых можно решать поставленную прикладную задачу, происходит потеря информации. Для устранения этих недостатков необходимо решить проблему унификации форматов данных.

Для повышения экономической эффективности необходима вычислительная оптимизация, совершенствование спецификаций и средств разработки, позволяющих использовать новые технологии при реализации вычислительных процессов. Одним из решений является так называемые облачные сервисы.

Рассмотренные примеры показывают необходимость интеграции методов фотограмметрии и BIM технологии, а также возможность уже в настоящее время применять автоматизированные фотограмметрические технологии. После внедрения технологии информационного моделирования объектов строительства появится предпосылка автоматического создания и обновления единой трехмерной модели городов, что создает основу для устойчивого развития инфраструктуры городов. Это относится как к новым объектам строительства, так и к уже существующим сооружениям. Создание информационной модели уже существующих зданий (сооружений) и включение их в единую трехмерную модель города по 2D чертежам не всегда доступно, поэтому самым эффективным инструментом являются фотограмметрические методы. Особые место занимают реалистичные измерительные 3D модели памятников архитектуры, которые важны для сохранения и восстановления исторического облика фасадов и всего архитектурного ансамбля в целом [13]. Таким образом, для фотограмметрии возникнет задача создания детальных измерительных трехмерных моделей для нового весьма обширного класса объектов.

В будущем все объекты BIM технологии создадут единую трехмерную модель городов, что создает основу для организации экологического благополучия, которое напрямую зависит от рационально использования и управления инфраструктурой городов.

Подводя итог краткому изложению проблемы развития и внедрения, отметим, что необходимым процессом является сбор данных дистанционными методами и фотограмметрическая обработка снимков. Несмотря на то, что современные методы фотограмметрии позволяют решать большинство задач для формирования 3D моделей необходимо сосредоточить внимание на дешифрировании изображений. Кроме того следует заметить что BIM технологии – новая весьма широкая сфера для применения фотограмметрических технологий, большой, новый рынок занятости для специалистов – фотограмметристов и выпускников ВУЗа по направлению «Фотограмметрия и дистанционное зондированию». Для успешного решения этой задачи следует:

– разрабатывать новые специализированные технологии для обеспечения данными BIM проекты;

– обучать студентов по направлению «Фотограмметрия и дистанционное зондирование» по переработанным специализированным программам (например, в рамках подготовки магистров), учитывающим все особенности новых технологий [14].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СП 333.1325800.2017 «Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла»:

утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 18 сентября 2017 г. № 1227/пр. : введен в действие с 19 марта 2018 г. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.minstroyrf.ru/upload/iblock/e80/SP-333.pdf (дата обращения: 17.03.2018)

2. The Business Value of BIM for Infrastructure 2017 [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.construction.com/toolkit/reports (дата обращения: 17.03.2018).

3. Phased introduction of Building Information Modelling (BIM) until 2020 [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.bmvi.de/SharedDocs/EN/PressRelease/2015/152-dobrindt-bim.html (дата обращения: 15.03.2018).

4. Лобанов А.Н. Фотограмметрия. : учебник для вузов. – М. : Недра, 1984. – 552 с.

5. Гук А.П., Евстратова Л.Г. Мониторинг технических сооружений по ортофотопланам построенным по технологии true ortho // Всероссийская конф. «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2017)»: сб. трудов. (Бердск, 29–31 августа 2017 г.). – Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2017. – С. 262–266.

6. Гук А. П., Лазерко М. М. Разработка методик создания 3D-моделей по аэрокосмическим снимкам высокого и сверхвысокого разрешения и другим данным дистанционного зондирования // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2011. – № 2. – С. 32–34.

7. Евстратова Л. Г. Использование «истинных» ортофотопланов (true ortho) в географических исследованиях // 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. 24–28.

8. Devrim Akca, Mark Freeman, Armin Gruen, Isabel Sargent. Quality assessment of 3D building data by 3D surface matching // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – Beijing, 2008. – Vol. XXXVII. – Part B2, CD-ROM.

9. Евстратова Л. Г. Создание «реальных» ортофотопланов (True Ortho) по аэрофотоснимкам с использованием программного комплекса INPHO // Геодезия и картография. – 2011. – № 3. – С. 29–32.

10. Лазерко М. М. Анализ современных средств для создания трехмерных моделей по различным данным // ГЕО-Сибирь-2008. IV Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 5 т. (Новосибирск, 22–24 апреля 2008 г.). – Новосибирск : СГГА, 2008. Т. 3. – С. 122–126.

11. Журкин И. Г., Хлебникова Т. А. Результаты экспериментальных исследований технологии получения измерительной трехмерной видеосцены по материалам аэрокосмических съемок // Геодезия и картография. – 2010. – № 7. – С. 27−31.

12. Гук А. П., Шляхова М. М. Некоторые проблемы построения реалистических измерительных 3D-моделей по данным дистанционного зондирования // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 4 (32). – С. 51–60.

13. Михайлов А. П., Перес Вальдез Мануэль де Хесус. Создание цифровых моделей памятников истории и архитектуры по материалам перспективной и плановой аэрофотосъемки // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 5. – С. 72–73.

14. Гук А. П., Евстратова Л. Г. Особенности подготовки широкого круга магистров методам обработки аэрокосмических снимков для создания различных видов продукции по данным дистанционного зондирования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 1. – С. 7–11.

© Л. Г. Евстратова, 2018

УДК 528.7

ЦИФРОВЫЕ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ В ТОПОГРАФО-ГЕОДЕЗИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Анастасия Сергеевна Скоробогатова
Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, магистрант кафедры космической и физической геодезии, тел. (705)133-68-28, e-mail: skorobog@inbox.ru

Марина Сергеевна Епифанова
Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, магистрант кафедры космической и физической геодезии, тел. (702)349-21-28, e-mail: m.skorob@mail.ru

Елена Павловна Хлебникова
Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. (383)361-08-66 e-mail: hlelenka@yandex.ru

Проведен частичный анализ функциональных возможностей программных продуктов фирмы «Ракурс» PHOTOMOD и компании «Leica Geosystems» Leica Photogrammetry Suite. Приведены основные достоинства и недостатки программных комплексов для обработки данных дистанционного зондирования, преобладающих в использовании на рынке Республики Казахстан.

Ключевые слова: цифровые фотограмметрические системы, ортофотоплан, данные дистанционного зондирования, PHOTOMOD, Leica Photogrammetry Suite.

DIGITAL PHOTOGRAMMETRIC SYSTEMS IN THE SURVEYING INDUSTRY IN THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

Anastasia S. Skorobogatova
Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Graduate, Department of Space and Physical Geodesy, phone: (705)133-68-28, e-mail: skorobog@inbox.ru

Marina S. Epifanova
Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Graduate, Department of Space and Physical Geodesy, phone: (702)349-21-28, e-mail: m.skorob@mail.ru

Elena P. Khlebnikova
Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Photogrammetry and Remote Sensing, phone: (383)361-08-66 e-mail: hlelenka@yandex.ru

A partial analysis of the functionality of software products of the company "RAKURS" PHOTOMOD and the company "Leica Geosystems" Leica Photogrammetry Suite. The main ad-

vantages and disadvantages of software systems for remote sensing data processing, prevailing in use in the market of the Republic of Kazakhstan, are given.

Key words: digital photogrammetric system, orthophoto, remote sensing data, PHOTOMOD, Leica Photogrammetry Suite.

Современные цифровые технологии, поддерживаемые спутниковыми навигационными системами и системами дистанционного сбора топографо-геодезических данных, позволяют более полно и достоверно отображать картографическую информацию. Важным преимуществом цифровых технологий является получение цифрового продукта, готового к использованию в географической информационной системе (ГИС) или системе автоматического проектирования (САПР). Эта особенность исключает промежуточные действия по оцифровке данных и значительно повышает эффективность использования результатов съемки [1].

В связи с развитием технологий спутникового позиционирования в последнее время при производстве аэрофотосъемки большой популярностью пользуются системы GPS и ГЛОНАСС для привязки аэрофотоснимков.

В настоящее время для обработки полученных изображений используют специальные компьютерные комплексы – цифровые фотограмметрические системы (ЦФС).

На сегодняшний день имеются различные программные продукты, при помощи которых возможно обработать материалы аэро- и космических съемок с дальнейшим комплексом работ по созданию ортофотопланов и создании цифровых топографических планов и карт.

Создание ортофотопланов является одним из важнейших этапов в технологической схеме создания цифровых топографических карт и планов [2].

Республиканское государственное казенное предприятие «Казгеодезия» Комитета по управлению земельными ресурсами Министерства сельского хозяйства Республики Казахстан было создано согласно постановлению Правительства в 2010 году. РГКП «Казгеодезия» имеет в своем составе 8 филиалов, расположенных в различных регионах Республики Казахстан. Предприятие успешно решает задачи согласно бюджетным программам.

С 2010 года предприятием выполняется аэрофотосъемка территорий больших и малых городов с целью дальнейшего создания цифрового топографического плана масштаба 1:2 000 согласно бюджетным программам. При производстве аэрофотосъемочных работ предприятием РКГП «Казгеодезия» используется цифровая камера ADS40 (Airborne Digital Sensor) компании Leica Geosystems (Швейцария).

В камере имеется несколько линеек, которые расположены под определенными углами отклонений от надира. Это позволяет производить съемку в 3 плоскостях. Одна производит съемку вперед по ходу движения самолета, вторая производит съемку позади самолета, а основной является камера производящая съемку непосредственно под самим самолетом. Это позволяет полу-

чить зону полного тройного перекрытия. Наличие тройного перекрытия может показаться нецелесообразным, избыточным, но именно его наличие позволяет значительно увеличить уровень автоматизации в процессе создания цифровой модели рельефа.

Одним из представителей цифровых фотограмметрических систем в топографо-геодезическом производстве Республики Казахстан является компания Leica Geosystems AG и ее программный продукт Leica Photogrammetry Suite. С 2001 года компания Leica Geosystems стала владелицей компаний ERDAS, Inc и LH Systems, которые занимались разработкой программного обеспечения для дистанционного зондирования и программ для фотограмметрии. Данное приобретение позволило Leica Geosystems выйти на новый уровень на рынке программного обеспечения для дистанционного зондирования [3].

Обработку материалов аэрофотосъемки РГКП «Казгеодезия» и ее 8 филиалов и дальнейшее создание цифровой модели рельефа и ортофотопланов производит в программном продукте компании Leica Geosystems «Leica Photogrammetry Suite».

К достоинствам данного программного продукта можно отнести следующее: набор полных функциональных возможностей, наличие большого количества сенсоров для производства работ с использованием спутниковых технологий, импорт и экспорт большого количества формата данных, мощный инструмент для создания ортомозаики, автоматическое извлечение рельефа с возможностью отображения этих данных как в виде растра, так и в виде непосредственно горизонталей, обработка фотограмметрических данных больший объемов, содержащих очень большое количество снимков, возможность осуществления 3D картографирования в стереорежиме.

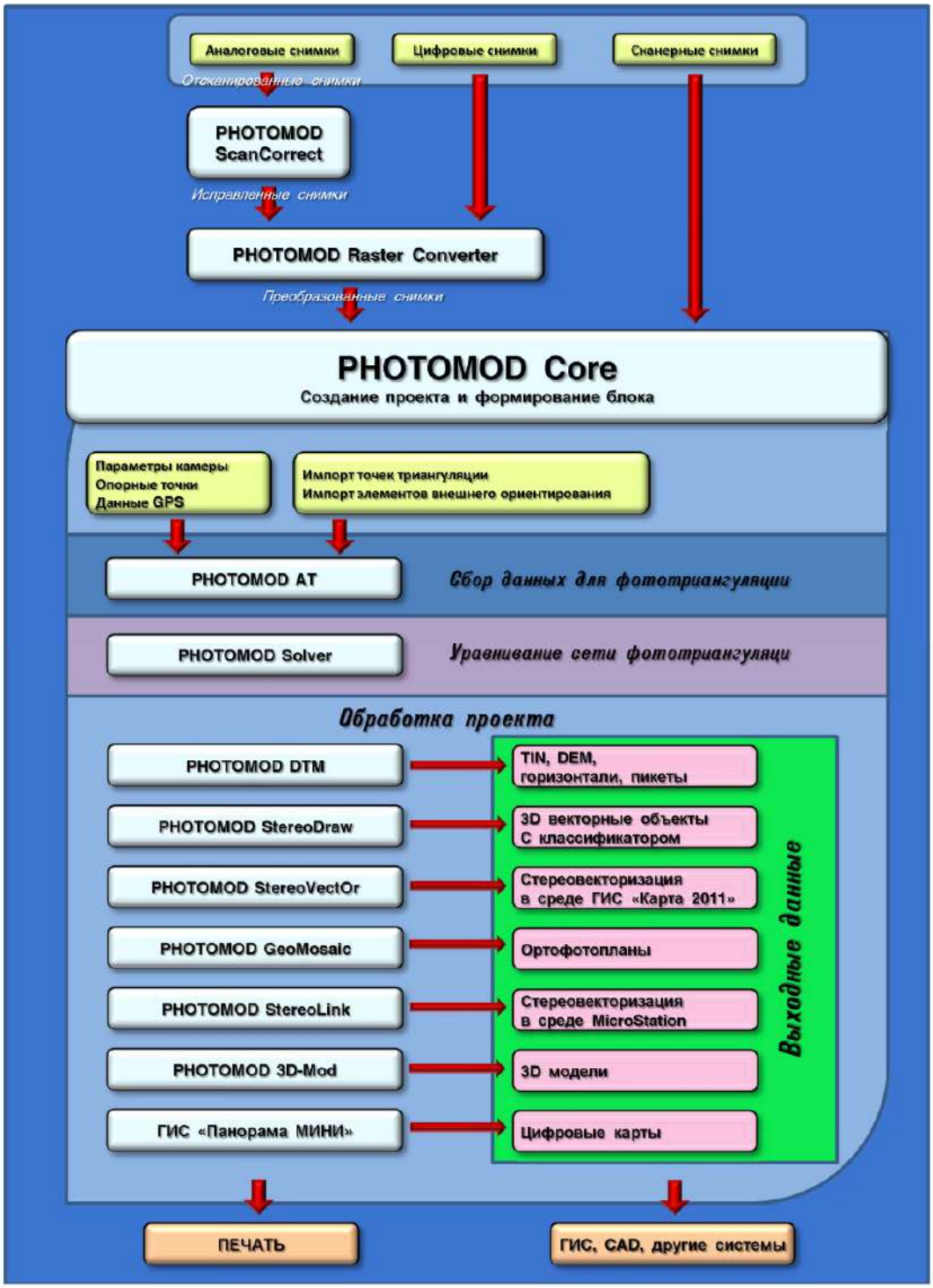
К дополнительным характеристикам система Leica Photogrammetry Suite можно отнести возможность изменения пользовательского интерфейса, наличие макросов, отвечающих за диалог с пользователем и за обработку растрового изображения, наличие высокого уровня языка программирования. К недостаткам можно отнести отсутствие русифицированной версии и высокую стоимость полного комплекта ЦФС [3, 4].

Еще одним представителем цифровых фотограмметрических систем в топографо-геодезическом производстве Республики Казахстан является компания «Ракурс» и ее программный продукт PHOTOMOD.

На российском рынке коммерческую цифровую фотограмметрическую систему, которая может быть использована для персональных компьютеров, первой предложила компания «Ракурс». На сегодняшний день ЦФС PHOTOMOD является наиболее популярной цифровой фотограмметрической системой в России и в более чем 50-ти странах СНГ и мира.

PHOTOMOD обладает довольно таки гибкой модульной структурой. Что позволяет использовать ее в качестве локальной ЦФС, в качестве сетевой среды в процессе создания и обработки больших проектов, в том числе и как дополнительный модуль к уже существующим фотограмметрическим системам при выполнении больших трудоемких процессов [5].

В состав входят сама управляющая оболочка PHOTOMOD Core и 10 дополнительных модулей, предназначенных для построения сети фототриангуляции, уравнивания сетей фототриангуляции снимков, построения цифровой модели рельефа, построения модели поверхности, создания ортофотпланов, создания цифровой карты местности и др. На рисунке представлена общая технологическая схема обработки проекта в системе PHOTOMOD.



Технологическая схема обработки проекта в системе PHOTOMOD

К достоинствам системы PHOTOMOD можно отнести: модульную структуру, что позволяет подобрать оптимальное сочетание комплектующих продуктов, замкнутость технологического процесса для получения итоговой продукции без использования сторонних программных продуктов, автоматизированные фотограмметрические процессы, возможность работы в сетевой среде при реализации больших проектов, оптимальное соотношение цены и производительности [3, 4].

Система PHOTOMOD имеет возможность экспорта и импорта графических данных с таких форматов как: BMP, TIFF, JPEG, DXF, DGN, ASCII, ASCII-A, ArcInfo ASCII, GeoTIFF, Shape-file, MIF/MID, ERDAS Imagine, PNG и многие другие; экспорта и импорта баз данных в DBF-формате; имеется возможность изменения интерфейса пользователем и имеет русифицированную версию [5].

Проведя анализ существующих и используемых в топографо-геодезическом производстве Республики Казахстан цифровых фотограмметрических систем можно сделать вывод, что главной задачей для развития таких систем является создание универсальных систем, которые могут позволить выполнение всех фотограмметрических процессов. Таких как создание цифровых топографических карт, создание цифровой модели рельефа, создание ортофотопланов с использованием данных аэро- и космических съемок, прочая целевая обработка данных аэрокосмических съемок. Еще одной задачей является максимальная автоматизация процессов измерения и последующей обработки данных этих измерений. Это позволит повысить производительность выполняемых процессов. Выбор того или иного программного продукта может зависеть от того, какой объем работ необходимо выполнить, от того, в каких форматах должны быть получены выходные данные и от того, какими финансовыми возможностями обладает исполнитель.

Не смотря на то, что РКГП «Казгеодезия» уже использует в своем топографо-геодезическом производстве цифровую фотограмметрическую систему компании Leica Geosystems AG, существует возможность внедрения с целью дальнейшего использования такого программного продукта, как PHOTOMOD. Первичную обработку материалов аэрозалетов и создание ортофотопланов РГКП «Казгеодезия» выполняет самостоятельно. Далее готовые обработанные материалы передаются в филиалы с целью создания цифровых топографических карт и планов. Переход от существующей технологии обработки материалов к использованию программного продукта PHOTOMOD значительно уменьшит финансовые затраты на приобретение лицензированного программного обеспечения и позволит выполнять полный комплекс работ по обработке материалов цифровых аэро- и космосъемок и создания цифровых моделей местности каждым филиалом самостоятельно.

В настоящее время для наиболее детального рассмотрения данного вопроса авторами проводится обширное экспериментальное исследование на фактических материалах с целью сопоставительного анализа функциональных возможностей указанных программных продуктов и оценки всех рисков и благо-

приятных факторов, влияющих на процесс обработки материалов аэрофотосъемки, связанных с возможностью внедрения в производство РКГП «Казгеодезия» программного продукта PHOTOMOD.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Земцова, А. В., Плотникова Е. В., Кузнецова И. А. Создание ортофотоплана на территорию месторождения // Инновациоонные технологии в маркшейдерии и геодезии. Междунар. форум маршейдеров : Междунар. форум маршейдеров «Инновациоонные технологии в маркшейдерии и геодезии» : труды (Алматы, 17-18 сентября 2015 г.). – Алматы : Казахстанский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, 2015. – С. 112-177.

2. ГКПНП (ОНТА)-05-005-07 Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов // Агентство Республики Казахстан по управлению земельными ресурсами. – Астана. : АЗР, 2008. – 75 с.

3. Савидова С. С. Технология обработки ДДЗ от Leica Geosystems и ДАТА+ // ГЕО-Сибирь-2005. Науч. конгр. : сб. материалов в 7 т. (Новосибирск, 25–29 апреля 2005 г.). – Новосибирск : СГГА, 2005. Т. 5. – С. 66–70.

4. Программное обеспечение для фотограмметрической обработки данных ДЗЗ // Пространственные данные. – 2006. – № 3. – С. 36-41.

5. Компания «Ракурс». ЦФС «PHOTOMOD 6.3». Руководство пользователя [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www2.racurs.ru/download/docs6/rus/general.pdf. – Загл. с экрана.

© А. С. Скоробогатова, М. С. Епифанова, Е. П. Хлебникова, 2018

УДК 528.7

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОГРАММНЫЕ ПРОДУКТЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ АЭРОСЪЕМОК С БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Валерия Вячеславовна Дедкова
Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ассистент кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. (383)361-08-66, e-mail: dedkova.val@gmail.ru

В статье приведена краткая обзорная информация о современных зарубежных и отечественных программных продуктах, с помощью которых выполняется автоматизированная фотограмметрическая обработка данных аэросъемочных работ, преимущественно с поддержкой обработки результатов съемки с БАС. Также представлена сводная информация о некоторых характеристиках программных средств.

Ключевые слова: программное обеспечение, фотограмметрия, беспилотные авиационные системы, обработка изображений, 3D-моделирование.

MODERN SOFTWARE FOR PROCESSING OF UAS-BASED IMAGERY RESULTS

Valeriya V. Dedkova
Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Assistant, Department of Photogrammetry and Remote Sensing, phone: (383)361-08-66, e-mail: dedkova.val@gmail.ru

The article provides a brief overview of modern software products, that are used for automated photogrammetric processing of aerial survey data, mainly with support of processing of UAS-survey results. Summary of some characteristics of the softwares are also presented.

Key words: software, photogrammetry, unmanned aerial systems, image processing, 3D modelling.

Уникальным и в то же время практичным средством получения пространственной информации является аэросъемка с беспилотных авиационных систем (далее – БАС). Преимущества данного вида съемки заключаются в высокой оперативности работ, существенном снижении затрат на содержание и эксплуатацию БАС (в сравнении с пилотируемыми авиационными средствами), отсутствии необходимости специальных площадок, предназначенных для запуска БАС, а также возможности проведения съемочных работ в труднодоступных местах или местах, представляющих опасность для здоровья и/или жизни человека [1].

Аэрофотосъемка с беспилотных авиационных систем принципиально не отличается от традиционных методов съемки с пилотируемых летательных аппаратов, собственно как и обработка полученных результатов. Однако следует учитывать особенности данных, полученных с применением БАС (количество снимков, используемое съемочное оборудование, условия съемки и т.д.), что не

всегда позволяет применять автоматические процедуры обработки стандартного функционала фотограмметрического программного обеспечения (далее – ПО). Следовательно, разработчики стремятся оптимизировать процесс обработки, расширяя функционал, либо создавая новые программные продукты. В данной статье приведен краткий обзор современных программных средств для обработки результатов съемки на основе беспилотных авиационных систем.

Одним из программных продуктов, предназначенных для цифровой обработки материалов аэрофотосъемок является ПО ContextCapture (ContextCapture Center), от ведущего поставщика программных решений в области развития инфраструктуры Bentley Systems. В ПО реализован функционал по фотограмметрической обработке всех типов цифровых RGB изображений, а также 3D-моделирования, создания цифровых карт и планов. Работа в ContextCapture ведется в двух модулях – модуле управления и модуле обработки данных. Разделение модулей управления и обработки позволяет обрабатывать данные одновременно на нескольких компьютерах по принципу общей очереди заданий, что значительно сокращает время вычислений. В виду автоматической обработки данных, точность итогового результата напрямую зависит от качества и геометрической точности импортируемых файлов (фотоизображений с камер смартфонов, компактных цифровых, DSLR, фотограмметрических и мультикамерных систем и т.д.). Для оптимального результата рекомендовано использование зеркальных камер с фиксированным объективом, требуемый процент продольного перекрытия для аэрофотоснимков должен составлять не менее 80 %, поперечного – не менее 50%. Информация о съемочной камере (фокусное расстояние, дисторсия объектива, главные точки и др.) может быть получена из метаданных EXIF или собственных баз данных ПО[2]. Аэротриангуляция выполняется в автоматизированном режиме (автоматически определяется относительное положение и ориентация каждого снимка), для повышения геометрической и геопространственной точности осуществляется ввод контрольных точек и редактирование связующих точек, возможен экспорт аэротриангуляции в форматы KML и XML [2].

Программа Autodesk ReCap Pro является частью программного комплекса Autodesk и предназначена для создания реалистичных трехмерных моделей по фотографиям с БАС и данным лазерного сканирования. Обработка БАС-данных осуществляется в приложении ReCap Photo. ReCap Photo – приложение, предоставляющее собой облачный сервис, с помощью которого можно загрузить на сервер фотоизображения и получить текстурированные полигоны, облака точек по фотографиям с геопривязкой, ортогональные изображения с картами высот в высоком разрешении и т.д. Фотограмметрический программный комплекс позволяет обрабатывать свыше 1000 изображений, что в 3-4 раза превышает предыдущий максимум [3].

Pix4Dmapper – одна из программ линейки программных продуктов Pix4D Solutions, используется для обработки изображений, полученных с БАС, или результатов наземной съемки. Программа реализует составление высокоточных карт и 3D-моделей с географической привязкой. Для получения высокоточных

результатов требуется достаточное перекрытие изображений. При проектировании летно-съемочных работ важно учитывать следующие факторы: рельеф местности/объекта, GSD (показатель, определяющий высоту полета), перекрытие. Современные БАС поставляются с хорошим программным обеспечением, с помощью которого можно задать требуемые параметры летно-съемочных работ, что в результате сыграет положительную роль как на проведении съемочных работ, так и на автоматизированной обработке результатов аэрофотосъемок [4].

Geomatica 2017 – пакет программного обеспечения, предназначенный для обработки и анализа данных дистанционного зондирования Земли, аэрофотосъемок, в том числе с БАС. Свыше 550 функций позволяют контролировать процессы обработки пространственной информации на различных этапах, что обеспечивает получение точных результатов [5].

ПО PhotoModeler UAS – приложение, позволяющее создавать точные 3D-модели и производить измерения по фотоснимкам и стереофотограмметрии с близких расстояний, в данном приложении реализованы функции по обработке результатов БАС-съемки, в том числе автоматическая калибровка камеры БПЛА [6].

Inpho UAS Master – цифровая фотограмметрическая станция (ЦФС) для обработки данных БАС-съемки, а также результатов наземных съемок. Обеспечивает полную автоматическую геопривязку, калибровку, уточнение и анализ данных, создание цветных плотных облаков точек, моделей поверхности и моделей без земной поверхности, уточнение и редактирование моделей рельефа, создание ортофотопланов и др [7].

В таблице 1 представлены некоторые характеристики вышеназванных программных продуктов в порядке их появления в тексте.

Таблица 1

Современные зарубежные программные продукты,
в которых реализована функция обработки данных БАС-съемки

№ п/п	Наименование/ Разработчик	Исходные данные	Минимальные системные требования	Стоимость
1	Autodesk ReCap/ Autodesk, Inc, США	Изображения (аэрофотосъемка, БАС), данные лазерного сканирования	ОС:Windows 10, Windows 8, Windows 7 Корпоративная, Максимальная, или Профессиональная (64 bit), 64-bit процессор с частотой 2.0 ГГц или быстрее; 4 ГБ ОЗУ; True color Монитор 1280x1024, графическое устройство с поддержкой OpenGL 3.1 и 256 МБ графической памяти	Месяц – 2 284 р. Год – 17 417 р. 3 года – 52 253 р.

Окончание табл. 1

№ п/п	Наименование/ Разработчик	Исходные данные	Минимальные системные требования	Стоимость
2	ContextCapture/ Bentley Systems, США	Изображения (аэрофотосъемка, БАС), видео, точки лазерного сканирования	Windows 10, Windows 8, Windows 7 Корпоративная, Максимальная, или Профессиональная (64 bit), 8-яд. 64-bit процессор с частотой 2.0 ГГц или быстрее,4 ГБ ОЗУ или больше	По запросу
3	Pix4Dmapper/ Pix4D SA, Швейцария	Изображения (аэрофотосъемка, БАС), видео	Windows 7, 8, 10, Server 2008, Server 2012, 64 bits (PC или Mac компьютеры, использующие Boot Camp);Процессоры (Intel i5/ i7/ Xeon рекомендуются); Любое графическое устройство с поддержкой OpenGL 3.2. (интегрированные карты Intel HD 4000 или выше); Для небольших проектов (до 100 изображений 14 МП): 4 ГБ ОЗУ, 10 ГБ свободного места на жестком диске	Бессрочная – 500 000 р. Год – 200 000 р.
4	Geomatica 2017/PCI Geomatics, Канада	Изображения (аэрофотосъемка, БАС, космическая съемка)	Windows 7, 8, 10, Server 2008, 2012, 2016, 64 bits; Linux CentOS 7.x; Процессор с частотой 2.2 ГГц или быстрее, 8 ГБ ОЗУ или больше, графическая карта или контроллер с поддержкой разрешения 1280x1024 и с 256 МБ памяти, более 2 ГБ свободного дискового пространства	По запросу
5	PhotoModeler UAS/ Eos Systems Inc., Канада	Изображения (БАС)	ОС: Windows 7/8/8.1 (64 bit), Vista (32, 64 bit); Процессор на частоте 2.5 ГГц, 8ГБ ОЗУ, 400МБ свободного дискового пространства, монитор с разрешением 1024×768	Месяц – 12 000 р., Год – 120 000 р.
6	Inpho UAS Master/ Trimble, Inc., США	Изображения (аэрофотосъемка, БАС)	Многоядерный ПК (поддерживается компьютерами до 16 ядер); Оперативная память от 8 Гб; Windows 7 (64 бит); Специальные аппаратные средства для стереоскопического режима: Видеокарта с поддержкой опции OpenGL (например, серии NVIDIA Quadro), дополнительные анаглифные очки	По запросу

Приведенные в таблице программные продукты являются самостоятельными, функционируют автономно и приобретаются отдельно от основного ПО (в случае, если это программный комплекс). Таблица составлена по данным актуальных версий ПО.

Среди отечественных фирм-разработчиков программного обеспечения для фотограмметрической обработки результатов аэрофотосъемки и дистанционно-

го зондирования лидирующие позиции занимают ЦФС PHOTOMOD (Компания «Ракурс») и Agisoft Photoscan (Группа компаний «Геоскан»), табл. 2.

Таблица 2

Современные отечественные программные продукты,
в которых реализована функция обработки данных БАС-съемки

№ п/п	Наименование/ Разработчик	Исходные данные	Минимальные системные требования	Стоимость
1	Agisoft Photoscan/ Группа компаний "Геоскан", Россия	Изображения (аэрофотосъемка, БАС)	Процессор: Quad-core Intel Core i7 CPU, Socket LGA 1150 или 1155, Материнская плата: LGA 1150 или 1155 с 4 разъемами DDR3 и хотя бы 1 разъемом PCI Express x16, Оперативная память: DDR3-1600, 4 x 4 Гб (всего 16 Гб) или 4 x 8 Гб (всего 32 Гб), Видеокарта: Nvidia GeForce GTX 980 или GeForce GTX 1080	Бессрочная лицензия – от 11 041 р.
2	ЦФС PHOTOMOD UAS, / Компания «Ракурс», Россия	Изображения (аэрофотосъемка, БАС и др.)	ОС: Microsoft Windows 7, 8.1, 10 x64 Процессор: Intel Core i7, Оперативная память: 32 ГБ (min 2 ГБ) Видеокарта: На базе чипа NVIDIA Quadro K2000	Бессрочная лицензия – от 179 000 р.

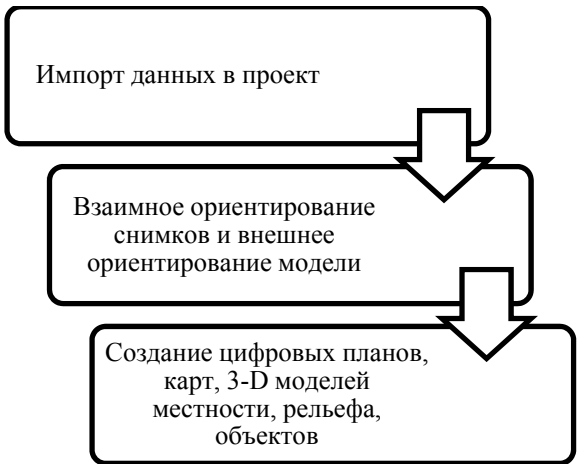
ЦФС PHOTOMOD является наиболее распространенной коммерческой ЦФС на территории России. На сегодняшний день PHOTOMOD состоит из комплекса программных средств фотограмметрической обработки данных дистанционного зондирования Земли, позволяющих получать пространственную информацию по изображениям практически всех коммерчески доступных съемочных систем. Для обработки данных с БАС реализована программа PHOTOMOD UAS. PHOTOMOD UAS является автономной программой и не требует установки дополнительного ПО, построена на модульном функционале ЦФС PHOTOMOD. С помощью программного средства можно получить ЦМР, 3D-векторы, ортофотопланы [8].

Agisoft Photoscan – фотограмметрическое программное обеспечение, предназначенное для автоматизированного создания 3D-моделей, геопривязанных ортофотопланов высокого разрешения, детальных цифровых моделей поверхности по цифровым изображениям [9].

Для того чтобы использовать максимум информации, содержащейся на аэрофотоснимке, необходима корректная обработка аэрофотоснимка. Со-

временные автоматизированные программные средства позволяют максимально оптимизировать процесс обработки, за счет чего сокращается время на выполнение задач и снижается трудоемкость. На сегодняшний день существуют десятки программных продуктов, предназначенных для обработки данных, полученных как в ходе традиционных аэрофотосъемок, так и с применением БАС, причем некоторые из них разрабатывались непосредственно для обработки данных с БАС.

На рисунке представлена общая схема фотограмметрической обработки данных в современных программах.



Общая схема цифровой фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки

Для более подробного изучения операций представленных программных продуктов необходимо выполнить исследования достоверности и точности получаемой продукции, а именно провести исследование фотограмметрического сгущения и построения 3D-моделей на макетных цифровых снимках, исследовать построение 3D-моделей на реальных данных, оценить точность определения параметров построения сети фототриангуляции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Возможности беспилотных авиационных систем для тематического картографирования лесных сообществ / Ю. С. Отмахов, С. А. Арбузов, Д. В. Осинцев, Д. В. Смирнов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 1. – С. 21–25.

2. Официальный сайт компании «Bentley Systems» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.bentley.com/ru/products/product-line/reality-modeling-software/contextcapture.

3. Официальный сайт компании «Autodesk» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://blogs.autodesk.com/recap/introducing-recap-photo

4. Официальный сайт компании «Pix4D SA» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://pix4d.com

5. Официальный сайт компании «PCI Geomatics» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.pcigeomatics.com/software/geomatica/professional

6. Официальный сайт компании «Eos Systems Inc» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.photomodeler.com/products/UAS/default.html

7. Официальный сайт компании «Trimble» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/inpho-uasmaster

8. Официальный сайт компании «Ракурс» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.racurs.ru/index.php

9. Официальный сайт компании «Геоскан» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.agisoft.com

© В. В. Дедкова, 2018

УДК 528.7

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОЧНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПО МАТЕРИАЛАМ БПЛА

Татьяна Александровна Хлебникова
Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор, тел. (913)474-19-70, e-mail: t.a.hlebnikova@ssga.ru

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

Сымбат Муратовна Аубакирова
Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант, тел. (913)388-34-86, e-mail: simona5-86@mail.ru

Интенсивное развитие беспилотных авиационных технологий и современный уровень цифровой фотограмметрии сделали возможным получение пространственных данных на интересующие территории в короткие сроки. Используемое программное обеспечение все более ориентировано на автоматизацию процессов обработки. В статье представлены результаты экспериментальных работ по исследованию точности построения фотограмметрической модели по материалам, полученным с беспилотного летательного аппарата.

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

EXPERIMENTAL STUDIES OF PHOTOGRAMMETRIC MODEL ACCURACY BY UAV

Tatyana A. Khlebnikova
Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, phone: (913)474-19-70, e-mail: t.a.hlebnikova@ssga.ru

Olga A. Opritova
Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Head of Siberian Training Research and Production Cartographical Center, phone: (913)940-08-97, e-mail: ooolg@yandex.ru

Simbat M. Aubakirova
Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D. Student, phone: (913)388-34-86, e-mail: simona5-86@mail.ru

The intensive development of unmanned aerial technologies and current level of digital photogrammetry allowed obtaining spatial data on the territories of interest within a short time. The used software is focused on automation of processing. This paper presents results of researches of photogrammetric model accuracy by UAV.

Key words: aerial photography, unmanned aerial system, photogrammetric processing, photogrammetric model, accuracy evaluation.

Для исследователей, использующих современное ПО ГИС для геоинформационного анализа, стало обыденным оперирование детальными цифровыми моделями объектов и явлений глобального характера и простирания [1]. В этом случае метрические измерения на местности заменяются измерениями по ее цифровой модели – модели геопространства.

В то же время интенсивное развитие беспилотных авиационных технологий и современный уровень цифровой фотограмметрии сделали возможным получение пространственных данных на интересующие участки территорий в максимально короткие сроки. Результаты фотограмметрической обработки аэрофотосъемки с БПЛА в виде различных цифровых продуктов (ортофотопланы, плотные модели, полигональные модели, ЦМР) используются для построения модели геопространства. Последняя в свою очередь используется как для мониторинга состояния различных природных и естественных объектов, так и для целей, требующих обеспечения регламентированной точности – создания цифровых топографических планов крупного масштаба, подготовки проектов межевания, землеустроительных дел на земельные участки т.п.

В этой связи особенно важным представляется соблюдение требований к точности промежуточных результатов на всех этапах обработки фотоснимков и получения конечного цифрового продукта для моделирования геопространства.

В настоящее время ряд организаций выполняют аэросъемку с БПЛА [2–8]. Для обработки материалов такой съемки используют программу Agisoft PhotoScan Professional Edition компании Agisoft LLC[9]. Однако сведений о точностных характеристиках результатов обработки крайне мало.

В этой связи нами ставилось целью исследование точности фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки с БПЛА двух вариантов опорных данных: с использованием центров проектирования фотоснимков и опорных точек. Оценка качества обработки по каждому варианту осуществлялась по контрольным точкам.

Материалы, рассматриваемые в данной статье представляют собой продолжение работ, опубликованных в [10–12].

Для проведения исследований выбрана программа Agisoft PhotoScan Professional Edition (версия 1.2.0, компания Agisoft LLC, г. Санкт-Петербург), далее Agisoft PhotoScan.

Программное обеспечение Agisoft PhotoScan, по нашему мнению, 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 [10].

Программа Agisoft PhotoScan в пользовательском отношении отличается от известных ЦФС. В отзывах опытных пользователей встречается определение этой программы – «программа нажатия одной кнопки». На самом деле это не совсем так. Безусловно, степень автоматизации высока, но для получения качественного конечного продукта, обеспечивающего точность измерений, необхо-

дим тщательный подбор параметров обработки, а также соблюдение последовательности операций обработки.

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

– выравнивание снимков (по терминологии документации программы);

– построение плотного облака точек;

– построение полигональной модели объекта;

– построение текстуры модели или ортофотоплана.

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

В данной статье приведены результаты оценки точности построения фотограмметрической модели, полученной по результатам аэрофотосъемки с БПЛА Supercam S350. Данный БПЛА относится к самолетному типу с размахом крыла 3,2 м и предназначен для выполнения панорамной и плановой аэрофотосъемки и видеосъемки на высоте от 50 до 500 м, развивает скорость полета от 65 до 120 км/ч. Допустимый вес полезной нагрузки может достигать 2,5 кг. На БПЛА была установлена цифровая фотокамера Sony, ILCE-6000 с фокусным расстоянием 20 мм и размером кадра 4 000 х 6 000 пикселей.

Аэрофотосъемка выполнена на высоте около 280 м, полученное пространственное разрешение фотоснимков составило 5 см/пиксель.

Территория съемки – равнинная, плотно застроенная, площадь съемки – 0,44 км^2. Обработка и оценка точности выполнена по 66 фотоснимкам, входящим в 3 маршрута залета.

На рис. 1 приведена схема расположения снимков, центров проектирования в момент съемки и контрольных точек.

Значения средних (v) и средних квадратических погрешностей (m) координат и высот центров проектирования, а также контрольных точек приведены в таблице.

Результаты оценки точности фотограмметрической модели, полученной с использованием центров проектирования

Число снимков n, погрешности v, m	WGS-84				Местная система координат			
	X (м)	Y (м)	XY (м)	H (м)	X (м)	Y (м)	XY (м)	H (м)
n (центры)	66							
v	0,12	0,08	0,16	0,16	0,10	0,22	0,26	0,26
m	0,15	0,10	0,17	0,19	0,13	0,34	0,37	0,32
n(контрольные)	7							
v	-	-	-	-	0,70	0,72	1,12	0,92
m	-	-	-	-	0,85	0,86	1,21	1,05

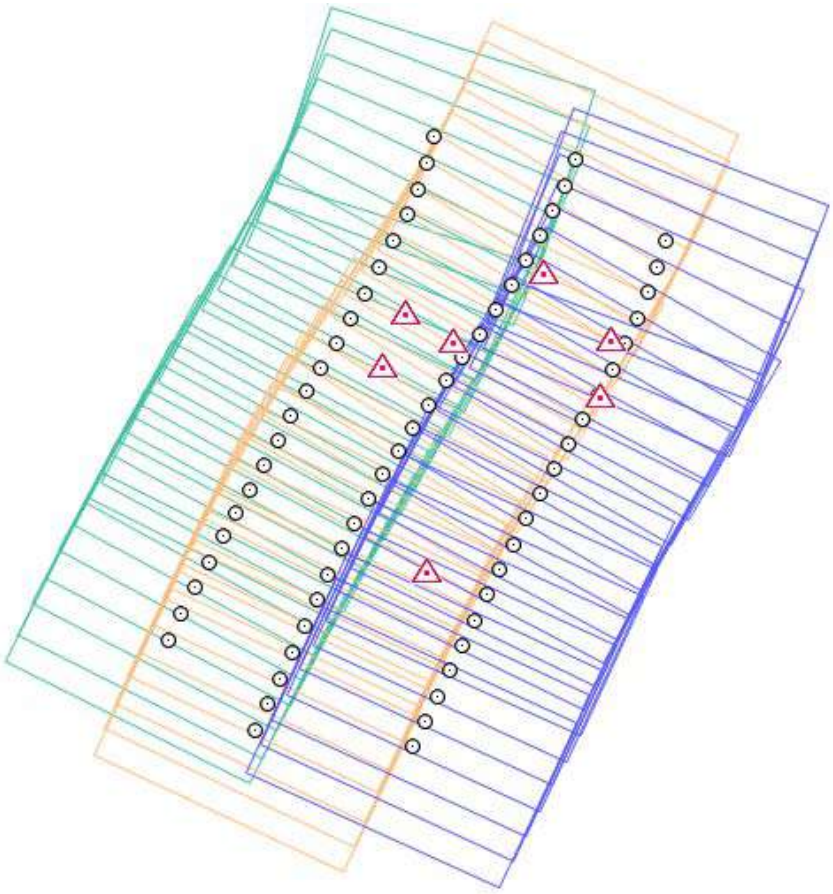


Рис. 1. Схема расположения снимков, центров проектирования в момент съемки и контрольных точек

Кроме того, выполнено фотограмметрическое сгущение с использованием опорных и контрольных точек. Координаты опорных точек определены по инженерно-топографическим планам масштаба 1:500 с точностью 0,1 м. В качестве опорных и контрольных точек преимущественно использованы центры смотровых колодцев подземных коммуникаций.

Фотограмметрическое сгущение выполнено в двух вариантах расположения опорных и контрольных точек. Результаты будут опубликованы позже.

Необходимо отметить, что терминология и результаты уравнивания в виде расхождений по осям координат и высот, помещаемые в протокол Agisoft PhotoScan, требуют дополнительных вычислений для сопоставления полученных результатов с допусками действующей инструкции [13].

В результате исследований сделаны следующие выводы:

Программное обеспечение Agisoft PhotoScan позволило получить по выбранным материалам аэрофотосъемки цифровую модель (облако точек) (рис. 2), пригодную для создания трехмерных моделей геопространства.

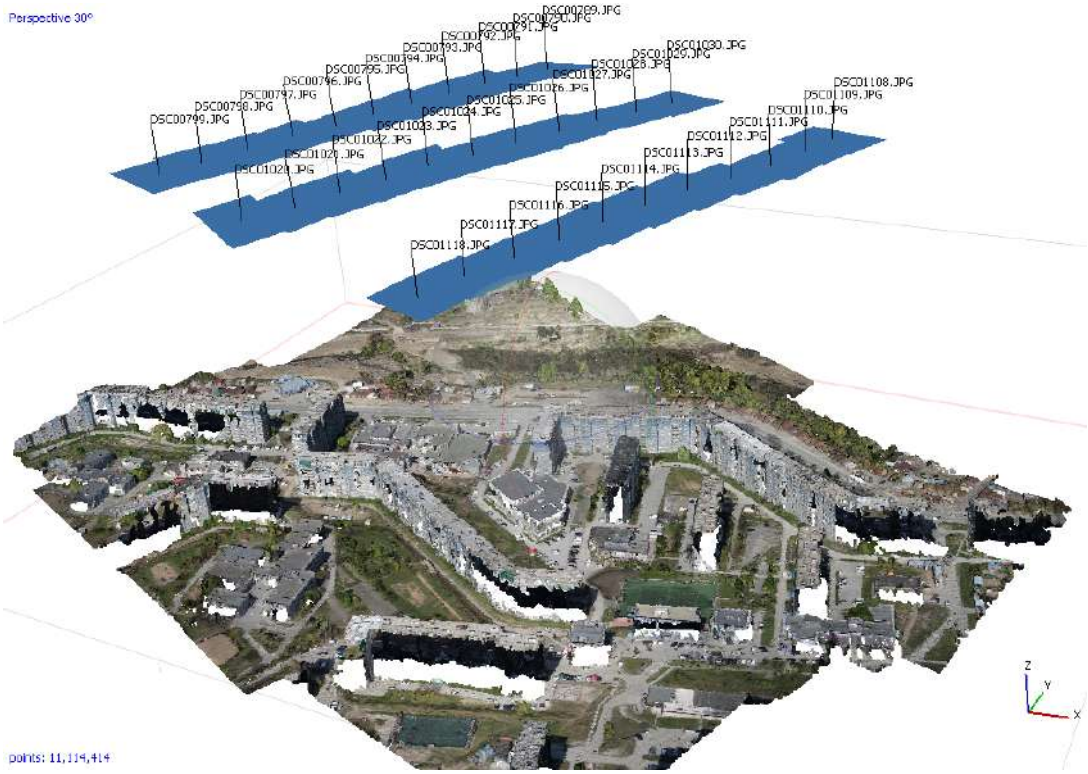


Рис. 2. Цифровая модель, полученная по материалам аэрофотосъемки

Для получения измерительных трехмерных моделей необходимо при обработке БПЛА использовать плановые координаты и высоты контрольных точек. Последние позволят судить о точности и пригодности полученной модели для измерительных целей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Обиденко В. И., Опритова О. А. Об определении метрических параметров больших по площади территорий средствами программного обеспечения геоинформационных систем // Геодезия и картография. – 2016. – Вып. 3. – С. 41–49.

2. Шевня М. С. Использование беспилотных летательных аппаратов для получения материалов дистанционного зондирования Земли // Геодезия и картография. – 2013. – Вып. 1. – С. 44-50.

3. Барбасов В. К., Гаврюшин Н. М., Дрыга Д. О., Батаев М. С. Использование многороторных БПЛА для целей ДЗЗ // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 5. – С. 122–126.

4. Желтов С.Ю., Михайлов А.П., Блохинов Ю.Б., Скрябин С.В., Скрыпицина Т.Н. Построение трехмерной модели гиперболической башни Шухова по материалам стереофотограмметрической съемки // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 1. – С. 53–58.

5. Graça N., Mitishita E., Gonçalves J. Photogrammetric mapping using unmanned aerial vehicle // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1, 2014 / ISPRS Technical Commission I Symposium, 17 – 20 November 2014, Denver, Colorado, USA, Pages 129-133.

6. Gandor F., Rehak M., Skaloud J. Photogrammetricmission planner for RPAS // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W4, 2015 International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics, 30 Aug–02 Sep 2015, Toronto, Canada. Pages 61-65.

7. Mah S. B., Cryderman C. S. Implementation of an unmanned aerial vehicle system for large scale mapping // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W4, 2015. International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics, 30 Aug–02 Sep 2015, Toronto, Canada. Pages 47-54.

8. Dayamit O.M., Pedro M.F., Ernestoa R.R., FernandoaB.L. Digital elevation model from non-metric camera in UAS compared with lidar technology // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W4, 2015. International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics, 30 Aug–02 Sep 2015, Toronto, Canada, Pages 411-413.

9. Agisoft PhotoScan Professional Edition – Руководство пользователя. Версия 1.2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_ru.pdf.

10. Хлебникова Т. А., Опритова О. А. Экспериментальные исследования технологии моделирования геопространства по материалам аэрофотосъемки // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 1. – С. 16–20.

11. Хлебникова Т. А., Опритова О. А. Экспериментальные исследования современных программных продуктов для моделирования геопространства // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 1. – С. 119−131.

12. Хлебникова Т. А., Опритова О. А. Экспериментальные исследования современных программных продуктов для моделирования геопространства по материалам БПЛА // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 1. – С. 3–6.

13. 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, С. М. Аубакирова, 2018

УДК 528.88

К ПРОБЛЕМЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ЗЕМЕЛЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Кирилл Иванович Калашников
Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, магистрант кафедры космической и физической геодезии; Бурятская государственная сельскохозяйственная академия им. В. Р. Филиппова, 670024, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Пушкина, 8, кандидат сельскохозяйственных наук, ст. преподаватель кафедры землеустройства, тел. (902)458-18-55, e-mail: kalashnikovkir@mail.ru

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

В работе приведены результаты исследования возможности совершенствования системы мониторинга земель сельскохозяйственного назначения на основе применения данных дистанционного зондирования Земли. Предложен подход к выявлению неиспользуемых сельскохозяйственных угодий на основе совместного использованиях архивных данных Landsat и сельскохозяйственных карт.

Ключевые слова: landsat, сельскохозяйственные угодья, залежь, мониторинг земель, деградация земель, пространственная привязка.

TO THE PROBLEM OF IMPROVING THE MONITORING SYSTEM OF AGRICULTURAL LANDS USING REMOTE SENSING

Kirill I. Kalashnikov
Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Graduate, Department of Space and Physical Geodesy; Buryat State Agricultural Academy Named After V. R. Filippov, 8, Pushkina St., Ulan-Ude, 670024, Russia, Ph. D., Senior Lecturer of Land Management Department, phone: (902)458-18-55, e-mail: kalashnikovkir@mail.ru

Ekaterina N. Kulik
Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Photogrammetry and Remote Sensing, phone: (913)926-82-57, e-mail: e.n.kulik@ssga.ru

The paper presents results of researches on improvement of the monitoring system of agricultural lands using remote sensing. Approach to identification of not used agricultural lands based on archival data Landsat and agricultural maps is offered.

Key words: landsat, agricultural land, fallow, land monitoring, land degradation, spatial reference.

Проведенное в последние десятилетия в нашей стране земельное реформирование привело к значительному сокращению используемых сельскохозяйственных земель и негативно сказалось на качестве сельскохозяйственных угодий. Отсутствие актуальных мониторинговых данных является одним из сдерживающих факторов устойчивого развития территорий на разных иерархических уровнях. В связи с этим, проблема эффективного управления земельными ресурсами требует новых подходов и решений, которые бы позволили получить актуальные и достоверные сведения о состоянии сельскохозяйственных земель.

Эффективная аграрная политика государства невозможна без получения объективной информации о сельскохозяйственном производстве. В тоже время существующая в России система сбора информации о состоянии сельскохозяйственных угодий, опирающаяся на данные статистической отчетности, не отвечает требованиям объективности, достоверности и оперативности получения [1]. В связи с этим, проблема совершенствования системы мониторинга земель сельскохозяйственного назначения является актуальной, а одним из векторов ее решения является применение данных дистанционного зондирования Земли.

Основываясь на докладах о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения можно сделать вывод о сокращении общей площади пашни в Российской Федерации за 2 десятилетия на 11 млн. гектар (рис. 1).

Рис. 1. Динамика сельскохозяйственных земель России
(с землями личного пользования), тыс. га

Такая ситуация обусловлена выбытием сельскохозяйственных земель из оборота в результате прекращения деятельности сельскохозяйственных предприятий. В тоже время, статистические данные РОСРЕЕСТРа содержат учетные данные и не отражают информацию о качественном состоянии сельскохо-

зяйственных угодий. Неиспользование сельскохозяйственных угодий по назначению приводит к их деградации, ухудшению качественного состояния. В связи с этим возникает необходимость в проведении широкомасштабных мероприятий по охране и контролю за использованием и инвентаризации земель, которые долгое время не проводятся в большинстве регионов России [2].

С начала 70-80-х годов в нашей стране проводились широкомасштабные систематические почвенные и геоботанические обследования, а предприятия Всесоюзного института сельскохозяйственных и аэрофотогеодезических изысканий обеспечивали их материалами аэрофотосъемки. Исследованию возможности применения полученных ранее данных в качестве эталонов для верификации разновременных данных дистанционного зондирования с целью анализа динамики деградационных процессов, оценки количественного и качественного состояния сельскохозяйственных угодий, посвящена данная работа.

Объектом исследования являются земли сельскохозяйственного назначения Мухоршибирского района Республики Бурятия. Выбор объекта исследования обусловлен наибольшей сельскохозяйственной освоенностью данного района по отношению к другим районам Республики. В Мухоршибирском районе успешно функционирует фактически единственное сохранившееся крупное хозяйство в Республике – СПК «Колхоз Искра». На примере данного хозяйства выполнен анализ состояния земель в условиях интенсивного землепользования. Исследования в работе проводятся на сельскохозяйственных угодьях в составе земель сельскохозяйственного назначения.

В исследовании использованы архивные снимки Landsat 5 Level 1 за 1991 г., полученные с использованием сервиса EarthExplorer геологической службы США и имеющие радиометрическую и геометрическую коррекции.

Дешифрирование неиспользуемых сельскохозяйственных земель основывается на анализе спектрального отклика и на особенностях их текстурных характеристик [3]. Залежные земли могут иметь разный возраст, а в силу того, что к залежам относят угодья неиспользуемые более 1 года для их выявления необходимо применять разновременные данные.

В тоже время, в силу различного хозяйственного использования залежей, даже в пределах отдельных хозяйств, на них произрастает различная сорная растительность, кустарники и мелколесье. Этот фактор не позволяет создать единый спектральный эталон. А следы вспашки даже на части территории залежи при классифицировании относят ее к другому виду угодий – классу пашни.

В связи с этим, в качестве эталонов для последующего выявления неиспользуемых земель, нами предлагается использовать сельскохозяйственные карты районов в масштабе 1:100 000, составленные по материалам аэрофотосъемки.

Для этого необходимо осуществить пространственную привязку сельскохозяйственной карты к снимку Landsat. В работе использовался ГИС-пакет ArcGIS, который имеет соответствующий инструментарий. Для быстрого нахождения опорных точек можно использовать базовые карты ArcGIS, которые

автоматически проецируются в соответствии с параметрами слоя – проекция UTM, зона 48, система координат WGS-84. Для их совместного отображения необходимо задать прозрачность для карты ArcGIS (рис. 2).

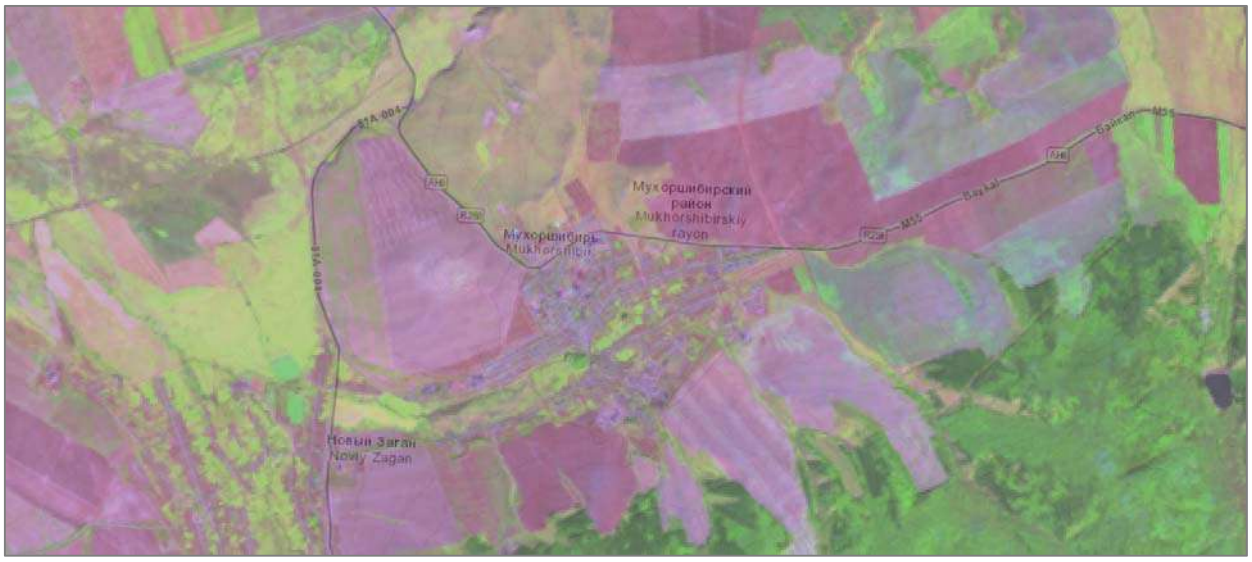


Рис. 2 Совместное отображение базовой карты ArcGIS
и снимка Landsat в комбинации 5-4-3

Пространственная привязка растров в ArcGIS осуществляется с использованием опорных точек с известными координатами. В данной работе использовались перекрестки дорог и устья рек. Опорные точки распределялись таким образом, чтобы охватить весь кадр снимка.

Использование опорных точек позволяет осуществить полиноминальную трансформацию растровых данных. Такая трансформация использует построение полинома на основе алгоритма наименьших квадратов. Аффинное полиноминальное преобразование использует 6 параметров для трансформации строк и столбцов растра в координаты карты:

$$\begin{aligned} x` &= Ax + By + C \\ y` &= Dx + Ey + F' \end{aligned} \qquad (1)$$

где x – число столбцов в растре; y – число строк в растре; x` – значение по горизонтали в координатном пространстве; y` – значение по вертикали в координатном пространстве; A – ширина ячейки в единицах карты; B, D – коэффициенты поворота; C – x` координата центра верхней левой ячейки снимка; E – отрицательная высота ячейки в единицах карты; F – y` координата верхней левой ячейки снимка.

При использовании более 10 опорных точек появляется возможность использования полинома 3-го порядка, при этом сокращается количество ошибок случайного типа, корректируются более сложные искажения, а невязки распределяются по всем связям.

При использовании инструмента «прозрачность» на сельскохозяйственной карте можно добиться эффекта наложения карты на космоснимок (рис. 3).

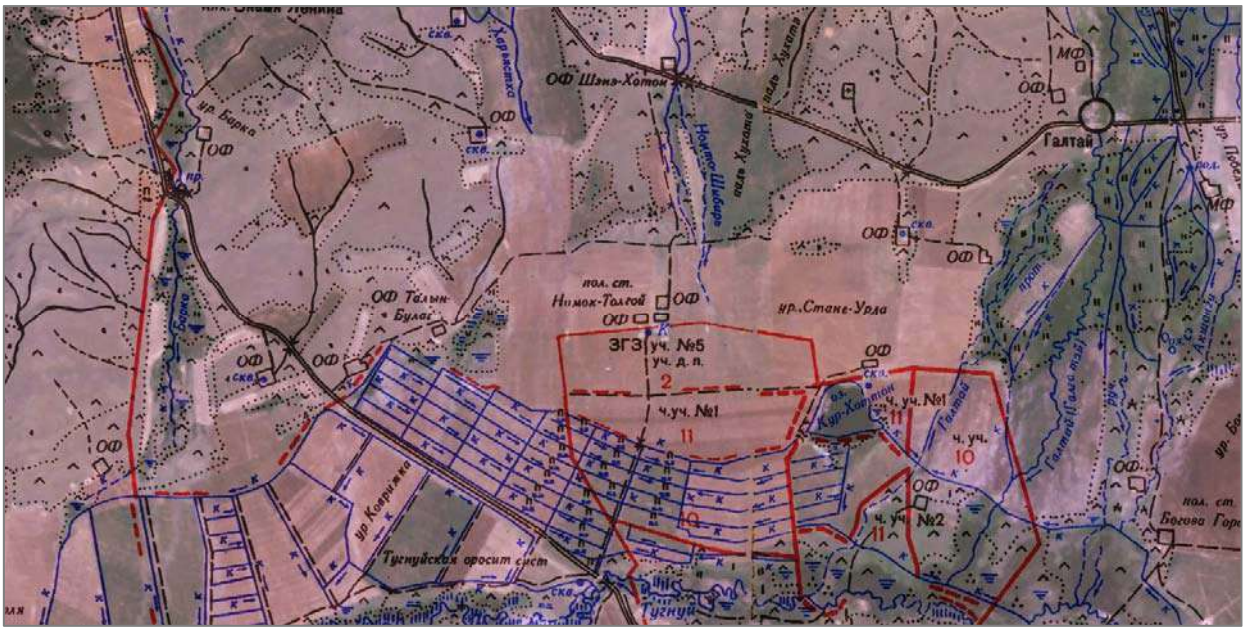


Рис. 3. Пример совместного использования сельскохозяйственной карты Мухоршибирского района Республики Бурятии М 1:100 000 со снимком Landsat 5

Таким образом, совместное использование данных архивной съемки Landsat с сельскохозяйственной картой района позволит создать векторную основу на данную территорию, провести оценку точности дешифрирования. Векторная основа позволит определить площадные характеристики по видам сельскохозяйственных угодий, выявить изменения в составе и соотношении угодий, определить их культуртехническое состояние и динамику процессов зарастания древесно-кустарниковой растительностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барталев, С. А. Метод выявления используемых пахотных земель по данным дистанционного зондирования со спутников [Текст] / С. А. Барталев, Е. А. Лупян, И. А. Нейштадт // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2006. – Выпуск 3. – Т. II. – С. 271-280

2. Белорусцева, Е. В. Мониторинг состояния сельскохозяйственных угодий Нечерноземной зоны Российской Федерации [Текст] / Е. В. Белорусцева // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – Москва, 2012. –Т. 9. – № 1.– С. 57-64

3. Маринина, О. А. Особенности дистанционного выявления залежных участков и проблемы целевого использования земель сельскохозяйственного назначения [Текст] / О. А. Маринина, Э. А. Терехин, Ж. А. Кириленко, Д. М. Курлович, Н. В. Ковальчик // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5. – С. 535.

© К. И. Калашников, Е. Н. Кулик, 2018

УДК 528.8

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТ ПО ДАННЫМ ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ТРАНСФОРМАЦИЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ РЕГИОНОВ

Аловсат Шура-оглы Гулиев
Государственная нефтяная компания Азербайджанской Республики (SOCAR), AZ1000, Азербайджан, г. Баку, пр. Гейдара Алиева, 121, старший геодезист, тел. (99450)492-93-18, e-mail: alov_soc@yahoo.com

Приведены результаты исследования точности цифровой модели рельефа (ЦМР) местности, полученной по результатам воздушного лазерного сканирования. С этой целью проведено сравнение высот точек цифровой модели рельефа местности, созданной по данным воздушного лазерного сканирования (ВЛС), и полученных на основе GPS-измерений.

Исследования показали, что ЦМР, построенная по данным ВЛС, получена с достаточной точностью, необходимой для использования в качестве основы с целью автоматизации пространственных трансформаций функциональной модели регионов.

Ключевые слова: воздушное лазерное сканирование, цифровая модель рельефа, GPS-измерения, оценка точности.

EVALUATION OF THE HEIGHT ACCURACY OF AIR LASER SCANNING FOR AUTOMATION OF SPATIAL TRANSFORMATIONS OF THE FUNCTIONAL MODEL FOR THE REGIONS

Alovsat Shura oglu Guliyev
State Oil Company of Azerbaijan Republic (SOCAR), 121, Prospect Heydar Aliyev St., Senior Geodesist, Baku, AZ1000, Azerbaijan, phone: (99450)492-93-18, e-mail: alov_soc@yahoo.com

Presented the results of the investigation of the accuracy of digital elevation model obtained from air laser scanning. A comparison is made between the heights of the ground control points of digital elevation model with data from GPS measurements.

Epy investigation have shown that digital elevation model is obtained with sufficient accuracy, which is necessary as a basis for automation of spatial transformations of the functional model for the regions.

Key words: air laser scanning, digital elevation model, GPS measurements, heights accuracy.

Современный подход к автоматизации пространственных трансформаций функциональной модели (АПТФМ) регионов подразумевает широкое применение геоинформационных систем (ГИС). На сегодняшний день имеется огромное количество поставщиков данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), разработана и функционирует обширная материально техническая база, включающая различные средства получения данных ДЗЗ, разработано большое разнообразие технологий получения разнообразных характеристик по аэро- и космическим снимкам. Все это в совокупности с неуклонным расширением сфер практического использования ГИС приводит к демократизации доступа

пользователей к данным ДЗЗ. ГИС стали эффективным инструментом в таких отраслях как геофизика, геология. Области применения ГИС непрерывно расширяются, так как они позволяют решать многие сложные прикладные задачи, например, оценка и контроль состояния окружающей среды, прогнозирование стихийных бедствий, мониторинг технологических состояний инженерных сетей и коммуникаций, организация транспортных систем, разведка природных ресурсов, контроль состояния нефте- и газопроводов, картографирование минных полей и др.

Наиболее важным и трудоемким этапом создания ГИС является получение и обработка данных. Фактически самым перспективным и экономически целесообразным является метод получения данных об объектах на основе ДЗЗ.

Многоаспектность АПТФМ регионов предопределяет привлечение целого комплекса методов и приемов анализа большого объема фактического материала, полученного в результате дистанционного исследования, для изучения физической природы явлений и процессов, их взаимосвязи и взаимозависимости. Системный анализ является основной методологией дистанционного изучения АПТФМ регионов.

Системное обоснование дистанционных методов одинаково действенно как в области их теории и методологии, так и в решении технологических, производственных и организационно-хозяйственных проблем. Главной задачей системного анализа, помимо разработки пространственной и временной иерархии изучаемых объектов, следует считать выявление в их составе тех компонентов и взаимосвязей, которые оказывают решающее влияние на их функционирование.

Системно-аэрокосмические (дистанционные) методы изучения АПТФМ регионов объединяют в себе традиционные съемки (аэрофотосъемку в оптическом диапазоне и с помощью воздушного лазерного сканирования (ВЛС)) и современные их виды – съемка бортовыми оптико-электронными системами дистанционного зондирования (БОЭСДЗ), различные съемки из космоса, которые разделяются на пассивные, регистрирующие солнечное или собственное излучение поверхности Земли (рис. 1), а также объектов инфраструктуры, и активные, фиксирующие отраженное искусственное излучение.

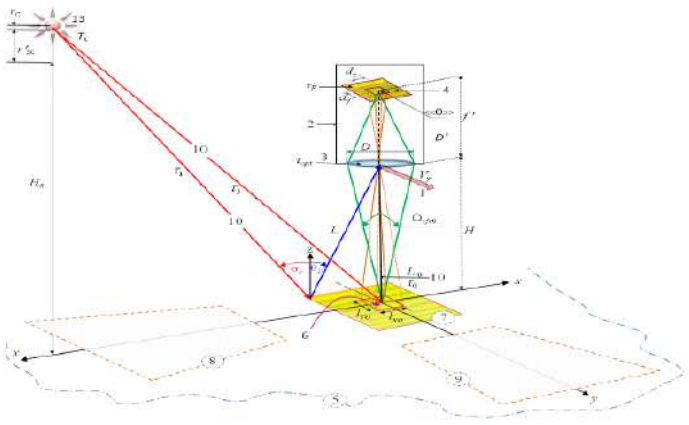


Рис. 1. Схема для расчета энергетического разрешения пассивной БОЭСДЗ

При решении разнообразных задач с использованием современных БОЭСДЗ для описания их качественных параметров и характеристик пользуются понятиями «пространственное», «временно́е», «спектральное» и «энергетическое» (амплитудное) разрешение.

Пространственное решение - это проект действия (G) по пространственному преобразованию результата пространственной концепции, механизмов управления самой территорией, либо происходящими на ней процессами.

Наличие трехмерной пространственно-информационной модели позволяет моделировать территорию и, в частности, создавать ее трехмерную геоинформационную модель. В ряде случаев моделирование поверхности Земли выделяют в отдельный процесс создания цифровой модели рельефа. Формально, сущность трехмерной геоинформационной системы представляет собой сложную функцию (P), которая изменяет базу компьютерных показаний (Y)

$$TGIS \equiv \{P, Y\},$$

где $P = (F_s,\ F_i, F_m, F_a, F_g)$; $Y = \{S, I, M, A, G\}$.

Как видно из рис. 2, гибкость пространственной трансформации функциональной модели региона во многом зависит от позиционной точности ДЗЗ [1].

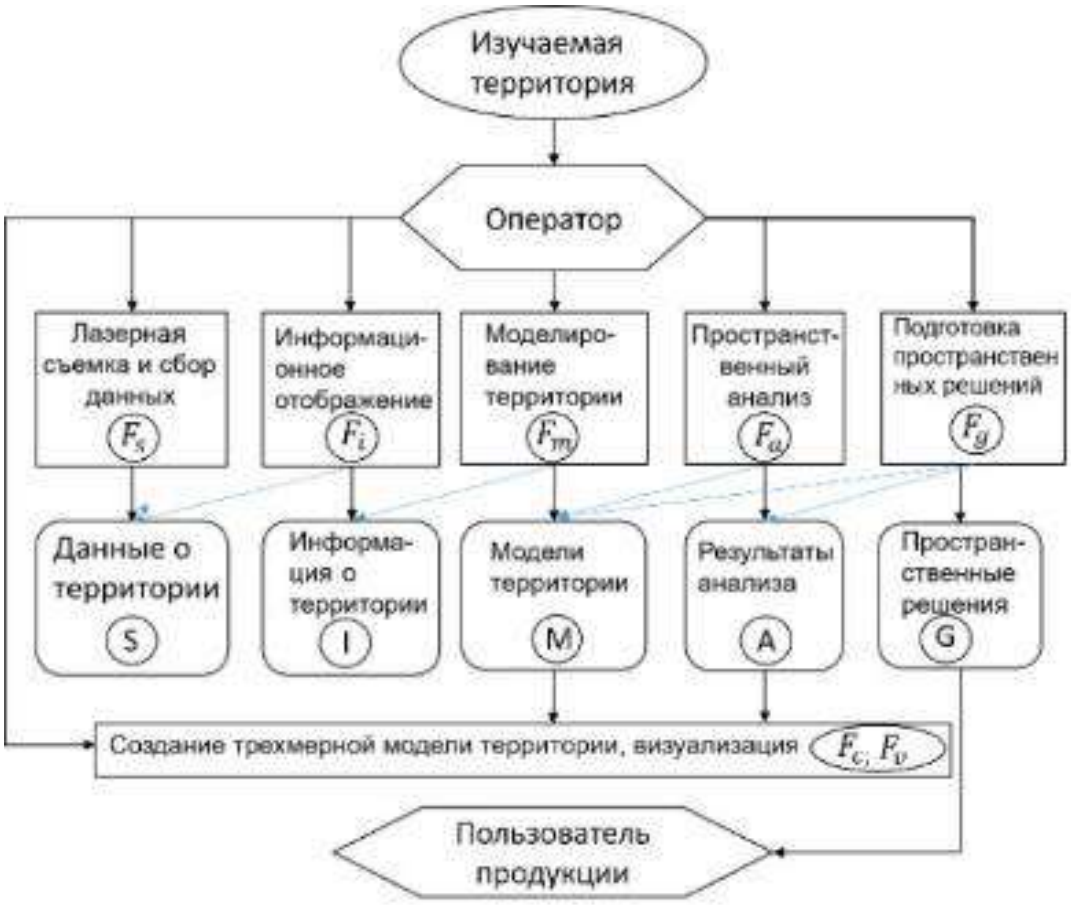


Рис 2. Структурно-функциональная модель системного представления трехмерного геоинформационного обеспечения

При обработке набора данных, представляемых ВЛС, существенной проблемой является обеспечение качества (ОК) и контроль качества (КК) данных.

На сегодняшний день в Азербайджане нет единых, унифицированных руководящих принципов, относящихся к ВЛС - комплекса стандартов и руководящих нормативных документов, охватывающих измерения и отчетность о точности высот цифровой трехмерной пространственно-информационной модели местности.

Не смотря на выполняемую фильтрацию ошибок в необработанных данных ВЛС, все же высоты, полученные на основе воздушного лазерного сканирования, не всегда совпадают с высотами наземных контрольных точек (GCP). В целом ошибки данных ВЛС можно разделить на четыре группы: ошибки в блоке, ошибки в полосе, ошибки GPS-измерений и ошибка в каждой конкретной точке.

За последние два десятилетия научными сообществами и частными организациями проведен ряд исследований, посвященных оценке точности высот, полученных по данным лазерного сканирования, и выявлению источников их погрешности. Данная статья является одной из попыток, которая должна гарантировать эффективную и последовательную проверку массива данных, поставляемых ВЛС. Ошибки определения высот могут быть хорошо видны при слиянии наборов данных, имеющих геопространственную привязку и представленных в виде массива точек с координатами X, Y, Z и трехмерной визуализации поверхности, например, цифровой модели рельефа (ЦМР), полученной путем фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки в оптическом диапазоне.

Общее слияние данных может быть произведено с использованием методов интерполяции ЦМР. Затем производится сравнение высот точек ЦМР и контрольных точек земли (GCP). Когда плотность точек низкая, используется полиномальная интерполяция поверхности. Интерполяционные высоты, полученные ВЛС для определения неизвестных высот, в конечном счете будут зависеть от используемого интерполяционного метода, включая входные параметры, такие как соседнее расстояние и влияние направления (анизотропия).

Альтернативный подход заключается в проведении взаимно однозначного сравнения высот точек, полученных по данным ВЛС, и высот опорных точек. Этот метод является более точным, однако занимает много времени.

Третий подход основан на использовании алгоритма проксимальной точки, предложенного Вебстером и Диасом в 2006 году [2]. В этом методе пользователь определяет радиус для поиска точек вокруг целевых GCP. Это автоматически создает минимальные, максимальные и другие статистические значения, относящиеся к GCP, для сопоставления с данными ВЛС. Высоты GCP сравниваются с результатами интерполяции точек ВЛС для определенного буфера вокруг GCP. Хотя проксимальный подход облегчает сравнительный анализ наборов данных ВЛС и GCP, он использует метод интерполяции для оценки высот GCP и сравнивает по отдельности высоты ВЛС и GCP. Кроме того, нет никаких правил для ограничения расстояния поиска точек.

Чтобы преодолеть проблему выбора радиуса для поиска точек и избежать наложения ошибок, должно проводиться индивидуальное сравнение высот контрольных точек и точек выборки ВЛС с использованием автокорреляционного расстояния (минимального расстояния) на основе первого закона Тоблера в географии [3]. Расстояние для поиска точек может быть определено вручную пользователем. Увеличение расстояния поиска приведет к увеличению количества сравнений и, следовательно, к увеличению времени обработки. Это также приводит к разным значениям (root mean square error (RMSE)).

В данном исследовании выполнено сравнение GCP и DEM. Расстояние поиска выбрано равным одному метру в соответствии с общим размером пикселей в DEM, полученной на основе ВЛС. В пределах расстояния поиска сравниваются высоты тех точек, которые расположены на первом минимальном расстоянии от выбранных контрольных точек. Затем с использованием отдельной процедуры последовательно выполняется сравнение высот точек, расположенных на втором, третьем и четвертом минимальных расстояниях.

Для исследования были выбраны данные ВЛС поселка Сангачалы, расположенного в 40 км к юго-западу от Баку. В результате их обработки получено плановое положение отдельных точек с точностью 15 см, ЦМР с шагом сетки 1x1 м. На данной территории планируется строительство нефтеперерабатывающего завода. Точность определения высот точек по данным ВЛС (DSE, 2010) указана как +/- 0,1 м с доверием 68%, точность позиционирования +/- 0,35 м (рис. 3, табл. 1).

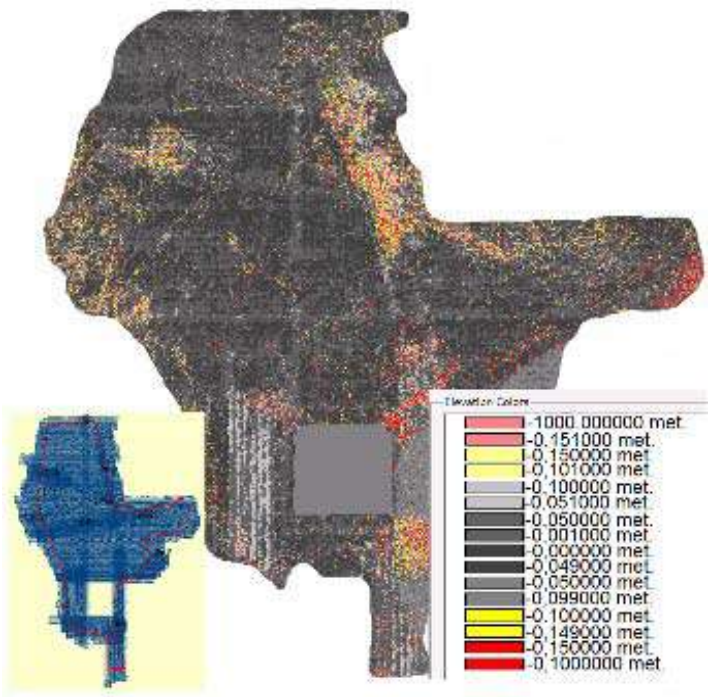


Рис. 3. Диаграмма относительной точности определения высот по данным ВЛС

Таблица 1

Сводка плана полета

Информация о плане полета	План	Факт
Высота полета	480 м AGL	
Скорость съемки	120 км	
Скорость сканирования	400 КГц MTA zone 2	
Плотность точек	16 pt/кв.м	
Изображение GSD	10 см	
Межстрочный интервал	219 м	
Запрещенные зоны	считается	нет
Количество строк	89	63
Всего линий (км)	761	743
Время съемки в режиме онлайн (мин)	208	203
Время поворота (мин)	445	435
Время паром (мин)	n/c	n/c

Для определения координат точек наземного контроля использовался двухчастотный приемник Trimble 4700b Sokkia. На каждой точке проводилось два цикла измерений по 30 мин. Обработка результатов измерений и модельные расчеты выполнялись с помощью специальных программ, используемых в международной практике: GPSurvey, Remote Controller, Gplood, Gamit/GLOBK.

В модуле GLOBK использован фильтр Калмана, который имеет итеративную природу. Так как выходные решения получены на основе глобальных параметров, для коррекции в комбинированном решении в окончательные координаты были введены небольшие поправки. Используя модуль GLOBK и координаты постоянно действующих GPS-станций, координаты наземных контрольных точек (GCP) были перевычислены из системы IGS в систему ITRF2008.

Все высоты точек определены с использованием геодезической модели «EGM2008».

Для выполнения оценки точности использовались наземные контрольные точки (постоянные метки) (рис. 4), высоты которых определены точнее, чем +/-0,03 м.

При оценке точности определения высот контрольных точек, полученных на основе ЦМР, необходимо учитывать принцип ничтожных погрешностей, в соответствии с которым точность эталонных отметок земной поверхности должна быть в разы выше оцениваемой точности [4]. Так как точность определения планового положения и высот пунктов каждым геодезическим прибором различна, в исследованиях использованы среднестатистические значения показателей точности. Для GPS - спутникового позиционирования значения максимально достижимой точности определения плановых координат и высот заявляются производителями выше 1 см, для лазерно-локационных систем – 10–15 см.

То есть в этом случае ошибками плановых координат и высот точек наземного контроля, полученных по результатам GPS-измерений, можно пренебречь и рассматривать вычисленные разности высот как истинные ошибки данных ВЛС. В качестве исследуемой территории был выбран участок, представляющий собой плоскую, местами всхолмленную равнину, расчлененную промоинами и канавами. Абсолютные высоты колеблются до 50 м. На участке преобладают суглинистые и глинистые (местами засоленные) грунты и песчаные холмы, площадью ~5 кв.км (рис. 4).

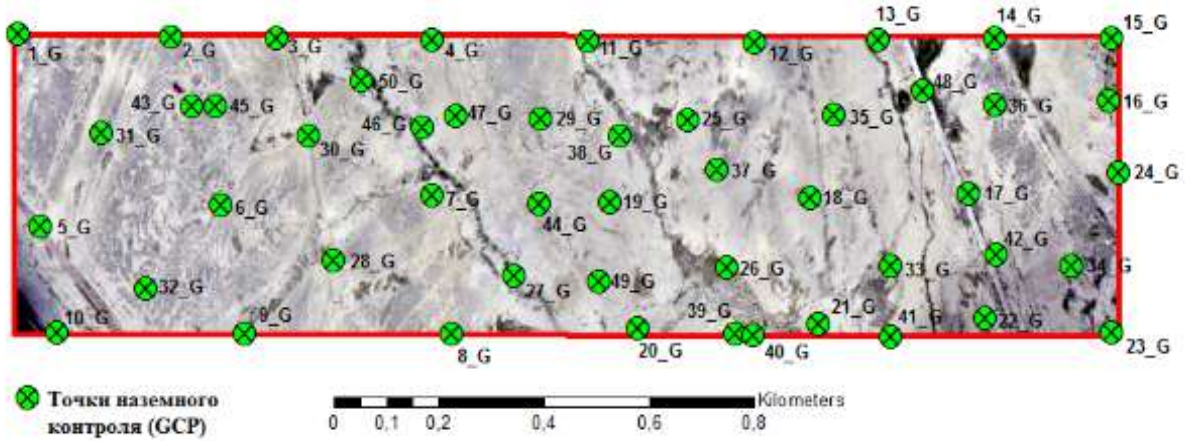


Рис. 4. Точки наземного контроля

В качестве исходного материала для исследования использовались два массива данных:

− координаты точек наземного контроля, полученные по результатам GPS-измерений;

− точки, соответствующие поверхности земли (класс Ground) из общего массива точек лазерных отражений, полученных по результатам ВЛС лазерным сканером Riegl Q680i, снабженным цифровой камерой Imperx IPX16M3, 4872X3248 pixel.

С помощью GPS-приемника получены координаты 50 точек наземного контроля, которые использовались для оценки точности данных ВЛС. По результатам ВЛС данной территории был получен массив точек лазерных отражений, включающий более 165000 точек, и по ним построена ЦМР в виде нерегулярной сети треугольников (триангуляция Делоне). Затем с помощью модуля Spatial Analyst в ArcGIS Desktop с ЦМР, полученной по результатам ВЛС, извлекались высоты каждой эталонной точки. На основе обработки всей совокупности пар высот эталонных точек рассчитывались статистические показатели точности высотной составляющей ЦМР. По расхождениям высот можно судить о степени точности и корректности получения данных ВЛС.

При статистической обработке данных принималась аддитивная модель ошибок, в которой факторы представлены в виде алгебраической суммы. Со-

гласно этой модели разности высот точек, полученных с ЦМР, построенной по данным ВЛС, и на основе GPS-измерений, будут равны:

$$\Delta H = H_{\text{ВЛС}} - H_{\text{GPS}}$$

Далее разность ΔH рассматривалась в виде суммы систематической (Δ_H) и случайной (δ_H) ошибок:

$$\Delta H = \Delta_H + \delta_H .$$

В результате вычислены следующие основные показатели точности модели [5]:

- среднее значение разности высот, оценка систематической ошибки (n – число измерений):

$$\overline{\Delta}_H = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} \Delta H_i ;$$

- средняя квадратическая ошибка RMSE (δ_H):

$$RMSE_{\Delta_H} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} \Delta H_i{}^2}$$

- средняя абсолютная ошибка (mean absolute error):

$$MAE_{\Delta_H} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} |\Delta H_i| ;$$

- минимальное и максимальное значения разностей высот.

После исключения систематической ошибки из результатов измерений ($\Delta h_i = \Delta H_i - \Delta_H$) оценивались параметры случайной составляющей.

Статистические показатели оценки точности по результатам обработки всей совокупности данных приведены в табл. 2.

Анализ результатов исследований показывает, что точность определения высот точек местности по данным ВЛС не превышает допусков, установленных инструкцией по топографическим съемкам [6], и построенная ЦМР может использоваться в качестве основы для автоматизации пространственных трансформаций функциональной модели региона.

Технология ВЛС произвела революцию в сборе данных для построения ЦМР. ВЛС обеспечивает получение тысячи измеренных геопривязанных точек в секунду, обеспечивая тем самым беспрецедентный уровень детализации отображения местности. Эти факторы стимулировали применение ВЛС во многих научных и производственных отраслях.

Таблица 2

Статистические показатели оценки точности по результатам обработки всей совокупности данных

Название параметра выборки	Значение параметра
Число точек n	50
Систематическая ошибка (среднее арифметическое) Δ_H , м	-0,04
Средняя квадратическая ошибка RMSE Δ_H, м	0,181
Средняя абсолютная ошибка MAE Δ_H , м	0,148
Минимальное значение разности ΔH_{min}, м	-0,997
Максимальное значение разности ΔH_{max}, м	0,515

За последние два десятилетия разработана и функционирует обширная материально - техническая база для получения данных ВЛС, значительно усовершенствовалась технология съемки благодаря предоставлению полноволновой записи для коммерчески доступных систем с малыми размерами, повышению точности бортовой GNSS и IMU, скорости повторения импульсов и разрешения диапазона, разработанным новым алгоритмам интерпретации данных, что делает ВЛС актуальным для еще более широкого применения.

Будущее развитие ВЛС, вероятно, будет сосредоточено на повышении точности, скорости и разрешения сканирования, на разработке новых алгоритмов для интерпретации данных, основанных на непараметрических методах анализа. Это приведет к тому, что технология ВЛС станет более доступной.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карпик А. П. Структурно-функциональная модель геодезической пространственной информационной системы // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2004. – № 6. – С. 140–148.

2. Webster T. L. and Dias, G. (2006). An automated GIS procedure for comparing GPS and proximal LiDAR elevations. Computers & geosciences 32(6), 713-726.

3. Tobler W. R. (1970). A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. Economic geography 46, 234-240

4. Новиков Г. А. Основы метрологии: учеб. пособие. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2010. 182 с.

5. Оньков И. В. Оценка точности высот SRTM для целей ортотрансформирования космических снимков высокого разрешения // Геоматика. Условные обозначения 2011. № 3. С. 40–46.

6. Инструкция по топографической съемке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500. М., Недра, 1982. 152 с.

© Аловсат Шура-оглы Гулиев, 2018

УДК 528.8

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЛЕДНИКОВ ВОСТОЧНОГО САЯНА ПО ДАННЫМ LANDSAT

Андрей Евгеньевич Михайлов
Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, студент, тел. (950)052-54-22, e-mail: andmik19@mail.ru

Евгений Валерьевич Клевцов
Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, кандидат географических наук, доцент, тел. (3952)40-51-03, e-mail: v11@istu.edu

Эдуард Юрьевич Осипов
Лимнологический институт СО РАН, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории геологии оз. Байкал, тел. (3952)42-53-12, e-mail: eduard@lin.irk.ru

Дано описание технологии полуавтоматического дешифрирования ледниковых образований Восточного Саяна по данным многоканальных снимков Landsat с использованием ГИС-технологий, приведены морфометрические характеристики ледников Восточного Саяна за период 1986-2010 гг., количественно оценены изменения площади ледников.

Ключевые слова: Восточный Саян, ледники, снимки Landsat, ГИС, изменения ледников.

REMOTE SENSING OF THE GLACIERS IN THE EASTERN SAYAN MOUNTAINS USING LANDSAT DATA

Andrey E. Mikhaylov
Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia, Student, phone: (950)052-54-22, e-mail: andmik19@mail.ru

Evgeny V. Klevtsov
Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia, Ph. D., Associate Professor, phone: (3952)40-51-03, e-mail: v11@istu.edu

Eduard Yu. Osipov
Limnological Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 3, Ulan-Batorskaya St., Irkutsk, 664033, Russia, Ph. D., Senior Researcher, Laboratory of the Lake Baikal Geology, phone: (3952)42-53-12, e-mail: eduard@lin.irk.ru

The article describes semi-automatic image interpretation technology for glacial formations in the Eastern Sayan mountains according to the multichannel Landsat images and GIS-technologies. Morphometric characteristics of glaciers in Eastern Sayan during the period of 1986-2010 are provided. The changes in glaciers area are evaluated.

Key words: Eastern Sayan, glaciers, Landsat images, GIS, changes in glaciers.

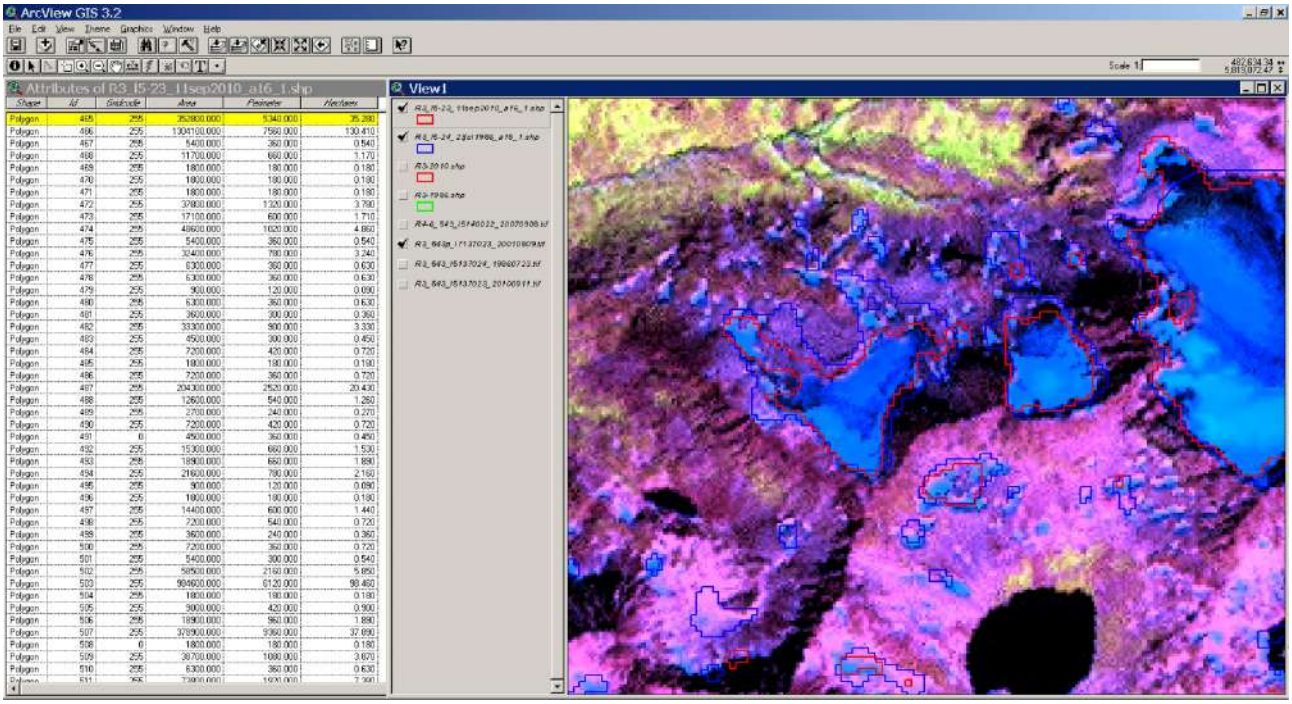
Введение

Систематический мониторинг ледников на международном уровне с конца XIX века получил широкое развитие. С этого времени стал накапливаться большой массив информации об изменении площадей, объемов и длин ледников во времени, а также их распределение в пространстве. Наиболее полная информация была получена по ледникам Альп и Скандинавии, на которые сохранились исторические наблюдения за ледниками. Меньше всего исследованы ледники внутри континентов, которые являются, как правило, небольшими по размеру и наиболее подвержены влиянию климатических колебаний. Систематический мониторинг этих объектов является важной задачей изучения природных изменений Земли. Задачей наших исследований было картирование ледниковых изменений в Восточном Саяне на рубеже XX-XXI веков с помощью использования современных технологий ГИС и дистанционного зондирования.

Методика

Для картирования ледников была использована технология полуавтоматического дешифрирования с использованием классифицированного изображения. Подобные изображения были построены по снимкам Landsat (сканеры TM, ETM+), полученным на территорию Восточного Саяна за период 1986-2010 гг. Снимки Landsat являются многоканальными с пространственным разрешением 15-30 м. Для дешифрирования было использовано соотношение каналов 3 и 5, красного и коротковолнового инфракрасного (TM3/TM5) в программе ENVI. Данная методика основана на контрасте высокой отражательной способности снежно-фирново-ледовых образований в видимой части спектра и сильным поглощением в коротковолновом диапазоне (SWIR). Эта методика считается оптимальной при картировании открытых, затененных и замороженных участков ледников (Osipov, Osipova, 2014; Осипов, Осипова, 2015). Оптимальные пороговые соотношения каналов были рассчитаны экспериментально в ходе геостатистического анализа для выборки из 5-10 ледников. Полученные значения составили для разных снимков от 1,8 до 2,2. Для исключения ошибочно классифицированных изолированных объектов был использован инструмент «сглаживание» (SMOOTHING) по 3 пикселям. Классифицированные таким образом пикселы были конвертированы в полигональные объекты, которые далее редактировались в программе ArcView. Рабочее окно программы ArcView с ледниками в районе Пика Топографов (Восточный Саян) приведено на рисунке. Для исключения небольших снежников полигоны площадью менее 0,02 км^2 были исключены из дальнейшего анализа. Автоматическая классификация часто генерирует ошибки на затененных участках ледников, а также включает в ледниковые контуры прилегающие к ним снежники и озера. Для минимизации таких ошибок было использовано ручное редактирование (коррекция) границ ледников в программе ArcView. Для измерения топографических характеристик лед-

ников была использована глобальная модель рельефа SRTM с разрешением 60 метров, полученная по данным 2000 года (Farr et al., 2007).



Рабочее окно программы ArcView с ледниками в районе
Пика Топографов (Восточный Саян)

Результаты

По данным дешифрирования снимков Landsat был создан каталог ледников Восточного Саяна за период 1986-2010 гг. и количественно оценено изменение ледниковой площади. Каталог 1986-90 годов включает 130 ледников общей площадью 20,9 км^2, со средними высотами 1460-3300 метров над уровнем моря. Каталог ледников 2010 года включает 171 ледник общей площадью 18,6 км^2, расположенных на высотах 1470-3430 метров. На долю ледников менее 0,1 км^2 приходится 48-69% числа и 16-31% площади, на долю ледников более 1 км^2 1-2% числа и 7-13% площади. По результатам анализа ледниковых изменений было установлено, что в 1990-2000 гг. наблюдалась наиболее высокая скорость таяния ледников, а в 2000-2010 гг. площадь оледенения Восточного Саяна, наоборот, незначительно увеличивалась, главным образом, за счет самых маленьких ледников.

Заключение

Была отработана технология автоматизированного дешифрирования ледниковых объектов на основе использования снимков среднего разрешения (15-30 м) Landsat. В результате дешифрирования снимков Landsat были карто-

графированы ледники Восточного Саяна за период 1986-2010 гг., оценены изменения ледниковой площади, связанные с климатическими изменениями на рубеже XX-XXI вв.

Исследования были выполнены при поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований (грант №15-05-04525).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Osipov E. Y., Osipova O. P. Mountain glaciers of southeast Siberia: current state and changes since the Little Ice Age // Annals of Glaciology. – 2014. – Vol. 55 (66). – P. 167−176.

2. Осипов Э. Ю., Осипова О. П. Динамика оледенения в горах юга Восточной Сибири за последние 160 лет // Лёд и снег. – 2015. – Т. 55. – №2 (130). – С. 33−41.

3. Farr T. G., Rosen P. A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L., Seal D., Shaffer S., Shimada J., Umland J., Werner M., Oskin M., Burbank D., Alsdorf D. The Shuttle Radar Topography Mission // Rev. Geophys. – 2007. – Vol. 45. – P. 1−33.

© А. Е. Михайлов, Е. В. Клевцов, Э. Ю. Осипов, 2018

УДК 528.94

РАЗРАБОТКА КАРТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БИОКЛИМАТИЧЕСКИХ ИНДЕКСОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ WORLDCLIM 2.0 (НА ПРИМЕРЕ ТЕРРИТОРИИ ПЕРМСКОГО КРАЯ)

Екатерина Сергеевна Черепанова
Пермский государственный национальный исследовательский университет, 614068, Россия, Пермь, ул. Букирева, 15, кандидат географических наук, доцент кафедры картографии и геоинформатики, тел. (342)239-67-34, e-mail: cherepanova_es@rambler.ru

Людмила Николаевна Ермакова
Пермский государственный национальный исследовательский университет, 614068, Россия, Пермь, ул. Букирева, 15, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры метеорологии и охраны атмосферы, тел. (342)239-61-01, e-mail: lnermak@psu.ru

Андрей Николаевич Шихов
Пермский государственный национальный исследовательский университет, 614068, Россия, Пермь, ул. Букирева, 15, кандидат географических наук, доцент кафедры картографии и геоинформатики, тел. (342)239-66-33, e-mail: and3131@inbox.ru

Биоклиматические индексы – это интегральные показатели, учитывающие совместное влияние нескольких элементов погоды и используемые для оценки благоприятности погодных условий. В настоящей работе на основе набора климатических данных WorldClim 2.0 с высоким пространственным разрешением (30’’) построены биоклиматические карты на территорию Пермского края. Предварительно с целью пригодности данных WorldClim 2.0 проведена их верификация на основе сравнения с климатическими нормами по данным метеостанций. Результаты подтвердили удовлетворительный уровень точности данных WorldClim 2.0 для территории Пермского края. Построенные карты отражают основные особенности пространственного распределения биоклиматических параметров по территории края с учетом влияния свойств подстилающей поверхности.

Ключевые слова: биоклиматические индексы, эффективно-эквивалентные температуры, климатические карты, WorldClim 2.0.

THE DEVELOPMENT OF THE MAPS OF BIOCLIMATIC INDICES BASED ON WORLDCLIM 2.0 DATA (ON THE EXAMPLE OF THE TERRITORY OF PERM KRAI)

Ekaterina S. Cherepanova
Perm State University, 15, Bukireva St., Perm, 614068, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Cartography and Geoinformatics, phone: (342)239-67-34, e-mail: cherepanova_es@rambler.ru

Lyudmila N. Ermakova
Perm State University, 15, Bukireva St., Perm, 614068, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Meteorology and Atmospheric Protection, phone: (342)239-61-01, e-mail: lnermak@psu.ru

Andrey N. Shikhov
Perm State University, 15, Bukireva St., Perm, 614068, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Cartography and Geoinformatics, phone: (342)239-66-33, e-mail: and3131@inbox.ru

Bioclimatic indices are integrated parameters, which characterized the coupling influence of some meteorological variables and used to estimate the comfort of weather conditions. We used WorldClim 2.0 gridded climatic dataset with 30'' spatial resolution as input data to create the maps of bioclimatic indices for the Perm Krai territory. Before calculation the bioclimatic indices, we compared Worldclim 2.0 data with climatic data estimated by weather stations. The validation results confirmed the satisfactory accuracy of Worldclim 2.0 data for the Perm Krai. The created maps characterized the main features of the spatial distribution of bioclimatic indices in the Perm Krai, taking into consideration the influence of underlying surface.

Key words: bioclimatic indices, effective equivalent temperatures, climate maps, WorldClim 2.0.

Важнейшими факторами окружающей среды, влияющими на жизнедеятельность человека, в первую очередь, на его теплоощущения, являются погодно-климатические условия. Выявление степени благоприятности погодных условий, территориальных зон комфорта осуществляется по значениям биоклиматических показателей (индексов). Биоклиматические индексы представляют собой интегральные показатели, учитывающие совместное влияние нескольких элементов погоды (температуры, влажности, скорости ветра, солнечной радиации). Расчет индексов позволяет выявить тенденции их изменений в пространстве и во времени, произвести территориальную дифференциацию биоклиматических условий.

При построении климатических карт (включая и карты производных биоклиматических показателей) необходимо учитывать влияние факторов подстилающей поверхности, особенно для территорий со сложным рельефом и редкой сетью наблюдений. Методы построения климатических карт с учетом факторов подстилающей поверхности активно разрабатываются в мире с 90-х гг. XX в., когда внедрение ГИС-технологий позволило автоматизировать подобные вычисления. Обзор первых работ в данном направлении приведен в статье (Ninyerola et al., 2000). Наиболее часто при интерполяции климатических данных учитывается зависимость от высоты местности. В ряде публикаций рассматриваются и другие факторы, такие как влияние крупных водоемов или распределение типов землепользования.

В России из работ в данном направлении стоит выделить создание электронного Агроэкологического атласа России и сопредельных стран (Афонин, и др., 2008). Климатические карты в данном атласе представлены в цифровом виде с пространственным разрешением, равным 10 км. Карты были построены с применением современной методики, основанной на использовании множественной линейной регрессии для учета влияния рельефа, расстояния до береговой линии и других факторов. Однако эти карты были созданы на основе климатических норм середины XX в., и уже не отражают современные климатические условия.

В последние годы выросла доступность цифровых данных о свойствах подстилающей поверхности (рельефе, типах землепользования, температуре поверхности суши и океана и др.). Также появились в открытом доступе климатические данные с множества метеостанций, которые ранее были закрыты. Все

это позволило в 2017 г. группе исследователей из университета Калифорнии (США) создать первый сеточный набор климатических данных с высоким пространственным разрешением (30 угловых секунд, что соответствует примерно 1 км) и глобальным охватом – WorldClim 2.0 (http://worldclim.org/version2). В отличие от данных реанализов (CFS, ERA-40, ERA-Interim и др.), данные WorldClim 2.0 созданы на основе интерполяции наблюдений метеостанций и поэтому более точно воспроизводят приземные климатические характеристики.

Набор данных WorldClim 2.0 включает семь основных переменных: среднесуточная, максимальная и минимальная температура воздуха, количество осадков, солнечная радиация, скорость ветра и парциальное давление водяного пара. Среднемесячные значения указанных переменных рассчитаны за период с 1971 по 2000 г. Для расчета различных переменных использовались данные от 9000 до 60000 метеостанций по всему Земному шару. Данные предоставляются в формате GeoTiff, в системе координат WGS-1984 с различным пространственным разрешением (от 30′′ до 10′). Детальное описание данных WorldClim 2.0 и алгоритмов интерполяции, использованных для их создания, приведено в статье (Fick and Hijmans, 2017).

Пространственное разрешение данных WorldClim 2.0 многократно выше, чем характерное расстояние между метеостанциями. Для достижения такой детальности и сохранения необходимой точности, при интерполяции авторы учитывали высотные зависимости и расстояние до береговой линии (для прибрежных районов). Помимо этого, впервые в практике подобных исследований были использованы многолетние измерения температуры земной поверхности со спутников Terra/Aqua MODIS. Это позволило воспроизвести особенности пространственного распределения температуры воздуха в зависимости от комплекса свойств подстилающей поверхности (а не только высоты местности). Результаты валидации данных WorldClim 2.0 показали их высокую точность. Коэффициент корреляции между фактическими измерениями метеостанций и данными WorldClim 2.0 составляет более 0,99 для температуры воздуха, 0,86 для влажности и 0,76 для скорости ветра (Fick and Hijmans, 2017).

Учитывая высокую детальность данных WorldClim 2.0, их использование для построения карт биоклиматических параметров на территорию отдельных регионов представляется вполне перспективным. Однако предварительно необходимо провести их верификацию по данным местной наблюдательной сети, поскольку характеристики точности данных для изучаемого региона могут существенно отличаться от средних значений, приведенных в статье (Fick et al., 2017).

Исходными данными для расчета биоклиматических параметров является температура воздуха, относительная влажность воздуха и скорость ветра, поскольку именно их сочетание определяет теплоощущение человека. Следовательно, для расчета биоклиматических параметров были получены данные о среднесуточной температуре воздуха, парциальном давлении водяного пара и скорости ветра за январь, июль, апрель и октябрь с пространственным разрешением 30′′. Предварительная обработка полученных растров включала их проецирование и извлечение по границам изучаемого региона.

Относительная влажность воздуха была рассчитана по данным о температуре воздуха и парциальном давлении водяного пара. Вычисления проведены по формулам, использованным в работе (Fick and Hijmans, 2017) при расчетах характеристик влажности. Кроме того, в данных WorldClim 2.0 для территории Пермского края не учитывается зависимость скорости ветра от высоты местности. В то же время, из ряда публикаций известно, что такая зависимость существует и может быть выражена формулой вида:

$$V_1 = V_0(H_1/H_0)k, \quad (1)$$

где H_1 – фактическая высота местности, H_0 – высота ближайшей метеостанции, V_0 – скорость ветра на метеостанции.

Безразмерный параметр k часто принимают равным 0,2 (Рыхлов, 2011). Это же значение параметра k использовалось и в настоящей работе. Расчет производился на основе цифровой модели рельефа средствами растровой алгебры. Само соотношение H_1/H_0 вычислялось путем деления растра цифровой модели рельефа (ЦМР) на растр, полученный в результате интерполяции высот метеостанций.

Верификация данных WorldClim 2.0 выполнена путем их сравнения со среднемесячными значениями соответствующих величин по данным метеостанций Уральского УГМС. Данные WorldClim 2.0 о температуре воздуха и влажности были сопоставлены с климатическими нормами (за период 1971–2000 г.) по наблюдениям 29 и 23 метеостанций соответственно. Верификация данных о скорости ветра аналогичным способом была невозможна, поскольку соответствующая информация о средней скорости ветра на метеостанциях в открытом доступе отсутствует. Поэтому сравнение было проведено с данными о средней скорости ветра за другой период (2005–2017 гг.), которые были получены с общедоступного web-ресурса https://rp5.ru/ (по данным 19 метеостанций). Для каждой из переменных рассчитаны средняя абсолютная и среднеквадратичная ошибки. Также вычислен коэффициент линейной корреляции Пирсона между фактическими данными метеостанций и данными WorldClim 2.0 (таблица).

Результаты верификации данных WorldClim 2.0

Переменная	Коэффициент линейной корреляции между фактическими данными и данными WorldClim 2.0	Средняя абсолютная и среднеквадратичная ошибки по месяцам			
		I	IV	VII	X
Температура воздуха, °С	0,998	–0,1/0,8	0,1/0,5	0,1/0,3	–0,2/0,6
Парциальное давление водяного пара, гПа	0,997	–0,41/0,42	–0,18/0,22	–0,29/0,59	–0,68/0,73
Скорость ветра, м/с	0,582	0,8/0,9	0,3/0,5	0,4/0,6	0,7/0,8

Как следует из таблицы, максимальную точность имеют данные WorldClim 2.0 по среднемесячной температуре воздуха. Систематические расхождения практически отсутствуют, так как значение средней абсолютной ошибки для указанных месяцев не превышает 0,2 по модулю. Среднеквадратичная ошибка оказалась несколько выше, так как для отдельных метеостанций (например Кунгур, Лысьва) расхождения средней температуры по фактическим данным и по данным WorldClim 2.0 достигают двух градусов. Причем расхождения в холодный период существенно больше, чем в летний период. Это может быть связано с влиянием использования дополнительных данных (температуры земной поверхности по спутниковым измерениям) при интерполяции в проекте WorldClim 2.0.

Точность данных WorldClim 2.0 о влажности воздуха (парциальном давлении водяного пара) также является удовлетворительной. В отличие от температуры, в этих данных имеются систематические ошибки, а именно занижение значений влажности, более существенное для холодного периода. Однако сравнение величины этого занижения с фактическим средним значением влажности показывает, что оно незначительно. В большинстве месяцев величина среднеквадратичной ошибки составляет не более 10% от средней влажности по данным метеостанций. Коэффициент корреляции между фактическими данными и данными WorldClim 2.0 как для температуры, так и для влажности близок к единице.

Что касается среднемесячной скорости ветра, то сравнение с фактическими данными метеостанций показывает существенное систематическое завышение скорости ветра в данных WorldClim 2.0. Это, однако, легко объясняется тем, что для анализа пришлось использовать разные временные отрезки (фактические данные получены за 2005–2017 гг., а данные WorldClim 2.0 характеризуют период 1971–2000 гг.). Скорость ветра за это время уменьшилась во многих регионах России. Наиболее значимой причиной такого уменьшения считается увеличение защищенности метеорологических площадок вследствие роста деревьев и застройки окружающей территории (Мещерская и др., 2006; Журавлев, Задде, 2013). Таким образом, существенное занижение скорости ветра по данным WorldClim 2.0 не указывает в данном случае на их низкое качество.

Верификация данных WorldClim 2.0 в целом подтверждает их удовлетворительный уровень точности для территории Пермского края. Это в совокупности с высоким пространственным разрешением и удобством использования данных позволяет рассчитывать на их основе биоклиматические параметры.

На основе данных WorldClim 2.0 были рассчитаны следующие биоклиматические параметры.

1. Эквивалентно-эффективная температура (ЭЭТ). Данный параметр определяет теплоощущения человека с учетом влияния скорости ветра и влажности воздуха и определяется по формуле (Головина, Русанов, 1993):

$$ЭЭТ = ET = 37 - \frac{37-t}{0.68-0.0014*f+\frac{1}{1.76+1.4*v^{0.75}}} - 0.29 * t * (1 - \frac{f}{100}), \quad (2)$$

где t - температура воздуха, ^{o}C; f - относительная влажность, %; v - скорость ветра, м/с.

2. Нормальная эквивалентно-эффективная температура (НЭЭТ) - показатель тепловой чувствительности с учетом влияния ветра для одетого человека:

$$НЭЭТ = 0{,}8\ ЭЭТ + 7℃\ , \quad (3)$$

3. Радиационно-эквивалентно-эффективная температура (РЭЭТ) - показатель, который учитывает теплоощущение человека от нагревания солнечной радиацией. В соответствии с рекомендациями Е.Г. Головиной и В.И. Русанова, РЭЭТ может быть рассчитана по формулам:

$$РЭЭТ=НЭЭТ+6{,}2℃ \quad (4)$$

4. Биологически активная температура (БАТ) – показатель, определяющий влияние радиации, отраженной поверхностью Земли на организм человека.

$$БАТ = 0{,}8НЭЭТ + 9℃ \quad (5)$$

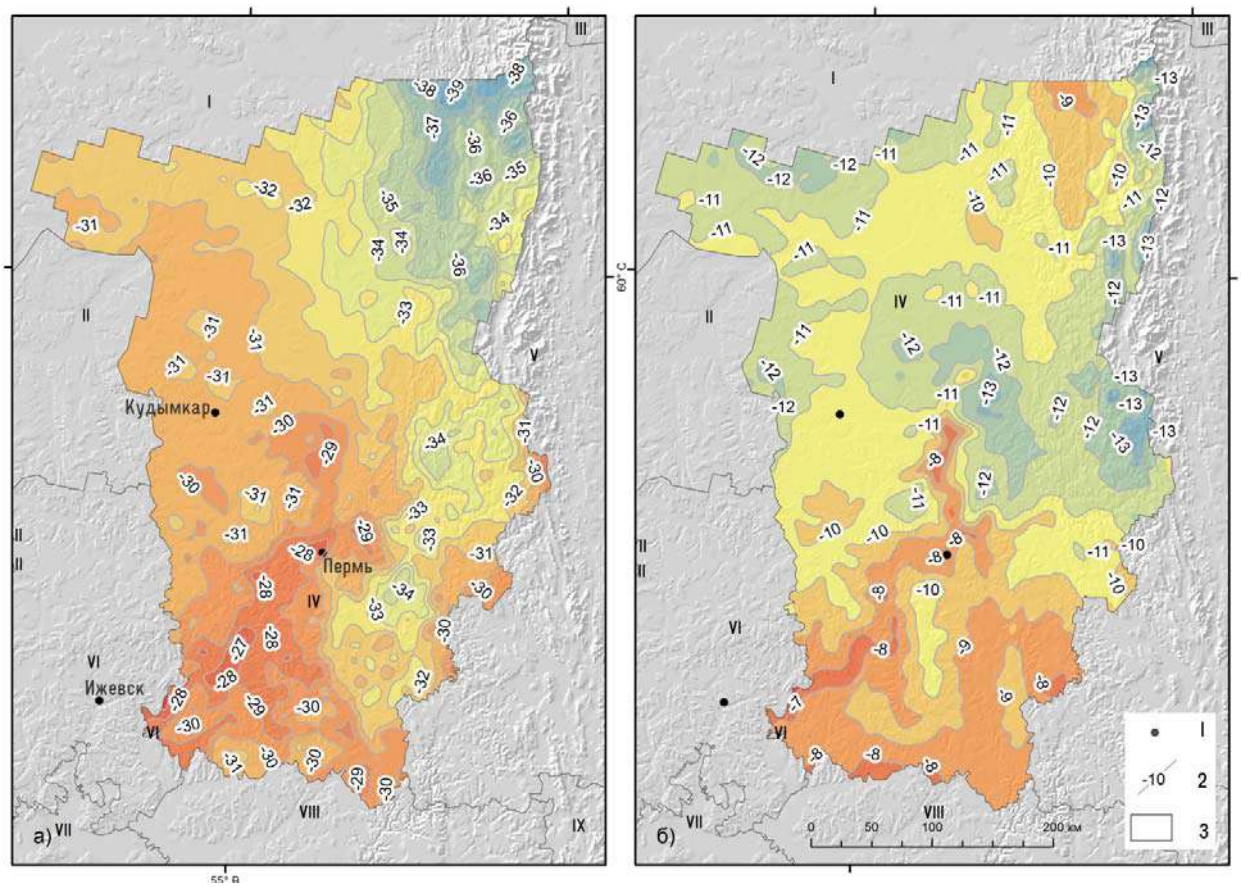
Расчет показателей производился средствами растровой алгебры программного комплекса ArcGIS 10.4. Результаты пересчета поверхностей были сглажены с помощью инструмента фокальной статистики. Таким образом, были получены следующие результаты:

1. Карты эффективно – эквивалентных температур по четырем центральным месяцам холодного (январь, октябрь) (рисунок) и теплого (апрель, июль) сезонов.

2. Карты производных от ЭЭТ величин – нормальных эквивалентно-эффективных температур (НЭЭТ), радиационно-эквивалентно-эффективных температур (РЭЭТ), карты биологически-активных температур (БАТ) по четырем месяцам центральных сезонов.

Результаты и их обсуждение

Значения ЭЭТ в январе по территории Пермского края изменяются в пределах от -28° до -36° С. Отмечается некоторое понижение значения ЭЭТ с запада на восток, в меридиональном направлении. Понижение значений ЭЭТ с юга на север не носит строго зональный характер, так как существенное влияние оказывают особенности подстилающей поверхности. Например, в январе в районах Камского и Воткинского водохранилищ, расположенных в центральной и юго-западной частях Пермского края, отмечается некоторое повышение ЭЭТ по сравнению с близлежащими территориями (на 1-2 градуса). На юго-востоке края ЭЭТ на 1-2 градуса ниже, чем в целом по южной части исследуемой территории. Это обусловлено застаиванием холодного воздуха в долинах рек Ирени и Сылвы и подтверждается также сравнительно высокой повторяемостью сильных морозов в данном районе (Пьянков и др., 2016).



Картосхема распределения эффективно-эквивалентных температур холодного периода – января (а) и октября (б):

1 – крупные города; 2 – изолинии равных значений ЭЭТ; 3 – границы субъектов (I – Республика Коми, II – Кировская область, III – Ханты-Мансийский АО, IV – Пермский край, V – Свердловская область, VI – Удмуртская республика, VII – Республика Татарстан, VIII – Республика Башкортостан, IX – Челябинская область

Более сложное распределение ЭЭТ наблюдается в восточной части Пермского края, что связано с пересеченностью рельефа.

Осенью влияние крупных водохранилищ на распределение показателей ЭЭТ более выражено по сравнению с зимним периодом. В целом в октябре значения ЭЭТ снижаются в северном направлении, меридиональная составляющая выражена меньше, чем в январе.

В заключении можно отметить целесообразность применения данных WorldClim 2.0 для биоклиматической оценки территории, так как для выявления реального биоклиматического потенциала территорий данных, полученных с метеостанций, оказывается недостаточно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Афонин А. Н., Грин С. Л., Дзюбенко Н. И., Фролов А. Н. (ред.) Агроэкологический атлас России и сопредельных стран: экономически значимые растения, их вредители, болезни и сорные растения, 2008 г. [DVD-версия].

2. Журавлев Г. Г., Задде Г. О. Оценка ветроэнергетического потенциала Кемеровской области // Вестник Томского государственного университета. 2013. № 376. С. 175–181.

3. Мещерская А. В., Еремин В. В., Баранова А. А., Майстрова В. В. Изменение скорости ветра на севере России во второй половине XX века по приземным и аэрологическим данным // Метеорология и гидрология. 2006. № 3. С. 83–97.

4. Пьянков С. В., Шихов А. Н., Абдуллин Р. К. Атлас опасных гидрометеорологических явлений Уральского Прикамья. Перм. гос. нац. иссл. ун–т. Пермь. 2016. 116 с.

5. Рыхлов А. Б. Закономерности изменения скорости ветра с высотой в приземном слое атмосферы на юго-востоке ЕТР для решения задач ветроэнергетики // Ученые записки РГГМУ. 2011. №. 20. С. 89–99.

6. Fick S. E., Hijmans R. J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas // International Journal of Climatologyю 2017. Vol. 37. PP. 4302–4315

7. Ninyerola M., Pons X., Roure J. M. A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques // International Journal of Climatology. 2000. V. 20. PP. 1823–1841.

8. Головина Е. Г., Русанов В. И. Некоторые вопросы биометеорологии. Учебное пособие. – СПб., изд. РГГМИ, 1993. 90 с.

© Е. С. Черепанова, Л. Н. Ермакова, А. Н. Шихов, 2018

УДК 528.88

РАЗВИТИЕ МЕТОДА RST (ROBUST SATELLITE TECHNIQUE) ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ ГОРНОГО АЛТАЯ

Полина Владимировна Воронина
Институт вычислительных технологий СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)330-78-26, e-mail: pol.voronina@gmail.com

Дмитрий Леонидович Чубаров
Институт вычислительных технологий СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, научный сотрудник, тел. (383)334-91-15, e-mail: dchubarov@ict.nsc.ru

Николай Николаевич Добрецов
Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)330-76-37; Институт вычислительных технологий СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, ведущий научный сотрудник, тел. (383)334-91-15, e-mail: nickdobretsov@gmail.com

Представлены результаты развития метода поиска статистических отклонений RST (Robust Satellite Technique) в пространственно-временных рядах спутниковых данных температуры поверхности Земли для территории Горного Алтая.

Ключевые слова: MODIS, обработка спутниковых данных, температура поверхности, температурные аномалии, статистические выбросы, метод RST (Robust Satellite Technique).

THE DEVELOPMENT OF RST (ROBUST SATELLITE TECHNIQUE) METHOD FOR DETECTION OF TEMPERATURE ANOMALIES ON THE TERRITORY OF MOUNTAIN ALTAI

Polina V. Voronina
Institute of Computational Technologies SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (383)330-78-26, e-mail: pol.voronina@gmail.com

Dmitri L. Chubarov
Institute of Computational Technologies SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher, phone: (383)334-91-15, e-mail: dchubarov@ict.nsc.ru

Nikolay N. Dobretsov
V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Leading Researcher, phone: (383)330-76-37; Institute of Computational Technologies SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Leading Researcher, phone: (383)334-91-15, e-mail: nickdobretsov@gmail.com

We present the results of the development of RST (Robust Satellite Technique) method to detect statistical deviations in spatial-time series of satellite land surface temperature data under the Altai Mountains.

Key words: MOIDS, satellite remote sensing data processing, Land Surface Temperature (LST), statistical deviations, method RST (Robust Satellite Technique).

Температура поверхности Земли представляет собой весьма интересный и значимый показатель состояния природных систем, на ее значение оказывают влияние биологические, химические процессы, протекающие как в приземном слое атмосферы, так и в коре Земли. Температура поверхности Земли, измеренная в ночное время, наименее зависит от неоднородности нагрева Солнцем в дневное время. Выбросы в пространственно-временных рядах данных температуры поверхности Земли связывают с катастрофическими природными явлениями, такими как лесные пожары, извержения вулканов, сейсмологические события.

Одним из способов определения выбросов в данных дистанционного зондирования является метод RST (Robust Satellite Techniques), предложенный в [1]. Этот метод применялся рядом исследователей для обнаружения аномальных отклонений температуры поверхности до и после сильных сейсмических событий [2-8].

Метод RST предназначен для проведения анализа пространственно-временных рядов спутниковых данных температуры поверхности с целью выявления статистических выбросов в этих рядах. С помощью метода RST выполнены исследования температурных режимов на различных территориях [2-7]. В основе метода лежит статистический анализ наборов спутниковых данных температуры земной поверхности для выделенной территории. Для того, чтобы исключить влияние сезонного хода температур и неоднородности рельефа данные преобразуются следующим образом: фиксируется временной интервал продолжительностью несколько десятков дней, содержащий исследуемое событие, извлекаются температуры в эти дни года за несколько предшествующих лет. Обычно рассматривается область на поверхности Земли, охватывающая основные геологические структуры, вовлеченные в современные процессы формирования поверхности. По выбранной области вычисляется индекс $\eta(\mathbf{r},t')$, основным достоинством которого является то, что при выборе области и временного интервала подходящих размеров он позволяет исключить влияние вариаций температуры, вызванных климатическими процессами, неоднородностью рельефа и погодными условиями [8,9]:

$$\eta(\mathbf{r},t') = \frac{T(\mathbf{r},t') - \left\langle T(\mathbf{r},t') \right\rangle_s - \left\langle \Delta T(\mathbf{r},t') \right\rangle_t}{\sigma_{\Delta T}(\mathbf{r})},$$

$\mathbf{r} \equiv (x,y) \in D$ – географические координаты центра пикселя, $T(\mathbf{r},t')$ – температура в момент времени t' в пикселе $\mathbf{r}$, $\left\langle T(\mathbf{r},t') \right\rangle_s$ – среднее по области значение температуры, $\left\langle \Delta T(\mathbf{r},t') \right\rangle_t$ – среднее по времени значение температуры в пикселе $\mathbf{r}$, $\sigma_{\Delta T}(\mathbf{r})$ – среднеквадратичное отклонение $T(\mathbf{r},t)$ от $\left\langle \Delta T(\mathbf{r},t') \right\rangle_t$.

В работе [9] был применен метод RST для сейсмически активной территории Горного Алтая по восстановленным по данным приборов MODIS/Terra зна-

чениям ночных температур. Это восстановление проводится на основе двухканального (31 и 32 каналы сенсора MODIS) алгоритма [10] и содержится в продуктах MOD11. Были отмечены следующие факторы: Во-первых, пространственно-временные ряды ночных температур содержат пропуски, количество которых для отдельных участков оказывается более 200 в течение календарного года. Пропуски вызваны либо облачностью в момент пролета спутника, либо какими-то нарушениями во время съемки. К сожалению, спонтанно проявляющаяся облачность не дает возможности судить о продолжительности и/или интенсивности аномалий. Во-вторых, количество и интенсивность аномалий очень сильно зависит от особенностей территории.

В качестве исходных данных для метода RST использовались значения ночных температур за период с 1 января по 31 декабря в течение 2001–2005 гг.

Требуемые данные организованы в виде файлового архива, к которому на основе технологии hVault осуществляется доступ как к реляционной СУБД [8], извлечение и преобразование данных происходит с помощью SQL-запросов.

На рис. 1 изображена область исследования. Это территория Горного Алтая со сложным геологическим строением, с высокой сейсмической активностью. Контур области D выделен красным цветом, звездочкой отмечен эпицентр Чуйского землетрясения, произошедшего 27 сентября 2003 г.

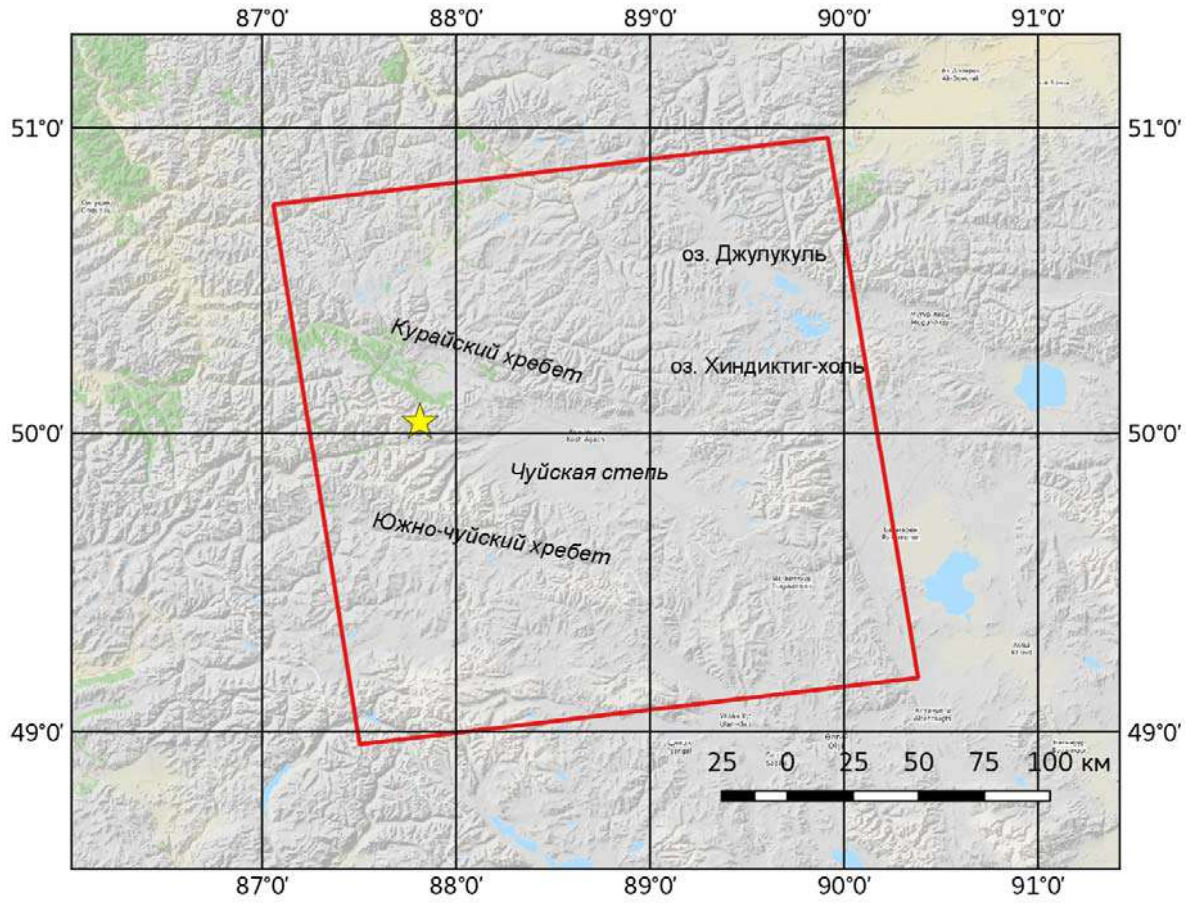


Рис. 1. Область исследования (проекция Меркатора на сфере; отмывка рельефа: OpenCycleMap)

Участками с аномальной температурой считаются те, в которых пороговые значения индекса $\eta > 2$. На рис. 2 представлены графики с количеством аномальных пикселей с различными пороговыми значениями для 5 лет, посчитанных отдельно для каждого года, но по единым средним по времени значениям.

Мы видим, что в течение каждого рассмотренного года аномальное распределение температуры поверхности присутствует с различной степенью интенсивности и продолжительности. Если рассматривать распределение индекса отдельно для каждого дня, как это было сделано в [9], то из-за облачности сложно судить о времени возникновения каждой аномалии, ее продолжительности и ее интенсивности.

Авторы предлагают воспользоваться следующим приемом. В ходе анализа пространственно-временных рядов температуры мы будем оставлять только те пиксели области, в которых получено превышение порогового значения индекса $\eta > 2$, далее мы суммируем значения индекса в выбранных нами пикселях. Т.о. в нашем анализе остаются только те пиксели исследуемой области, в которых хотя бы один раз за временной интервал произошло превышение порогового значения индекса. Результат такого анализа показан на рис. 3. Одновременно с подсчетом накопительной характеристики индекса мы получаем и количество вхождений с аномальным значением по каждому пикселю (рис. 4). Видно, что для исследуемой территории существуют участки, в которых за весь период анализа не зафиксировано ни одной температурной аномалии. В первую очередь, это Курайская и Чуйская котловины, а также оз. Джулукуль. Есть участки, в которых аномалии присутствуют регулярно, например, озеро Хиндиктиг-холь. Последний случай вызывает особый интерес, т.к. возникает вопрос о границе между аномальным и нормальным распределением температур на таком типе объектов.

Представляет интерес и распределение пикселей, в которых значение температуры не определено из-за облачности. Количество таких пикселей также просуммировано за весь период наблюдений, т.е. за весь календарный год построен индекс облачности (рис. 5). Интересно, что на территории Чуйской и Курайской котловин этот индекс – максимальный.

И, наконец, на рис. 6 представлено совмещение карт распределения тепловых аномалий за пять лет 2001–2002 и 2004–2005 гг. Каждый интервал выделен собственным цветом. Как уже упоминалось, отчетливо видно практически полное отсутствие аномалий в Чуйской и Курайской котловинах.

Предложенная модификация метода RST для обнаружения выбросов в пространственно-временных рядах данных температуры поверхности позволяет частично отфильтровывать их случайные проявления. С использованием модифицированной методики проведен анализ полей температуры поверхности для сейсмически активной территории Горного Алтая для интервала 2001–2005 гг., выявлены участки с устойчивыми по пространству и времени тепловыми аномалиями, а также участки с отсутствием аномалий.

2001

2002

2003

2004

2005

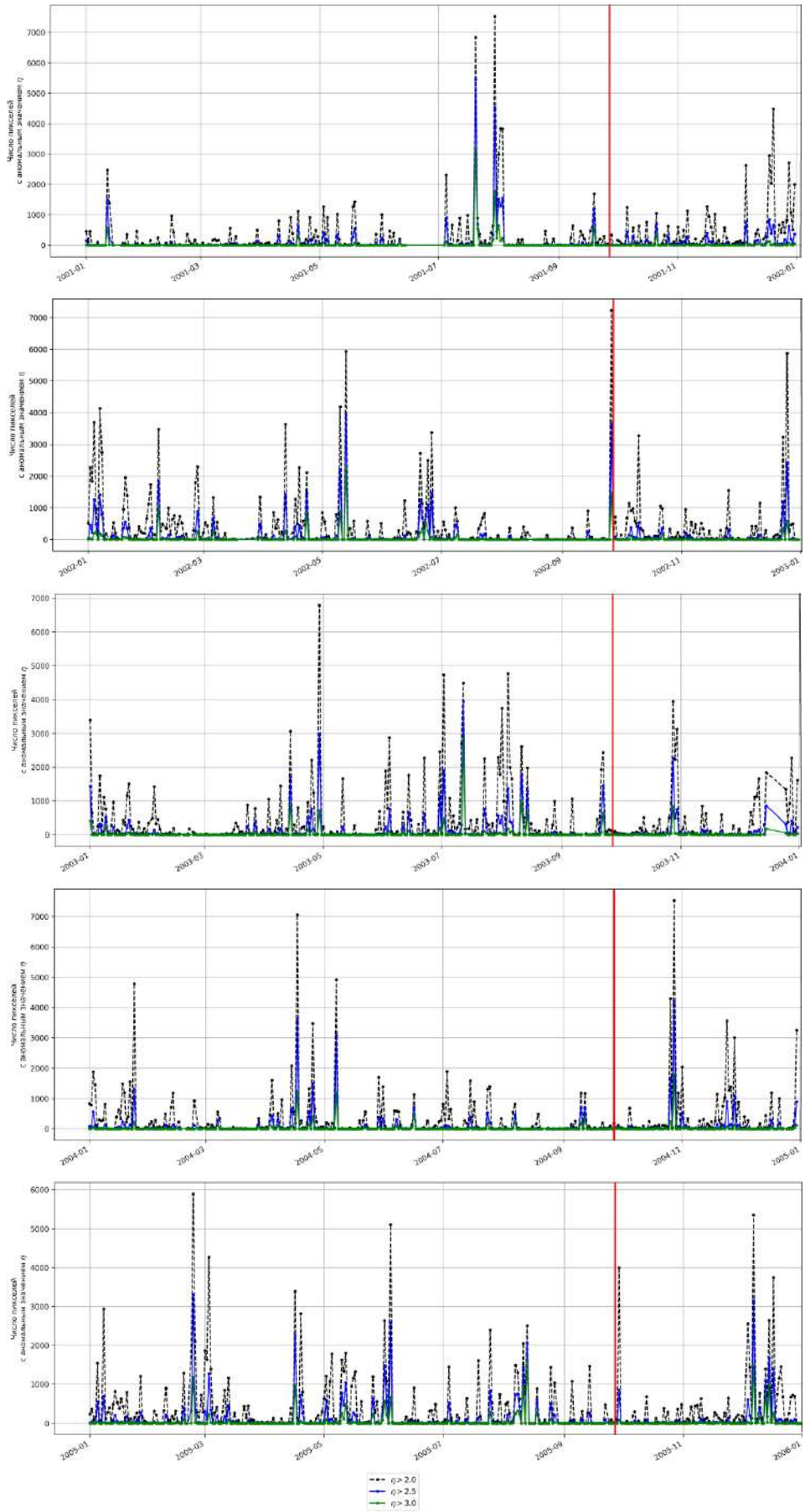


Рис. 2. Количество аномальных пикселей с различным пороговым значением

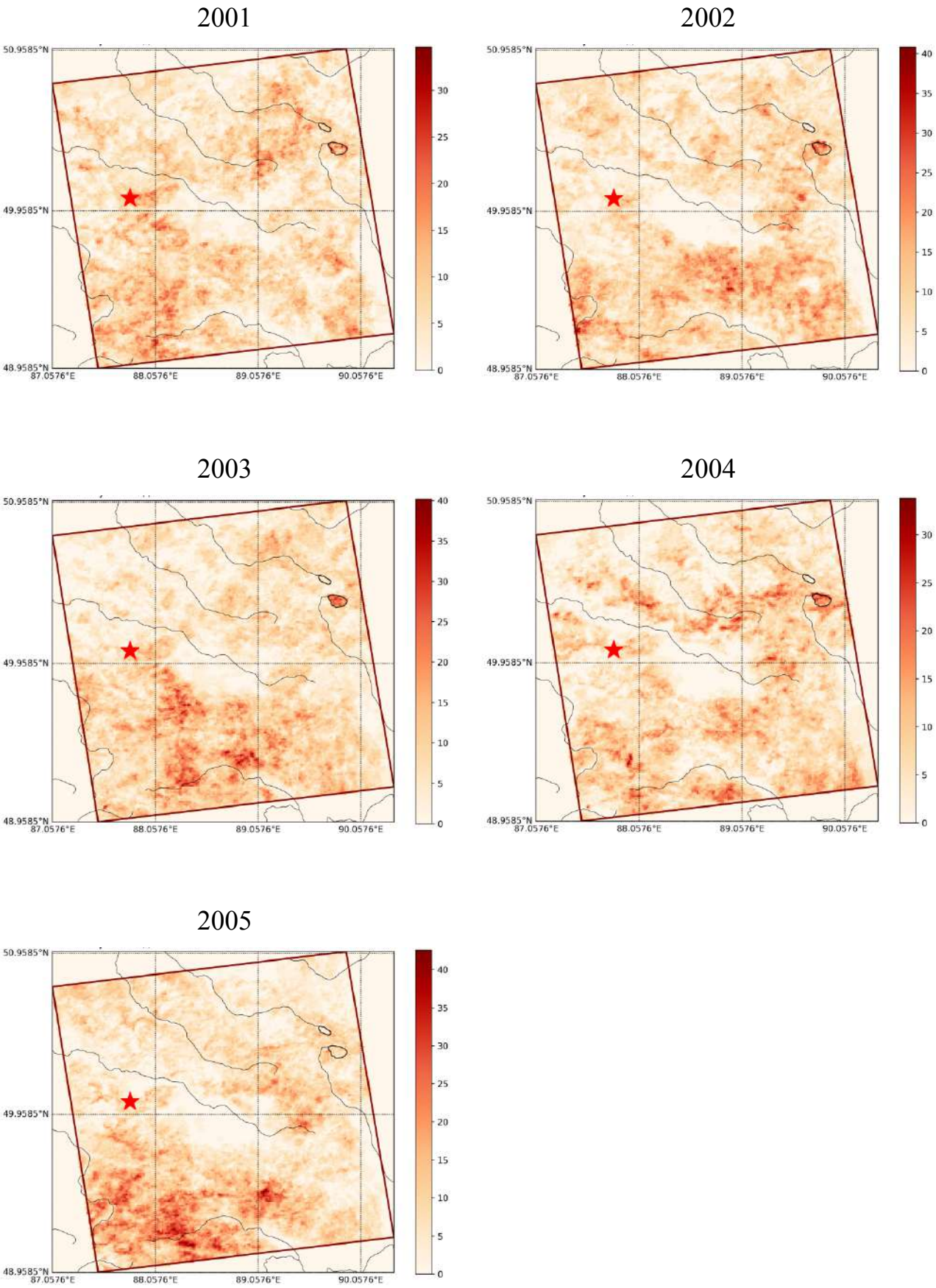
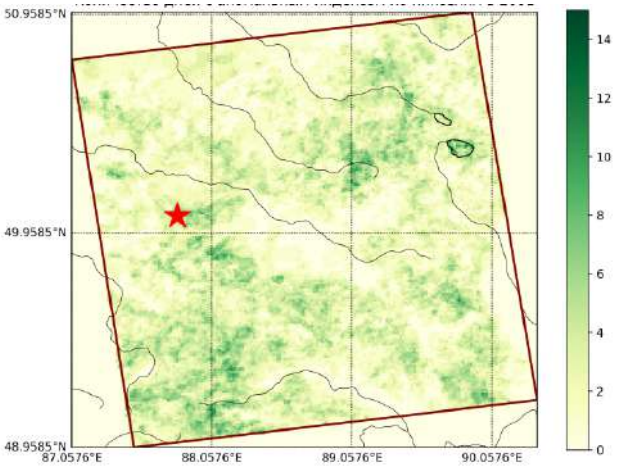
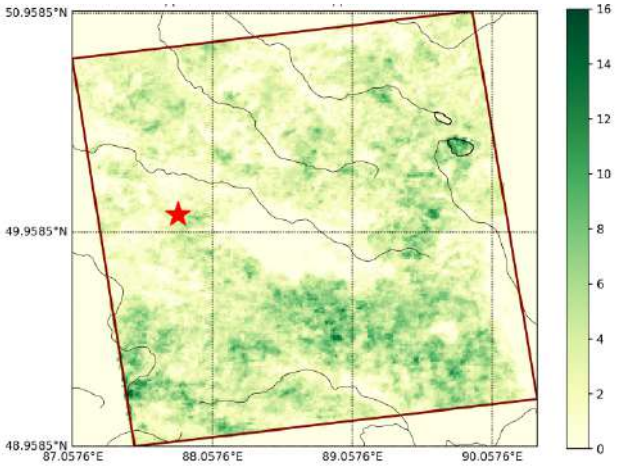


Рис. 3. Накопительная сумма аномальных значений индекса

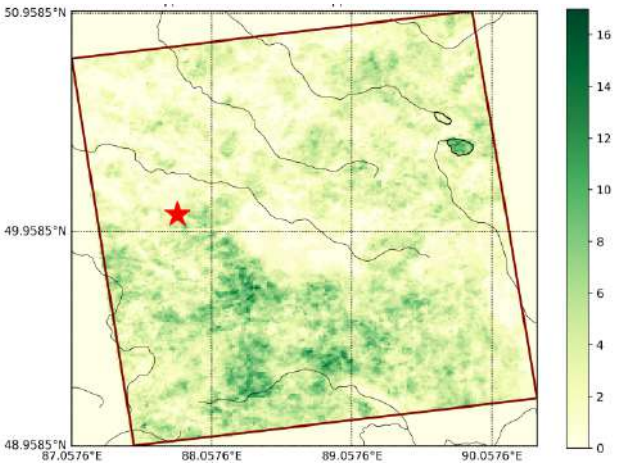
2001



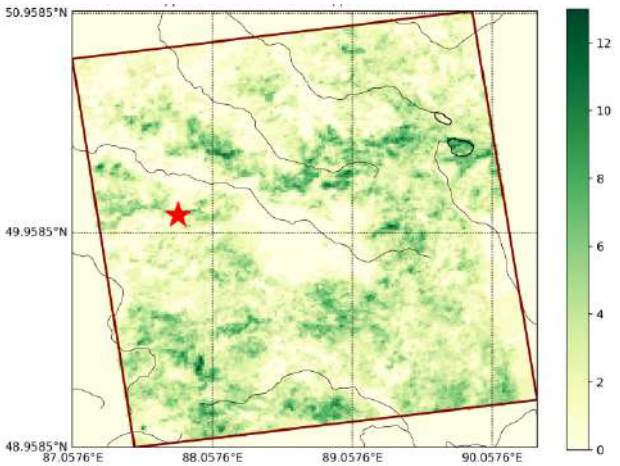
2002



2003



2004



2005

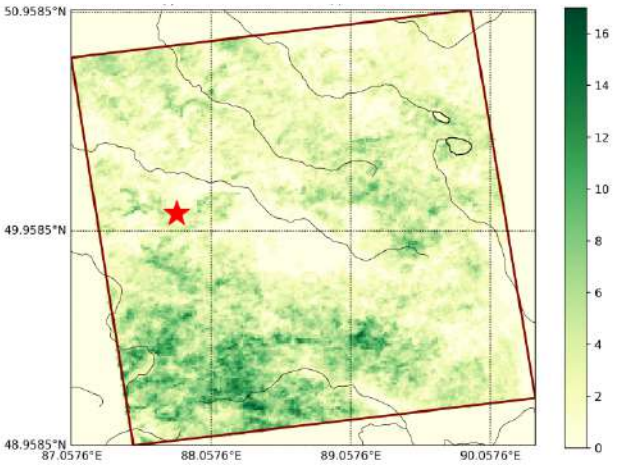
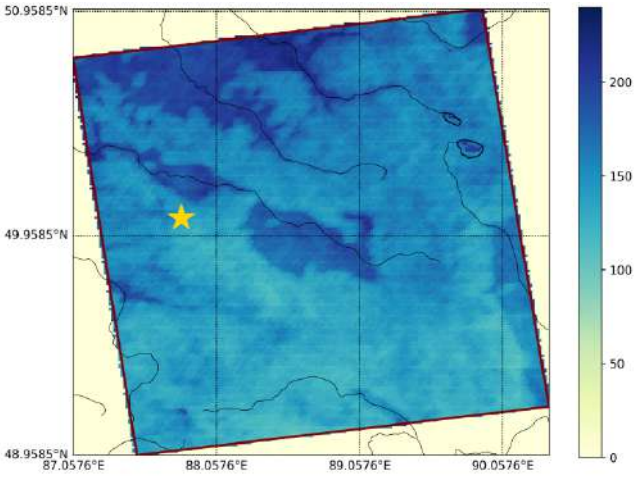
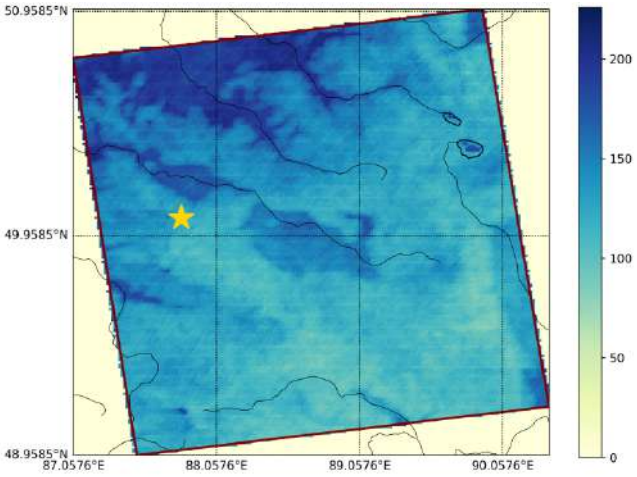


Рис. 4. Количество аномальных пикселей

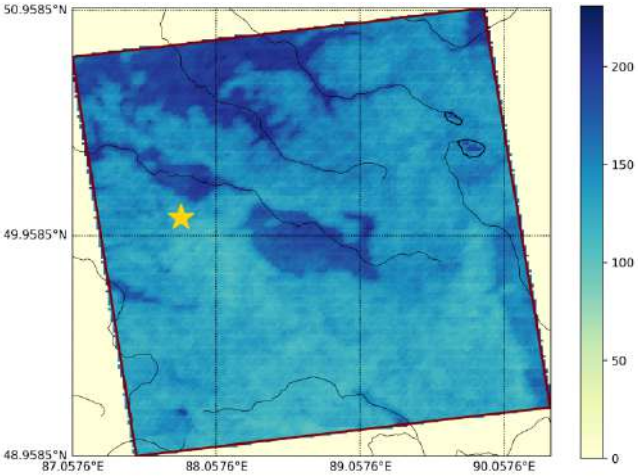
2001



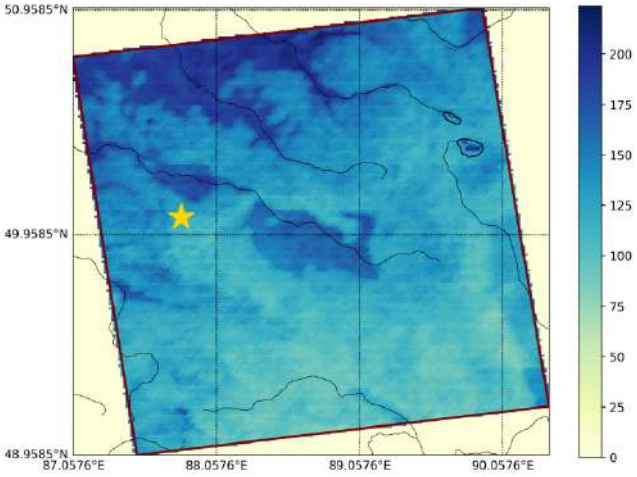
2002



2003



2004



2005

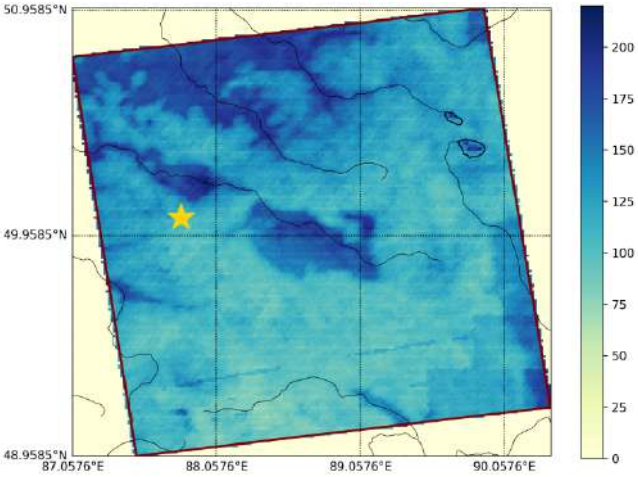


Рис. 5. Количество облачных пикселей

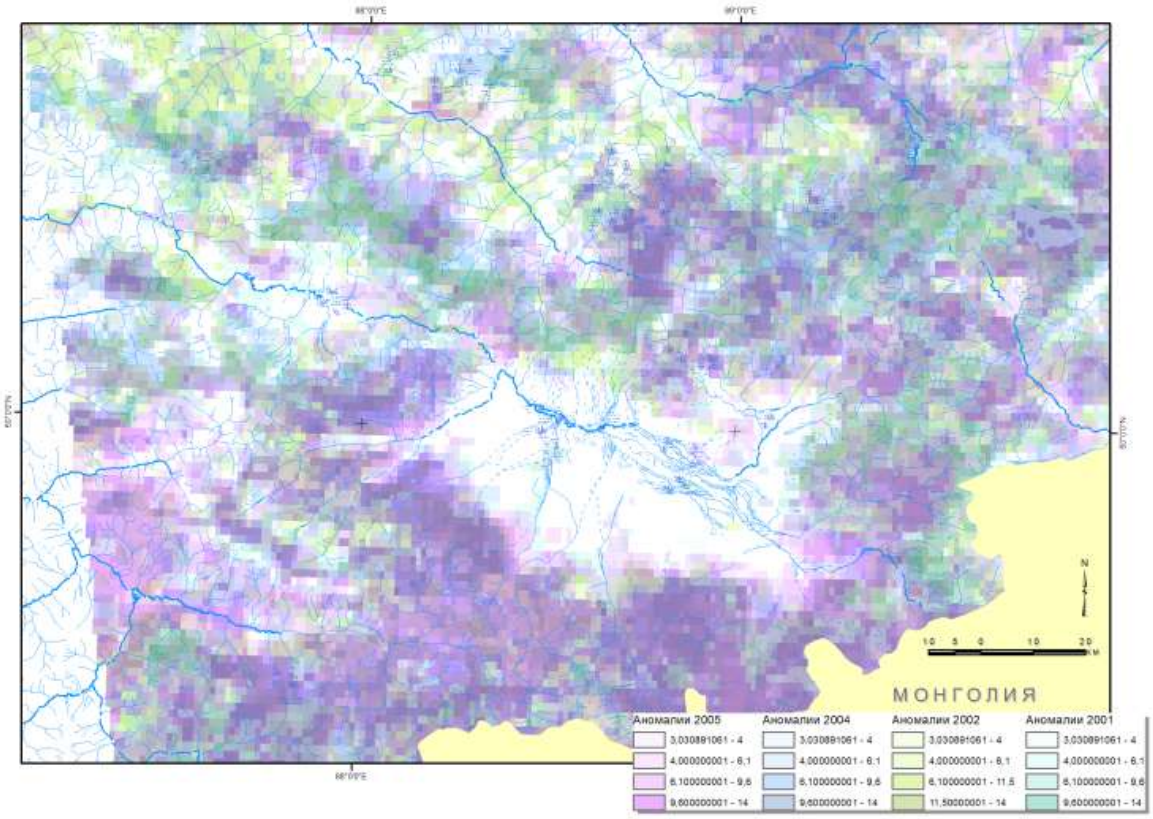


Рис. 6. Совмещение плотности тепловых аномалий
за 2001–2002 и 2004–2005 гг.

Модифицированная методика теоретически позволяет разделять аномальные проявления на две категории. Первая – это «пролонгированные аномалии», при которых аномальные точки непрерывно проявляются несколько раз подряд, формируя тем самым некое событие, продолжающееся во времени. Оно аномально по отношению к фону, но достаточно длительное по отношению к частоте измерений. И вторая – это «пульсирующие аномалии», в которых аномальные точки проявляются несколько раз в течение исследуемого интервала времени, но по отношению друг к другу проявляющиеся в разное время.

Работа выполнена при финансовой поддержке программ ФНИ (проекты № 0316-2016-0002, № 0330-2016-0018).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Tramutoli V. (2001) Robust satellite techniques for remote sensing of seismically active areas / Tramutoli V., Di Bello G., Pergola N. and Piscitelli S. // Ann. di Geofis., 44(2), 295-312.

2. Filizzola C. (2004) Robust satellite techniques for seismically active areas monitoring: a sensitivity analysis on September 7, 1999 Athens's Earthquake / Filizzola C., Pergola N., Pietrapertosa C., Tramutoli V. // Physics and Chemistry of the Earth, 29(4-9), 517-527, doi:10.1016/j.pce.2003.11.019.

3. Corrado R. (2005) Seismically active area monitoring by robust TIR satellite techniques: a sensitivity analysis on low magnitude Earthquakes in Greece and Turkey / Corrado R., Caputo R.,

Filizzola C., Pergola N., Pietrapertosa C., Tramutoli V. // Natural Hazards and Earth System Sciences. 5: 101-108.

4. Genzano N. (2007) Robust satellite technique for monitoring seismically active areas: The case of Bhuj-Gujarat Earthquake / Genzano N., Aliano C., Filizzola C., Pergola N., Tramutoli V. // Tectonophysics, 431, 197-210.

5. Aliano C. (2008) Robust TIR satellite techniques for monitoring Earthquake active regions: limits, main achievements and perspectives / Aliano C., Corrado R., Filizzola C., Genzano N., Pergola N., Tramutoli V. // Annals of Geophysics, Vol. 51, N. 1.

6. Genzano N. (2009) RST analysis of MSG-SEVIRI TIR radiances at the time of the Abruzzo 6 April 2009 Earthquake / Genzano N., Aliano C., Corrado R., Filizzola C., Lisi M., Mazzeo G., Paciello R., Pergola N., Tramutoli V. // Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9, 2073-2084.

7. Tramutoli V. (2013) On the possible origin of thermal infrared radiation (TIR) anomalies in Earthquake-prone areas observed using robust satellite techniques (RST) / Tramutoli V., Aliano C., Corrado R., Filizzola C., Genzano N., Lisi M., Martinelli G., Pergola N. // Chemical Geology, 339, 157-168, doi:10.1016/j.chemgeo.2012.10.042.

8. Шокин Ю.И. (2015) Информационная система приема, обработки и доступа к спутниковым данным и ее применение для решения задач мониторинга окружающей среды / Шокин Ю.И., Добрецов Н.Н., Мамаш Е.А., Кихтенко В.А., Воронина П.В., Смирнов В.В., Чубаров Д.Л.// Вычислительные технологии. Т. 20. № 5. С. 157-174.

9. Воронина П. В., Чубаров Д. Л., Кихтенко В. А. Статистические отклонения в пространственно-временных рядах спутниковых данных температуры поверхности Земли на территории юга Сибири // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 2. – С. 46–50.

10. Wan Z. (1996) A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space / Wan Z., Dozier J. // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. Vol. 34. No. 4. P. 892–905.

© П. В. Воронина, Д. Л. Чубаров, Н. Н. Добрецов, 2018

УДК 535.3:681.75

ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВНУТРИКОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Александр Андреевич Донцов
Институт водных и экологических проблем СО РАН, 656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодёжная, 1, младший научный сотрудник, тел. (923)711-24-02, e-mail: alexdontsov@yandex.ru

Игорь Анатольевич Суторихин
Институт водных и экологических проблем СО РАН, 656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодёжная, 1, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник; Институт вычислительных технологий СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, старший научный сотрудник, тел. (903)910-15-86, e-mail: sia@iwep.ru

Представлено описание модульной специализированной геоинформационной системы (ГИС) мониторинга внутриконтинентальных водоёмов Сибири. Информационной основой ГИС являются оптические и радарные данные дистанционного зондирования Земли, полученные с космических аппаратов Landsat-8, Sentinel-2 и Sentinel-1, а также данные наземных измерительных комплексов и экспедиционных работ. Показана архитектура ГИС, основные модули и компоненты. Обсуждаются технологические особенности работы, последовательность обработки и визуализации данных. Приводятся результаты использования этой системы в задаче сопоставления экспедиционных данных измерения концентрации хлорофилла «а» в поверхностном слое Новосибирского водохранилища со значением спектрального индекса NDCI, вычисленного по данным КА Sentinel-2.

Ключевые слова: ГИС, мониторинг, спутниковая съемка, водные объекты, спектральные индексы, водные индексы, дешифрирование, автоматическое выделение воды, Landsat-8, Sentinel-2, Sentinel-1, NDWI, Rest Api, NDCI, Django, Posgis, Mapserver.

GEOINFORMATION SYSTEM OF REGISTRATION OF HYDROLOGICAL PARAMETERS OF INTRACONTINENTAL WATER OBJECTS

Alexander A. Dontsov
Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 1, Molodezhnaya St., Barnaul, 656038, Russia, Junior Researcher, phone: (923)711-24-02, email: alexdontsov@yandex.ru

Igor A. Sutorikhin
Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 1, Molodezhnaya St., Barnaul, 656038, Russia, D. Sc., Professor, Chief Researcher; Institute of Computational Technologies SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Senior Researcher, phone: (903)910-15-86, e-mail: sia@iwep.ru

A description is given of a modular specialized geoinformation system (GIS) for monitoring inland water bodies in Siberia. Information basis of GIS is optical and radar data of Earth remote sensing received from Landsat-8, Sentinel-2 and Sentinel-1 spacecraft, as well as data of ground measuring systems and expedition works. The GIS architecture, main modules and components are shown. The technological features of the work, the sequence of data processing and visualization are discussed. The results of the use of this system in the task of comparing the chlorophyll concen-

tration measurement data "a" in the surface layer of the Novosibirsk Reservoir with the value of the NDCI spectral index computed from the Sentinel-2 satellite data are presented.

Key words: GIS, monitoring, satellite images, water bodies, lakes, water surface area, water indices, automatic water extraction, Sentinel-2, NDWI, Rest Api, NDCI, Django, Posgis, Mapserver.

Введение

Внутриконтинентальные водные объекты играют важную роль в региональных природных и антропогенных процессах. В последнее время в связи с отсутствием на большинстве территории Российской Федерации стационарных пунктов наблюдения, для определения параметров водных объектов широко используются данные дистанционного зондирования Земли, которые во многом являются единственным актуальным источником информации. Однако необходимо отметить, что полная и всесторонняя информация о состоянии водных объектов может быть получена только путём интеграции разных способов измерений воедино, таких, как: спутниковый мониторинг, наземные измерительные комплексы и экспедиционные исследования. Исходя из этого, актуальна разработка интегрированных модульных геоинформационных систем, реализующих в себе интерфейсы для обработки, хранения и анализа всех трёх вышеназванных способов измерений [1].

В настоящее время довольно большие по площади водные объекты, такие как моря и океаны хорошо изучены при помощи систем и методов дистанционного зондирования из космоса, созданы обширные базы данных параметров таких объектов, однако внутриконтинентальные водные объекты в этом плане менее исследованы. Изучение состояния водных объектов типа озер, водотоков и водохранилищ трудно представить без хорошо структурированной базы данных площадных, гидрологических и гидрохимических параметров.

В работе рассматривается прототип модульной автоматизированной ГИС мониторинга внутренних водоемов Сибири. Система строится на основе спутниковых данных космических аппаратов Sentinel-1, Sentinel-2 и Landsat-8, получаемых из открытых архивов ESA (European Space Agency) и USGS (United States Geological Survey) [2, 3], а также данных наземных измерительных комплексов и экспедиционных работ.

Основные задачи, решаемые при помощи ГИС, представлены ниже:

1. определение площади акватории озер и водохранилищ;
2. определение динамики песчаных наносов в виде побочней и осерёдков в руслах рек;
3. мониторинг установления и схода ледового покрова на водоёмах;
4. определение изменения береговой линии рек и других водоемов;
5. оценка концентрации содержания хлорофилла «а» в поверхностном слое водоёмов [4, 5].

При решении приведённых задач используются спутниковые снимки и результаты наземных измерений. Такой подход обеспечивает возможность предоставления полной и всесторонней информации о состоянии водных объектов пользователям ГИС.

Методы и материалы

На рис. 1 представлена структурная схема ГИС. Компоненты объединяет между собой Web-платформа Django, которая позволяет реализовывать модульные приложения на языке программирования Python. Для работы с системой был разработан Web-интерфейс, WMS/WPS-интерфейс и RESTfull web-api для интеграции с наземными измерительными комплексами. Работу ГИС можно разделить на два блока – это работа со спутниковыми данными и работа с данными наземных измерительных комплексов и экспедиционных работ.

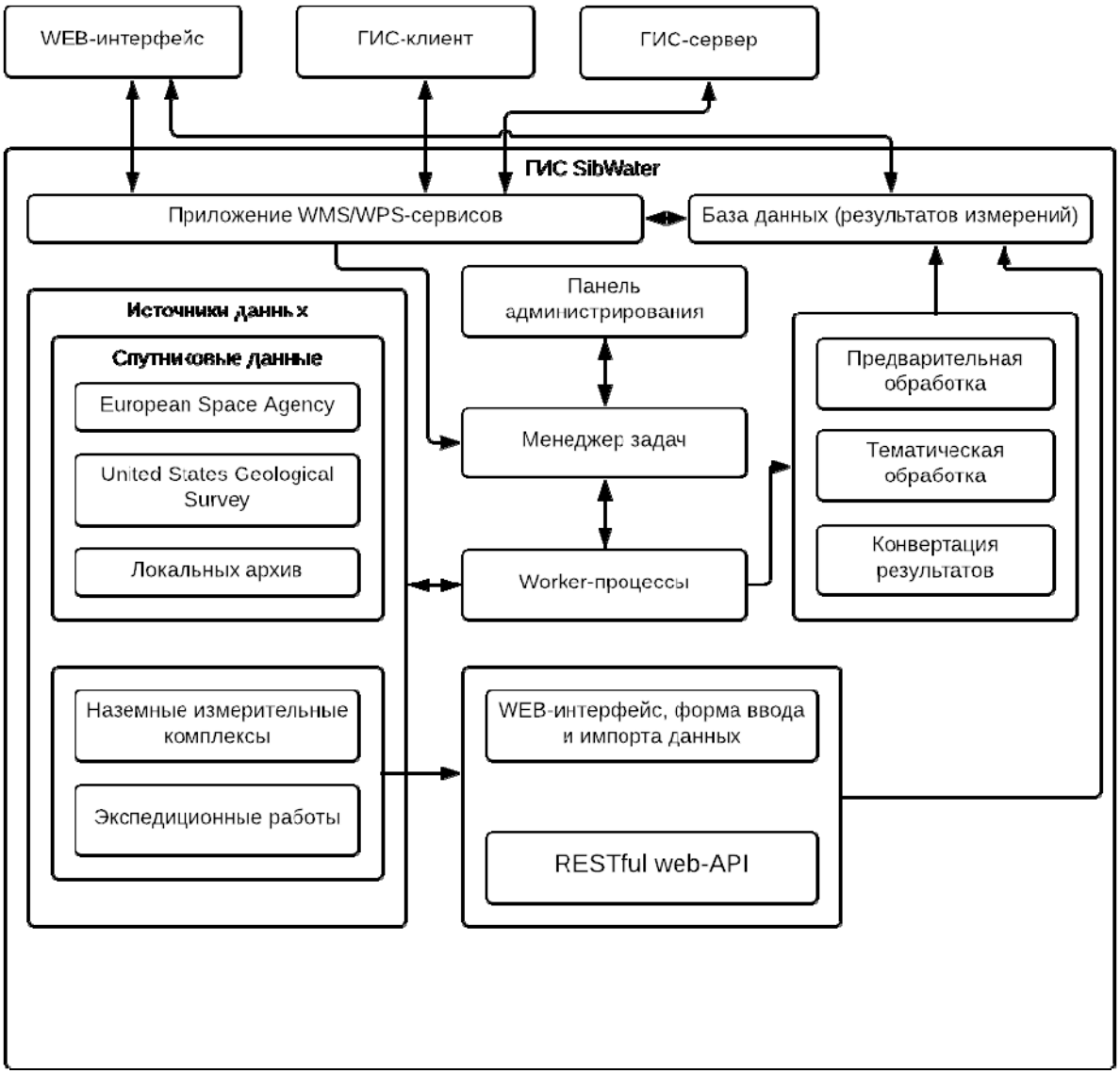


Рис. 1. Блок схема ГИС

На этапе предварительной обработки данных оптического диапазона осуществляется атмосферная коррекция. Для реализации атмосферной коррекции используется программный модуль, базирующийся на основе пакета Sen2Cor. Sen2Cor предназначен для генерации и форматирования продукта Sentinel-2 Level 2A и содержит систему атмосферной коррекции ATCOR. Она генерирует продукты уровня 2A и включает дополнительные функции, такие как создание карты классификации, обнаружение и удаление дымки перистых облаков, топографическую коррекцию, теневую компенсацию и т.д [5, 6, 7]. Если отмеченный водный объект перекрывается маской облачности, то обработка снимка не проводится. С помощью предварительной маски воды определяются границы анализируемого водоема, на основе которых из целого изображения вырезается фрагмент, содержащий рассматриваемый водоем.

Для обработки данных радиодиапазона КА Sentinel-1 разработан модуль на основе программного пакета SNAP. Рассмотрим его основные функции.

1. Калибровка. Для правильной работы данные должны быть откалиброваны. Это особенно необходимо при подготовке данных для мозаик, где могут быть несколько продуктов на различных углах съемки и относительных уровнях яркости.

2. Спекл-фильтрация изображений. Фильтры могут быть применены к данным для уменьшения количества спекл-шума.

3. Корректировка по местности. Корректировка по местности геокодирует изображение, исправляя геометрические искажения с использованием цифровой модели высот (DEM), и производит продукт в картографической проекции.

После предварительной и тематической обработки осуществляется выделение водной поверхности, при помощи, в случае с данными оптического диапазона, спектральных водных индексов, которые усиливают контраст между водной поверхностью и другими объектами или алгоритмов классификации Random Forest, Spectral Angle Mapper, K-means.

Полученные результаты в виде векторных полигонов в формате GeoJSON или Shapefile записываются в базу данных, в качестве которой используется СУБД PostgreSQL и расширение PostGIS**,** добавляющее поддержку географических объектов в реляционную базу данных [5].

Интеграцию с наземными измерительными комплексами обеспечивает RESTfull web-api, который основывается на расширении Django REST framework (DRF). Данные API передаются в формате JSON и после валидации при помощи функционала Django-форм записываются в базу данных ГИС. Результаты экспедиционных работ также могут быть добавлены в ГИС посредством API или web-интерфейса с формой добавления и импорта данных.

Рассмотрим примеры работы разрабатываемой ГИС. Оценка концентрации содержания хлорофилла «а» в поверхностном слое водоёмов. Как известно, определение в водоемах концентраций хлорофилла – фотосинтетического пигмента растительной клетки, позволяет получить однозначную информацию об интенсивности фотосинтеза и биомассе фитопланктона, характеристиках качества воды, наличие химических загрязнений. Мультиспектральные данные по-

зволяют производить оценку концентрации хлорофилла «а» в поверхностном слое водоёмов при помощи расчёта спектрального индекса NDCI (Normalized Difference Chlorophyll Index) [8, 9, 10].

В таблице представлены результаты экспедиционных измерений, был рассчитан коэффициент корреляции R, между значениями индекса NDCI и данными наземных измерений, который составил 0,93.

Результаты экспедиционных измерений хлорофилла «а»
в поверхностном слое и значения индекса NDCI
по данным Sentinel-2 (29.08.2017)

	дата	мг/м3	NDCI	R
Боровое - Быстровка, левый берег	16.08.2017	10,62	-0.135	
Боровое - Быстровка, середина	16.08.2017	8,70	-0.198	
Боровое - Быстровка, правый берег	16.08.2017	7,81	-0.204	
Ленинское - Сосновка, левый берег	16.08.2017	22,07	-0.074	0,93
Ленинское - Сосновка, середина	16.08.2017	15,16	-0.104	
Ленинское - Сосновка, правый берег	16.08.2017	14,66	-0.154	
Бердский залив, Агролес	17.08.2017	82,35	0.197	

На рис. 2 показан пример web-интерфейса системы, данные КА Sentinel-2 и векторные данные экспедиционных работ, в ходе которых выполнены измерения концентрации хлорофилла «а» располагаются поверх базового слоя предоставленного открытым картографическим проектом Open Street Maps.

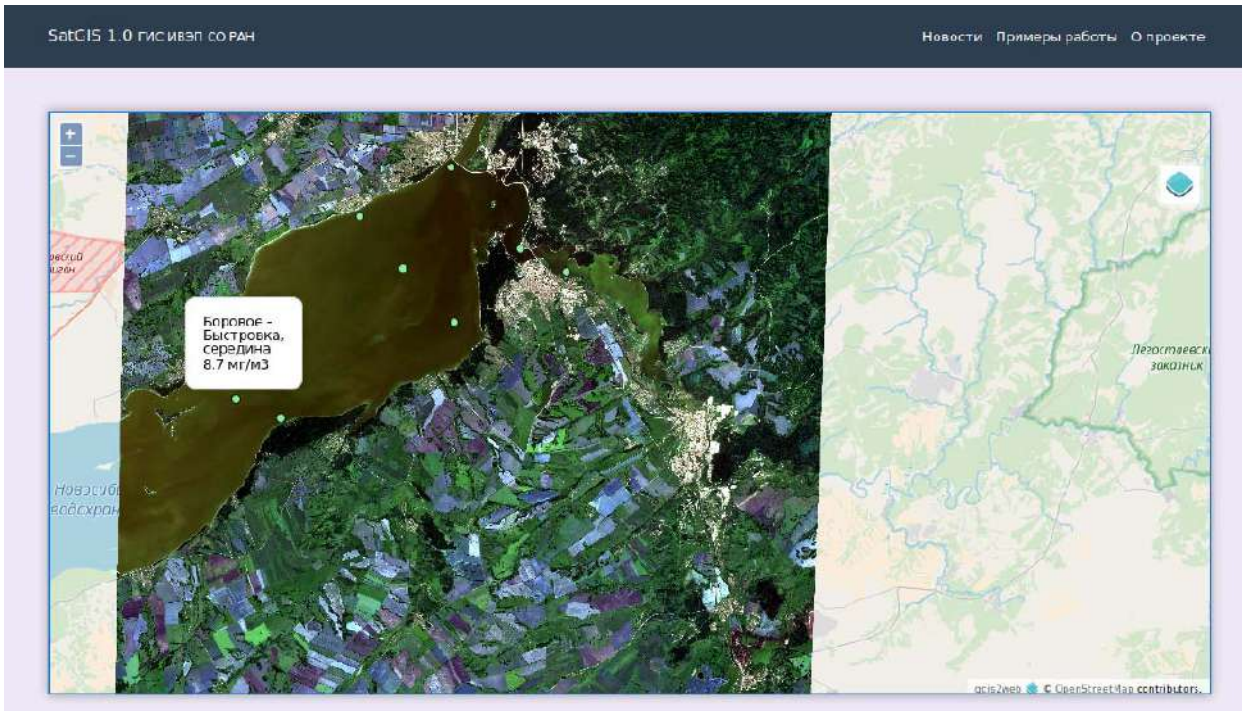


Рис. 2. Результат вычисления индекса NDCI по данным Sentinel-2, 29.08.2017. Точками показаны места экспедиционных измерений концентрации содержания хлорофилла «а» в поверхностном слое

При клике на элемент векторного слоя экспедиционных измерений, появляется всплывающее окно с измеренными значениями по этому объекту. Растровые слои web-карты визуализируются при помощи утилиты MapServer [11, 12].

В базе данных водные объекты могут содержать результаты обработки спутниковых и наземных измерений, рис. 3.

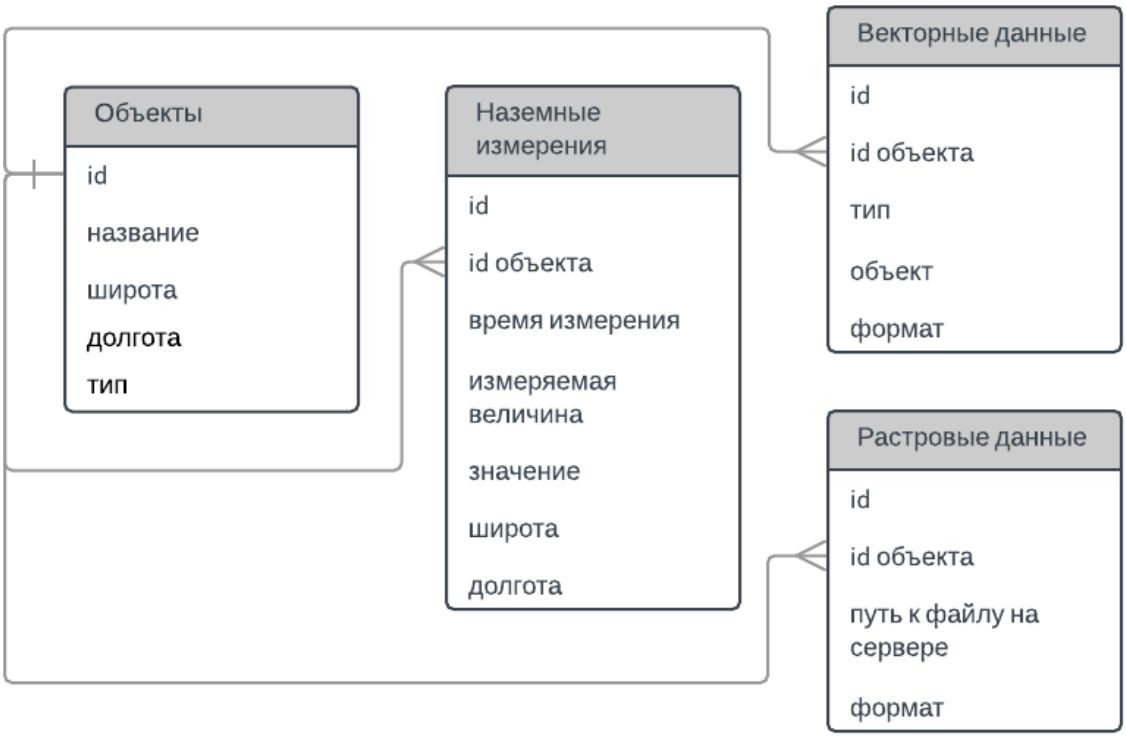


Рис. 3. Фрагмент схемы базы данных ГИС

Заключение

Предложенная геоинформационная система позволяет производить регулярный мониторинг параметров внутриконтинентальных водных объектов по данным оптической и радиолокационной спутниковой съемки с космических аппаратов Sentinel-2, Landsat-8 и Sentinel-1 и систем наземного мониторинга и результатов экспедиционных работ. Указанная ГИС может быть использована для решения широкого спектра прикладных и фундаментальных задач гидрологии внутриконтинентальных водных ресурсов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. A collaborative (web-GIS) framework based on empirical data collected from three case studies in Europe for risk management of hydro-meteorological hazards. // International Journal of Disaster Risk Reduction – 2016. Vol. 15. P. 10-23.

2. Европейское космическое агентство [Электронный ресурс]. – URL: http://www.esa.int/ESA (Дата обращения: 25.03.2018).

3. United States Geological Survey [Электронный ресурс]. – URL: https://www.usgs.gov (Дата обращения: 25.03.2018).

4. Донцов, А. А., Суторихин, И. А. ML Geo processing. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017617154, заявка 2017611248, дата рег. 27.05.2017. – М.: Роспатент, 2017.

5. Донцов, А. А., Суторихин, И. А. Специализированная геоинформационная система автоматизированного мониторинга рек и водоемов // Вычислительные технологии. – 2017. Том 22. № 5. С. 39-46.

6. Sen2Cor. [Электронный ресурс]. – URL: http://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor (Дата обращения: 25.03.2018).

7. ATCOR-4 User Guide. [Электронный ресурс]. – URL: http://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor (Дата обращения: 25.03.2018).

8. Toming, K., Kutser, T., et al. First Experiences in Mapping Lake Water Quality Parameters with Sentinel-2 MSI Imagery. Remote Sens. 2016, 8, 640.

9. Cretaux J.F. et al. SOLS: A lake database to monitor in the Near Real Time water level and storage variations from remote sensing data // Advances in space research. – 2011. Vol. 47. No. 9. P. 1497-1507.

10. Application of Sentinel 2 MSI Images to Retrieve Suspended Particulate Matter Concentrations in Poyang Lake. // Remote Sensing – 2017, 9(7), 761-780.

11. MapServer [Электронный ресурс]. – URL: http://mapserver.org (Дата обращения: 25.03.2018).

12. Nathan R.S., et al. A review of open source software solutions for developing water resources web applications // Environmental Modelling & Software – 2015. Vol. 67. P. 108-117.

© А. А. Донцов, И. А. Суторихин, 2018

УДК 528.72:004.93

КЛАССИФИКАЦИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ СООТНОШЕНИЙ ЯРКОСТЕЙ РАЗЛИЧНЫХ КАНАЛОВ

Марк Александрович Гурьянов
Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, студент, тел. (923)172-73-00, e-mail: mark-guryanov@yandex.ru

Сергей Михайлович Борзов
Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат технических наук, зав. лабораторией, (383)330-90-33, e-mail: borzov@iae.nsk.su

В работе предложены модификации метода спектрального угла, осуществляющие анализ разброса значений пикселей в пространствах признаков-углов. Эффективность данных модификаций исследована на двух тестовых гиперспектральных изображениях и сравнена с некоторыми распространёнными методами классификации путём сопоставления достигаемых ими точностей классификации.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, обработка гиперспектральных данных, спектральные признаки, угловые признаки.

HYPERSPECTRAL IMAGE CLASSIFICATION BASED ON THE BRIGHTNESS RATIO OF VARIOUS CHANNELS

Mark A. Guryanov
Novosibirsk State University, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630090, Russia, Student, phone: (923)172-73-00, e-mail: mark-guryanov@yandex.ru

Sergey M. Borzov
Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Head of Laboratory, phone: (383)330-90-33, e-mail: borzov@iae.nsk.su

In this paper, we propose modifications of Spectral Angle Mapper method, which analyse the scatter of pixel values in angular features spaces. The efficiency of these modifications is tested on two different hyperspectral images and compared with the efficiency of some common classification methods by matching the overall accuracies that are achieved by them.

Key words: remote sensing, hyperspectral image classification, spectral features, angular features.

Введение. В настоящее время развитие средств ДЗЗ характеризуется внедрением технологий гиперспектральной съёмки в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. При подобной съемке формируется насколько десятков или даже сотен изображений в узких спектральных зонах. С учетом того, что спектры поглощения различных веществ и материалов уникальны, такой подход позволяет определять тип и состояние растительности и почвенного покрова, идентифицировать материал наблюдаемых объектов. Высокое спектральное

разрешение дает в тысячи раз больше информации об объекте наблюдения, чем человеческое зрение.

В то же время перспективы применения и ценность гиперспектральных данных по сравнению с обычными мультиспектральными остаётся под вопросом, особенно если учесть затраты, необходимые на регистрирующее оборудование, а также передачу, обработку и хранение гигантского объема поступающей информации. Использование гиперспектральных данных оправдано в задачах, которые не могут быть решены средствами мультиспектральной съемки, в частности, при классификации подклассов поверхности, отличающихся не только типом материала, но и его состоянием. Но проблема заключается в том, что классические методы попиксельной классификации демонстрируют недостаточно большую точность при работе с гиперспектральными данными. В настоящий момент известны ряд подходов к увеличению точности классификации. Один из них основан на учете соотношений яркостей пикселей в различных спектральных каналах.

Целью работы является исследование эффективности методов классификации типов растительности, основанных на учете соотношений яркостей в различных каналах гиперспектральных изображений.

Методы попиксельной спектральной классификации. Спектральная классификация типов подстилающей поверхности по авиационным и спутниковым мульти- и гиперспектральным изображениям осуществляется на основе анализа диаграмм рассеяния значений пикселей в многомерном пространстве признаков, в качестве которых используются яркости в отдельных каналах. Процедура состоит из двух этапов: обучения и отнесения пикселей к наиболее близкому классу. На первом этапе в многомерном пространстве признаков на основе анализа обучающих выборок (наборов пикселей, для которых известны классы) определяются области (кластеры), в которых наиболее часто встречаются пиксели каждого из классов. На втором этапе анализируется близость классифицируемых пикселей к сформированным кластерам. Различные методы классификации отличаются между собой, в первую очередь, способом определения указанной близости.

Для попиксельной классификации широко применяются несколько методов. Кратко опишем их суть.

Метод минимального расстояния (Minimum Distance, MinDist) для оценивания близости классифицируемых пикселей к сформированным классам использует простейшую меру – обычное Евклидово расстояние в многомерном пространстве признаков.

Метод классификации по максимальному правдоподобию (Maximum Likelihood, ML) основан на определении плотности распределения пикселей обучающей выборки в выбранной системе признаков. При этом в качестве меры близости используется евклидово расстояние от классифицируемого пикселя до центра кластера, нормированное на среднеквадратичное отклонение класса в данном направлении. Отсюда следует, что при равных расстояниях от классифицируемого пикселя до двух кластеров результатом классификации определя-

ет именно разброс данных. В реализации программного пакета ENVI в этом методе предполагается нормальный закон распределения классов, причём для каждого класса используется своя матрица ковариации.

Метод опорных векторов (SVM) учитывает только ближайшие к разделяющей границе пиксели и формирует ее таким образом, чтобы максимально увеличить расстояние от границы до классифицируемого объекта. В случае, если построить поверхность, разделяющую пиксели двух классов, не удается, она формируется так, чтобы максимально уменьшить количество пересечений классов (на основе расчета суммы штрафов). В [5] показано, что именно метод SVM целесообразно использовать в условиях недостаточного объёма обучающих данных.

Общим недостатком перечисленных методов является то, что они основываются на абсолютных значениях яркостей пикселей в различных спектральных каналах, тогда как известно, что для классификации реальных изображений более информативными является соотношения яркостей различных каналов. Это свойство в частности широко используется при оценке состояния растительного покрова: нормализованный вегетационный индекс (NDVI), коротковолновый вегетационный индекс (SWVI), индекс стресса (MSI) и т.п. Для обработки мульти и гиперспектральных изображений с целью более полного учета различных соотношений поканальных яркостей предложен метод спектрального угла (Spectral Angle Mapper, SAM) [1][6].

Данный метод основан на определении кластера, для которого угол между вектором, направленным из начала координат к центру этого кластера, и вектором, направленным из начала координат к классифицируемому пикселю, минимален. Другими словами, если для каждого из K кластеров-классов обучающей выборки определить средний вектор как

$$\overline{\boldsymbol{x}}^{\boldsymbol{k}} = \frac{1}{S_k} * \sum_{j=1}^{S_k} \boldsymbol{x}_{\boldsymbol{j}}^{\boldsymbol{k}}$$

где $k = \overline{1, K}$, S_k – число пикселей -го класса в обучающей выборке, $\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{j}}^{\boldsymbol{k}}$ – j-й пиксель k-го класса в обучающей выборке, то классифицируемый пиксель $\boldsymbol{x}$ относят к классу

$$c = \underset{k}{\operatorname{argmin}} \left\{ \arccos\left(\frac{\langle \boldsymbol{x}, \overline{\boldsymbol{x}}^{k} \rangle}{\|\boldsymbol{x}\| * \|\overline{\boldsymbol{x}}^{k}\|} \right) \right\}$$

где $\langle *,* \rangle$ означает скалярное произведение векторов, $\|*\|$ – евклидова норма вектора.

Как ясно из описания SAM, он, подобно методу минимального расстояния, основывается лишь на близости классифицируемого пикселя к центрам кластеров, представляющих различные классы, и не учитывает на их распределении в многомерном пространстве признаков. Однако, как показано в [2], методы,

учитывающие распределение классов, как правило, демонстрируют более высокую точность классификации. По этой причине целесообразно рассмотреть и сравнить между собой различные способы учета параметров кластеров при реализации метода SAM.

Один из таких способов использует классификацию по показателю сопряжённости [3]. При его реализации вместо вычисления угла между классифицируемым пикселем и средним вектором класса вычисляется угол между вектором и подпространством, натянутым на множество векторов из этого класса. Однако, классификация по показателю сопряжённости, так же, как и метод SAM, при вычислении угла и отнесении рассматриваемого пикселя к одному из классов никак не учитывает плотность распределения данных в кластерах. Поэтому возникла идея модифицировать метод SAM таким образом, чтобы при соотнесении классифицируемого пикселя с кластерами классов обучающей выборки учитывались не только углы между пикселем и средними значениями кластеров (или подпространствами), но и разброс углов между классифицируемым пикселем и пикселями обучающей выборки каждого класса.

Вышеописанная идея осуществлялась путём перевода пикселей-векторов исходного изображения в некоторое пространство признаков-углов, после чего проводилась классификация полученных пикселей-углов методом ML. Рассмотрены два варианта перевода исходных пикселей в пространство углов:

1) преобразование пикселей-векторов в N-мерные сферические координаты с последующим отбрасыванием радиальной координаты, показывающей уровень яркости пикселя (N-1 признаков-углов), следующим образом:

$$\varphi_1 = \operatorname{arcctg}\frac{x_1}{\sqrt{{x_N}^2 + {x_{N-1}}^2 + \cdots + {x_2}^2}}$$

$$\varphi_2 = \operatorname{arcctg}\frac{x_2}{\sqrt{{x_N}^2 + {x_{N-1}}^2 + \cdots + {x_3}^2}}$$

...

$$\varphi_{N-2} = \operatorname{arcctg}\frac{x_{N-2}}{\sqrt{{x_N}^2 + {x_{N-1}}^2}}$$

$$\varphi_{N-1} = 2 * \operatorname{arcctg}\frac{x_{N-1} + \sqrt{{x_N}^2 + {x_{N-1}}^2}}{x_N}$$

2) вычисление углов между исходным пикселем-вектором и всеми координатными осями исходного N-мерного Евклидова пространства (N признаков-углов) следующим образом:

$$\varphi_i = \arccos\frac{x_i}{\sqrt{{x_1}^2 + {x_2}^2 + \cdots + {x_N}^2}} \qquad \forall\, i = \overline{1, N}$$

Исходные данные. Исследование эффективности вышеописанных алгоритмов классификации проводилось на двух изображениях.

Первое изображение является фрагментом снимка AVIRIS местности Indian Pines на северо-востоке штата Индиана (США). Данный фрагмент имеет размер 145x145 пикселей, пространственное разрешение ≈ 20 метров на пиксель, 220 спектральных каналов в диапазоне 0.4 – 2.5 мкм. Один из каналов этого изображения представлен на рис. 1 слева. Для этого фрагмента имеется карта классов, составленная по наземным наблюдениям и отмечающая 16 классов и неклассифицированную область, представлена на рис. 1 справа.

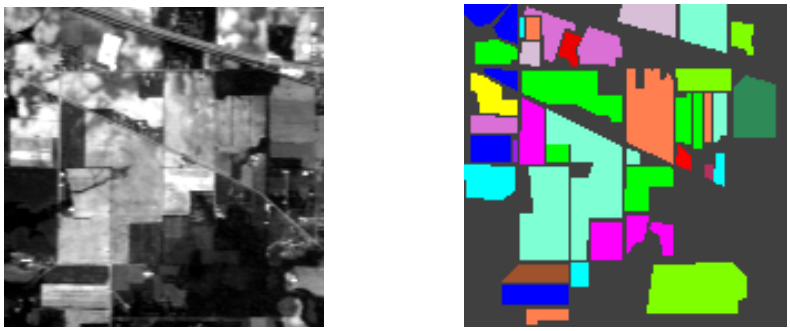


Рис. 1. Один из 220-ти каналов изображения Indian Pines (слева)
и его карта классов (справа)

Второе изображение также получено с помощью сенсора AVIRIS над Salinas Valley, штат Калифорния (США). Изображение имеет размер 217x512 пикселей и 224 спектральных канала. В отличие от первого изображения, это характеризуется высоким пространственным разрешением – 3.7 метров на пиксель. Один из каналов этого изображения представлен на рис. 2 слева. Карта классов для данного изображения также содержит 16 классов и неклассифицированную область, представлена на рис. 2 справа.

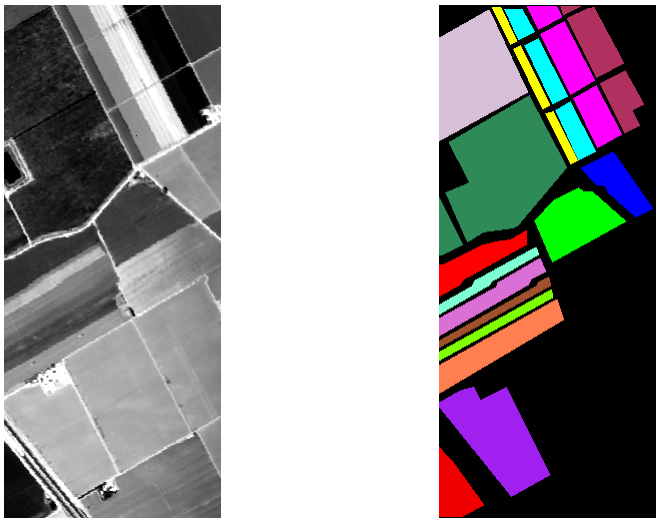


Рис. 2. Один из 224-х каналов изображения Salinas (слева)
и его карта классов (справа)

Экспериментальные результаты. В [4] показано, что для того, чтобы метод ML давал приемлемые результаты классификации пикселей в N-мерном мультиспектральном пространстве, необходимо, чтобы в обучающей выборке в каждом классе присутствовало не менее (N+1) пикселей (и это теоретический минимум). В случае первого тестового изображения, имеющего 220 каналов, в обучающую выборку были случайным образом взяты по 221-му пикселю из тех классов, размер которых позволял взять столько пикселей. Четыре класса из 16-ти имеют меньший объём, поэтому в первом тесте эти классы не рассматривались (т.е. не учитывались при подсчёте точности классификации). Во втором тестовом изображении (224-хканальном) все классы имеют достаточно большой объём, поэтому в обучающую выборку были включены по 450 случайных пикселей каждого из 16-ти классов. Тестовая выборка в обоих тестах состояла из всех пикселей каждого изображения, не вошедших в обучающую выборку.

Для оценки эффективности классификации сформированные картосхемы сопоставлялись с подспутниковыми данными. В качестве критерия используется результирующая точность классификации (overall accuracy), определяемая как процент верно классифицированных пикселей изображения, т.е. пикселей, отнесённых к тому классу, которым он помечен на карте классов.

В табл. 1 приведены результаты классификации тестовых изображений методами MinDist и SAM. В табл. 2 представлены результаты классификации изображения Indian Pines методами SVM (с линейным ядром) и ML, в исходном пространстве признаков и двух пространствах признаков-углов: в сферических координатах (n-dim. sphere) и в углах между исходными векторами и координатными осями (coord. angles). Здесь классификация проводилась как по полному набору признаков, так и по 20-ти наиболее информативным компонентам MNF-преобразования [2].

Таблица 1

Проценты точности классификации изображений методами MinDist и SAM

Метод классификации	Изображение	
	Indian Pines	Salinas
MinDist	41,13	75,78
SAM	43,68	76,33

Таблица 2

Проценты точности классификации изображения Indian Pines

Метод классификации	Пространство признаков	Количество признаков	
		все каналы	MNF, 20 компонент
SVM, линейное ядро	обычное	82,57	85,99
	n-dim. sphere	84,19	86,37
	coord. angles	86,38	86,85
ML	n-dim. sphere	41,84	88,2
	coord. angles	42,35	88,11

В табл. 3 приведены аналогичные результаты для изображения Salinas.

Таблица 3

Проценты точности классификации изображения Salinas

Метод классификации	Пространство признаков	Количество признаков	
		все каналы	MNF, 20 компонент
SVM, линейное ядро	обычное	92,27	92,77
	n-dim. sphere	91,36	92,24
	coord. angles	92,17	92,6
ML	n-dim. sphere	86,21	92,38
	coord. angles	86,44	93

Из приведённых таблиц видно, что хоть метод ML при классификации в пространстве углов не всегда приводит к улучшению точности по сравнению с обычной классификацией методом SAM, при дополнительном выделении в пространстве углов между исходными векторами и координатными осями (coord. angles) 20-ти наиболее информативных MNF-компонент и последующей классификации метод ML даёт гораздо лучшие результаты, чем обычный SAM, а также превосходит метод SVM с линейным ядром.

Заключение. Изучены существующие модификации метода SAM. Предложена модификация метода SAM, осуществляющая анализ разброса значений углов в многомерном пространстве признаков. Описанная модификация была реализована путём перевода исходного изображения в угловое пространство двумя способами: преобразованием пикселей-векторов в N-мерные сферические координаты с последующим отбрасыванием радиальной координаты и вычислением углов между исходным пикселем-вектором и всеми координатными осями исходного N-мерного Евклидова пространства. Исходные и полученные изображения классифицировались методами SAM, SVM и ML, после чего сравнивались результаты классификаций этими методами.

Показано, что классификация методом ML по 20-ти наиболее информативным компонентам MNF-преобразования признаков-углов между исходными векторами и координатными осями значительно превосходит по точности классификацию методом SAM в исходном пространстве признаков, а также оказывается лучше, чем классификация методом SVM с линейным ядром по тем же 20-ти признакам.

Исследование выполнено за счет средств субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания №АААА-А17-117052410034-6 в ИАиЭ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kruse, F. A., Lefkoff, A. B., Boardman, J. B., Heidebrecht, K. B., Shapiro, A. T., Barloon, P. J. and Goetz, A. F. H., The Spectral Image Processing System (SIPS) - Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data. Remote Sensing of Environment. 1993, 44, pp. 145–163.

2. Борзов С.М., Потатуркин А.О., Потатуркин О.И., Федотов А.М. Исследование эффективности классификации гиперспектральных спутниковых изображений природных и антропогенных территорий // Автометрия. 2016. 52, № 1. С.3-14.

3. В. А. Фурсов, С. А. Бибиков, О. А. Байда, Тематическая классификация гиперспектральных изображений по показателю сопряжённости, КО, 2014, том 38, выпуск 1, 154–158

4. Richards, J.A., Remote Sensing Digital Image Analysis. Springer-Verlag, Berlin, 2013, p. 494.

5. Борзов С.М., Потатуркин О.И. Классификация типов растительного покрова по гиперспектральным данным дистанционного зондирования земли // Вестник НГУ: информационные технологии. 2014. №.4. С.13-22.

6. Бучнев А. А., Пяткин В. П. Классификация с обучением гиперспектральных данных дистанционного зондирования земли // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 2. – С. 8–12.

© М. А. Гурьянов, С. М. Борзов, 2018

УДК 519.652

ОБ ОДНОМ ДЕТЕКТОРЕ УГЛОВЫХ ТОЧЕК НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Иван Гаврилович Казанцев
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. 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.sscc.ru

Рассматриваются масштабируемые маски выделения углов на изображениях, применяемые при обработке скользящим по изображению окном. В отличие от известных алгоритмов, матрицы маски больших размеров конструируются простым добавлением строк и столбцов меньших масок, оставляя подматрицы неизменными.

Ключевые слова: обработка изображений, скользящее окно, детектор углов.

ABOUT A CORNER DETECTOR ON IMAGES

Ivan G. Kazantsev
Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Associate Professor, Senior Researcher of Image Processing Laboratory, phone: (383)330-73-32, e-mail: kig@ooi.sscc.ru

We consider scalable masking of the detection of angles on the images used for processing by a sliding window on the image. Unlike well-known algorithms, the large-size matrices of masks are constructed by simply adding rows and columns of smaller masks leaving the submatrices unchanged.

Key words: image processing, sliding window, corner detector.

В работе рассматриваются новые маски выделения углов на изображениях для применения в традиционном методе скользящих фрагментов, или окон. Угловые точки являются важной локальной особенностью изображения и принадлежат к классу так называемых доминантных, характерных, или точек интереса и т.д. Они используются как опорные точки в работе со стереопарами, как признаки в распознавании лиц (например, уголки глаз), отпечатков пальцев и букв в текстах. Важные приложения включают также калибровку камер, отслеживание движущихся объектов в робототехнике и машинном зрении, согласование изображений и распознавание образов. Углы инвариантны к вращению и изменению условий освещения. Интерес к созданию помехоустойчивых и эффективных алгоритмов обнаружения углов существует на протяжении десятилетий и источниками создаваемых методов служат многие области науки, от цифровой обработки снимков и оптики до дифференциальной и интегральной геометрии. Недавние обзоры и статьи, посвященные отдельным методам, можно найти в библиографическом списке [1]-[10].

Угол в данной работе понимается эвристически и на естественном языке описывается как «точка, являющаяся пересечением двух достаточно гладких

кривых». Будем считать их близкими к прямым в небольшой окрестности угловой точки. В обработке изображений прямые, составляющие стороны угла, называются границами, поскольку визуально воспринимаются как доминирующие изменения яркости, характеризующие различие одной области снимка от другой. Поэтому один из распространенных подходов к поиску углов состоит в выделении границ и бинаризации, и последующих процедур обнаружения на бинарном аналоге изображения. В основе метода лежит исследование яркостей изображения в окрестности точки на равенство нулю второй производной и изменение знака в направлении нормали к границе. Известно множество градиентных масок, предложенных для этого метода. Отметим, что одномерный яркостной профиль изображения, нормальный к границе, может быть разнообразным, обычно выделяют такие виды: импульс, ступенька, пандус и крыша. Поскольку движение скользящего дифференцирующего окна и вычисление его свертки с локальным фрагментом изображений происходит автоматически, возникают проблемы, связанные с импульсным шумом, который проявляется в коротких ложных контурах длиной в единицы пикселов. Известны эффективные быстрые алгоритмы регуляризации дифференцирующей свертки, например, дополнительной сверткой с двумерной функцией Гаусса, параметры которой можно варьировать.

Вторая группа алгоритмов не производит выделение границ и бинаризацию, а работает непосредственно с полутоновым изображением, сканируя его элементы локальной окрестностью и вычисляя корреляцию фрагмента снимка с маской, программирующей модель угловой структуры. Предполагается, что внутренняя область угла приближенно представляет собой плато. Размер маски нечетный, при сканировании снимка ее центральный элемент помещается в исследуемый элемент изображения. Для каждого элемента изображения вычисляются величины корреляции маски при ее различных вращениях около центрального элемента. Максимальное абсолютное значение из них оставляется как мера наличия угла в точке. Как правило, маски сконструированы для выделения прямых углов. Практикой установлено, что маска прямых углов достаточно хорошо отслеживает углы несколько меньшие 90 градусов. Приведем два примера расчета масок традиционным методом.

Рассмотрим традиционную маску 5x5 элементов (рис. 1), предназначенную для выделения угла, раствор которого составляет 90 градусов. Значения ее 25 элементов рассчитываются следующим образом. На угол отводится 3x3=9 положительных элементов, на отрицательные остается 25-9=16 элементов. Чтобы маска была дифференцирующей, сумма ее элементов должна равняться нулю. Поэтому область угла заполняется девятью элементами со значениями +16, область фона – шестнадцатью элементами со значениями (-9). Имеем 9*(+16) + 16*(-9) = 0.

Рассмотрим маску 7x7 элементов для прямых углов (рис. 2). Значения ее 49 элементов рассчитываются аналогично. На угол отводится 4x4=16 положительных элементов, на отрицательные остается 49-16=33 элементов. Чтобы сумма ее элементов равнялась нулю, область угла заполняется шестнадцатью элементами

со значениями +33, область фона – тридцатью тремя элементами со значениями (-16). Имеем 16*(+33) + 33*(-16) = 0.

$$W = \begin{bmatrix} ? & & & \cdots & & & ? \\ & -9 & -9 & -9 & -9 & 16 & \\ & -9 & -9 & -9 & 16 & \vdots & \\ \vdots & \vdots & -9 & 16 & 16 & \vdots & \vdots \\ & -9 & -9 & -9 & 16 & \vdots & \\ & -9 & -9 & \cdots & -9 & 16 & \\ ? & & & \cdots & & & \end{bmatrix}$$

Рис. 1. Маска 5x5 выделения угла в 90 градусов

$$U = \begin{bmatrix} -16 & \cdots & -16 & 33 & \cdots & \cdots & 33 \\ & & \vdots & \vdots & & & \vdots \\ & & \vdots & 33 & & & \vdots \\ \vdots & & -16 & 33 & 33 & \cdots & 33 \\ & & -16 & -16 & \cdots & \cdots & -16 \\ & & & & & & \\ -16 & & & \cdots & & & -16 \end{bmatrix}$$

Рис. 2. Маска 7x7 выделения угла в 90 градусов

Рассмотренные детекторы обладают рядом недостатков. Они имеют высокий коэффициент усиления шума и не обладают свойствами, необходимыми для организации иерархических вычислений. Например, данные сканирования маской 5x5 проблематично использовать для вычислений с масками больших размеров. Вычисления с масками последовательно увеличивающихся размерностей дают информацию о линейных и площадных параметрах и моменте перехода угла в область фона. Поэтому были предприняты попытки конструирования масок, обладающих свойствами иерархичности, или масштабируемости. Такие маски получаются, если предположить, что граница между угловой структурой и фоном проходит внутри одного какого-то пиксела, а не между двумя соседними пикселами по их общей границе, как в матрицах W и U.

Тогда, вычисляя доли пиксела, занимаемые фоном и углом, для каждого элемента маски, и приводя их к целым значениям, используя общий знаменатель, можно получить матрицы S и T (рис. 3 и 4 соответственно).

$$S = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|}
\hline
-1 & & & \cdots & & -1 & 1 \\
\hline
 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 3 \\
\hline
 & -1 & -1 & -1 & 1 & 3 & 3 \\
\hline
\vdots & -1 & -1 & 0 & 3 & 3 & 3 \\
\hline
 & -1 & -1 & -1 & 1 & 3 & 3 \\
\hline
 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 3 \\
\hline
-1 & & & \cdots & & -1 & 1 \\
\hline
\end{array}$$

Рис. 3. Иерархическая маска 5x5 и 7x7 выделения угла
в 90 градусов

$$T = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|}
\hline
-1 & \cdots & -1 & 3 & 7 & 7 & 3 \\
\hline
 & -1 & -1 & 3 & 7 & 3 & -1 \\
\hline
 & & -1 & 3 & 3 & -1 & \\
\hline
\vdots & \vdots & -1 & 0 & -1 & \vdots & \vdots \\
\hline
 & & -1 & -1 & \cdots & & \\
\hline
 & -1 & & \cdots & & -1 & \\
\hline
-1 & & & \cdots & & & -1 \\
\hline
\end{array}$$

Рис. 4. Иерархическая маска 5x5 и 7x7 выделения угла
в 45 градусов

Легко видеть, что новые маски имеют значения на границе угла примерно в 2 раза меньшие, чем внутри него. Это придает такому ядру свертки свойства гладкости в оценке значения свертываемого фрагмента изображения на зашумленных границах угла. Маски обладают инвариантностью к вращению. Те же значения весов матрицы S присутствуют и в повернутых вариантах (Матрица Q, рис. 5).

$$Q = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|}
\hline
-1 & \cdots & -1 & & 1 & 3 & 3 & 3 \\
\hline
 & -1 & -1 & & 1 & 3 & 3 & 3 \\
\hline
 & & -1 & & 1 & 3 & 3 & 3 \\
\hline
\vdots & \vdots & -1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\
\hline
 & & -1 & -1 & \cdots & \cdots & -1 \\
\hline
 & -1 & \cdots & & \cdots & -1 & \vdots \\
\hline
-1 & & & \cdots & & & -1 \\
\hline
\end{array}$$

Рис. 5. Иерархическая маска 5x5 и 7x7 выделения угла в 90 градусов

Другое интересное свойство масок состоит в том, что периферийные, или обрамляющие элементы, производят также дифференцирующий эффект, как и всё ядро в целом. Периферийные элементы матрицы T (Рис. 4), например, в сумме равны нулю: 3+7+7+3+20*(-1) = 0. Это справедливо для всех подматриц.

В задаче достижения под-пиксельного разрешения, или при обработке снимков высокого разрешения, где угловые структуры имеют размеры в десятки пикселов, использование иерархических масштабируемых масок становится особенно эффективным. Полученные детекторы легко трансформируются для полутоновой обработки заменой центрального нулевого элемента на единицу.

Работа выполнена частично при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-07-00066).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.

2. Vineeta Vishwakarma, Jigyasha Maru. A Review Paper On Different Corner Detection Techniques // International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR). – 2016. – Vol. 5 (4). – P. 1058–1062.

3. Козловский А. Н. Алгоритм распознавания простых объектов на разновременных аэрокосмических изображениях по их форме // Шестой Белорусский космический конгресс. – Минск, – 2014. – Т. 1. – С. 323–326.

4. Козловский А. Н. Детектор угловых точек на основе аппроксимации контуров объектов изображения // Информатика. – 2010. – Т. 28, № 4. – С. 36–47.

5. Борисенко Д. И. Методы поиска угловых особенностей на изображениях // Молодой ученый. – 2011. – Т. 1, № 5. – С. 120–123.

6. Shen F., Wang H. Corner detection based on modified Hough transform // Pattern Recognition Letters. – 2002. – Vol. 32 (8). – P. 1039–1049.

7. Ambar Dutta, Avijit Kar, Chatterdji B. N. Corner Detection Algorithms for Digital Images in Last Three Decades // Institution of Electronics and Telecommunication Engineers (IETE) Technical Review. – 2008. – Vol. 25 (3). – P. 122–133.

8. Golightly I, Jones D. Corner Detection and Matching for Visual Tracking during Power Line Inspection // Image and Vision Computing. – 2003. – Vol. 21. – P. 827–840.

9. Gao Xinting, Farook Sattar, Ronda Venkateswarlu. Multiscale corner detection of gray level images based on loggabor wavelet transform // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2007. – Vol. 17 (7). – P. 868–875.

10. Rosten E., Porte R., Drummond T. Faster and Better: A Machine Learning Approach to Corner Detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2010. – Vol. 32 (1). – P. 105–119.

© И. Г. Казанцев, 2018

УДК 528.88

СПУТНИКОВЫЕ ДАННЫЕ В ПРОГНОЗЕ УРОЖАЙНОСТИ ПШЕНИЦЫ ДЛЯ АДМИНИСТРАТИВНЫХ РАЙОНОВ СИБИРИ

Сергей Митрофанович Кононенко
Сибирский институт управления – филиал Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ, 630102, Россия, г. Новосибирск, ул. Нижегородская, 6, кандидат физико-математических наук, доцент, тел. (383)210-17-15, e-mail: sergej_k@cn.ru

Таисия Васильевна Старостина
Сибирский научно-исследовательский гидрометеорологический институт, 630090, Россия, Новосибирск, ул. Советская, 30, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)222-25-30, e-mail: starostina@sibnigmi.ru

Разработаны модели прогноза урожайности яровой пшеницы для некоторых административных районов Сибирского региона. Используются стандартные приземные агрометеорологические данные и спутниковая информация о вегетационном индексе NDVI. Проверено качество полученных моделей и проведены авторские испытания на независимой выборке. Лучшие модели переданы для производственных испытаний и для практического использования.

Ключевые слова: вегетационный индекс, агрометеорологические наблюдения, модель прогноза урожайности, травы.

SATELLITE DATA IN FORECAST FOR WHEAT YIELD FOR ADMINISTRATIVE AREAS OF SIBERIA

Sergey M. Kononenko
Siberian Institute of Management – a branch of the Russian Academy of National Economy and Public Administration under the President of the Russian Federation, 6, Nizhegorodskaya St., Novosibirsk, 630102, Russia, Ph. D., Associate Professor, phone: (383)210-17-15, e-mail: sergej_k@cn.ru

Taisia V. Starostina
Siberian Research Hydrometeorological Institute, 30, Soviet St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Leading Researcher, phone: (383)222-25-30, e-mail: starostina@sibnigmi.ru

The models of spring wheat yield forecast for some administrative regions of the Siberian region have been developed. Standard surface agrometeorological data and satellite information on the vegetative index NDVI are used. The quality of the received models was checked and author's tests were carried out on an independent sample. The best models are transferred for production tests and for practical use.

Key words: vegetation index, agrometeorological observations, yield forecast model, grasses.

1. Введение, обзор

Прогноз урожайности яровой пшеницы рассмотрен для некоторых административных районов Сибирского региона. Модели используют данные стандартных агрометеорологических наблюдений (осадки, температуру и дефицит

насыщения воздуха) и новую информацию дистанционного зондирования. Вовремя предоставленный прогноз администрациям районов помогает уменьшить экономические потери, связанные с рисками природного характера. В данной работе делается оценка влияния различных факторов на точность прогноза.

Появление новых модулей спутникового зондирования поверхности земли с возможностью измерять и обрабатывать различные участки спектра привело к новым показателям вегетационного периода роста растений. К ним относится нормализованный относительный индекс растительности NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), показатель количества активной биомассы и самый распространенный среди подобных ему индексов. Он используется в различных работах, связанных с дистанционным зондированием поверхности земли и растительного покрова. Накопленная в Институте космических исследований РАН по всей территории России информация по этому индексу с реальной регулярностью 3-4 раза в неделю и разрешением 250 м архивирована с 2000г., дала начало новому направлению исследований.

В [1] дается краткий обзор теоретических и прикладных разработок этого направления, проводимых в Институте космических исследований РАН. Методом поиска аналогов временного хода вегетационных индексов разработаны автоматизированные мониторинг и анализ состояния посевов в любом регионе России, оперативная и объективная оценка последствий воздействия на посевы различных факторов. В работе описана технология построения для любого административного района карт отклонений вегетационного индекса от среднемноголетних значений. Графики временной изменчивости значений индекса можно строить в указанных точках земной поверхности. Мониторинг состояния посевов даётся для субъектов РФ.

В [2] вегетационный индекс используется вместе со стандартными данными агрометеорологических наблюдений для построения регрессионных моделей и делается ежедекадный расчет урожайность озимых культур по территории субъектов Северо-Кавказского, Приволжского и Центрально-Черноземного регионов. По оценке авторов ошибка прогноза не превышала 10 % , что даёт возможность использовать данную технологию в оперативном обеспечении сельского хозяйства УГМС Росгидромета.

В работе [3] авторы заменили в своей динамической модели прогноза урожайности рассчитанную относительную площадь листьев посевов на значения измеренного вегетационного индекса NDVI, получив усовершенствованную модель, с помощью которой сделали следующие выводы – величина NDVI достаточно адекватно отражает ход фотосинтеза всех сельскохозяйственных культур; использование NDVI в блоке расчета фотосинтеза в действующей модели прогнозирования урожайности яровой пшеницы дало положительные результаты; замена теоретической кривой сезонного хода фотосинтеза на измеренные значения вегетационного индекса, привела к повышению оправдываемости в годы с экстремальными условиями. Полученные результаты дают основание утверждать, что вегетационный индекс NDVI может быть использован

как во вновь создаваемых динамических моделях прогнозирования урожайности, так и в действующих моделях для их усовершенствования.

В качестве примера использования вегетационного индекса NDVI в ЕС можно привести материалы регулярного бюллетеня [4], издающегося по проекту Европейской комиссии MARS (Monitoring Agricultural ResourceS), в котором регулярно публикуются точные и своевременные прогнозы ожидаемой урожайности сельскохозяйственных культур по территории союза и других стратегических регионов мира. Технология системы AGRI4CAST, оперативно работающая с 1992г., в состоянии контролировать весь вегетационный период таких культур как, зерновые, масляничные, белковые, сахарной свеклы, картофеля, рис, пастбища, способна реагировать на эффекты краткосрочного метеорологического воздействия. Эффективность системы обеспечивают данные дистанционного зондирования и метеорологических наблюдений, агрометеорологическое моделирование и статистический анализ.

2. Описание данных, моделей и терминов

Модели включают данные стандартных агрометеорологических наблюдений (осадки, температуру и дефицит насыщения воздуха) и спутниковые данные дистанционного зондирования (вегетационный индекс NDVI). Данные по урожайности взяты из статистических сборников субъектов региона. Данные NDVI=(nir-red)/(nir+red), где nir - отражение в ближней инфракрасной области спектра (диапазон волн 0,7-1,0 мкм), red - отражение в красной области спектра (диапазон волн 0,6-0,7 мкм) из архива ИКИ РАН. Спектральные каналы выбирались из условия наименьшего отражения растительности в красном диапазоне спектра и, наоборот, самое высокое отражение по сравнению с другими природными объектами в ближнем ИК-диапазоне спектра. Падение спектральной кривой в красном диапазоне и резкий подъем в ближнем ИК-диапазоне характерно для растительности в хорошем состоянии. Фотосинтез высших растений приводит к максимуму отражения листьями в инфракрасной области и к максимальному поглощению хлорофиллом солнечной радиации в красной области спектра. Фазы вегетации яровых зерновых культур влияют на величину вегетационного индекса. Фазы кущения и выхода в трубку на 23 неделе делают максимальной скорость роста кривой функции вегетационного индекса. На 24 неделю приходится нижний узел соломины, на 27 неделю фазы колошения и цветения. Далее, 29 неделя, идут фазы молочной спелости, 32 неделя, восковой спелости и, 32 неделя, полной спелости и, наконец, на 37 неделе уборка урожая. На 29 неделю приходится максимум среднего многолетнего хода кривой ndvi. Максимальное поступление азота в растения яровой пшеницы (50 – 60 %), происходит между фазами кущения и колошения. В результате перед фазой колошения накапливается 70 – 80 % азота и формируют 50 – 60 % сухой массы растения. В этот период происходит формирование генеративных клеток, дифференциация органов колоса, в частности цветков в колосе. Потребление воды по фазам развития яровой пшеницы распределяется следующим образом. Макси-

мальное потребление воды (50-60 %) за весь вегетационный период происходит в фазе выхода растений в трубку и колошения, в фазе молочной спелости зерна 20-30 % и восковой спелости 3-5 %. При построении моделей прогноза урожайности фазы вегетации определяют выбор агрометеорологических параметров и интервалов их временного суммирования. Параметры регрессионных моделей находились с помощью метода наименьших квадратов, среда программирования MATLAB. Как и в [5] оценка значимости коэффициента корреляции для парных моделей и в многомерном случае проводилась с помощью критерия Стьюдента, выборочное значение t_R^* которого, рассчитывались по формулам и сравнивались с $t_{кр}$ (α; ν) из таблицы, где уровень значимости α принимался равным 5%, а число степеней свободы ν=N-m-1, где N=12 длина выборки, m число независимых переменных.

При оценке качества полученных моделей проверялось выполнение следующих условий:

1) Близость коэффициента детерминации r^2 к значению 0.70, показывающую какой процент дисперсии исходного ряда урожайности y = $\{y_1,\ldots,y_N\}$ описывает модель.

2) По критерию Стьюдента проверялась значимость коэффициентов регрессии. Критическое значение $t_{кр}$(α, ν) определяется по уровню значимости α (принималось равным 5%) и числу степеней свободы ν = N-2, где N - длина ряда.

3) Адекватность регрессионной модели исходным данным проверялась с помощью критерия Фишера F.

4) Неравенство $\sigma_y > \sigma_\varepsilon$, где σ_ε- стандартное отклонение ошибок, σ_y- стандартное отклонение исходного ряда . Авторские испытания моделей проводились в соответствии с [6] на двухлетней контрольной выборке. По результатам этих проверок принималось решение о передаче построенных моделей на производственные испытания.

3. Построение моделей, расчеты

При построении моделей для одного из районов в качестве независимых параметров среди агрометеорологических данных выберем температуру (временной интервал I - 20VII, коэффициент корреляции r=-0,65) и дефицит насыщения воздуха (временной интервал 21.VI - 20.VII, коэффициент корреляции r = -0,75). К ним добавим данные по вегетационному индексу ndvi.

Вначале построим однофакторную модель (независимый признак температура) и оценим ее качество. Проверку значимости r проведем с помощью критерия Стьюдента, выборочное значение t* которого, рассчитаем по формулам и сравним с $t_{кр}$(α, ν), где уровень значимости α принимается равным 5 %, а число степеней свободы ν = N-2, где N длина выборки. Так как

$$5.63 = t^* > t_{кр} = 2.20,$$

то коэффициент корреляции r значим, т.е. между двумя переменными существует статистически значимая обратная связь. Расчет коэффициентов модели дает следующую зависимость урожайности от дефицита насыщения

$$y = - 1.09x_3 + 24.37.$$

Коэффициент детерминации модели равен 0.56, что указывает на недостаточность числа независимых переменных для описания ряда. При этом статистическую значимость или адекватность построенной модели подтверждает величина критерия Фишера ($20.2 = F > F_{кр} = 4.8$) и его уровень значимости 0.01 значительно меньший задаваемого при расчете коэффициентов модели 0.05. Как видим статистика Фишера получилась намного хуже чем для модели предыдущего района и это должно повлиять на среднюю относительную ошибку конечной многофакторной модели.

Далее усложним модель включением еще одного параметра. Расчет коэффициентов модели дает следующую зависимость урожайности от температуры и дефицита насыщения воздуха

$$y = - 0.50x_2 - 0.83x_3 + 31.79.$$

Коэффициент детерминации модели равен 0.59, что ниже требуемой границей 0.70 и указывает на недостаточность числа независимых переменных. При этом статистическую значимость или адекватность построенной модели подтверждает величина критерия Фишера ($7.2 = F > F_{кр} = 4.1$) и его уровень значимости 0.01 значительно меньший задаваемого при расчете коэффициентов модели 0.05. Как видим, включение еще одного параметра не улучшило статистику Фишера, она осталась такой же низкой как и в модели с одним параметром. Далее включим в модель еще один параметр интегральный индекс ndvi. В этом случае зависимость урожайности от трех параметров температуры, дефицита и индекса ndvi будет следующей

$$y = - 0.62x_2 + 0.19x_3 + 18.3x_4 - 10.$$

Включение спутниковых данных по вегетационному индексу значительно повысило качество модели. Рассмотрим подробнее изменения. Коэффициент детерминации вырос до 0.82, а это доля дисперсии зависимой переменной, объясняемая рассматриваемой моделью зависимости, то есть объясняющими переменными. Статистическую значимость или адекватность построенной модели подтверждает величина критерия Фишера ($18.6 = F > F_{кр} = 3.9$), причем уровень значимости в рассчитываемой статистике Фишера равен 0.0003. Статистика модели от трех независимых переменных стала значительно лучше по сравнению с моделью от двух переменных.

Проверим модель на двухлетней контрольной выборке. Прогноз $\{y_i^f, x_i\}$ считается оправдавшимся, если его ошибка $|y_i^f - y_i^c|$ с контрольной выборкой

$\{y_i^c, x_i\}$ меньше 0,67σ при заблаговременности не более двух месяцев (см. формулы [6]). Имеем для первого (2012г.) и второго (2013г.) года соответственно

$$|y_i^f - y_i^c| = |7.38 - 7.9| = 0.52 < 0.67\sigma = 0.67*3.5 = 2.3$$

$$|y_i^f - y_i^c| = |14.98 - 16.2| = 1.22 < 0.67\sigma = 0.67*3.2 = 2.2.$$

Тогда оправдываемость метода γ (см. формулы [6]) для двух контрольных годов равна 100 %. И средняя относительная ошибка оправдавшихся прогнозов $\bar{P}$, считаемая по формулам [6] равна

$$\bar{P} = \frac{1}{2}\left(\frac{0.52}{13.6}100 + \frac{1.22}{13.6}100\right) = 6.4\ \%.$$

Средняя относительная ошибка возросла на порядок (0.6% и 6.4%) по сравнению с результатом. Как видим, по уровню оценок статистик Фишера для одно и дух параметрических моделей можно, по крайней мере качественно, давать оценку относительной ошибки трехпараметрической модели. Для сравнения приведем еще два прогноза. Инерционный прогноз дает на эти два года 14.4 ц/га и 7.9 ц/га, не оправдывается и в результате получается средняя относительная ошибка 54 %. Такая ошибка объяснима с учетом аномального по агроклиматическим параметрам 2012 года. Прогноз по тренду (или климатический прогноз)

$$y = - 0.4143x + 846.333$$

дает на эти два года 12.8 ц/га и 12.3 ц/га, также не оправдывается и в результате получается средняя относительная ошибка 36 %.

Для другого района в качестве независимых параметров модели среди агрометеорологических данных выберем осадки (временной интервал I - 20VII, коэффициент корреляции r=0,78) и дефицит насыщения (временной интервал 11-20VII, коэффициент корреляции r=-0,61). К ним добавим данные по вегетационному индексу ndvi.

Вначале построим однофакторную модель (независимый признак осадки) и оценим ее качество. Проверку значимости r проведем с помощью критерия Стьюдента, выборочное значение t* которого, рассчитаем по формулам и сравним с $t_{кр}(\alpha, \nu)$, где уровень значимости α принимается равным 5 %, а число степеней свободы $\nu = N-2$, где N длина выборки. Так как

$$6.7 = t^* > t_{кр} = 2.20,$$

то коэффициент корреляции r значим, т.е. между двумя переменными существует статистически значимая прямая связь. Расчет коэффициентов модели дает следующую зависимость урожайности от дефицита насыщения

$$y = 0.10x_2 + 8.32.$$

Коэффициент детерминации модели равен 0.61, что указывает на недостаточность числа независимых переменных для описания ряда. При этом статистическую значимость или адекватность построенной модели подтверждает величина критерия Фишера (17.5 = F > $F_{кр}$ = 4.8) и его уровень значимости 0.001 значительно меньший задаваемого при расчете коэффициентов модели 0.05.

Далее усложним модель включением еще одного параметра. Расчет коэффициентов модели дает следующую зависимость урожайности от осадков и дефицита насыщения

$$y = 0.08x_2 - 0.21x_3 + 10.98.$$

Коэффициент детерминации модели равен 0.66, что ниже требуемой границей 0.70 и указывает на недостаточность числа независимых переменных. При этом статистическую значимость или адекватность построенной модели подтверждает величина критерия Фишера (9.6 = F > $F_{кр}$ = 4.1) и его уровень значимости 0.005 значительно меньший задаваемого при расчете коэффициентов модели 0.05. Далее включим в модель еще один параметр интегральный индекс ndvi. В этом случае зависимость урожайности от трех параметров температуры, дефицита насыщения и индекса ndvi будет следующей

$$y = 0.02x_2 - 0.045x_3 + 16.15x_4 - 19.05.$$

Включение спутниковых данных по вегетационному индексу значительно повысило качество модели. Рассмотрим подробнее изменения. Коэффициент детерминации вырос до 0.82, а это доля дисперсии зависимой переменной, объясняемая рассматриваемой моделью зависимости, то есть объясняющими переменными. Статистическую значимость или адекватность построенной модели подтверждает величина критерия Фишера (13.9 = F > $F_{кр}$= 3.9), причем уровень значимости в рассчитываемой статистике Фишера равен 0.001.

Проверим модель на двухлетней контрольной выборке. Прогноз $\{y_i^f, x_i\}$ считается оправдавшимся, если его ошибка $|y_i^f - y_i^c|$ с контрольной выборкой $\{y_i^c, x_i\}$ меньше 0,67σ при заблаговременности не более двух месяцев (см. формулы [13]). Имеем для первого (2012 года) и второго (2013года) года соответственно

$$|y_i^f - y_i^c| = |6.76 - 7.1| = 0.34 < 0.67\sigma = 0.67 * 3.7 = 2.5$$

$$|y_i^f - y_i^c| = |15.85 - 17.5| = 1.64 < 0.67\sigma = 0.67 * 3.7 = 2.5.$$

Тогда оправдываемость метода γ (см. формулы [6]) для двух контрольных годов равна 100 %. И средняя относительная ошибка оправдавшихся прогнозов $\bar{P}$, считаемая по формулам [6] равна

$$\bar{P} = \frac{1}{2}\left(\frac{0.34}{14.4}100 + \frac{1.64}{14.4}100\right) = 6.9\ \%.$$

Для сравнения приведем еще два прогноза. Инерционный прогноз дает на эти два года 16.4 ц/га и 7.1 ц/га, не оправдывается и в результате получается средняя относительная ошибка 68 %. Такая ошибка объяснима с учетом аномального по агроклиматическим параметрам 2012 года. Прогноз по тренду (или климатический прогноз)

$$y = 0.0995x - 186.143$$

дает на эти два года 14.0 ц/га и 14.15 ц/га, также не оправдывается.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савин И.Ю., Лупян Е.А., Барталев С.А. Оперативный спутниковый мониторинг состояния посевов сельскохозяйственных культур в России. Геоматика, 2011, №2, стр.69-76.

2. Клещенко А.Д., Савицкая О.В. Оценка пространственно-временного распределения урожайности зерновых культур и стандартизованного индекса осадков (SPI) по спутниковой и наземной информации Тру-ды ГГО – СПб.: ООО «Д'АРТ», 2014. – Вып. 571. – С. 147 – 161.

3. Клещенко А.Д., Лебедева В.М., Найдина Т.А., Савицкая О.В. Использование спутниковой информации Modis в оперативной агрометеорологии, Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2015. − Т.12. – С. 143 – 154.

4. SPOT Vegetation satellite analysis, MARS Bulletin., 2011, Vol.19, No. 22 (Web Version).

5. Кононенко С.М., Старостина Т.В. Совместное использование спутниковой и наземной метеорологической информации для мониторинга посевов сельскохозяйственных культур // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 2. – С. 28–33.

6. РД 52.27.284-91 Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов.- М., Гидрометеоиздат, 1991. – С. 98–107.

© С. М. Кононенко, Т. В. Старостина, 2018

УДК 528.854

МНОГОЛЕТНИЙ МОНИТОРИНГ УСЫХАНИЯ ОЗЕРА УБИНСКОЕ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ LANDSAT 4,5,7,8 С ПОМОЩЬЮ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ СЕГМЕНТАЦИИ

Сергей Александрович Рылов
Институт вычислительных технологий СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат технических наук, научный сотрудник, e-mail: RylovS@mail.ru

В работе рассматривается изменение площади акватории озера Убинское с 1989 по 2017 год по спутниковым данным Landsat 4,5,7,8. Для автоматизированного определения площади водного зеркала озера использовался алгоритм выделения водной поверхности на мультиспектральных спутниковых снимках ECCA-Water. Для обработки изображений с пропусками данных со спутника Landsat-7 был применен специальный алгоритм для восстановления границ рассматриваемого водного объекта. Приводятся и обсуждаются полученные результаты определения площади водного зеркала озера Убинское. За рассматриваемый период она сократилась в 2,5 раза.

Ключевые слова: мониторинг, Убинское, озеро, площадь акватории, усыхание, спутниковая съемка, Landsat, полосы.

LONG-TERM MONITORING OF LAKE UBINSKOYE BY LANDSAT 4,5,7,8 SATELLITE DATA WITH USE OF SPECIALIZED SEGMENTATION ALGORITHMS

Sergey A. Rylov
Institute of Computational Technologies SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Researcher, e-mail: RylovS@mail.ru

The paper considers the Lake Ubinskoe water area change from 1989 to 2017 according to Landsat 4,5,7,8 satellite data. For the automated water extraction on the multispectral satellite images, ECCA-Water algorithm was applied. For the Landsat-7 satellite images containing missing data, a special algorithm was used to restore the boundaries of the water body. The obtained results of the determination of the area of the Lake Ubinskoe are given and discussed. During the considered period its area reduced by 2.5 times.

Key words: monitoring, Ubinskoye, lake, water surface area, drying, satellite images, Landsat, stripes, gap filling.

Природные водоемы имеют огромное значение для всех видов хозяйственной деятельности: они служат источником водоснабжения, широко используются для нужд сельского хозяйства, а также в качестве рыбных и охотничьих угодий [1, 2]. Характерной чертой для Новосибирской области, расположенной в зоне неустойчивого увлажнения, является значительное изменение площадей озер как в течение года, так и в многолетнем разрезе [3]. Однако в настоящее время можно отметить существенный недостаток информации о пространственно-временной динамике этих объектов [4]. В связи с этим наблюдаются определенные расхождения между данными, опубликованными в водном реестре

и других доступных источниках, по сравнению с оценками, полученными с помощью актуальных спутниковых снимков [3]. Обмеление озер может приводить к негативным последствиям для рыбного и сельского хозяйства, экологической обстановки и социально-экономической ситуации в регионе. Например, значительное снижение уровней озер Убинское и Ханата за последние десятилетия привело к массовой гибели рыбы [2, 5].

Озеро Убинское – крупное мелководное пресное озеро, которое считается вторым по величине в Новосибирской области. Для его гидрологического режима характерны многолетние циклические колебания уровня воды с амплитудой до 2 м. Преобладающие глубины в период повышенной водности составляют 2,0-2,8 м. В это время площадь озера увеличивается до 440 км^2. В маловодные периоды средняя глубина озера снижается до 0,6 м, а наибольшая – до 1 м [6]. В настоящее время озеро находится в маловодной стадии. Котловина Убинского озера имеет пологие заболоченные склоны. А побережье покрыто зарослями тростника обыкновенного, камыша озерного, разными видами осок и ив. В открытой части озера на дне расстилаются луга гребенчатого рдеста [7].

Получение актуальной и достоверной информации об изменениях площадей крупных озер возможно только с использованием спутниковых данных [1, 4, 8, 9]. Благодаря своей доступности, регулярности и высокому качеству съемки для мониторинга площадей водного зеркала озер широко используются данные со спутников серии Landsat (№ 4-8) [9-11]. Пространственное разрешение получаемых мультиспектральных изображений составляет 30 м, что позволяет проводить наблюдение за озерами площадью десятки и сотни км^2.

Однако у спутниковой съемки Landsat-7 существует проблема с пропусками 22 % данных в виде полос по полю изображения, которая вызвана вышедшим из строя 31 мая 2003 года прибором SLC (Scan Line Corrector). Разработанные в настоящее время методы по восстановлению этих пропусков используют интерполяцию и данные других съемок [12]. Но эти подходы плохо подходят для неоднородных сцен и неприменимы в случаях, когда происходят существенные изменения границ объектов между съемками [13], таких как например изменения границ водоемов. При этом существует острая необходимость использования данных Landsat-7, т.к. нередко они оказываются единственными доступными данными съемки, особенно в период до 2013 года, когда был запущен Landsat-8.

В данной работе рассматривается задача мониторинга площади акватории озера Убинское с 1989 по 2017 год по спутниковым данным Landsat 4,5,7,8. Для автоматизированного определения площади озера использовался алгоритм выделения водной поверхности ECCA-Water [14]. Для обработки изображений с пропусками данных со спутника Landsat-7 был применен специальный алгоритм для восстановления границ рассматриваемого водного объекта. Приводятся полученные результаты определения площади озера Убинское.

Данные и методы. Для проведения мониторинга озера Убинское было взято 29 спутниковых снимков с 1989 по 2017 год: 1 – Landsat-4; 11 – Landsat-5; 6 – Landsat-8; 9 – Landsat-7 (из которых 4 содержат пропуски данных);

а также 2 дополнительных снимка Sentinel-2 за 2016 и 2017 года. Данные со спутников Landsat в большинстве случаев обеспечили 1-2 безоблачных снимка в год за летний период. По возможности выбирались снимки в районе августа месяца.

На первом этапе обработки осуществлялось выделение водной поверхности на мультиспектральных изображениях с помощью алгоритма ECCA-Water [14]. Этот алгоритм разработан на основе непараметрического быстродействующего алгоритма кластеризации ECCA [15] для автоматического выделения водной поверхности по данным с космических аппаратов Ресурс-П и Канопус-В. Он также хорошо показал себя по сравнению с другими методами автоматического выделения водной поверхности при выделении озер по данным Sentinel-2 [16].

Полученные результаты проверялись визуально и в случае наличия ошибок (которые были связаны с мелкими облаками, высокой мутностью или сильными зарослями тростников и водорослей) корректировались с помощью промежуточных результатов кластеризации или вручную. Необходимо отметить, что густые прибрежные заросли, не отличимые от заболоченных склонов, к акватории озера не относились.

После выделения водной поверхности, она разделялась на множество пространственно-связных областей, из которых по заданным координатам выбиралась область, соответствующая анализируемому водоему. После чего рассчитывалась его площадь.

В тоже время для изображений Landsat-7 с пропусками данных был применен специально созданный алгоритм для восстановления границ рассматриваемого водного объекта. Сначала формируется картосхема, содержащая 3 класса: вода, суша и полосы пропусков данных. Предполагается, что ширина полос значительно меньше размеров рассматриваемого объекта. Целью алгоритма является установление соединений между водными сегментами (и их концами), разделенными полосами. Задача является достаточно тривиальной для случая объектов выпуклой формы. Однако на практике это редко выполняется и необходимо рассматривать случаи, когда множество сегментов с одной стороны полосы может быть связана с множеством сегментов с другой стороны, образуя «острова» или «мосты». Соединение концов сегментов осуществляется при их последовательном рассмотрении, решение об изменении соединений принимается исходя из минимизации общей длины соединений (рис. 1). Результаты применения алгоритма восстановления границ к 6 случайным изображениям Убинского озера с искусственным нанесением полос показали, что точность определения площади озера на поврежденных снимках находится в пределах 0,2 %.

Результаты определения площади акватории озера Убинское. В таблице и на графике (рис. 2) представлены полученные результаты определения площади водного зеркала озера Убинское с 1989 по 2017 год. Пунктирной линией на графике показана линия тренда.

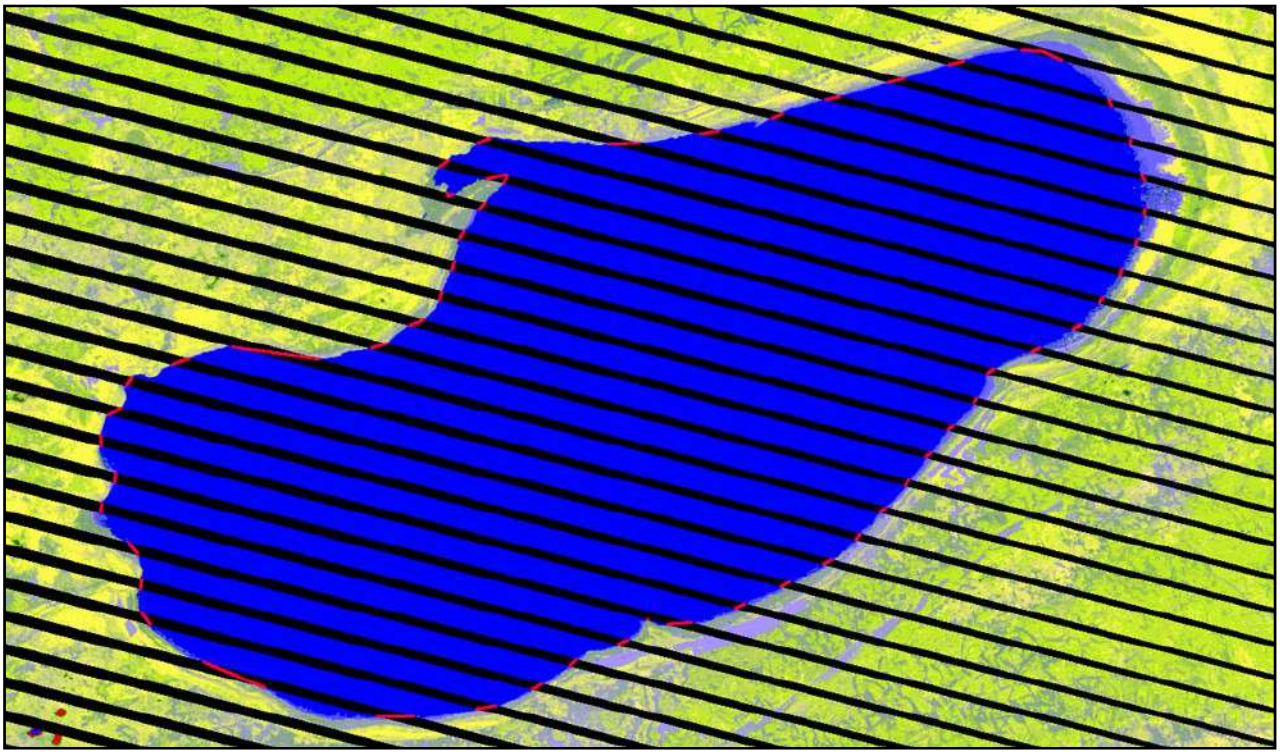


Рис. 1. Результат работы алгоритма восстановления границ водоема на спутниковом изображении с пропусками данных Landsat-7 за 26.08.2003

Изменение площади акватории озера Убинское

Сенсор	Дата съемки	Площадь км^2	Сенсор	Дата съемки	Площадь км^2	Сенсор	Дата съемки	Площадь км^2
L4	04.09.89	426,3	L7	19.05.02	397,2	L7	22.06.12	202,7
L5	30.08.90	425,4	L7	26.08.03	377,7	L8	28.07.13	183
L5	16.10.93	416,9	L7	28.08.04	369,2	L8	14.09.13	163,3
L5	12.05.94	417	L7	16.09.05	320,5	L8	29.06.14	163,8
L5	23.05.98	410,8	L5	26.08.06	251	L8	31.05.15	164
L5	12.09.98	407,7	L5	29.08.07	252,8	S2	23.06.16	169,4
L7	16.09.99	396,8	L5	19.06.08	271,8	L8	27.07.16	168
L7	14.06.00	408,7	L5	08.07.09	218,8	L8	27.05.17	171,7
L7	01.08.00	394,5	L5	18.06.10	232,2	S2	03.09.17	165,1
L7	04.08.01	375,7	L5	15.08.11	224,2			

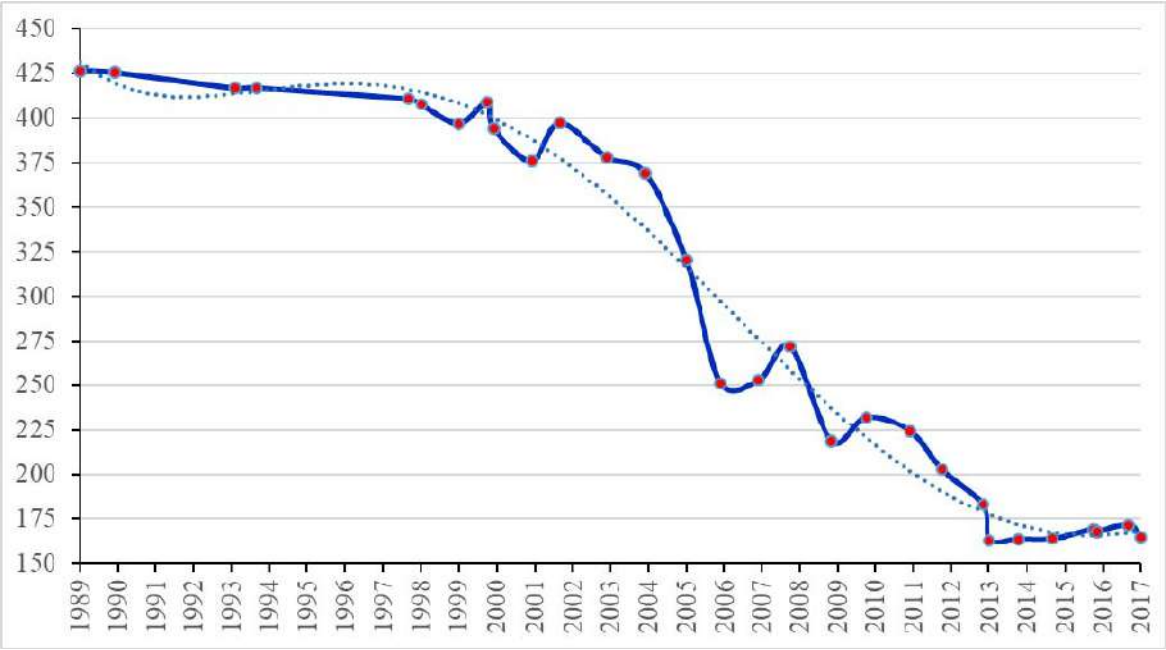


Рис. 2. График изменения площади акватории озера Убинское
по данным спутниковой съемки (км^2)

Результаты показывают, что за рассмотренный период площадь акватории озера сократилась в 2,5 раза. Особенно резкое усыхание происходило с 2000 по 2013 год. Однако с 2013 года площадь стабилизировалась на минимальном уровне ~ 165 км^2 и тренд на понижение остановился.

Наблюдаемые локальные колебания объясняются внутригодовыми изменениями площади озера. Весеннее таяние снегов обеспечивает повышенный уровень озера в мае и начале июня. Если исключить результаты за май-июнь, то график будет практически монотонным.

Рис. 3. Спутниковые изображения Убинского озера
с выделенным контуром водного зеркала за 1989 г., 2008 г. и 2017 г.

Заключение. В работе представлены результаты оценки изменения площади акватории озера Убинское с 1989 по 2017 год по спутниковым данным Landsat 4,5,7,8 с помощью специализированных алгоритмов для выделения водной

поверхности и устранения пропусков в данных. За рассматриваемый период площадь озера сократилась в 2,5 раза с 425 до 165 км^2. При этом с 2013 года процесс сокращения остановился и площадь стабилизировалась на минимальном уровне.

Таким образом, на данный момент Убинское озеро уже не является вторым по величине в Новосибирской области, уступив эту позицию озеру Сартлан.

Результаты также показали значительную внутригодовую динамику изменения площади Убинского озера. В дальнейшем получение значительного числа внутригодовых наблюдений благодаря использованию дополнительных данных с двух новых спутников Sentinel-2 позволит провести анализ внутригодовых изменений площади водного зеркала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дубовик Д. С., Якутин М. В. Использование данных дистанционного зондирования Земли в мониторинге малых озер Убсунурской котловины (Тыва) // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 2. – С. 74–78.

2. Рязанова Н. Е., Кравчук М. В. Изменения площадей Сарпинских озёр в 2005–2016 гг. Причины и последствия // Науки о Земле: вчера, сегодня, завтра: материалы III Междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, июль 2017 г.). – СПб.: Свое издательство, 2017. – С. 26-32.

3. Институт озероведения РАН, Озера Новосибирской области [Электронный ресурс]. – URL: http://www.limno.org.ru/win/lakerus/nso_04.htm (дата обращения 23.03.2018).

4. Лямина В.А., Глушкова Н.В., Смоленцева Е.Н., Зольников И.Д. Использование методов ГИС и ДЗ для мониторинга площади озер и солончаков на территории юга Западной Сибири // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 4, ч. 2. – С. 3–7.

5. Терещенко В.Г., Терещенко Л.И. Влияние изменения уровня воды крупного мелководного оз. Убинское на структуру его рыбного населения // Биология внутренних вод. – 2004. – №. 1. – С. 80-87.

6. Иллюстрированный атлас «Охота, рыбалка, туризм – Новосибирская область». – Новосибирск: Издательство «Арта», 2004. – 128 с. – ISBN 5-902700-01-9.

7. Научно-популярная энциклопедия «Вода России», Убинское озеро [Электронный ресурс]. – URL: http://water-rf.ru/Водные_объекты/1274/Убинское_озеро (дата обращения 23.03.2018).

8. Анопченко Л.Ю. Динамика обсыхания причановской территории Барабы по данным космических снимков // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2011. – Т. 4. – С. 245–248.

9. Курганович К.А., Носкова Е.В. Использование водных индексов для оценки изменения площадей водного зеркала степных содовых озер юго-востока Забайкалья, по данным дистанционного зондирования // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2015. – №. 6 (121). – С.16-24.

10. Acharya T.D., Lee D.H., Yang I.T., Lee J.K. Identification of Water Bodies in a Landsat 8 OLI Image Using a J48 Decision Tree // Sensors. – 2016. – Vol. 16. – N. 7. – P. 1075.

11. Кравцова В.И., Тарасенко Т.В. Динамика термокарстовых озер центральной Якутии при изменениях климата с 1950 года // Криосфера Земли. – 2011. – Т. 15. – № 3. – С. 31-42.

12. Hossain M. S. et al. Assessment of Landsat 7 Scan Line Corrector-off data gap-filling methods for seagrass distribution mapping // International Journal of Remote Sensing. – 2015. – Vol. 36. – N. 4. – P. 1188-1215.

13. Yin G. et al. A comparison of gap-filling approaches for Landsat-7 satellite data // International Journal of Remote Sensing. – 2017. – Vol. 38. – N. 23. – P. 6653-6679.

14. Рылов, С.А. Технология обработки данных с космических аппаратов «Канопус-В», «Ресурс-П» и «Метеор-М» для мониторинга и картографирования паводковой ситуации / С.А. Рылов, О.Г. Новгородцева, И.А. Пестунов, О.А. Дубровская, Ю.Н. Синявский // Материалы II межд. научной конф. «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли». – Красноярск: СФУ, 2015. – С. 207-212.

15. Пестунов И.А., Рылов С.А., Бериков В.Б. Иерархические алгоритмы кластеризации для сегментации мультиспектральных изображений // Автометрия. – 2015. – Т. 51. – № 4. – С. 12-22.

16. Донцов А.А., Пестунов И.А., Рылов С.А., Суторихин И.А. Автоматизированный мониторинг площадей акваторий озер и водохранилищ по спутниковым данным // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 2. – С. 38–45.

© С. А. Рылов, 2018

УДК 004.93

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ СРАВНЕНИЕ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДЛЯ СЕГМЕНТАЦИИ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Юрий Николаевич Синявский
Институт вычислительных технологий СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, научный сотрудник, тел. (383)334-91-73, e-mail: yorikmail@gmail.com

Сергей Александрович Рылов
Институт вычислительных технологий СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (383)334-91-73, e-mail: rylovs@mail.ru

Работа посвящена экспериментальному сравнению 12 непараметрических алгоритмов кластеризации, позволяющих выполнять сегментацию изображений. Для сравнения выбраны алгоритмы, разработанные в Лаборатории обработки данных ИВТ СО РАН, а также алгоритмы, включенные в пакеты ENVI, ELKI и Smile. Эксперименты выполнены с использованием цифровых фотографий и мультиспектральных спутниковых изображений, полученных со спутника WorldView-2.

Ключевые слова: непараметрические алгоритмы кластеризации, сегментация мультиспектральных изображений, экспериментальное сравнение.

EXPERIMENTAL EVALUATION OF NONPARAMETRIC CLUSTERING ALGORITHMS FOR MULTISPECTRAL IMAGES SEGMENTATION

Yuriy N. Sinyavskiy
Institute of Computational Technologies SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher, phone: (383)334-91-73, e-mail: yorikmail@gmail.com

Sergey A. Rylov
Institute of Computational Technologies SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (383)334-91-73, e-mail: rylovs@mail.ru

Experimental evaluation of twelve nonparametric clustering algorithms was made. Algorithms developed in Image processing laboratory of ICT SB RAS were compared to clustering algorithms from ENVI satellite image processing toolbox and two open-source data mining frameworks (ELKI and Smile). Digital photos and multispectral images from WorldView-2 satellite were used for evaluation.

Key words: nonparametric clustering algorithms, multispectral image segmentation, experimental evaluation.

Введение

Решение целого ряда прикладных задач неразрывно связано с сегментацией цифровых изображений. Это могут быть как мультиспектральные снимки,

полученные со спутников, самолетов или беспилотных летательных аппаратов, так и обычные цифровые фотографии (например, данные медицинских обследований). Сегментация преследует две основных цели – разбиение изображения на части, удобные для дальнейшего анализа, и группировка пикселей в более высокоуровневые и информативные структуры [1]. Одним из наиболее распространенных подходов к сегментации изображений является использование алгоритмов кластеризации [2]. При этом априорные сведения о вероятностных характеристиках классов, а также обучающие выборки, как правило, отсутствуют. В этих условиях наиболее подходящими являются непараметрические алгоритмы, которые не требуют жестких предположений о виде функции плотности распределения и позволяют выделять кластеры сложной формы [3]. Однако они не получили распространения на практике из-за свойственной им высокой вычислительной трудоемкости. Применение сеточного подхода, при котором пространство признаков разделяется на конечное число ячеек, позволяет добиться высокой вычислительной эффективности, но при этом точность выделения кластеров сильно зависит от сеточной структуры [4]. В лаборатории обработки данных разработаны эффективные плотностные и сеточные алгоритмы для сегментации мультиспектральных изображений.

В данной работе выполнено экспериментальное сравнение разработанных алгоритмов с шестью наиболее эффективными непараметрическими алгоритмами, реализованными в пакетах программ ENVI, ELKI и Smile.

Алгоритмы и данные

Шесть алгоритмов были разработаны в Лаборатории обработки данных ИВТ СО РАН [5-10]. Для сравнения были выбраны непараметрические алгоритмы *k*-средних [2] и ISODATA [2], которые включены во многие пакеты для обработки спутниковых изображений и поэтому часто используются при решении практических задач. В экспериментах использованы программные реализации алгоритмов из пакета ENVI [11]. Количество итераций было ограничено 10. Центры кластеров, полученные на предыдущей итерации, использовались для инициализации следующей, что позволило получить качественные результаты. Кроме того, в экспериментах использованы программные реализации наиболее эффективных плотностных алгоритмов DBSCAN [12], OPTICS [13] и DENCLUE [14], включенные в пакеты для анализа данных ELKI [15] и Smile [16]. В дополнение к этому, авторами была выполнена параллельная реализация эффективного (в плане качества) итеративного плотностного алгоритма MeanShift [17]. Количество итераций «среднего сдвига» в экспериментах было ограничено десятью.

В экспериментах использовано восемь тестовых изображений [18] – пять цифровых фотографий (рис. 1) и три фрагмента мультиспектральных снимков, полученных со спутника WorldView-2 (рис. 2).

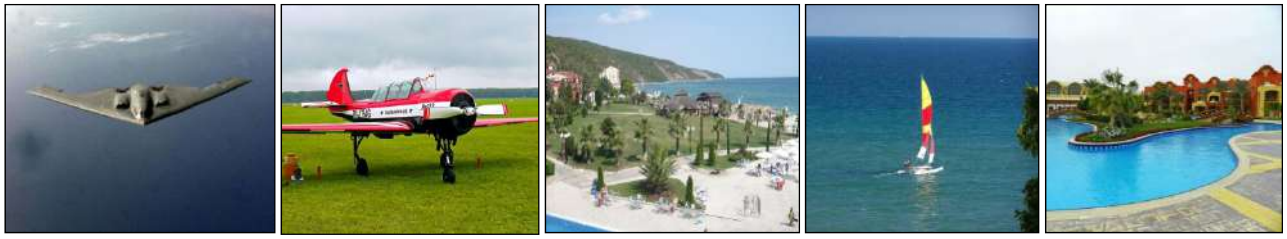


Рис. 1. Тестовые изображения 1–5 (цифровые фотографии). Размер изображений составляет 0.3, 1, 2.2, 5 и 13.8 млн пикселей соответственно

Рис. 2. Тестовые изображения 6–8 (фрагменты снимков, полученных со спутника WorldView-2). Размер изображений составляет 4.2, 9 и 12 млн пикселей соответственно

Обработка цифровых фотографий выполнялась по трем каналам (красный, зеленый и синий), а спутниковых изображений – по четырем (красный, зеленый, синий и ближний инфракрасный). Вычисления производились на ПЭВМ с процессором Intel Core i7 (2.3 ГГц, 4 ядра, 8 потоков) и 8 Гб оперативной памяти.

Экспериментальное исследование

В первом эксперименте выполнялось сравнение времени работы рассматриваемых алгоритмов. Результаты эксперимента представлены в табл. 1. Прочерки в таблице соответствуют неприемлемо высокому времени обработки (более 18 часов).

Анализ результатов показывает, что алгоритмы, включенные в пакеты ELKI и Smile, не позволяют оперативно обрабатывать изображения высокого разрешения. Кроме того, время их работы значительно увеличивается с ростом числа каналов. Алгоритмы из пакета ENVI лучше адаптированы к анализу изображений, однако время обработки изображений размером более 9 млн пикселей превышает 5 минут. Алгоритмы, разработанные в Лаборатории обработки данных ИВТ СО РАН, позволяют выполнять сегментацию мультиспектральных изображений большого размера в диалоговом режиме.

Таблица 1

Результаты обработки тестовых изображений (время в секундах)

Изображение	1	2	3	4	5	6	7	8
Размер изображения (млн пикселей)	0.3	1	2.2	5	13.8	4.2	9	12
Число каналов	3	3	3	3	3	4	4	4
HCA_MS [5, 6]	0.13	0.33	1.04	0.85	4.75	26.3	2.97	666
ECCA [7]	0.17	0.48	0.66	3.1	5.5	6.1	44.04	3
CCAE [7]	0.05	0.09	0.15	0.32	0.63	0.56	1.39	1
HECA_MS [8]	0.05	0.23	0.74	0.54	2.74	13.62	9.49	183.3
MeanSC [9]	0.09	0.51	0.86	1.44	8.99	1.44	8.16	4.2
EMeanSC [10]	0.39	2.25	3.16	5.21	31.31	4.97	28.74	10.47
MeanShift [17]	2.91	52	102	67	388	4138	217	62388
k-средних [2]	0.5	36	5	17	1196	75	302	588
ISODATA [2]	1	15	5	9	1178	68	332	337
DBSCAN [12]	194	2731	13098	–	–	39965	–	–
OPTICS [13]	638	5244	40013	–	–	–	–	–
DENCLUE [14]	6934	39849	–	–	–	–	–	–

Второй эксперимент посвящен сравнению времени обработки тестовых изображений с использованием последовательной и параллельной версий алгоритмов MeanSC [9] и EMeanSC [10]. Реализация алгоритмов была выполнена на языке C++ с использованием стандарта OpenMP. Результаты эксперимента приведены в табл. 2. Применение параллельных вычислений позволило существенно уменьшить время работы, особенно при обработке изображений большого размера.

Таблица 2

Сравнение последовательной и параллельной версий алгоритмов

Изображение	Размер изображения (млн. пикселей)	Число каналов	Время обработки (1 поток), с				Время обработки (8 потоков), с			
			MeanSC			EMeanSC	MeanSC			EMeanSC
			h=11	h=13	h=16		h=11	h=13	h=16	
1	0.3	3	0.16	0.11	0.1	0.4	0.11	0.1	0.09	0.39
2	1.0	3	1.14	1	0.64	3.28	0.61	0.56	0.51	2.25
3	2.2	3	2.69	2.15	2.18	8.08	0.98	0.86	0.86	3.16
4	5.0	3	5.48	4.09	3.06	13.63	1.93	1.71	1.44	5.21
5	13.8	3	38.03	28.31	20.53	87.82	12	9.93	8.99	31.31
6	4.2	4	2.91	2.52	2.21	7.89	1.72	1.64	1.44	4.97
7	9.0	4	48.21	31.31	18.75	99.16	11.65	8.4	8.16	28.74
8	12.0	4	4.46	4.53	4.42	14.75	3.11	2.73	4.2	10.47

Заключение

Выполнено экспериментальное сравнение 12 непараметрических алгоритмов, позволяющих обрабатывать мультиспектральные изображения. Показано, что алгоритмы, включенные в распространенные пакеты для анализа спутниковых данных, не позволяют оперативно выполнять обработку изображений большого размера. С другой стороны, алгоритмы, разработанные в Лаборатории обработки данных ИВТ СО РАН, позволяют выполнять сегментацию в диалоговом режиме.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-37-00492-мол_а).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение / Пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 752 с.

2. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2006. С. 812.

3. Пестунов И.А., Синявский Ю.Н. Алгоритмы кластеризации в задачах сегментации спутниковых изображений // Вестник КемГУ. 2012. № 4/2 (52). С. 110-125.

4. Krstinic D., Skelin A.K., Slapnicar I. Fast two-step histogram-based image segmentation // Image Processing, IET. 2011. Vol. 5. No. 1. P. 63-72.

5. Пестунов И.А., Рылов С.А., Бериков В.Б. Иерархические алгоритмы кластеризации для сегментации мультиспектральных изображений // Автометрия. 2015. Т. 51. № 4. С. 12-22.

6. Рылов С.А. Непараметрический алгоритм кластеризации для сегментации изображений на основе комбинации сеточного подхода и процедуры среднего сдвига // Труды Всероссийской конференции «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов». 2017. С.150-155.

7. Пестунов И.А., Рылов С.А., Синявский Ю.Н., Бериков В.Б. Подход к построению ансамбля непараметрических алгоритмов кластеризации для сегментации спутниковых изображений // Сборник трудов III Международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2017). 2017. С.775-780.

8. Рылов С.А., Пестунов И.А. Ансамблевый непараметрический алгоритм кластеризации для сегментации мультиспектральных спутниковых изображений на основе комбинации сеточного подхода и процедуры среднего сдвига // Тезисы докладов Пятнадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (г. Москва, 13-17 ноября 2017 г.). Москва: ИКИ РАН, 2017. С. 52.

9. Пестунов И.А., Синявский Ю.Н. Непараметрический алгоритм кластеризации данных дистанционного зондирования на основе grid-подхода // Автометрия. 2006. Т. 42. № 2. С. 90-99.

10. Пестунов И.А., Бериков В.Б., Синявский Ю.Н. Сегментация многоспектральных изображений на основе ансамбля непараметрических алгоритмов кластеризации // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2010. № 5(31). С. 56-64.

11. ENVI – The Leading Geospatial Analytics Software [Electronic resource]. URL: http://www.harrisgeospatial.com/SoftwareTechnology/ENVI.aspx (accessed at 29.03.2018).

12. Ester M., Kriegel H.-P., Sander J., Xu X. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial database // Proceedings of 1996 International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD'96). 1996. P. 226-231.

13. Ankerst M., Breunig M.M., Kriegel H.-P., Sander J. OPTICS: ordering points to identify the clustering structure // Proceedings of 1999 ACM SIGMOD International Conference on Management of data. 1999. P. 49-60.

14. Hinneburg A., Keim D. A general approach to clustering in large databases with noise // Knowledge and Information Systems. 2003. Vol. 5. Iss. 4. P. 387-415.

15. ELKI: Environment for Developing KDD-Applications Supported by Index-Structures [Electronic resource]. URL: https://elki-project.github.io (accessed at 29.03.2018).

16. Smile – Statistical Machine Intelligence and Learning Engine [Electronic resource]. URL: https://haifengl.github.io/smile (accessed at 29.03.2018).

17. Cheng Y. Mean shift, mode seeking, and clustering // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1995. Vol. 17. No. 8. P. 790-799.

18. Синявский Ю.Н. Тестовые изображения для сегментации [Электронный ресурс]. URL: https://drive.google.com/drive/folders/13Lr3VMC703T1hvArwYKrGsR2FkSLMSpX (дата обращения 29.03.2018).

© Ю. Н. Синявский, С. А. Рылов, 2018

УДК 528.852

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СЕТЬ ОБЛАЧНЫХ WEB-СЕРВИСОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Алексей Александрович Бучнев
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории обработки изображений, тел. (383)330-73-32, e-mail: baa@ooi.sscc.ru

Павел Алексеевич Ким
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории обработки изображений, тел. (383)330-73-32, e-mail: kim@ooi.sscc.ru

Валерий Павлович Пяткин
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией обработки изображений, тел. (383)330-73-32, e-mail: pvp@ooi.sscc.ru

Федор Валерьевич Пяткин
Сибирский центр ФГБУ «НИЦ «Планета», 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Советская, 30, младший научный сотрудник, тел. (383)222-33-07, e-mail: fep@ya.ru

Рассматривается распределенная сеть облачных web-сервисов для обработки спутниковых данных, предоставляющая услуги обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в рамках облачной модели SaaS. Фактически это совокупность Web-сервисов, реализующих функциональные модули программного комплекса обработки данных ДЗЗ PlanetaMonitoring.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, программное обеспечение PlanetaMonitoring, облачная среда, web-сервис, линеаменты, кольцевые структуры, кластеризация, метод *K*-средних.

DISTRIBUTED NETWORK OF CLOUD-BASED WEB-SERVICES FOR SATELLITE DATA PROCESSING

Aleksey A. Buchnev
Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher of Image Processing Laboratory, phone: (383)330-73-32, e-mail: baa@ooi.sscc.ru

Pavel A. Kim
Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher of Image Processing Laboratory, phone: (383)330-73-32, e-mail: kim@ooi.sscc.ru

Valeriy P. Pyatkin
Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Professor, Head of Image Processing Laboratory, phone: (383)330-73-32, e-mail: pvp@ooi.sscc.ru

Fedor V. Pyatkin
Siberian Center FGBU «SRC «Planeta», 30, Sovetskaya St., Novosibirsk, 630099, Russia, Junior Researcher, phone: (383)222-33-07, e-mail: fep@ya.ru

We consider a distributed network of cloud-based Web- services for processing satellite data, which provides remote sensing data processing services within the framework of the cloud SaaS model. In fact, this is a collection of web- services that implement the functional modules of the PlanetaMonitoring remote sensing data processing software.

Key words: remote sensing, software PlanetaMonitoring, cloud, web-service, lineaments, coils, cluster analysis, *K*-means method.

1. Введение

Целью работы является разработка и реализация модели (макета) распределенной сети облачных web-сервисов для обработки спутниковых данных, предоставляющей услуги обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в рамках облачной модели SaaS. Фактически это совокупность web-сервисов, реализующих функциональные модули программного комплекса обработки данных ДЗЗ PlanetaMonitoring**.** Разработанный в ИВМиМГ СО РАН совместно с ФГБУ «НИЦ «Планета» программный комплекс PlanetaMonitoring обеспечивает функционально полный набор операций по обработке данных ДЗЗ [1,2,3]. Программный комплекс PlanetaMonitoring реализует технологии предварительной и тематической обработки многоспектральной спутниковой информации оптического, инфракрасного и микроволнового диапазонов. В процессе предварительной обработки спутниковых данных осуществляются яркостные и геометрические преобразования, геокодирование, составление обзорных монтажей и другие. Тематическая обработка многоспектральных спутниковых данных включает технологии распознавания объектов (без обучения и с обучением), выделения и картирования линеаментов и кольцевых структур, а также пространственного перемещения природных объектов (ледяных полей, водных масс, облачных образований в атмосфере). Каждая из перечисленных выше программных технологий комплекса PlanetaMonitoring для использования в облачной среде реализована в виде Windows-приложения (пакетный режим). В данной работе предлагается подход к организации облачной среды, способной обеспечить надежное и эффективное выполнение этих Windows-приложений при обработке данных ДЗЗ.

В настоящее время становится актуальным использование Internet-технологий для оперативной интеграции информационно-вычислительных ресурсов при решении задач обработки данных ДЗЗ. Новая парадигма облачных

вычислений (cloud computing) дает такую возможность [4]. Основная идея облачных вычислений — технологии распределенной 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) и многих других возможных Internet-технологий для удаленных пользовательских вычислений. В данной работе основное внимание уделяется облачной концепции SaaS (Software as a Service, «программное обеспечение как услуга»).

В ИВМиМГ СО РАН разрабатываются макеты web-сервисов, реализующих программные технологии (пакетные Windows-приложения) комплекса PlanetaMonitoring**,** что решает новую задачу предоставления услуг обработки данных ДЗЗ в рамках облачной модели SaaS. Макеты сервисов реализуются на платформе Windows и состоят из двух компонент. Вычислительной компоненты, созданной на основе разработанного ранее соответствующего Windows-приложения (пакетный режим), и Web-интерфейса, выполненного на основе свободного Web-сервера Apache [5]. Основной облачный web-сервер для обработки спутниковых данных планируется реализовать на базе ИВМиМГ СО РАН. Ряд обстоятельств диктуют такое решение, главное из них – возможность организации высокопроизводительных масштабируемых вычислений на Сибирском Суперкомпьютерном Центре (ССКЦ), установленном в ИВМиМГ СО РАН. На основном сервере формируется так называемая облачная среда, предоставляющая услуги обработки данных ДЗЗ в рамках облачной модели SaaS. Фактически это совокупность web-сервисов, реализующих функциональные модули программного комплекса обработки данных ДЗЗ PlanetaMonitoring [6].

Далее, используя технологию «зеркалирования» [7], эта облачная среда (полностью или частично) переносится на серверы наземного комплекса приема, обработки, архивации и распространения спутниковой информации (НКПОР) Росгидромета, включающий в себя три региональных центра, входящих в состав ФГБУ «НИЦ «Планета»: Европейский (гг. Обнинск – Москва – Долгопрудный), Сибирский (г. Новосибирск) и Дальневосточный (г. Хабаровск). Кроме того, в состав НКПОР входит сеть стационарных и мобильных автономных пунктов (около 70) приема спутниковой информации в России, Антарктиде и на морских судах, находящихся под научно-методическим руководством ФГБУ «НИЦ «Планета» (рис. 1). Первое резервное зеркало будет реализовано на сервере Сибирского центра (СЦ) ФГБУ «НИЦ «ПЛАНЕТА». Важно, что СЦ ФГБУ "НИЦ "Планета" поддерживает web-сервер, на котором представлена оперативная спутниковая продукция, поступающая в режиме реального времени (ftp1.rcpod.ru).

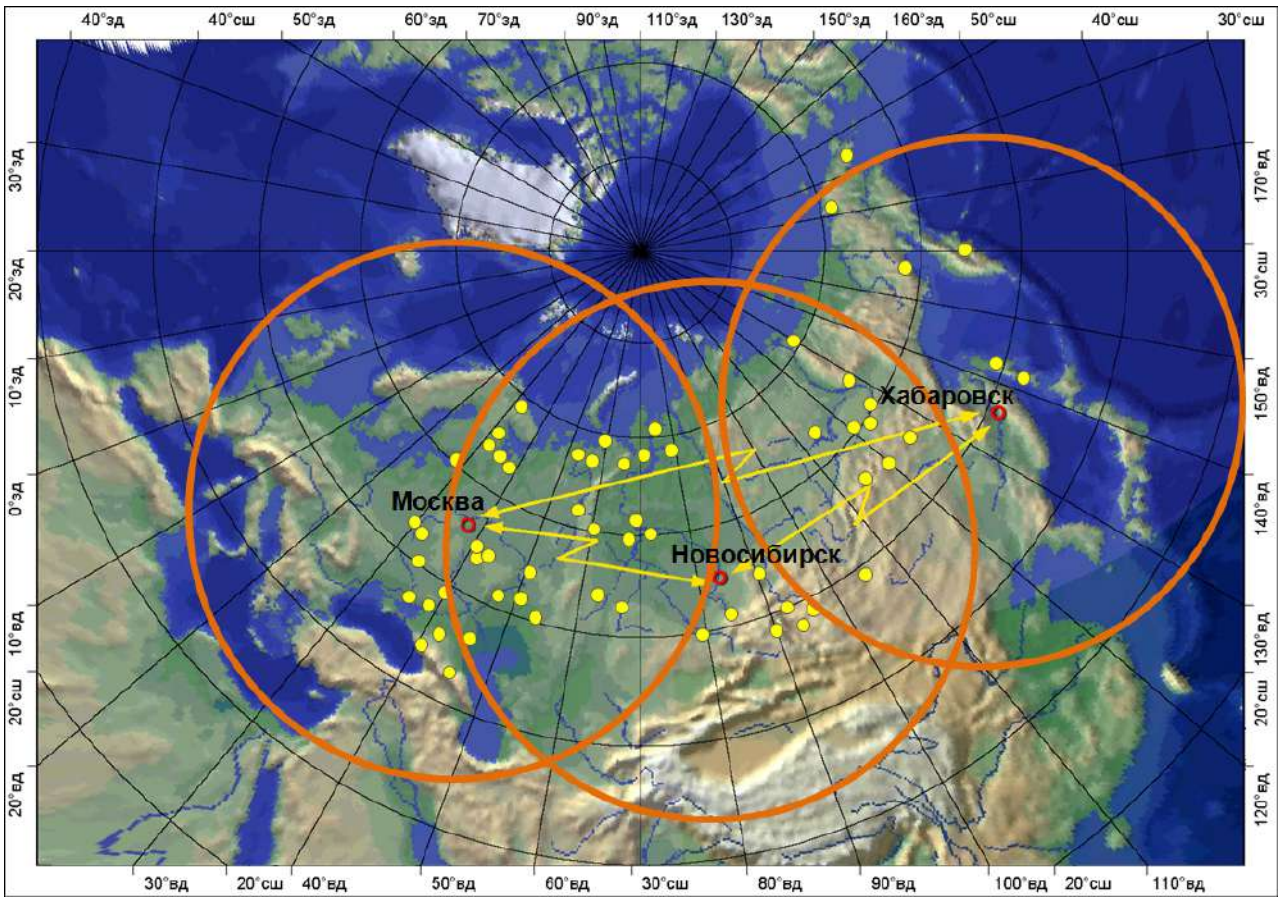


Рис. 1

2. Вычислительные компоненты распределенной системы облачных web-сервисов

Разрабатываемая в ИВМиМГ СО РАН система облачных web-сервисов по обработке спутниковых данных содержит набор сервисов, соответствующих функционально полному набору программных технологий, включенных в состав программного комплекса по обработке данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) PlanetaMonitoring [2]. Перечислим некоторые из этих программных технологий: фильтрация спутниковых изображений; радиометрическая и геометрическая коррекция; географическая привязка; трансформирование в картографические проекции и построение мозаик из отдельных изображений; выделение линеаментов и кольцевых структур; распознавание и классификация объектов окружающей среды (кластерный анализ и классификация с обучением); определение пространственных перемещений объектов по разновременным спутниковым изображениям. Заметим, что технология выделения линеаментов и кольцевых структур уже реализована в виде облачного web-сервиса и доступна пользователям сети Internet [5].

По сути, практически каждая вычислительная компонента некоторого web-сервиса является пакетным вариантом соответствующей программной техноло-

гии комплекса PlanetaMonitoring: для обращения к сервису необходимо передать в облачную среду текстовый файл, содержащий параметры обработки. Исключение составляет web-сервис для классификации с обучением: процесс обучения классификатора (построение сигнатур классов) возможен только на основе интерактивного взаимодействия с пользователем. В связи с этим этап обучения классификатора необходимо выделить в отдельный процесс, который может быть загружен на компьютер пользователя. Результаты работы процесса обучения передаются в облачную среду для запуска основного этапа работы классификатора.

В настоящее время нами завершаются испытания макета облачного Web-сервиса жесткой кластеризации данных ДЗЗ. Основным алгоритмом жесткой кластеризации в нашей системе является широко известный алгоритм *K*-средних [8]. Алгоритм основан на итеративной процедуре отнесения векторов признаков кластерам по критерию минимума расстояния вектора до центра кластера. Оптимальным считается такое разбиение входных векторов на кластеры, при котором внутриклассовый разброс не может быть уменьшен при переносе какого-либо вектора из одного кластера в другой. Алгоритм *K*-средних обеспечивает получение минимума (в общем случае локального) следующей функции ошибок

$$E = \sum_{i=1}^{K} \sum_{j=1}^{N} \gamma_{ij} \rho(x_j, m_i), \text{ где } \gamma_{ij} = \begin{cases} 1, x_j \in C_i \\ 0 \end{cases}.$$

Здесь N – количество векторов признаков, K - число кластеров, x_j – j-ый вектор признаков, m_i – центр i-го кластера, $\rho(x, y)$ – выбранная метрика (расстояние) между векторами x и y, C_i – i-ый кластер.

Алгоритм *K*-средних является одним из способов, называемых “Методы центра тяжести”, которые используются в задачах автоматической классификации данных, и представляет собой вариант метода динамических сгущений.

Результатами кластеризации можно управлять с помощью следующих параметров [9]: количество выделяемых кластеров; количество итераций алгоритма; тип метрики (расстояния) между векторами (Евклидова, Чебышева, Махаланобиса, сити-блок расстояние), выбранная метрика определяет форму получаемых кластеров; способ выбора начальных центров; точность вычислений.

Приведенные ниже рисунки демонстрируют результат работы алгоритма *K*-средних (исходные данные предоставлены СЦ ФГБУ «НИЦ «Планета»).

На рис. 2 изображена водно-ледовая обстановка на реке Мильтюш (впадает в Обское водохранилище в районе с. Бурмистрово); апрель 2015 года, изображение ИСЗ «Канопус» (разрешение 10 м). Рис. 3 – результат кластеризации, выделялось 12 кластеров.

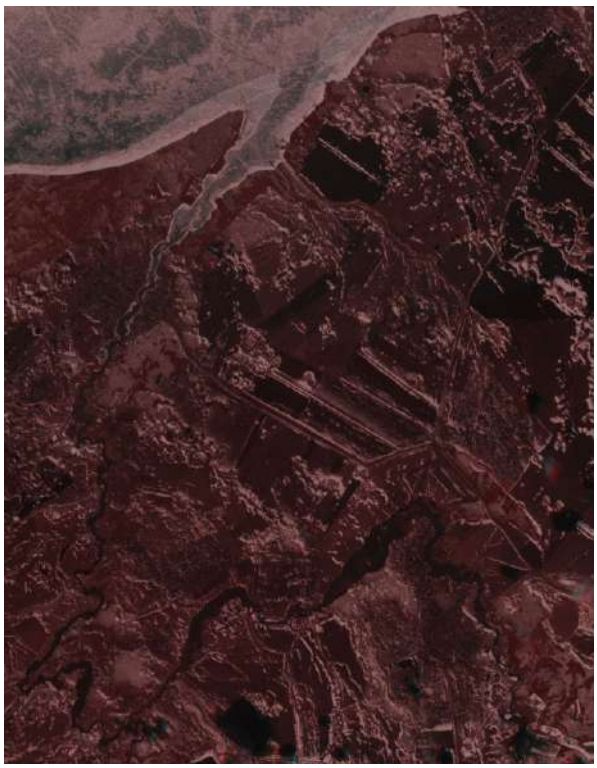


Рис. 2

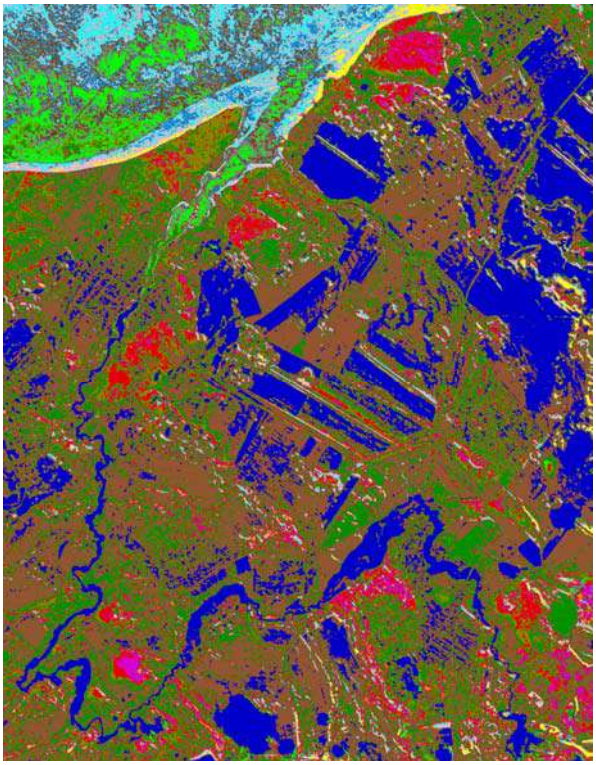


Рис. 3

3. Web-интерфейс распределенной системы облачных web-сервисов

Разработка «частных» облачных сервисов имеет в своей природе также и такую аргументацию, как возможность обеспечения сохранности интеллектуальной собственности на создание и использование в режиме ноу-хау авторских программных алгоритмов. Тем самым, оказывается оправданным вложение усилий в развитие облачных технологий несоизмеримое по масштабам возможностям программных корпораций. Численное расширение спектра web-сервисов, развиваемых в рамках единой облачной технологии, с необходимостью должно учесть при конструировании их программного наполнения качественные особенности в структуре пользовательских запросов, в частности, асинхронную природу обращений к ним. Большие временные затраты на обслуживание конкретного сервиса в режиме online требует отслеживания его текущего состояния, и, принятое решение о взаимодействии по этой задаче с пользователем удачно сочетает баланс между вычислительными нагрузками на собственно процесс и его вспомогательное обеспечение. Другая насущная проблема развития облака, решение которой увеличивает его эффективный потенциал – это необходимость перераспределять ресурсы для однотипных запросов, оттягивающих их на свою реализацию, что наиболее безболезненно возможно при «зеркалировании» сервисных процессов на компьютерах доступной сети, то есть дублирование инфраструктуры процессов по соответствующим серверам облака с сохранением

иерархии каталогов файловой системы, вписываемое в гипертекстовое пространство возможных браузеров работы с web-сервисами. Работа «зазеркалья» обеспечивается диспетчером распределения ресурсов для конкретных сервисных запросов. Структурная сложность, находящегося в разработке облачного диспетчера, определяется архитектурой вложения предметно-ориентированного облака web-сервисов в эксплуатируемые уже сейчас распределенные сети Наземного комплекса приема, обработки, архивации и распространения спутниковой информации Росгидромета (рис. 1).

Как уже отмечалось, с начальных реализаций представленного Web-сервиса, целенаправленно продолжилось многолетнее развитие идеологически поддерживаемой в Лаборатории обработки изображений ИВММГ СО РАН концепции объединения в рамках единой интерфейсной программной оболочки разнородных алгоритмов для обработки изображений [10]. Таким образом, «сменные» вычислительные компоненты, опирающиеся на унифицированный сетевой интерфейс, предусматривают возможность реализации вычислительных компонентов на различных архитектурных платформах гетерогенных сетей, объединяющих как многопроцессорные архитектуры Сибирского суперкомпьютерного центра, так и распределенные сети НКПОР Росгидромета.

С учетом разнородности и обширности рынка пользовательских браузеров, используемых в Интернет, WEB-интерфейс в макетном варианте реализуется с использованием базовых средств гипертекстового языка HTML. Сервисная часть выполнена на Apache 2.2 [11, 12], при этом, с учетом природной гетерогенности объемлющей инфраструктуры, развиваются и другие платформы в архитектуре IIS Windows.

Информационные потоки данных обеспечиваются по FTP-протоколу. Таким образом, пользователь имеет возможность вести поиск «скрытых» в «облаке» объектов, как по архивным данным, так и по индивидуальным образцам изображений. Здесь отслеживается облачная парадигма хранения данных. Собственно пользовательский интерфейс реализуется посредством «формы» в HTML — разделе документа, позволяющем вводить информацию для последующей обработки системой, и, дополнительно к разметке обычных элементов, содержит разметку для элементов управления и надписей [13].

На рис. 4 приведен интерфейс сеанса работы с макетом web-сервиса выделения линеаментов и кольцевых структур на спутниковых изображениях [5]. Задан параметр выделения кольцевых структур. На исходном космическом снимке после запуска и выполнения соответствующей программы web-сервиса выделены две одинаковые кольцевые структуры. Одна из них, расположенная выше, представляет импактный кратер Брент (Канада). Диаметр кратера 3,8 км, позиция, выделенная стрелкой, - центр кратера Брент с географическим координатами: 16,074° N и 78,183° W.

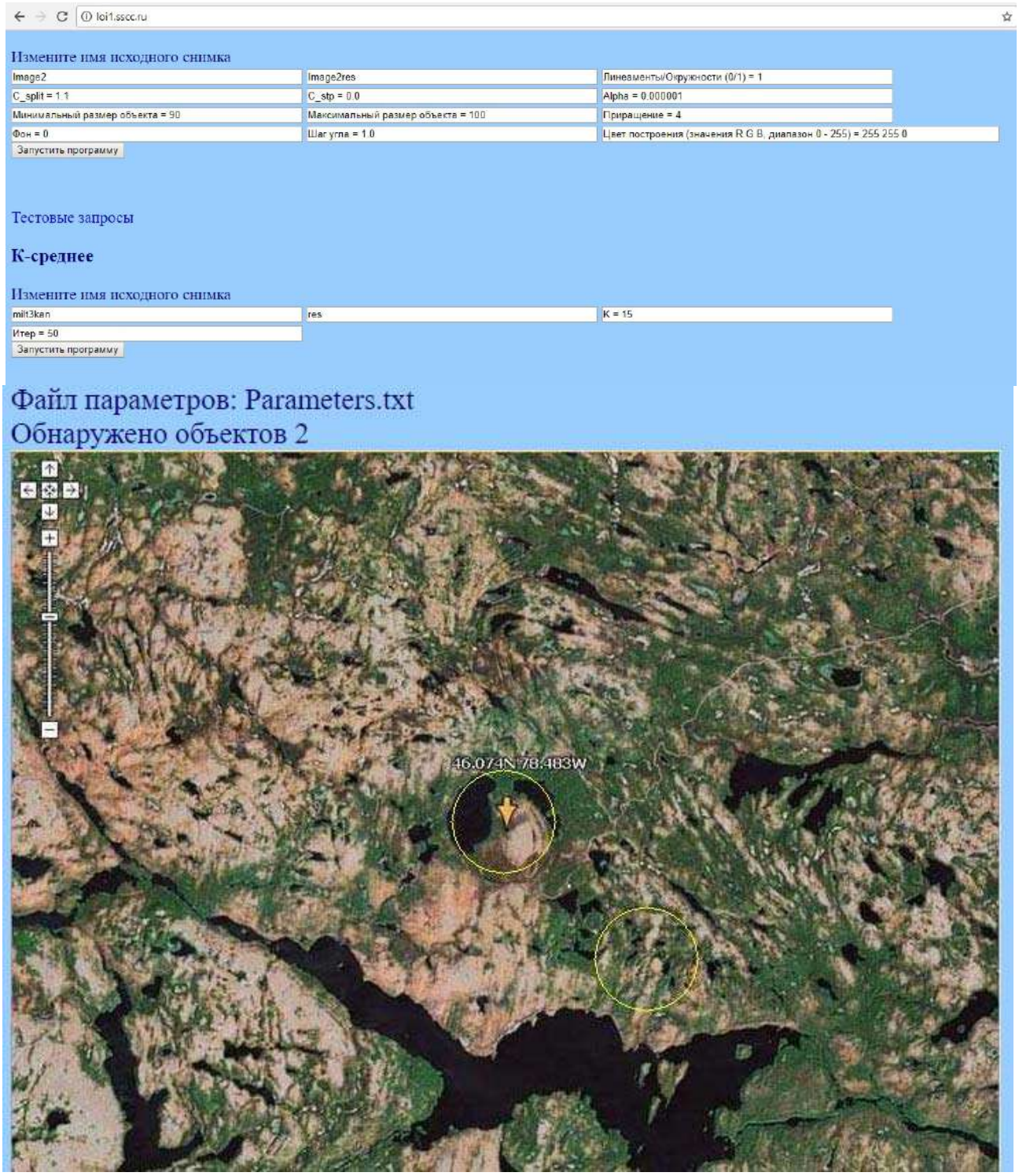


Рис. 4

4. Заключение

Успешный опыт реализации макета облачного web-сервиса по выделению линеаментов и кольцевых структур на космических изображениях был использован для создания макета облачного web-сервиса жесткой кластеризации дан-

ных ДЗЗ, представляющего широко известный алгоритм *K*-средних. В дальнейшем предполагается разработка макетов облачных web-сервисов и по другим программным модулям комплекса PlanetaMonitoring [2].

Работа выполнена частично при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-07-00066) и Базового проекта ФАНО (проект № 0315-2016-0003).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.- Техносфера, 2010. – 560 с.

2. Асмус В.В., Бучнев А.А., Кровотынцев В.А., Пяткин В.П., Салов Г.И. Planetamonitoring: программный комплекс обработки спутниковых данных // Проблемы информатики. – 2013, № 3. – С. 85-99.

3. Asmus V.V., Buchnev A.A., Pyatkin V.P., Salov G.I. Software System for Satellite Data Processing of Applied Tasks in Remote Sensing of the Earth. //Pattern Recognition and Image Analysis, vol. 19, No.3, 2009. pp. 69-74.

4. 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.

5. Бучнев А.А., Ким П.А., Пяткин В.П., Салов Г.И. Макет облачного web-сервиса по выделению линеаментов и кольцевых структур на космических изображениях // Журн. Сиб. Федерального Ун-та. Техника и Технология. – 2017. – Т. 10, № 6. – С. 741-746.

6. Бучнев А. А., Пяткин В. П., Пяткин Ф. В. Облачная среда в прикладных дистанционных исследованиях Земли // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Пленарное заседание : сб. материалов (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. – С. 8–13.

7. Mirror website [Electronic resource] URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Mirror_website (the date of the reference search: 11.03.2018)

8. Jain A.K. Data clustering: 50 years beyond K-means. Pattern Recognition Letters, 2010, 31, 651-666.

9. Асмус В.В., Бучнев А.А., Пяткин В.П. Кластерный анализ данных дистанционного зондирования Земли. Автометрия, 2010, 46(2), 58-66.

10. Бучнев А.А., Калантаев П.А., Ким П.А., Пяткин В.П., Системная поддержка процесса обработки цифровых изображений. // Математические. структуры и моделирование. // Сб.научн.трудов Омск.гос.ун-т 1999.-Вып.3. стр.42-46/МДИ-98.

11. Environment Variables in Apache [Electronic resource] URL: https://httpd.apache.org/docs/2.4/env.html (the date of the reference search: 11.03.2018).

12. Running CGI Scripts on Apache2 [Electronic resource]. URL: https://tasdikrahman.me/2015/09/30/Running-CGI-Scripts-on-Apache2-Ubuntu / (the date of the reference search: 11.03.2018).

13. Form (HTML) [Electronic resource]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/HTML (the date of the reference search: 11.03.2018).

REFERENCES

1. Schowengerdt R.A. (2010) Remote sensing. Models and methods for image processing. Moskva, Technosfera, 560 p. [in Russian].

2. Asmus V.V., Buchnev A.A., Krovotyntsev V.A., Pyatkin V.P., Salov G.I. (2013) Planetamonitoring: software complex processing of satellite data. *Problems of Informatics,* 7(3), 85-99. [in Russian].

3. Asmus V.V., Buchnev A.A., Pyatkin V.P., Salov G.I. (2009) Software System for Satellite Data Processing of Applied Tasks in Remote Sensing of the Earth. //Pattern Recognition and Image Analysis, vol. 19, No.3, pp. 69-74.

4. Kim P. A., Kalantaev P. A., Pyatkin V. P. (2015) Cloud Multiagent System for the Database of Natural Resources.// Pattern Recognition and Image Analysis, Vol. 25, No. 2, pp. 220-222.

5. Buchnev A.A, Kim P.A., Pyatkin V.P., Salov G.I. (2017) Cloud web-service model for detection of lineaments and circular structures in space images. *J P.F. Sib. Fed. Univ. Eng. technol*., 10(6), 741-746. DOI: 10.17516/1999-494X-2017-10-6-741-746. [in Russian].

6. Buchnev A.A., Pyatkin V.P., Pyatkin F.V. (2017) Cloud in the application of earth remote sensing. In *Sbornik materialov Interekspo Geo-Sibir'-2017: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: plenarnaya sessiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2017: International Scientific Conference: plenary session]* (pp. 13–20). Novosibirsk: SSGA [in Russian].

7. Mirror website [Electronic resource] URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Mirror_website (the date of the reference search: 11.03.2018).

8. Jain A.K. (2010) Data clustering: 50 years beyond K-means. Pattern Recognition Letters, 31, 651-666.

9. Asmus V.V., Buchnev A.A., Pyatkin V.P. (2010) The cluster analysis of Earth remote sensing data. *Avtometriya*, 46(2), 58-66. [in Russian].

10. Buchnev A.A., Kalantaev P. A., Kim P. A., Pyatkin V.P. (1999) System support for digital image processing. In *Sbornik nauchnych trudov Omskogo gos.un-ta. "Matematicheskiye struktury i modelirovaniye",T.3. [Collection of scientific papers: "Mathematical structures and modeling",V.3]* (pp.42-46/MDI-98). Omsk: OmSU [in Russian].

11. Environment Variables in Apache [Electronic resource] URL: https://httpd.apache.org/docs/2.4/env.html (the date of the reference search: 11.03.2018).

12. Running CGI Scripts on Apache2 [Electronic resource] URL: https://tasdikrahman.me/2015/09/30/Running-CGI-Scripts-on-Apache2-Ubuntu (the date of the reference search: 11.03.2018).

13. Form (HTML) [Electronic resource] URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/HTML (the date of the reference search: 11.03.2018).

© А. А. Бучнев, П. А. Ким, В. П. Пяткин, Ф. В. Пяткин, 2018

УДК 528.854:004.93'1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА КЛАССИФИКАЦИИ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПРИЗНАКОВ НА ОСНОВЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ МОМЕНТОВ

Павел Владимирович Мельников
Институт вычислительных технологий СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, ведущий специалист, e-mail: pvlvlml@gmail.com

Игорь Алексеевич Пестунов
Институт вычислительных технологий СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)334-91-55, e-mail: pestunov@ict.nsc.ru

Рассмотрена схема классификации гиперспектральных изображений (ГСИ) высокого пространственного разрешения на основе геометрических моментов. Проведено экспериментальное сравнение различных методов классификации и выделения пространственных признаков. Результаты исследований показывают, что при классификации ГСИ целесообразно (с точки зрения вычислительных затрат) использовать геометрические моменты не выше 1-го порядка и наращивать число спектральных признаков (главных компонент или признаков MNF) до достижения требуемого качества распознавания.

Ключевые слова: классификация, метод главных компонент, гиперспектральные изображения, геометрические моменты, высокое пространственное разрешение.

EXPERIMENTAL STUDY OF QUALITY OF SPECTRAL-SPATIAL CLASSIFICATION OF HYPERSPECTRAL IMAGERY BASED ON GEOMETRIC MOMENTS

Pavel V. Melnikov
Institute of Computational Technologies of SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Lead Specialist, e-mail: pvlvlml@gmail.com

Igor A. Pestunov
Institute of Computational Technologies of SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Leading Researcher, phone: (383)334-91-55, e-mail: pestunov@ict.nsc.ru

A method of classification of hyperspectral imagery of high spatial resolution based on geometric moments is studied in this paper. An experimental comparison of several spectral feature extraction methods and classification algorithms with different parameters is presented. The results show that to keep computational cost from increasing it is advisable to use geometric moments of 0th and 1st order and to increase number of spectral features (PCA or MNF) until required accuracy is reached.

Key words: classification, principal component analysis, minimum noise fraction, hyperspectral images, geometric moments, high spatial resolution.

Введение

В последние годы в области дистанционного зондирования Земли наблюдается активное внедрение гиперспектральных съемочных систем. Эти системы позволяют одновременно получать изображение сцены с высоким пространственным разрешением (4 м и лучше) в большом количестве (до нескольких сотен) узких (порядка нескольких нанометров) спектральных каналов. Высокая размерность данных порождает так называемую проблему «проклятия размерности», из-за которой многие традиционные алгоритмы классификации становятся непригодными. Отличительной особенностью гиперспектральных изображений (ГСИ) высокого пространственного разрешения состоит в том, что значительная часть информации, которая необходима для анализа таких изображений, содержится в их пространственных характеристиках (текстура, контекст и др.).

В настоящее время известен целый ряд методов извлечения пространственных признаков, которые применялись при обработке ГСИ [1]. В работе [2] использовались матрицы совместной встречаемости (Gray level co-occurrence matrices, GLCM). Признаки, рассчитанные по этим матрицам, описывают контраст, энергию, энтропию и другие характеристики областей изображения [1]. Случайные марковские поля (Markov random fields, MRF), использовались в работе [3] для постобработки результатов классификации по спектральным признакам. В работе [4] эта методика позволила достичь существенного улучшения точности классификации ГСИ. Расширенные морфологические профили (Extended morphological profiles, EMP) [5] сочетают как пространственную, так и спектральную информацию. В [6] EMP успешно применялись для повышения точности классификации ГСИ. В работах [7, 8] исследовались профили атрибутов (Attribute profiles, AP), которые являются расширениями морфологических профилей и могут описывать различную информацию о структуре объектов. Трехмерные дискретные вейвлет-преобразования (3D discrete wavelet transform, DWT) могут использоваться для выделения спектрально-текстурных и геометрических характеристик на зашумленных изображениях [9]. Трехмерные фильтры Габора [10] позволяют получить спектрально-текстурные признаки, путем извлечения информации о масштабе и ориентации элементов ГСИ. Моменты изображений могут использоваться для определения текстурных характеристик объектов на полутоновых изображениях, таких, как форма, ориентация, вытянутость вдоль какой-то оси. Они широко применяются в таких задачах обработки изображений, как сегментация, поиск и распознавание объектов, анализ формы и текстуры объектов. Предложены различные классы моментов, устойчивых к преобразованиям изображения (сдвиг, поворот, изменение масштаба): Гаусса-Эрмита, Чебышева, Лежандра; однако геометрические моменты отличаются от них вычислительной эффективностью и не требуют задания параметров, зависящих от изображения [11].

В [11] проведено сравнение геометрических моментов с другими признаками: GLCM, MRF, EMP. В сравнении были использованы три эталонных изображения: Pavia University, Pavia Center и Salinas, широко применяющиеся при

сравнении алгоритмов обработки ГСИ. Геометрические моменты, построенные на основе трех главных компонент, обеспечили лучшее качество классификации по сравнению с другими наборами признаков. Также показано, что вычисление геометрических моментов – менее ресурсоемкая задача. В [12] проведено сравнение результатов классификации на основе геометрических признаков и различных методов постобработки картосхемы и показано, что для ГСИ высокого разрешения геометрические признаки обеспечивают лучший результат.

Таким образом, в [11] и [12] показано преимущество геометрических моментов над другими методами, однако остается открытым вопрос о числе необходимых пространственных признаков и соотношении числа спектральных и пространственных признаков. Вопрос является важным, так как увеличение числа признаков позволяет улучшить качество классификации, однако увеличивает время обработки. Поэтому актуальной задачей является определение оптимальных признаков и соотношения между спектральными и пространственными признаками, позволяющего достичь компромисса между качеством работы и временем классификации. Настоящая работа посвящена исследованию и выработке рекомендаций по классификации ГСИ высокого пространственного разрешения на основе геометрических моментов. Исследование проводится на примере задачи классификации изображений лесных массивов по возрастному и видовому составу.

Методика исследования

Особенностью гиперспектральных изображений является большое число спектральных каналов, что не позволяет напрямую применять упомянутые ранее методы, которые, как правило, на каждый исходный спектральный признак генерируют несколько результирующих пространственных, что лишь усугубляет «проклятие размерности». Распространенным решением этой проблемы является использование предварительного этапа сокращения числа спектральных признаков. В данной работе на этом этапе производится выделение некоррелированных систем признаков с помощью метода главных компонент (МГК) [13] и его модификации – метода минимизации шумовых помех (Minimum Noise Fraction, MNF) [14]. Эти методы хорошо показали себя в задачах классификации ГСИ [15].

Вторым этапом схемы для классификации ГСИ высокого разрешения, рассматриваемой в данной работе, является вычисление пространственных признаков на основе полученного набора комплексных спектральных признаков (главных компонент). К каждому такому признаку, полученному на первом этапе, применяется метод выделения признаков на основе геометрических моментов. Таким образом происходит использование пространственной информации, а число признаков для последующей классификации может вырасти. Также, в целях сравнения, на этом этапе будут использоваться традиционные статистические признаки.

Геометрический момент порядка $p+q$ для непрерывной функции от двух аргументов определяется по формуле $m_{p,q} = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} f(x,y)x^p y^q dx\,dy$.

Для дискретного цифрового изображения $I(i,j)$ размером $M \times N$ он определяется как $m_{p,q} = \sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N} i^p j^q I(i,j)$. При текстурном анализе геометрические моменты вычисляются не по всему изображению, а по окну размером $w \times w$ с центром в рассматриваемом пикселе (с координатами x,y): $GM(p,q,x,y) = \sum_{i=-w/2}^{w/2}\sum_{j=-w/2}^{w/2} i^p j^q I(\mathrm{x}+i, \mathrm{y}+j)$. Существует один признак нулевого порядка $GM(0,0)$, два признака первого порядка $GM(0,1)$ и $GM(1,0)$, три признака второго $GM(0,2)$, $GM(2,0)$ $GM(1,1)$ и т. д. При наличии нескольких спектральных каналов пространственные признаки вычисляются независимо для каждого канала.

В отличие от геометрических моментов, статистические моменты не описывают пространственную структуру объектов, так как рассматривают пиксели изображения независимо от их координат; и позволяют вычислять интегральные характеристики областей изображения, такие как среднее, дисперсию и т.д. Для дискретного изображения $I(i,j)$ размером $M \times N$ статистический момент первого порядка (среднее) определяется как: $Avg = \frac{1}{MN}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N} I(i,j)$. Статистический момент второго порядка (дисперсия) определяется по формуле: $Var = \frac{1}{MN-1}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\left(I(i,j) - \mathrm{Avg}\right)^2$. При использовании статистических моментов в качестве контекстных признаков, они вычисляются не по всей области размером $M \times N$, а по окну размером $w \times w$ с центром в рассматриваемом пикселе. Заметим, что статистический признак первого порядка Avg с точностью до постоянного множителя совпадает с геометрическим моментом нулевого порядка: $Avg(x,y) = GM(0,0,x,y)/w^2$.

Для классификации в данной работе использовались два метода: метод максимального правдоподобия (ML), широко применяющийся при обработке мультиспектральных изображений, и метод опорных векторов (SVM), хорошо зарекомендовавший себя в задачах классификации гиперспектральных изображений. В данной работе использовалась реализация метода опорных векторов из библиотеки libsvm [16] с радиальной базисной функцией и параметрами $\gamma = 0.125$ и $C = 100$.

Исходные данные и результаты исследования

В экспериментах использовались два изображения размером 600×420 и 1000×350 пикселей, содержащих по 87 спектральных каналов в диапазоне 404–1016 нм. Синтезированные RGB-композиты этих изображений приведены на рис. 1а и 2а. Пространственное разрешение составляло около 1 м. Изображе-

ния получены в 2011 г. с помощью авиационного гиперспектрометра, разработанного НПО «Лептон» [17]. На изображениях представлены участки Савватьевского лесничества Тверской области.

Для этих изображений имелись эталонные картосхемы, полученные с помощью наземных лесотаксационных обследований. На картосхемах отображен видовой и возрастной составы лесных массивов. К моменту съемки картосхемы значительно устарели, поэтому специалистами было выполнено их уточнение при помощи визуального анализа изображений (рис. 1б и 2б). Сомнительные пиксели на границах классов были отнесены к фону (на рисунке показан черным) и при оценке точности классификации не учитывались.

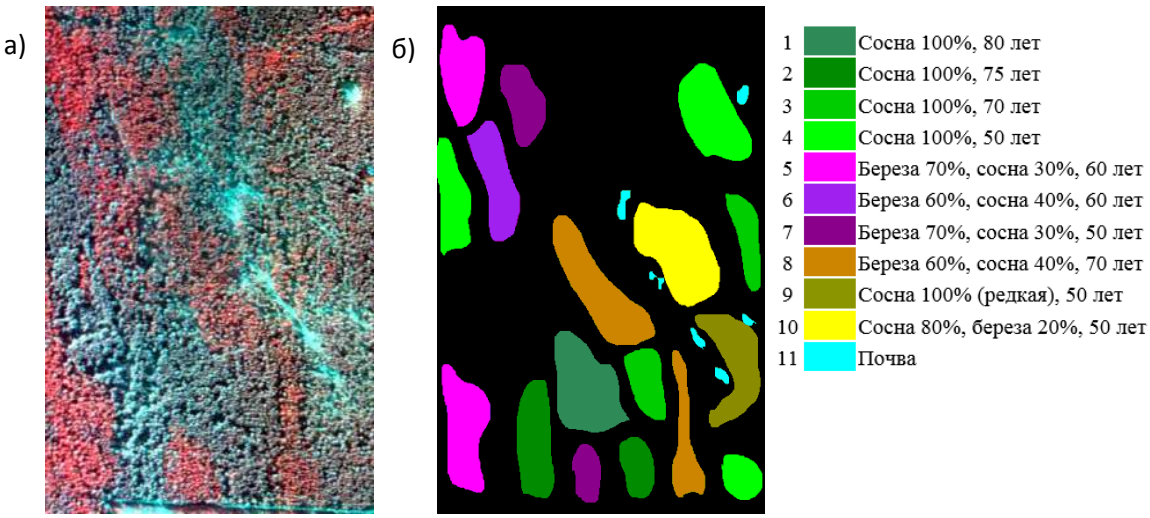


Рис. 1. RGB-композит (каналы 81, 19, 10) (а)
и эталонная картосхема (б) изображения 1

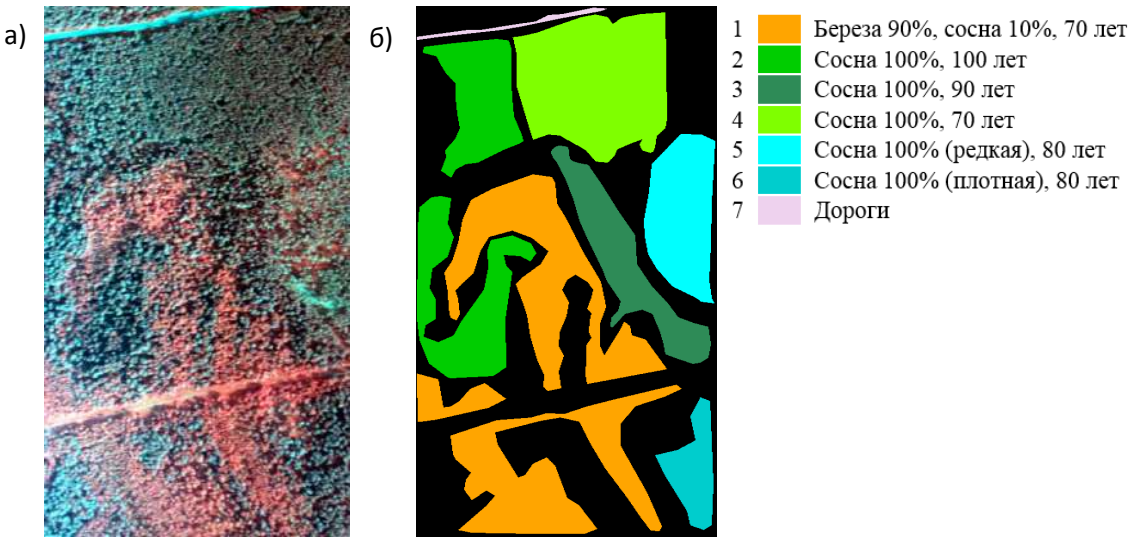


Рис. 2. RGB-композит (каналы 81, 19, 10) (а)
и эталонная картосхема (б) изображения 2

Для оценки качества классификации использовались контрольные выборки. Обучающие выборки включали по 1000 случайно выбранных точек каждого класса. Результаты усреднялись по пяти независимым запускам процедуры классификации. Под точностью классификации везде далее подразумевается процент правильно классифицированных пикселей.

Основные результаты классификации изображений 1 и 2 представлены в табл. 1 и 2, соответственно. В таблицах представлена точность классификации:

- только по спектральным признакам: на основе признаков МГК и MNF, с помощью классификаторов максимального правдоподобия (ML) и метода опорных векторов (SVM);
- по статистическим признакам: «0 п-к» – признак нулевого порядка Avg, «1 п-к» – признак 1-го порядка Var, «0 + 1 п-к» – на основе обоих признаков;
- по геометрическим признакам: «1 п-к» – признаки GM(0,1) и GM(1,0), «0 + 1 п-к» – признаки GM(0,0), GM(0,1) и GM(1,0); «0 + 1 + 2 п-к» – признаки GM(0,0), GM(0,1), GM(1,0), GM(1,1), GM(2,0), GM(0,2); результаты классификации только по признаку нулевого порядка GM(0,0) не приведены, так как признак совпадает со статистическим признаком нулевого порядка.

Далее более подробно рассматриваются результаты на примере изображения 1.

Таблица 1

Точность классификации изображения 1 с помощью различных классификаторов и методов учета пространственной информации

Число признаков	Спектральные признаки				Статистические признаки			Геометрические признаки		
	МГК		MNF		MNF			MNF		
					0 п-к	1 п-к	0 + 1 п-к	1 п-к	0 + 1 п-к	0 + 1 + 2 п-к
	ML	SVM	ML	SVM	SVM			SVM		
2	31.83	32.96	35.12	36.18	65.05	34.26	71.81	21.63	69.48	72.89
3	38.34	40.99	38.95	39.65	76.26	48.2	84.85	27.88	83.03	86.76
4	43.05	45.56	43.55	45.96	83.23	57.13	89.47	35.7	89.77	94.17
6	44.07	46.77	48.39	50.87	93.46	72.2	95.74	52.14	96.71	99.11
9	46.2	48.71	50.73	53.34	96.88	82.56	98.5	70.15	99	99.85
12	48.37	51.8	51.65	55	99.14	86.69	99.8	81.43	99.81	99.97
15	48.69	51.99	52.33	55.96	99.66	91.32	99.94	90.11	99.97	99.99
20	48.78	51.9	52.44	55.78	99.96	94.85	99.98	96.35	99.99	100

Таблица 2

Точность классификации изображения 2 с помощью различных классификаторов и методов учета пространственной информации

Число признаков	Спектральные признаки				Статистические признаки			Геометрические признаки		
	МГК		MNF		MNF			MNF		
					0 п-к	1 п-к	0 + 1 п-к	1 п-к	0 + 1 п-к	0 + 1 + 2 п-к
	ML	SVM	ML	SVM	SVM			SVM		
2	49.96	49.1	62.9	62.1	84.06	56.87	87.96	34.68	86.05	87.08
3	60.69	61.3	68.67	70.44	94.23	64.78	96.4	39.58	95.75	96.42
4	73.77	76.31	70.61	72.77	96.28	72.96	98.42	44.33	97.68	98.08
6	74.66	77.36	76.78	79.6	98.89	85.8	99.63	56.07	99.51	99.65
9	75.67	78.25	78.65	81.81	99.66	89.32	99.9	68.63	99.91	99.92
12	77.42	79.69	79.44	82.47	99.87	92.67	99.9	76.8	99.96	99.94
15	77.37	79.44	79.9	82.5	99.92	94.11	99.95	82	99.93	99.95
20	77.08	79.08	79.97	82.34	99.95	95.96	99.92	86.99	99.96	99.96

В первом эксперименте производилось сравнение метода главных компонент и метода MNF. На рис. 3 представлена зависимость точности попиксельной классификации первого изображения от числа использованных признаков.

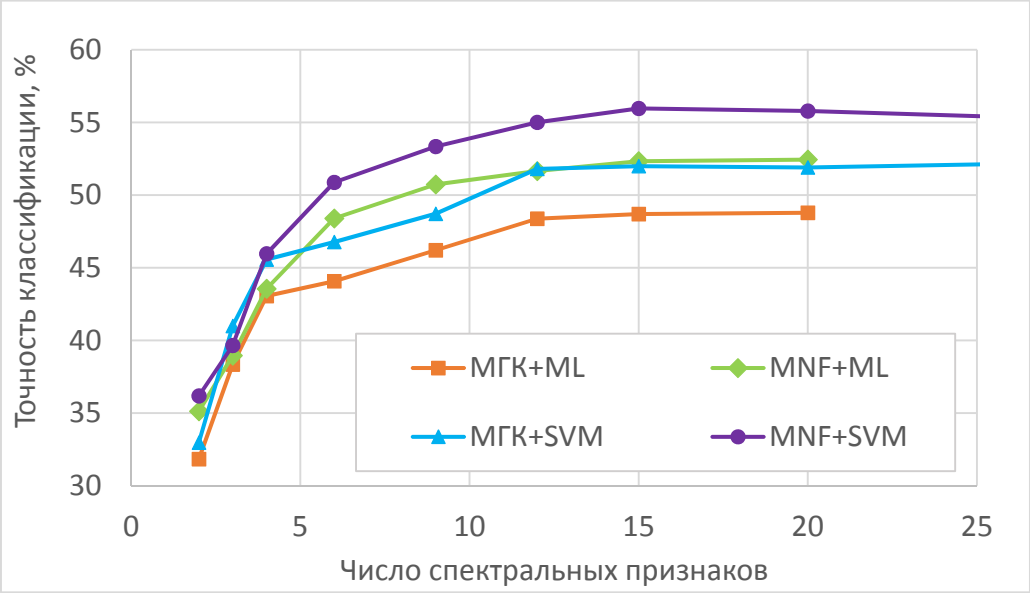


Рис. 3. Результаты классификации изображения 1 только по спектральным признакам

Видно, что оба алгоритма классификации дают более высокое качество при использовании набора признаков MNF, а метод опорных векторов обеспечивает более высокое качество, чем метод максимального правдоподобия. Данные из табл. 2 показывают, что это верно и для второго изображения. Поэтому далее в экспериментах использовался метод выделения признаков MNF и классификатор SVM.

На рис. 4 представлена точность классификации по различным наборам геометрических моментов. Использованы признаки нулевого (Avg), первого (*GM*(0,1), *GM*(1,0)) и второго (*GM*(1,1), *GM*(0,2), *GM*(2,0)) порядков. Признаки вычислялись на основе спектральных признаков MNF, использовался классификатор SVM.

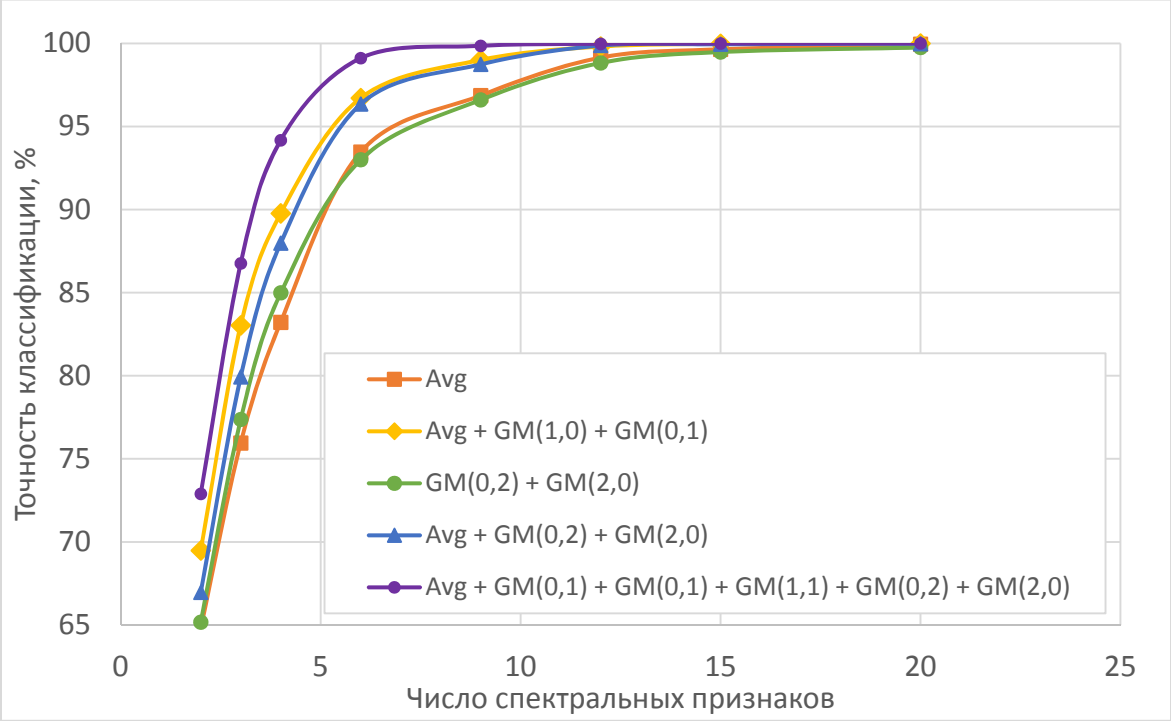


Рис. 4. Результаты классификации изображения 1 на основе различных наборов геометрических признаков (использованы признаки MNF, классификатор SVM)

График показывает, использование пространственных признаков позволяет значительно повысить качество классификации (в предыдущем эксперименте с помощью спектральных признаков для этого изображения была достигнута точность лишь 56%, теперь же она приближается к 100%). Также, для достижения необходимой точности лучше брать больше спектральных признаков и на их основе вычислять геометрические моменты низких порядков, чем использовать геометрические моменты высоких порядков при малом числе спектральных признаков. Например, использование геометрических признаков нулевого, первого и второго порядков, рассчитанных на основе шести спектральных при-

знаков (т.е. используя $(1+2+3)\cdot 6=36$ пространственных признаков), можно достичь точности классификации 99.11%. Однако использование только признака нулевого порядка, вычисленного на основе первых 12-ти спектральных признаков, обеспечивает точность 99.14% при всего лишь 12-ти пространственных признаков.

На рис. 5 представлена точность классификации по различным наборам статистических признаков. Признаки вычислялись на основе спектральных признаков MNF, использовался классификатор SVM. Также на графике показана точность спектральной классификации.

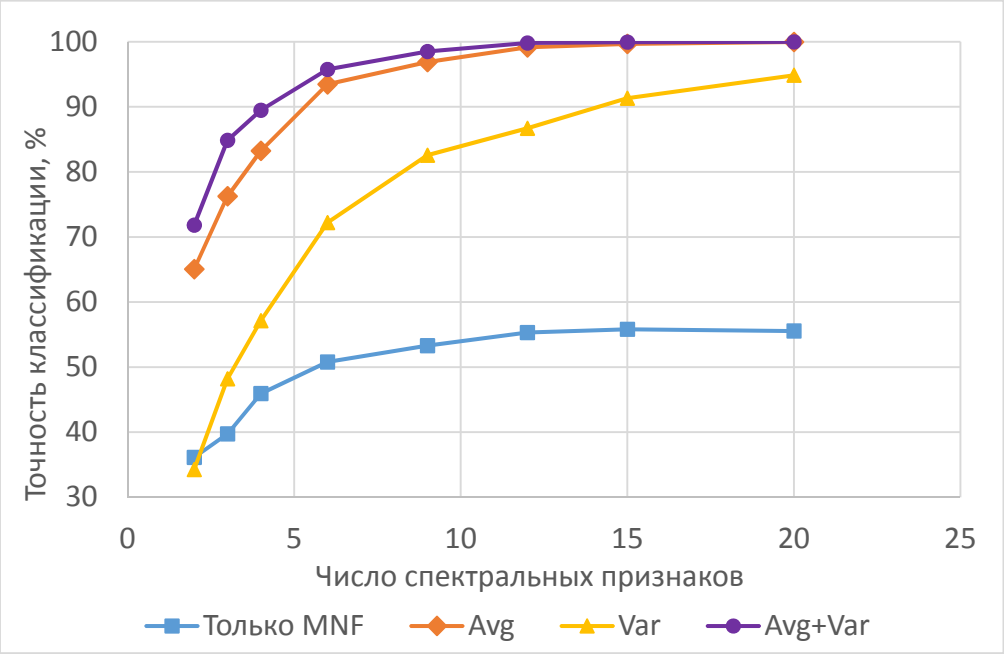


Рис. 5. Результаты классификации изображения 1 на основе различных наборов статистических признаков (использованы признаки MNF, классификатор SVM)

Как и в предыдущем эксперименте, график показывает, что добавление пространственной информации существенно повышает точность классификации. Использование момента первого порядка дает лучший результат, чем использовании только лишь момента второго порядка. Добавление дисперсии к среднему несущественно улучшает точность классификации.

Заключение

В работе рассмотрена схема классификации гиперспектральных изображений высокого пространственного разрешения на основе геометрических моментов, включающая три этапа: 1) формирование сокращенного набора спектральных признаков с помощью метода главных компонент или его модификации, метода Minimum Noise Fraction; 2) вычисление пространственных признаков на

основе геометрических моментов; 3) построение классификатора и собственно классификация. В рамках этой схемы проведено исследование качества классификации с помощью метода максимального правдоподобия и опорных векторов.

Исследование показало, что использование пространственных признаков позволяет существенно повысить качество классификации ГСИ высокого разрешения. Использование геометрических моментов позволяют достичь лучшего результата, чем статистических моментов.

Использование геометрических моментов выше первого порядка нецелесообразно для решения задачи распознавания типов древостоев. Увеличение числа сформированных спектральных признаков позволяет достичь того же качества классификации при меньшем числе признаков. Таким образом, при классификации целесообразно использовать геометрические признаки нулевого и первого порядков и наращивать число спектральных признаков (главных компонент или признаков MNF) до достижения требуемого качества распознавания (на обучающей или контрольной выборке).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Petrou M., Garcia S.P. Image processing: Dealing with texture. – Wiley, 2006. – 618 с.
2. Tsai F., Lai J.-S. Feature extraction of hyperspectral image cubes using three-dimensional gray-level co-occurrence // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens,– Jun. 2013. – Vol. 51, no. 6. – С. 3504–3513.
3. Tarabalka Y., Fauvel M., Chanussot J., Benediktsson J. A. SVM-and MRF-based method for accurate classification of hyperspectral images // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. – Oct. 2010. – Vol. 7, no. 4. – С. 736–740,
4. Li W., Prasad S., Fowler J. E. Hyperspectral image classification using Gaussian mixture models and Markov random fields // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. – Jan. 2014. – Vol. 11, no. 1. – С. 153–157.
5. Benediktsson J. A., Palmason J. A., Sveinsson J. R. Classification of hyperspectral data from urban areas based on extended morphological profiles // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – Mar. 2005. – Vol. 43, no. 3. – С. 480–491,.
6. Quesada-Barriuso P., Argello F., Heras D. B. Spectral-spatial classification of hyperspectral images using wavelets and extended morphological profiles // IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens. – , Apr. 2014. – Vol. 7, no. 4. – С. 1177–1186.
7. Song B. Li J., Mura M. D. и др. Remotely sensed image classification using sparse representations of morphological attribute profiles // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – Aug. 2014. – Vol. 52, no. 8. – С. 5122–5136.
8. Marpu P. R., Pedergnana M., Mura M. D. и др. Automatic generation of standard deviation attribute profiles for spectral-spatial classification of remote sensing data // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. – Mar. 2013. – Vol. 10, no. 2. – С. 293–297.
9. Ye Z., Prasad S., Li W., Fowler J. E., He M. Classification based on 3-D DWT and decision fusion for hyperspectral image analysis // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. – Jan. 2014. – Vol. 11, no. 1. – С. 173–177.
10. Shen L., Zhu Z., Jia S., Zhu J., Sun Y. Discriminative Gabor featureselection for hyperspectral image classification // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. – Jan. 2013. – Vol. 10, no. 1. – С. 29–34.

11. Kumar B., Dikshit O. Spectral–spatial classification of hyperspectral imagery based on moment invariants // IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing. – 2015. – Vol. 8, no. 6. – C. 2457-2463.

12. Melnikov P.V., Pestunov I.A., Rylov S.A. Comparison of spectral-spatial classification methods for hyperspectral images of high spatial resolution // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – Красноярск: СФУ, 2017. – Т. 10. № 6. – С. 805–811.

13. John A. Richards Remote sensing digital image analysis: an introduction. – Springer, 2013. – 494 c.

14. Green A. A., Berman M., Switzer P., Craig M. D. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1988. – Vol. GRS-26. – C. 65–74.

15. Борзов С.М., Мельников П.В., Пестунов И.А., Потатуркин О.И., Федотов А.М. Комплексная обработка гиперспектральных изображений на основе спектральной и пространственной информации // Вычислительные технологии. – Новосибирск: ИВТ, 2016. – Т. 21, № 1. – С. 25–39.

16. Chang C.-C., Lin C.-J. LIBSVM: a library for support vector machines // ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology. – 2011. – Vol. 2 (27). – C. 1–27.

17. 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. – 55(11). – C. 2657–2667.

REFERENCES

1. Petrou, M., & Sevilla, P. G. (2006). Image Processing: Dealing With Texture. Wiley.

2. Tsai, F., & Lai J.-S. (2013). Feature extraction of hyperspectral image cubes using three-dimensional gray-level co-occurrence. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 51(6), 3504–3513. DOI: 10.1109/TGRS.2012.2223704.

3. Tarabalka, Y., Fauvel, M., Chanussot, J., & Benediktsson, J. A. (2010). SVM-and MRF-based method for accurate classification of hyperspectral images. IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., 7(4), 736–740. DOI: 10.1109/LGRS.2010.2047711.

4. Li, W., Prasad, S., & Fowler, J. E.. (2014). Hyperspectral image classification using Gaussian mixture models and Markov random fields. IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., 11(1), 153–157. DOI: 10.1109/LGRS.2013.2250905.

5. Benediktsson, J. A., Palmason, J. A., & Sveinsson, J. R. (2005). Classification of hyperspectral data from urban areas based on extended morphological profiles. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 43(3), 480–491. DOI: 10.1109/TGRS.2004.842478.

6. Quesada-Barriuso, P., Argello, F., & Heras, D. B. (2014). Spectral-spatial classification of hyperspectral images using wavelets and extended morphological profiles. IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens., 7(4), 1177–1186. DOI: 10.1109/TGRS.2004.842478.

7. Song, B. et al. (2014). Remotely sensed image classification using sparse representations of morphological attribute profiles. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 52(8), 5122–5136. DOI: 10.1109/TGRS.2013.2286953.

8. Marpu, P. R. et. al. (2013). Automatic generation of standard deviation attribute profiles for spectral-spatial classification of remote sensing data. IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., 10(2), 293–297. DOI: 10.1109/LGRS.2012.2203784.

9. Ye, Z., Prasad, S., Li, W., Fowler, J. E., & He, M. (2014). Classification based on 3-D DWT and decision fusion for hyperspectral image analysis. IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., 11(1), 173–177. DOI: 10.1109/LGRS.2013.2251316.

10. Shen, L., Zhu, Z., Jia, S., Zhu, J., & Sun, Y. (2013). Discriminative Gabor feature selection for hyperspectral image classification. IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., 10(1), 29–34. DOI: 10.1109/LGRS.2012.2191761.

11. Kumar, B., & Dikshit, O. (2015). Spectral–spatial classification of hyperspectral imagery based on moment invariants. IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing, 8(6), 2457-2463. DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2446611.

12. Melnikov, P.V., Pestunov, I.A., & Rylov, S.A. Comparison of spectral-spatial classification methods for hyperspectral images of high spatial resolution. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 10(6), 805-811. DOI: 10.17516/1999-494X-2017-10-6-805-811.

13. Richards, J.A. (2013). Remote sensing digital image analysis: an introduction (5th ed.). Germany, Berlin: Springer. DOI: 10.1007/978-3-642-30062-2.

14. Green, A. A., Berman, M., Switzer, P., & Craig, M. D. (1988). A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., GRS-26, 65–74. DOI: 10.1109/36.3001.

15. Borzov, S.M., Melnikov, P.V., Pestunov, I.A., Potaturkin, O.I., & Fedotov, A.M. (2016). Complex spectral-spatial processing of hyperspectral images. Computational Technologies, 21(1), 25–39 [In Russian].

16. Chang, C.-C., & Lin, C.-J. (2011). LIBSVM: a library for support vector machines. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology. 2(27), 1–27. DOI: 10.1145/1961189.1961199.

17. Kozoderov, V.V., Kondranin, T.V., Dmitriev, E.V., & Kamentsev, V.P. (2015). Bayesian classifier applications of airborne hyperspectral imagery processing for forested areas. Advances in Space Research, 55(11), 2657–2667. DOI: 10.1016/j.asr.2015.02.015.

© П. В. Мельников, И. А. Пестунов, 2018

УДК 502.3+528.854.2+551.511

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ВЫБРОСОВ НОВОСИБИРСКИХ ТЭЦ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

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

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.sscc.ru

Татьяна Владимировна Ярославцева
ФБУН «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

На спутниковых снимках территорий городов и промышленных площадок непременным атрибутом являются дымовые шлейфы, которые характеризуют источники выбросов и процессы распространения примесей в атмосфере. Цель работы состоит в использовании этой информации для оценки параметров источников и характеристик пограничного слоя атмосферы. Предложенный подход базируется на уравнениях гидротермодинамики. Для восстановления вертикального профиля ветра в пограничном слое используется уравнения Экмана и данные аэрологического зондирования. Эффективная высота источника рассчитывается по высоте солнца над горизонтом и положением тени дымовой струи на спутниковом снимке. Контроль точности оценивания дополнительной высоты подъема дымового факела проводится с помощью известных соотношений, включающих в себя динамический импульс выброса и тепловой поток плавучести. По зимним спутниковым снимкам г. Новосибирска проведены оценки эффективной высоты подъема факелов для крупных ТЭЦ города. Представлены результаты численного восстановления вертикальных профилей ветра по дымовым шлейфам. Предлагаемые подходы могут быть использованы для анализа процессов загрязнения атмосферы городов.

Ключевые слова: пограничный слой атмосферы, метеорологические условия, дымовой шлейф, эффективная высота источника, поток плавучести, спутниковые снимки, обратная задача, численное моделирование.

ESTIMATING THE EMISSION PARAMETERS OF NOVOSIBIRSK THERMAL POWER STATIONS WITH THE USE OF SATELLITE INFORMATION

Vladimir F. Raputa
Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Chief Researcher, phone: (383)330-61-51, e-mail: raputa@sscc.ru

Anatoly A. Lezhenin
Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)330-64-50, e-mail: lezhenin@ommfao.sscc.ru

Tatyana V. Yaroslavtseva
FBSI «Novosibirsk scientific research institute of hygiene» of Rospotrebnadzor, 7, Parhomenko St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)330-61-51, e-mail: tani-ta@list.ru

Satellite images of cities and industrial platforms show plumes of smoke which characterize sources of emissions and transport of pollutions in the atmosphere. The purpose of this work is the use of this information for assessment of emission sources and characteristics of the atmospheric boundary layer. An approach based on the equations of atmospheric dynamics is proposed. For the calculation of a vertical wind's profile in the atmospheric boundary layer Ekman's equations and data of aerological sounding are used. The effective source height is calculated using the sun's angle over the horizon and the projection of the shadow of the smoke plume in the satellite image. Assessment of the accuracy of estimation of the additional height of plumes of smoke is carried out by means of some ratios including the dynamic impulse of emissions of pollutions and the buoyancy heat flux. Using winter satellite images of Novosibirsk of effective heights of a plumes of smoke for large combined heat and power plants of the city are estimated. The results of calculations of vertical profiles of wind are presented. This approach can be used for the analysis of the processes of pollution in the urban atmosphere.

Key words: atmospheric boundary layer, meteorological conditions, plumes of smoke, effective height, flux of buoyancy, satellite images, inverse problem, numerical modeling.

Введение

Экспериментальные и теоретические исследования атмосферного загрязнения играют важную роль в решении проблем окружающей среды. Они необходимы для проведения оценок риска здоровья населения, воздействия на биосферу и климатическую систему [1-5].

Дымовые шлейфы природных пожаров, выбросов промышленных предприятий и крупных ТЭЦ хорошо видны на снимках из космоса [6-8]. Траектории дымовых факелов фиксируют направления и скорости ветра на высотах выбросов. Возможности же визуальных наблюдений за распространением дымовых загрязнений с помощью наземных средств весьма ограничены. Использование спутниковых снимков позволяет прослеживать дымовые шлейфы до нескольких десятков километров. Такая картина особенно часто наблюдается в зимний период времени. Протяженность и ширина дымовых шлейфов может изменяться в больших диапазонах [2, 4].

Модели, базирующиеся на численном решении уравнений гидротермодинамики атмосферы, позволяют получить детальное описание процессов переноса примеси в локальном и региональном масштабах [9 - 14]. Для проведения расчетов требуется задание значительных объемов входной информации, включающей сведения о метеорологических условиях и параметрах источников выбросов примеси [15 - 18]. При этом основные характеристики источника такие, как интенсивность выброса и эффективная высота подъема дымового шлейфа требуют большей точности определения. Также важна информация о вертикальном профиле ветра. Для получения этих сведений нами используются как расчетные методы, так и аэрологические, метеорологические наблюдения и спутниковые снимки. Решение поставленных задач требует построения соот-

ветствующих математических моделей оценивания параметров с использованием данных с различных систем наблюдений состояния атмосферы и процессов переноса и диффузии примеси [19]. В практическом плане это приведет к повышению точности расчетов полей загрязнения.

Объекты и методы исследования

Материалами исследований служили зимние спутниковые снимки территории г. Новосибирска. На них хорошо видны траектории дымовых выбросов от труб ТЭЦ-2, ТЭЦ-3, ТЭЦ-4, ТЭЦ-5. Высота основных труб ТЭЦ-2, ТЭЦ-3 составляет 120 м, их диаметр равен 8,2 м. Высота и диаметр устья большой трубы ТЭЦ-5 равны 260 м и 10,8 м соответственно.

На рис. 1 представлен снимок г. Новосибирска с ИСЗ «Ресурс-П» №1 за 13 февраля 2018 г. на 12 часов местного времени, полученный в Сибирском центре ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «ПЛАНЕТА» (http://www.rcpod.ru). Предварительный анализ показывает, что направления выносов примеси от разновысоких труб ТЭЦ заметно различаются. Дымовые шлейфы от труб высотных труб ТЭЦ-5, сносятся в западно-северо-западном направлении. Для более низких источников ТЭЦ-2, ТЭЦ-3, ТЭЦ-4 вынос примеси происходит в секторе запад-юго-запад.

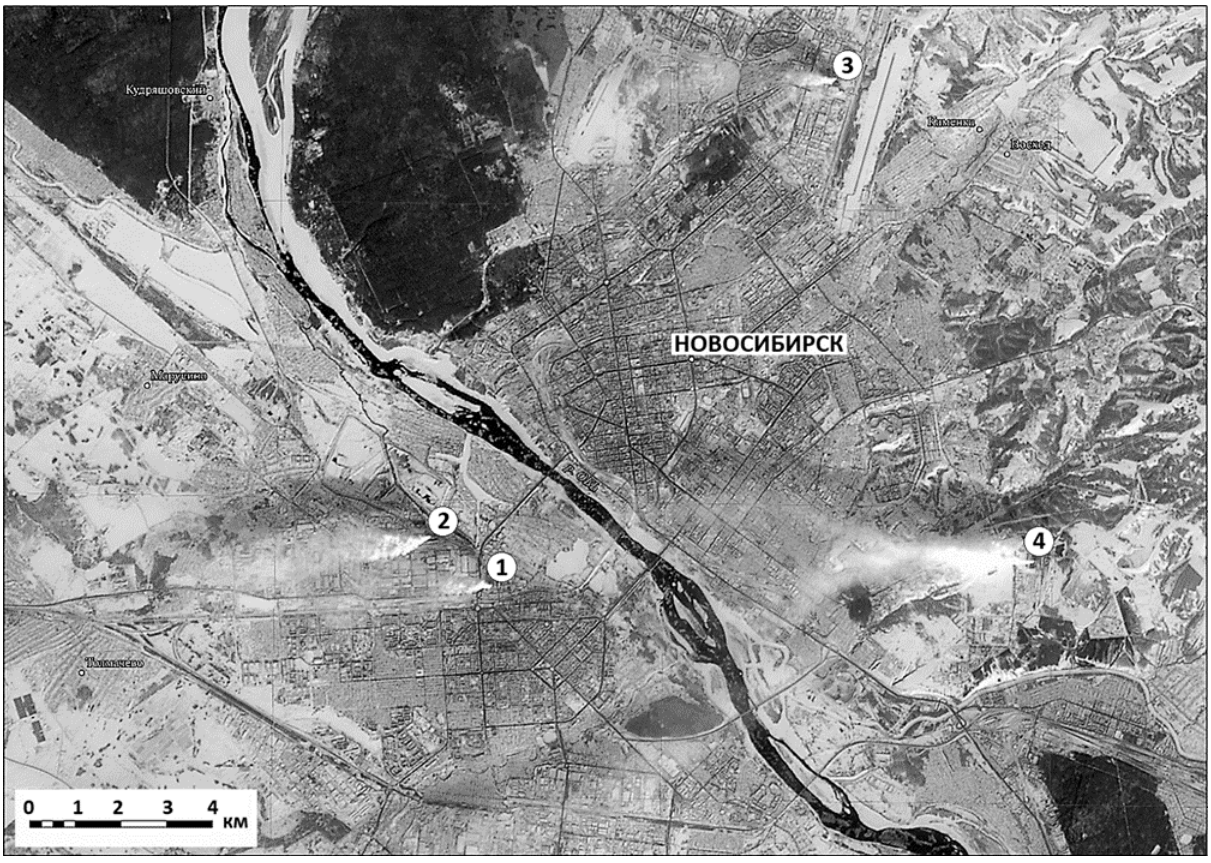


Рис. 1. Спутниковый снимок г. Новосибирска от 13 февраля 2018 г.
на 12 часов местного времени с ИСЗ «Ресурс-П» № 1.
1 - ТЭЦ-2, 2 - ТЭЦ-3, 3 - ТЭЦ-4, 4 - ТЭЦ-5

Отметим, что при слабом ветре и устойчивой температурной стратификации в нижней атмосфере эффективная высота подъема газоаэрозольной примеси, выбрасываемой из труб ТЭЦ-5, может достигать несколько сотен метров. По сути эти дымовые струи расположены в верхней части зимнего пограничного слоя атмосферы. На таких уровнях наблюдается правый поворот ветра с высотой [20]. Это подтверждается анализом рис. 1 и данными, приведенными в табл. 1, 2. Относительно направления приземного ветра на близкорасположенной к г. Новосибирску метеостанции Огурцово (индекс станции 29638) угол правого поворота дымовых факелов от труб ТЭЦ-5 составляет не менее 35 - 40 градусов. Для анализа метеорологических условий в течение 13 февраля 2018 г. использованы данные аэрологической станции г. Новосибирска. Станция расположена на высоте 143 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 07 и 19 часов местного времени.

Таблица 1

Метеорологические параметры в нижней атмосфере
по данным аэрологической станции г. Новосибирска
07 часов местного времени 13 февраля 2018 г.

Высота над уровнем моря, м	Давление, hPa	Температура, °C	Направление ветра, град.	Скорость ветра, м/с
143	1008	-15,3	0	0
203	1000	-15,1	40	2
473	965	-14,9	47	3
737	932	-13,9	54	3
794	925	-14,1	55	3
1436	850	-14,7	70	4

Таблица 2

Метеорологические параметры в нижней атмосфере
по данным аэрологической станции г. Новосибирска
на 19 часов местного времени 13 февраля 2018 г.

Высота над уровнем моря, м	Давление, hPa	Температура, °C	Направление ветра, град.	Скорость ветра, м/с
143	1008	-11,5	30	2
208	1000	-11,7	35	3
528	959	-13,1	54	5
747	932	-10,3	67	7
805	925	-10,5	70	7
1152	884	-11.8	80	10
1452	850	-12,9	85	11

Из табл. 1, 2 следует, что в течение дня в пограничном слое атмосферы температурная стратификация была близка к нейтральной и наблюдались слабые ветра северо-восточного направления.

Для расчетов полей концентрации примесей в атмосфере необходимо задание параметров источников выбросов и текущих метеорологических условий [15, 21]. Основными характеристиками источника являются мощность эмиссии, его геометрическая высота, диаметр трубы, температура и скорость исходящих газов. Существенное влияние на процессы распространения примеси оказывают метеорологические условия: распределение с высотой температуры, влажности воздуха и скорости ветра [7, 9, 15-18].

Для вычисления эффективной высоты источника и вертикального профиля ветра существует множество подходов [15, 21]. Фактической высотой источника выброса следует считать его эффективную высоту

$$h_{эф} = h_{тр} + \Delta h\,, \tag{1}$$

где $h_{тр}$ – геометрическая высота трубы, Δh – добавка к высоте за счет скорости выброса примеси и теплового потока плавучести.

При стратификации близкой нейтральной расчет Δh производится по формуле [15]

$$\Delta h = a\frac{w_0}{U}D_0 + b\frac{\Phi}{U^3}\,, \qquad \Phi = g w_0 \frac{D_0^2 \Delta T}{4T_a}\,, \tag{2}$$

где g – ускорение силы тяжести, w_0 – скорость выброса примеси в атмосферу, U – скорость ветра, D_0 – внутренний диаметр трубы, Φ – поток плавучести, ΔT – превышение температуры исходящих газов над температурой атмосферы T_a.

При измерении скорости ветра на уровне флюгера: $a = 1{,}9$, $b = 4{,}95$ [15].

Для расчета вертикального профиля ветра в пограничном слое используем следующую модель [22]:

$$\frac{\partial}{\partial z}k\frac{\partial u}{\partial z} + l(v - V_g) = 0\ , \qquad \frac{\partial}{\partial z}k\frac{\partial v}{\partial z} - l(u - U_g) \tag{3}$$

Здесь u, v - горизонтальные компоненты скорости ветра в направлении осей x, y соответственно, ось z направлена вертикально вверх, l – параметр Кориолиса, k – коэффициент вертикального турбулентного обмена, U_g, V_g – горизонтальные составляющие скорости геострофического ветра. Для определения коэффициента вертикального турбулентного обмена применяются различные схемы замыкания [12, 13, 18-20]. Для случая постоянного коэффициента турбулентности в работе [22] предложен метод восстановления компонентов скорости ветра в пограничном слое атмосферы по данным спутниковых наблюдений распространения дымовых струй от разновысоких источников.

Результаты

Расчет дополнительной высоты подъема дымового шлейфа выброса ТЭЦ проводился двумя способами. В первом случае использовался спутниковый снимок (рис. 1). По углу высоты Солнца и измеренным проекциям дымовых шлейфов от труб ТЭЦ-3 и ТЭЦ-5 на поверхность земли были определены эффективные высоты выбросов примеси. В рассматриваемом случае высота Солнца над горизонтом достигала 19° 03´, измеренная ширина тени от шлейфа ТЭЦ-3 составила примерно 1000 м, от шлейфа ТЭЦ-5 – 1500 м. Рассчитанные по этим значениям эффективные высоты подъема дымовых струй равны: 344 м для ТЭЦ-3, 516 м для ТЭЦ-5.

По формулам (1), (2) были выполнены расчеты дополнительных высот подъема дымовых шлейфов от труб ТЭЦ-3, ТЭЦ-5. Исходные данные и результаты расчетов для $w_0 = 6$ м/с представлены в табл. 3. Скорость ветра на высоте флюгера составляла 3 м/с (метеостанция Огурцово).

Таблица 3

Оценки дополнительных высот подъема дымовых шлейфов ТЭЦ-3 и ТЭЦ-5

ТЭЦ-3			ТЭЦ-5		
ΔT ,°C	Φ , м^4/с^3	Δh, м	ΔT ,°C	Φ , м^4/с^3	Δh, м
150	571	136	150	848	194
200	760	171	200	1130	245

Численное восстановление вертикального профиля ветра проводилось с использованием модели (3) [22]. На рис. 2 приведены вычисленные компоненты скорости ветра.

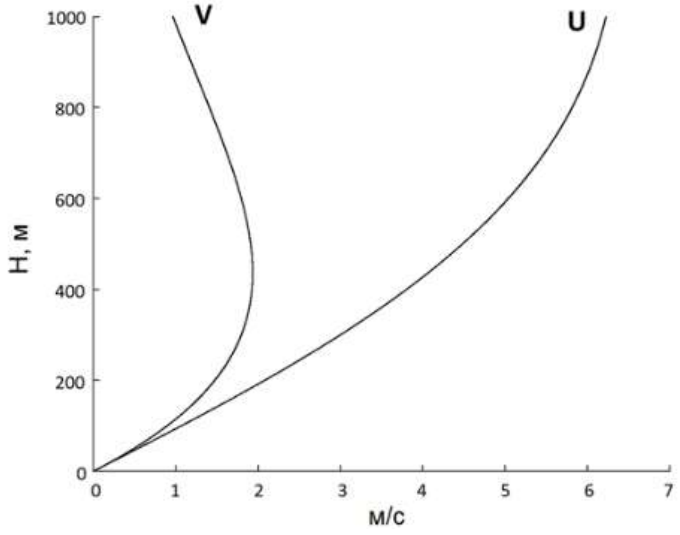


Рис. 2. Восстановленные с помощью модели (4) составляющие скорости ветра U , V

Геострофический ветер задавался 6 м/с. Угол между направлением приземного ветра и направлением дымового факела от трубы ТЭЦ-5 был равен 40°.

Обсуждение

Многочисленные примеры фиксации на космических снимках дымовых выбросов в атмосферу от антропогенных и природных источников указывают на возможности широкого использования этой информации для изучения процессов распространения примесей. Проведенное исследование позволяет с помощью наблюдений из космоса определить параметры источников.

Оценки эффективных высот подъема дымовых шлейфов ТЭЦ-3, ТЭЦ-5 г. Новосибирска, вычисленных по формулам (1), (2) (табл.3) и по спутниковой информации вполне сопоставимы. Наиболее высокий уровень совпадения при ΔT = 200°С. Оценка $h_{эф}$ по формулам (1), (2) для ТЭЦ-3 составила 291 м, а для ТЭЦ-5 – 505 м. Значения $h_{эф}$, полученные на основе спутниковых данных (рис. 1), составили 344 м и 516 м соответственно. Следует отметить, что для конкретного момента времени неадекватное определение параметров, таких как скорость ветра, температуры выбросов, может привести к значительным погрешностям при вычислении $h_{эф}$. В то же время, оценки $h_{эф}$, полученные по космоснимку, могут оказаться более объективными.

По спутниковой информации о траекториях шлейфов (рис. 1), данных с метеостанции, уравнений (3) рассчитаны компоненты скорости ветра в пограничном слое атмосферы г. Новосибирска (рис. 2). Полученные ветровые характеристики позволяют более точно описывать процессы распространения загрязнения территории города и его окрестностей от высотных источников.

Заключение

Предложен метод косвенного оценивания эффективной высоты подъема шлейфа выбросов от точечного источника, базирующийся на спутниковой информации. Наиболее эффективно применение этого метода при слабых ветрах, устойчивой или нейтральной стратификации пограничного атмосферы.

В таких метеорологических условиях реализуются благоприятные возможности для визуализации траекторий дымовых шлейфов в достаточном диапазоне расстояний от источника выброса. Наличие снегового покрова усиливает контрастность проекции шлейфа (тень) на земную поверхность. Проведена апробация предложенного похода для ряда крупных ТЭЦ г. Новосибирска и выполнено сравнение с результатами расчетов эффективной высоты подъема шлейфа по общепринятым методикам.

При отсутствии достоверной информации об источнике примеси имеется дополнительная возможность оценивать динамические и тепловые характеристики выбросов на основе спутниковых наблюдений. Подобная ситуация может возникнуть при аварийных выбросах. Полученные результаты указывают на необходимость комплексного использования различных видов информации

и расчетных методов для повышения контроля процессов загрязнения атмосферы от природных и антропогенных источников.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ (грант № 17-47-540342), госзадания 0315-2016-0004, проекта ПРАН № 51 (0315-2018-0016).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Balter B. M., Faminskaya M. V. Irregularly emitting air pollution sources: acute health risk assessment using aermod and the Monte Carlo approach to emission rate // Air Quality, Atmosphere and Health. – 2017. Vol. 10 (4). – P. 401–409.

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. Lezhenin A. A., Raputa V. F., Yaroslavtseva T. V. Numerical Analysis of Atmospheric Circulation and Pollution Transfer in the Environs of Norilsk Industrial Region // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2016. Vol. 29 (6). – P. 565–569.

4. Obolkin V. A., Potemkin V. L., Makukhin V. L., Chipanina Y. V., Marinayte I. I. Low-level atmospheric jets as main mechanism of long-range transport of power plant plumes in the Lake Baikal Region // Int. J. Environ. Studies. – 2014. Vol. 71 (3). P. 391–397.

5. Ding A. J., Huang X., Nie W., Sun J. N., Kerminen V.-M., Petäjä T., Su H., Cheng Y. F., Yang X.-Q., Wang M. H., Chi X. G., Wang J. P., Virkkula A., Guo W. D., Yuan J., Wang S. Y., Zhang R. J., Wu Y. F., Song Y., Zhu T., Zilitinkevich S., Kulmala M., Fu C. B., 2016: Enhanced haze pollution by black carbon in megacities in China // Geophysical Research Letters. – 2016. Vol.43 (6). – P. 2873–2879.

6. Кондратьев К. Я., Григорьев Ал. А., Покровский О. М., Шалина Е. В. Космическое дистанционное зондирование атмосферного аэрозоля. – Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – 216 с.

7. Solomos S., Amiridis V., Zanis P., Gerasopoulos E., Sofiou F. I., Herekakis T., Brioude J., Stohl A, Kahn R. A., Kontoes C. Smoke dispersion modeling over complex terrain using high resolution meteorological data and satellite observations – The FireHub platform // Atmos. Environ. – 2015. – Vol. 119. – P. 348–361.

8. Tohidi A., Kaye N. B. Highly buoyant bent-over plumes in a boundary layer // Atmos. Environ. – 2016. – Vol. 131. – P. 97–114.

9. Baklanov A., Smith Korsholm U., Nuterman R., Mahura A., Nielsen K. P., Sass B. H., Rasmussen A., Zakey A., Kaas E., Kurganskiy A., Sørensen B., and González-Aparicio, I.: Enviro-HIRLAM online integrated meteorology–chemistry modelling system: strategy, methodology, developments and applications (v7.2) // Geosci. Model Dev., – 2017. – Vol 10. – P. 2971–2999.

10. Siljamo P., Sofiev M., Filatova E., Grewling L., Jäger S., Khoreva E., Linkosalo T., Ortega Jimenez S., Ranta H., Rantio-Lehtimäki A., Svetlov A., Veriankaite L., Yakovleva E., Kukkonen J. A numerical model of birch pollen emission and dispersion in the atmosphere. Model evaluation and sensitivity analysis // Int. J. Biometeorol., – 2013. – Vol. 57. – P. 125–136.

11. Sokhi R., Baklanov A., Schluenzen H. (Eds.): Air Pollution and Meteorological Modelling for Atmospheric Research and Policy Applications, Anthem Press, 2017 – 260 p.

12. Gao Z., Bresson R., Qu Y., Milliez M., Munck C., Carissimo B. High resolution unsteady RANS simulation of wind, thermal effects and pollution dispersion for studying urban renewal scenarios in a neighborhood of Toulouse // Urban Climate. – 2018. – Vol. 23. – P. 114–130.

13. Li H., Cui G., Zhang Z. A New Scheme for the Simulation of Microscale Flow and Dispersion in Urban Areas by Coupling Large-Eddy Simulation with Mesoscale Models // Boundary-Layer Meteorol. – 2018. – Vol. 167. – P. 145–170.

14. Fallah-Shorshani M., Shekarrizfard M., Hatzopoulou M. Evaluation of regional and local atmospheric dispersion models for the analysis of traffic-related air pollution in urban areas // Atmos. Environ. – 2017. – Vol. 167. – P. 270–282.

15. Бызова Н. Л., Гаргер Е. К., Иванов В. Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 278 с.

16. Islam M. A., Roy G. D. A mathematical model in locating an unknown emission source // Water, Air, and Solid Pollut. – 2002. – Vol. 136. – N 1/4. – P. 331–345.

17. Mikhailuta S. V., Lezhenin A. A., Pitt A., Taseiko O. V. Urban wind fields: Phenomena in transformation // Urban Climate. – 2017. – Vol. 19. – P. 122–140.

18. Baas P., van de Wiel B. J. H., van der Linden S. J. A., Bosveld F. C. From Near-Neutral to Strongly Stratified: Adequately Modelling the Clear-Sky Nocturnal Boundary Layer at Cabauw // Boundary-Layer Meteorol. – 2018. – Vol. 166. – P. 217–238.

19. Рапута В. Ф., Шлычков В. А., Леженин А. А., Романов А. Н., Ярославцева Т. В. Численный анализ данных аэрозольных выпадений примесей от высотного источника // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 27. – № 8. – С. 713–718.

20. Зилитинкевич С. С. Атмосферная турбулентность и планетарные пограничные слои. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 252 с.

21. Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе // Утверждены приказом Минприроды России от 06.06.2017 № 273.

22. Леженин А. А., Ярославцева Т. В., Рапута В. Ф. Использование спутниковой информации о траекториях дымовых факелов для расчета полей ветра // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 1. – С. 63–67.

REFERENCES

1. Balter, B. M., & Faminskaya, M. V. (2017). Irregularly emitting air pollution sources: acute health risk assessment using aermod and the Monte Carlo approach to emission rate. Air Quality, Atmosphere and Health, 10 (4), 401–409. doi: 10.1007/s11869-016-0428-x

2. Balter, B. M., Balter, D. B., Egorov, V. V., & Stalnaya, M. V. (2014). Fitting the emission model and meteorology to Landsat data on pollutant plumes from gas well pumping. Issledovanie Zemli iz kosmosa [Earth Observation and Remote Sensing], 2, 55–66 [in Russian].

3. Lezhenin, A. A., Raputa, V. F., & Yaroslavtseva, T. V. (2016). Numerical analysis of atmospheric circulation and pollution transfer in the environs of Norilsk industrial region. Atmospheric and Oceanic Optics, 29(6), 565–569.

4. Obolkin, V. A., Potemkin, V. L., Makukhin, V. L., Chipanina, Y. V., & Marinayte, I. I. (2014). Low-level atmospheric jets as main mechanism of long-range transport of power plant plumes in the Lake Baikal Region. Int. J. Environ. Studies, 71(3), 391–397. doi:10.1080/00207233.2014.918396.

5. Ding, A. J., Huang, X., Nie W., Sun, J. N., Kerminen, V.-M., Petäjä, T., Su, H., Cheng, Y. F., Yang, X.-Q., Wang, M. H., Chi, X. G., Wang, J. P., Virkkula, A., Guo, W. D., Yuan, J., Wang, S. Y., Zhang, R. J., Wu, Y. F., Song, Y., Zhu, T., Zilitinkevich, S., Kulmala, M., Fu, C. B. (2016). Enhanced haze pollution by black carbon in megacities in China. Geophysical Research Letters, 43, 6, 2873-2879. doi: 10.1002/2016GL067745.

6. Kondrat'yev, K. Ya., Grigor'yev, Al. A., Pokrovskiy, O. M., Shalina, E. V. (1983). Kosmicheskoe distantsionnoe zondirovanie atmosfernogo aerozolya [Space remote sensing of an atmospheric aerosol]. Leningrad: Gidrometeoizdat [in Russian].

7. Solomos, S., Amiridis, V., Zanis, P., Gerasopoulos, E., Sofiou, F. I., Herekakis, T., Brioude, J., Stohl, A, Kahn, R. A., Kontoes, C. (2015). Smoke dispersion modeling over complex terrain using high resolution meteorological data and satellite observations - The FireHub platform. Atmos. Environ., 119, 348–361. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.066

8. Tohidi, A., Kaye, N. B. (2016). Highly buoyant bent-over plumes in a boundary layer. Atmos. Environ., 131, 97–114. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.01.046

9. Baklanov, A., Smith Korsholm, U., Nuterman, R., Mahura, A., Nielsen, K. P., Sass, B. H., Rasmussen, A., Zakey, A., Kaas, E., Kurganskiy, A., Sørensen, B., and González-Aparicio, I. (2017). Enviro-HIRLAM online integrated meteorology–chemistry modelling system: strategy, methodology, developments and applications (v7.2). Geosci. Model Dev., 10, 2971–2999. https://doi.org/10.5194/gmd-10-2971-2017

10. Siljamo, P., Sofiev, M., Filatova, E., Grewling, Ł., Jäger, S., Khoreva, E., Linkosalo, T., Ortega Jimenez, S., Ranta, H., Rantio-Lehtimäki, A., Svetlov, A., Veriankaite, L., Yakovleva, E., and Kukkonen, J. (2013). A numerical model of birch pollen emission and dispersion in the atmosphere. Model evaluation and sensitivity analysis. Int. J. Biometeorol., 57, 125–136. https://doi.org/10.1007/s00484-012-0539-5

11. Sokhi, R., Baklanov, A., & Schluenzen, H. (Eds.) (2017). Air Pollution and Meteorological Modelling for Atmospheric Research and Policy Applications. Anthem Press.

12. Gao, Z., Bresson, R., Qu, Y., Milliez, M., Munck, C., Carissimo, B. (2018). High resolution unsteady RANS simulation of wind, thermal effects and pollution dispersion for studying urban renewal scenarios in a neighborhood of Toulouse. Urban Climate, 23, 114–130. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.11.002

13. Li, H., Cui, G., & Zhang, Z. (2018). A New Scheme for the Simulation of Microscale Flow and Dispersion in Urban Areas by Coupling Large-Eddy Simulation with Mesoscale Models. Boundary-Layer Meteorol.,167, 145–170. https://doi.org/10.1007/s10546-017-0323-5

14. Fallah-Shorshani, M., Shekarrizfard, M, Hatzopoulou, M. (2017). Evaluation of regional and local atmospheric dispersion models for the analysis of traffic-related air pollution in urban areas. Atmos. Environ., 167, 270–282. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.025

15. Byzova, N. L., Garger, E. K., & Ivanov, V. N. (1991). Eksperimental'nye issledovaniya atmosfernoy diffuzii i raschety rasseyaniya primesi [Experimental researches of atmospheric diffusion and calculations of dispersion of pollutions]. Leningrad: Gidrometeoizdat [in Russian].

16. Islam, M. A., Roy, G. D. (2002). A mathematical model in locating an unknown emission source. Water, Air, and Solid Pollut., 136(1/4), 331–345.

17. Mikhailuta, S. V., Lezhenin, A. A., Pitt, A., Taseiko, O. V. (2017). Urban wind fields: Phenomena in transformation. Urban Climate, 19, 122–140. http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2016.12.005

18. Baas, P., van de Wiel, B. J. H., van der Linden, S. J. A., Bosveld, F. C. (2018). From Near-Neutral to Strongly Stratified: Adequately Modelling the Clear-Sky Nocturnal Boundary Layer at Cabauw. Boundary-Layer Meteorol., 166, 217–238. https://doi.org/10.1007/s10546-017-0304-8

19. Raputa, V. F., Shlychkov, V. A., Lezhenin, A. A., Romanov, A. N., Yaroslavtseva, T. V. (2014). Numerical analysis of aerosol substance fallout from a high-altitude source. Optika Atmosfery i Okeana. [Atmospheric and Oceanic Optics], 27(8), 713–718 [in Russian].

20. Zilitinkevich, S. S. (2013). Atmosfernaya turbulentnost' i planetarnye pogranichnye sloi [Atmospheric turbulence and planetary boundary layers]. Moscow: FIZMATLIT [in Russian].

21. Metody raschetov rasseivaniya vybrosov vrednykh (zagryaznyayushchikh) veshchestv v atmo-sfernom vozdukhe (2017) [Methods of calculations of dispersion of the harmful (polluting) substances in atmospheric air]. Utverzhdeny prikazom Minprirody Rossii ot 06.06.2017 № 273 [in Russian].

22. Lezhenin, A. A., Raputa, V. F. & Yaroslavtseva, T. V. (2016). Use of satellite information on trajectories of the plumes of smoke for the calculation of wind fields. In Sbornik materialov Interekspo Geo-Sibir' – 2016: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Distantsionnye metody zondirovaniya Zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchey sredy, geoekologiya – 2016 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2016: International Scientific Conference: Vol. 1. Remote sensing methods of the Earth and photogrammetry, environmental monitoring, geoecology-2016] (pp. 63–67). Novosibirsk: SSUGT [in Russian].

© В. Ф. Рапута, А. А. Леженин, Т. В. Ярославцева, 2018

УДК 519.652

ЕСТЕСТВЕННАЯ КЛАСТЕРИЗАЦИЯ

Павел Алексеевич Ким
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории обработки изображений, тел. (923)113-11-35, e-mail: kim@ooi.sscc.ru

Рассматриваются формальные средства описания «естественной» кластеризации [1], основанные на известных географических понятиях, таких как, речной бассейн, площадь водосбора, водораздел. Основу формализации составляет разработанные в математике диаграммы Вороного [2] тесно связанные с разбиением площади триангуляцией Делоне. Естественная кластеризация разрабатывалась для масштабируемой модели рельефа, допускающей расширение в четырехмерное пространство, и, тем самым, разработанная модель кластеризация не ограничивается исключительно двумя географическими параметрами, но может быть продолжена и в многомерные пространства. И, если, чаще для кластеризации используются статистические методы, то для предложенной модели на первый план выдвигаются методы математического анализа для выделения границ водоразделов - стыковые соединения. Работа выполнена частично при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-07-00066) и Базового проекта ФАНО (проект № 0315-2016-0003).

Ключевые слова: масштабируемая модель рельефа, кластеризация, многомерные пространства, диаграммы Вороного.

NATURAL CLUSTERIZATION

Pavel A. Kim
Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher of Image Processing Laboratory, phone: (383)330-73-32, e-mail: kim@ooi.sscc.ru

Formal means of describing "natural" clustering [1], based on known geographical concepts, river basin, catchment area, watershed are considered. The basis of the formalization is the Voronoi diagrams [2] developed in mathematics that are closely related to the division of the area by the Delaunay triangulation. Natural clustering was developed for a scalable terrain model that allows expansion into four-dimensional space, and thus clustering is not limited to only two parameters, but can be extended to multidimensional spaces. And if, more often, statistical methods are used for clustering, then for the proposed model, the methods of mathematical analysis for isolating the boundaries of watersheds-butt joints-are brought to the forefront. This work was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (Project № 16-07-00066) and the Basic Project of the FAO (project No. 0315-2016-0003).

Key words: the Scaled model of a relief, clustering, multidimensional spaces, Voronoi diagrams.

Понятие кластера используется в разных отраслях науки как специфический разделяющий инструмент, что порождает множество алгоритмов кластеризации, отвечающих специфическим целям конкретных исследований. И, хо-

тя, общепринятой классификации методов кластеризации не существует, однако, выделяют группируемые подходы, которые можно рассматривать как некоторое приближение к практической классификации методов кластеризации [2]. Среди них: вероятностные (K-средних, K-medians, EM-алгоритм, Алгоритмы семейства FOREL, Дискриминантный анализ); подходы на основе систем искусственного интеллекта (Метод нечеткой кластеризации, C-средних, Нейронная сеть Кохонена, Генетический алгоритм); логические (построение дендрограммы, осуществляемое с помощью дерева решений); теоретико-графовые; иерархический подход, предполагающий наличие вложенных групп кластеров различного порядка… Приведенная здесь классификация имеет своей целью оттенить своеобразие разработанного в лаборатории Обработки изображений ИВМиМГ СО РАН метода «естественной» кластеризациии.

Поскольку все методы кластеризации опираются на исходную «гипотезу компактности» в пространстве объектов, следовательно все близкие в этом фазовом пространстве объекты исследуемой совокупности должны относиться к одному кластеру, а все различные объекты соответственно должны находиться в различных кластерах. Подход к кластерному анализу, основанный на методе «геометрической кластеризации» относится к числу задач, содержащих в себе «внутренне присущие» свойства классификации в их фазовом пространстве признаков. Предлагаемый к рассмотрению метод «естественной кластеризации» выполняется на фазовом пространстве индикаторов. Используемые термины «водораздел», «речной бассейн» (рис. 1), отражающие топологические свойства рельефа, исходно применялись в моделях масштабирования рельефа в геофизических исследованиях. Гистограмма двумерных векторов признаков, получаемая обычно при двухспектральном анализе изображения, в новой постановке задач - например, в случае сравнения индекса налогового потенциала территории муниципального образования с индексом бюджетных расходов образует своего рода рельеф в фазовом пространстве индикаторов. И если рассматривать «перевернутую-опрокинутую» поверхность, то логично к кластерам относить «озерные бассейны» для определенного выбираемого уровня высоты поверхности «озера». Границы перевернутых кластеров проходят по «водоразделам». Выбирая разные уровни поверхности «озер» возможно получать не только различное количество кластеров, но и различные их распределения в фазовом пространстве, сохраняя при этом топологическую связность объектов одного кластера. Принципиально новым в подходе, который мы называем «естественной кластеризацией», является возможность его распространения на четырехмерное фазовое пространство признаков [3].

Разрабатываемая в лаборатории «естественная кластеризация» в отличие от чисто статистических подходов ориентируется на геометрическиие свойства кластеризуемых объектов. Ключевым фактором классификации определяется свойство «водораздела», имеющего понятийные корни в географии. О нетривиальности подхода говорит уже тот факт, что наличие локальных высот на рельефе может не характеризоваться свойством разделимости, тогда как наличие локальных минимумов такими свойствами обладает.

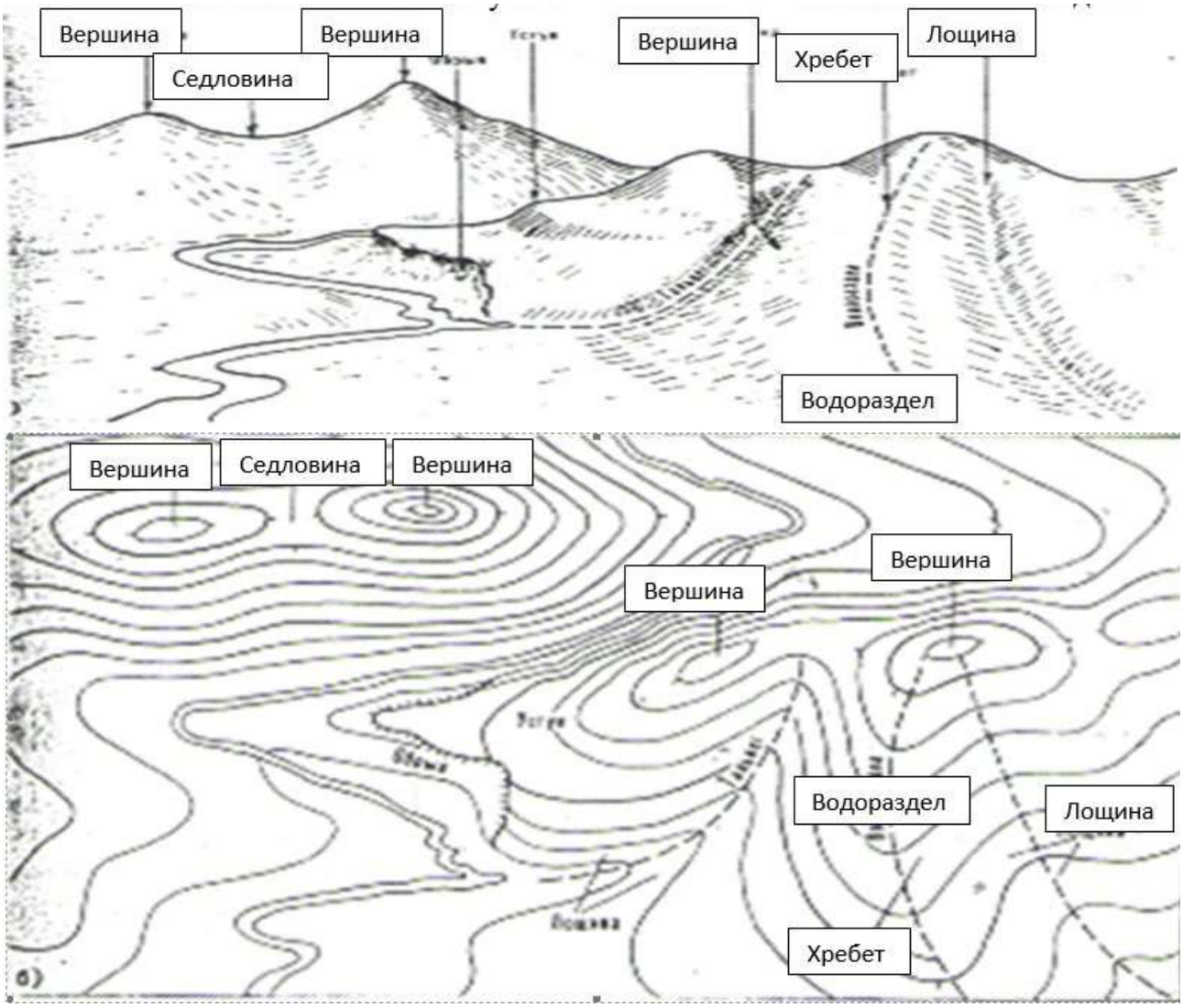


Рис. 1. Географические примитивы характеризации рельефа

Разработан алгоритм вычленения линий «водоразделов» на базе полигонов Вороного, разбивающих пространство множества точек локальных минимумов высот рельефа. Были сформулированы утверждения о существовании фрагментов линий «водораздела» между локальными минимумами высот. Интересные математические постановки возникают в связи с возможностью рассматривать в качестве представителей кластеров – точки локальных минимумов т.е. объекты порождающие площадные «озера», площадные границы которых несколько размывает нечеткий фронт «водоразделения», что порождает разные вариативные возможности толкования разделения кластеров, в частности, и путем привлечения механизмов использования нечетких множеств.

Диаграмма Вороного конечного множества точек S на плоскости представляет такое разбиение плоскости, при котором каждая область этого разбиения образует множество точек, более близких к одному из элементов множества S, чем к любому другому элементу множества (рис. 1, слева). Естественные кластеры (рис. 1, справа), образующиеся на поверхности рельефа сохраняют свою то-

пологическую структуру, индуцированную соответствующей диаграммой Вороного для точек соответствующих локальным минимумам высот рельефа.

Возрастание интереса к естественной кластеризации, связывается в первую очередь с переносом наработанных результатов на пространства большей размерности. Важным индикатором этого вновь формирующего технологического тренда, следует отметить патент США. Yao, 31.01.2017, United States Patent 9554776 «Способ выделения области интереса с использованием 3D/4D аппаратуры визуализации», в котором представлено устройство, создающее виртуальный четырехмерный объект. Вторым примером, является виртуальный учебник 4D-Анатомия – это облачный, интерактивный, ресурс для моделирования рассечения и современная образовательная платформа. Создатели программы создали мощный интерактивный ресурс по анатомии человека. Вы получаете не просто изображение, но можете вращать его и даже увидеть, как бьется сердце (http://didaktor.ru/dobavte-v-kopilku-programmy-po-4d-anatomii-uchitelyu-na-zametku/#more-6067).

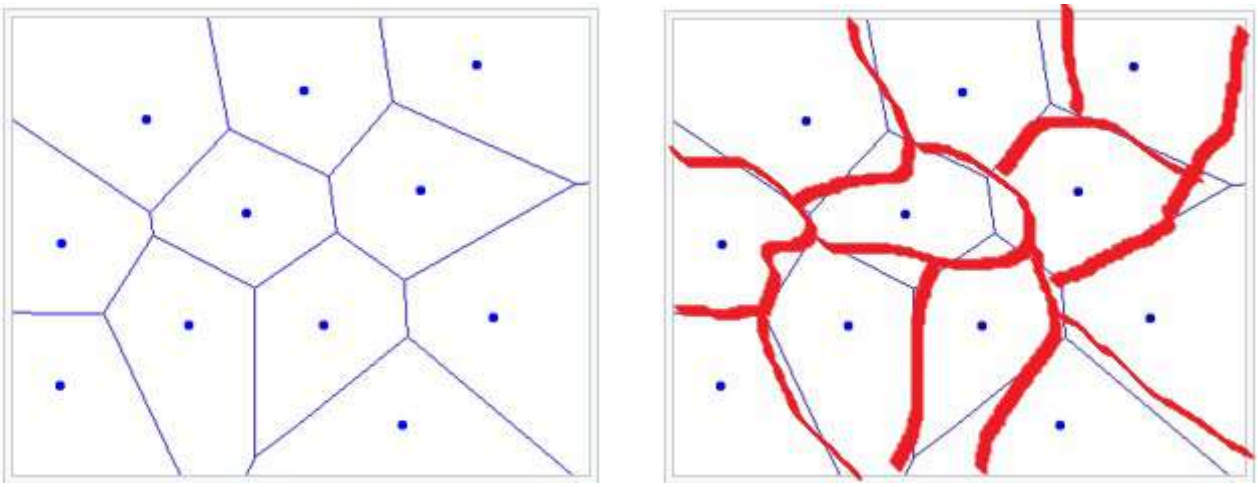


Рис. 2. Схемы разбиения поверхности диаграммами Вороного
и соответствующие географические кластеры

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ким П. А., Федоровых О. П. О методе естественной кластеризации в задачах оптимизации межбюджетных трансфертов // 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. 168–171.

2. Кластерный_анализ [Electronic resource] URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/ Кластерный_ анализ (the date of the reference search: 19.03.2018).

3. Ким П.А., Федоровых О.П. Геометрия четырехмерного пространства - о развитии пространственного восприятия // ПРЕДМЕТНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ Арбузова Е.Н., Гефан Г.Д., Дубова М.А., и др. - коллективная монография. Москва, 2016, стр. 50-63 Издательство: Общество с ограниченной ответственностью "Русальянс "Сова" (Москва).

4. Диаграмма_Вороного [Electronic resource] URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/ Диаграмма_ Вороного (the date of the reference search: 19.03.2018).

REFERENCES

1. Kim P.A. Fedorovykh O.P. O metode yestestvennoy klasterizatsii v zadachakh optimizatsii mezhbyudzhetnykh transfertov. // Interekspo GEO-Sibir'-2013.IX Mezhdunarodnyy nauchnyy kongress, Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya <Distantsionnyye metody zondirovaniya Zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchey sredy, geoekologiya>: sb.materialov v 2t., t.1. -Novosibirsk:SGGA,2013.-219 s.:str.168-171.

2. Cluster analysis. [Electronic resource] URL: https://en.wikipedia.org/wiki/ Cluster_analysis (the date of the reference search: 19.03.2018).

3. Kim P.A., Fedorovykh O.P. Geometriya chetyrekhmernogo prostranstva - o razvitii prostranstvennogo vospriyatiya // PREDMETNOYe OBRAZOVANIYe Arbuzova Ye.N., Gefan G.D., Dubova M.A., i dr. - kollektivnaya monografiya. Moskva, 2016, str. 50-63 Izdatel'stvo: Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu "Rusal'yans "Sova" (Moskva).

4. Voronoi diagram [Electronic resource] URL: https://en.wikipedia.org/wiki/ Voronoi_diagram (the date of the reference search: 19.03.2018).

© П. А. Ким, 2018

УДК 551.511.42.001.572(571.14)

НАЗЕМНЫЙ И СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ АТМОСФЕРНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ В РАЙОНЕ НОВОСИБИРСКОГО ЭЛЕКТРОДНОГО ЗАВОДА

Татьяна Владимировна Ярославцева
ФБУН «Новосибирский НИИ гигиены» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 630108, 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

Ирина Алексеевна Соловьёва
Сибирский центр ФГБУ «НИЦ «Планета», 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Советская, 30, заместитель директора, тел. (383)222-33-07, e-mail: sol@rcpod.ru

Обсуждаются методы совместного анализа данных наземных и спутниковых наблюдений загрязнения снежного покрова от пылящих точечных, линейных и площадных источников. Анализируются ореолы выноса пыли от высотных труб, производств по дроблению и переработке угля, карьерных выработок, технологической трассы в окрестностях Новосибирского электродного завода. С использованием моделей реконструкции предложены методы поиска связей между оцифрованными изображениями ореолов и данных контактных наблюдений.

Ключевые слова: атмосфера, снежный покров, мониторинг, загрязнение, аэрозоль, пылевые выпадения, спутниковые наблюдения, тона серого цвета, функциональная связь, модель реконструкции.

GROUND-BASED AND SATELLITE MONITORING OF ATMOSPHERIC POLLUTION IN AREA OF NOVOSIBIRSK ELECTRODE PLANT

Tatyana V. Yaroslavtseva
FGUN «Novosibirsk Scientific Research Institute of Hygiene» of Rospotrebnadzor, 7, Parhomenko St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)330-61-51, e-mail: tani-ta@list.ru

Vladimir F. Raputa
Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Chief Researcher, phone: (383)330-61-51, e-mail: raputa@sscc.ru

Irina A. Solov´eva
Siberian Center FGBU «SRC «Planeta», 30, Sovetskay St., Novosibirsk, 630099, Russia, Deputy Director, phone: (383)222-33-07, e-mail: sol@rcpod.ru

Methods for joint analysis of ground and satellite observations of snow cover contamination from dusting point, linear and area sources are discussed. The aureoles of dust removal from high-altitude pipes, coal crushing and processing plants, quarry workings, technological

route in the vicinity of the Novosibirsk electrode plant are analyzed. Using reconstruction models, methods are proposed for searching for links between digitized images of halos and data of contact observations.

Key words: atmosphere, snow cover, monitoring, pollution, aerosol, dust precipitation, satellite observations, gray tone, functional connection, reconstruction model.

Введение

Прямые экспериментальные исследования процессов атмосферного загрязнения требуют привлечения значительных экономических и технических ресурсов [1-3]. По этой причине они носят ограниченный и разовый характер. Использование природных планшетов существенно расширяют возможности мониторинговых исследований загрязнения окружающей среды антропогенными и природными источниками.

В условиях Сибири одним из наиболее надежных природных планшетов является снежный покров как при проведении контактных, так и дистанционных наблюдений [4, 5]. В пробах снега гораздо проще и надежнее определяется многокомпонентный состав выбросов вредных примесей, накопленных за длительный промежуток времени. На спутниковых снимках достаточно высокого пространственного разрешения отчетливо фиксируются выпадения на снежный покров аэрозолей промышленного происхождения [5] и отражает атмосферную динамику процессов их переноса от источника. Использование моделей реконструкции полей выпадений примесей создает возможности эффективной количественной интерпретации данных наземного и спутникового мониторинга снежного покрова [6-9].

Целью работы является анализ процессов атмосферного загрязнения пылящими источниками в районе Новосибирского электродного завода (НЭЗ) с использованием наземных и дистанционных наблюдений.

Объекты и методы исследований

Удобным методом визуализации пространственной картины выпадения пыли являются спутниковые снимки снежного покрова в окрестностях промышленного предприятия. На рис. 1 и рис. 2 представлены соответственно спутниковые снимки от 24 января и 18 февраля 2018 г. окрестностей НЭЗ.

Объектами исследования являются выпадения загрязняющих веществ от основных источников НЭЗ, выносы пыли от карьера, предприятий по переработке угля, технологической трассы.

Для реконструкции полей аэрозольных выпадений использовалась зависимость

$$\sigma(r,\vec{\theta}) = \theta_1 r^{-\theta_2} \exp\left(-\frac{\theta_3}{r}\right). \qquad (1)$$

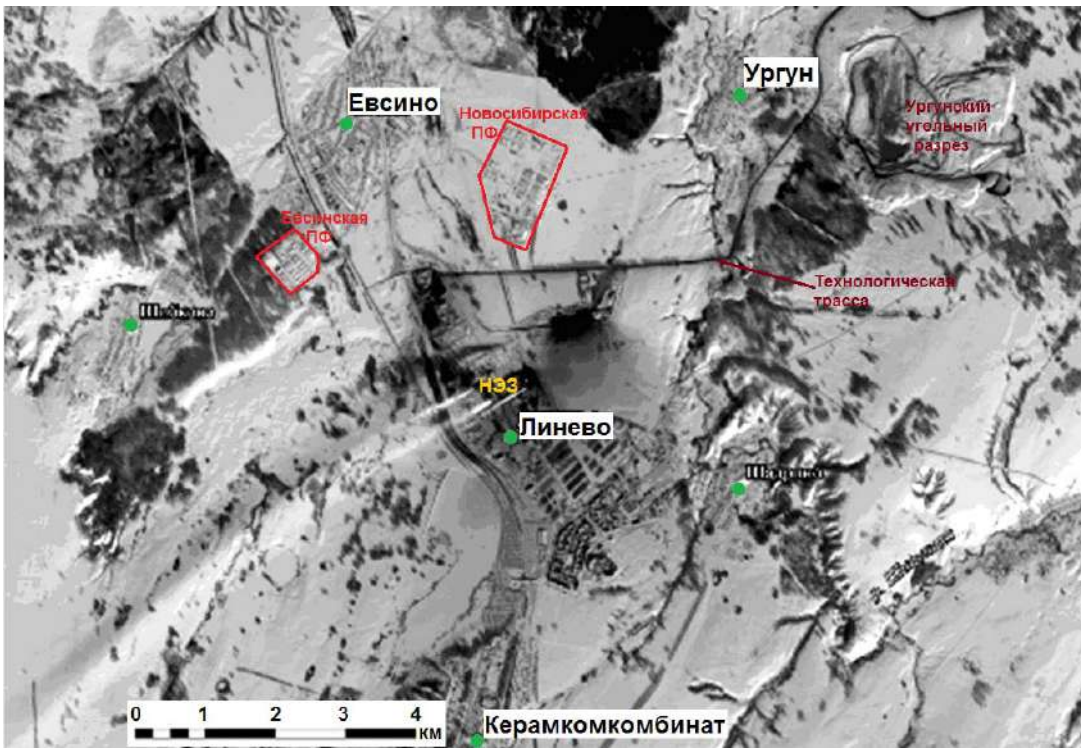


Рис. 1. Оцифрованный в тонах серого цвета спутниковый снимок окрестностей НЭЗ от 24 января 2018 г. (ИСЗ «Landsat-8»)

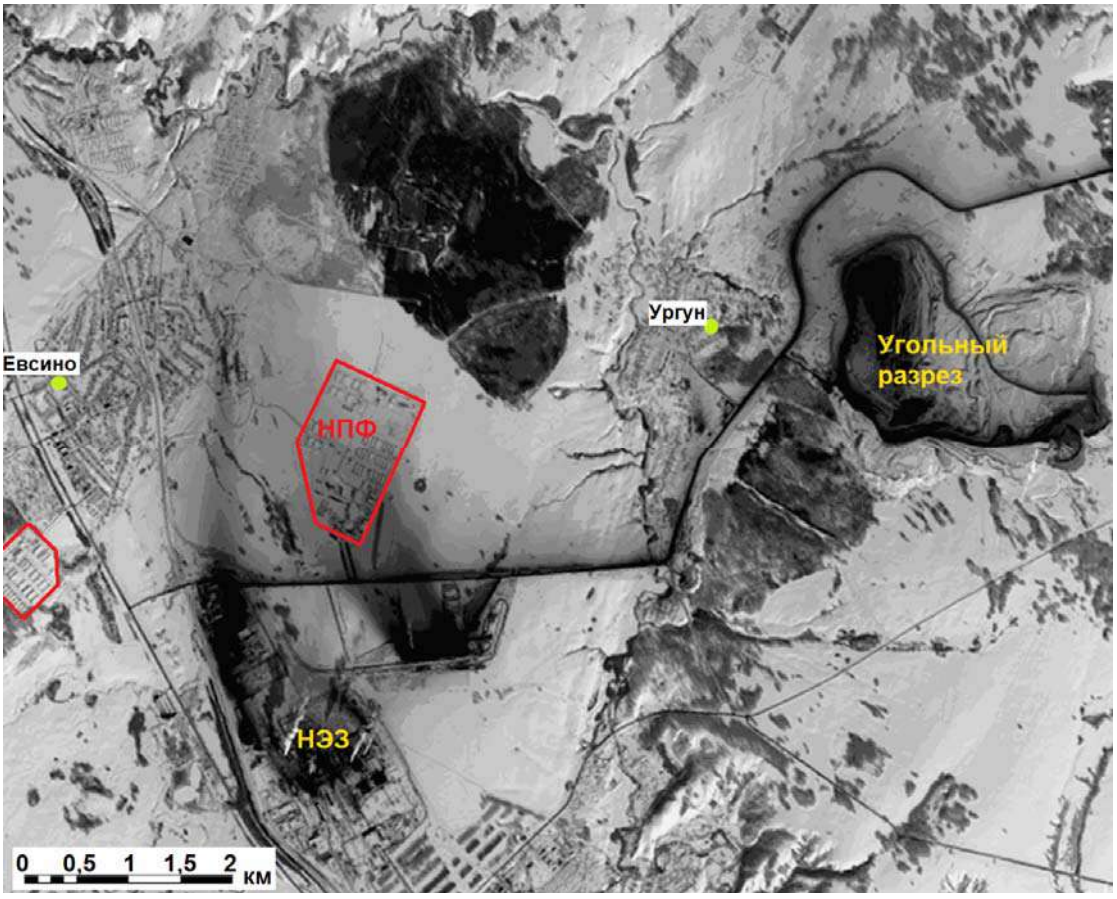


Рис. 2. Оцифрованный в тонах серого цвета спутниковый снимок окрестностей НЭЗ от 18 февраля 2014 г. (ИСЗ «Landsat-8»)

Соотношение (1) получено из уравнения баланса массы тяжелой неоднородной примеси в атмосфере [7, 9].Оценка неизвестного вектора параметров $\vec{\theta}$ в выражении (1) проводится по данным наблюдений поверностной концентрации осадка методом наименьших квадратов.

Результаты и обсуждения

На рис. 1 отчетливо прослеживаются на снежном покрове обширные пылевые выносы от предприятия по переработке угля на пос. Линево. Эта зона высокого загрязнения сформировалась при ветрах северных направлений в период сильных морозов. Шлейф загрязнения, видимый на космическом снимке, мог сформироваться за довольно длительный бесснежный период времени.

На рис. 2 представлены поля выпадений пыли при ветрах южного направленности также довольно длительной повторяемости. Анализ рис. 2 показывает, что выносы пыли от карьера охватывают большие территории и протяженностью, составляющей в северном направлении несколько километров. В зону влияния выносов попадает пос. Ургун. Из рис. 2 вытекает, что в зоны интенсивных выносов пыли от предприятий по переработке угля оказались пос. Евсино и Новосибирская птицефабрика.

Попарный корреляционный анализ данных с учетом модельных описаний позволил установить вид функциональных связей между наземными и спутниковыми наблюдениями уровней загрязнения. Показано, что для высотных труб НЭЗ характерна степенная связь (рис. 3а), для площадного имеет место линейная зависимость (рис. 3б).

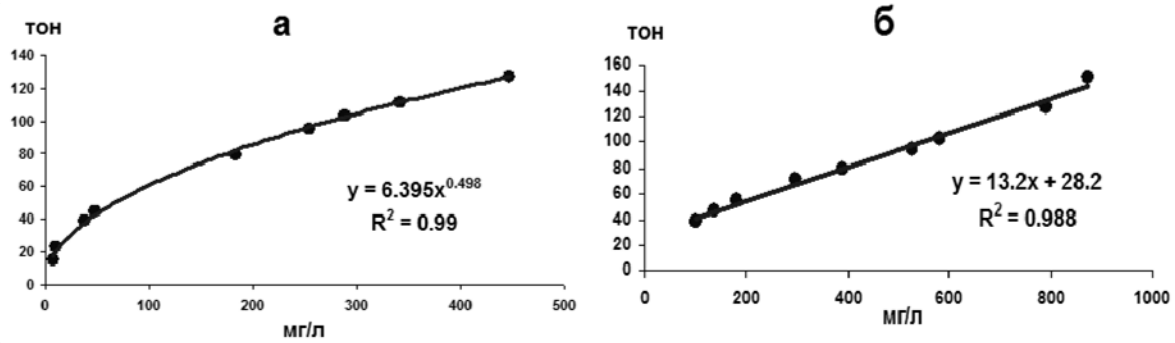


Рис. 3. Зависимость между интенсивностью тонов серого цвета и выпадениями пыли от труб НЭЗ (а) и от площадного источника – предприятия по дроблению угля (б)

На снимках все цветовые градации были переведены в тона серого цвета. Дешифровка позволила привязать к выбранной шкале ореолы загрязнения от основных очагов. Сравнительный анализ данных экспериментальных исследований и спутниковых наблюдений показал, что концентрации пыли в снеге

с удалением от источника довольно быстро снижается и что связано с относительно небольшой эффективной высотой источников.

Заключение

Используемые подходы позволяют существенно оптимизировать выполнение наземного мониторинга загрязнения окрестностей промышленной площадки в зимнем сезоне. С использованием модельных описаний процессов выноса пыли от точечных и площадных источников, зимних спутниковых снимков и данных наземных исследований загрязнения снега могут быть численно восстановлены поля выпадений пыли и оценивания суммарного их выноса.

Работа подготовлена при поддержке проекта РФФИ (грант № 17-47-540342), госзадания 0315-2016-0004, проекта ПРАН № 51 (0315-2018-0016).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. - 278 с.

2. Горчаков Г. И., Копров Б. М., Шукуров К. А. Влияние ветра на вынос аэрозоля с подстилающей поверхности // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2004. – Т. 40. – № 6. – С. 759–775.

3. Cesari D., De Benedetto G.E., Bonasoni P., Busetto M., Dinoi A., Merico E., Chirizzi D., Cristofanelli P., Donateo A., Grasso F.M. et al. Seasonal variability of PM2.5 and PM10 composition and sources in an urban background site in Southern Italy. //Sci. TotalEnviron. – 2018. – 612. – P. 202–213.

4. 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.

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

6. Щербатов А.Ф., Рапута В.Ф., Турбинский В.В., Ярославцева Т.В. Оценка загрязнения атмосферного воздуха пылью по данным снегосъемки на основе реконструкции полей выпадений // Анализ риска здоровью. -2014. - № 2. - С. 42-47.

7. Ярославцева Т. В., Рапута В. Ф. Модели оценивания аэрозольного загрязнения атмосферного воздуха от наземного площадного источника // Ползуновский вестник. – 2005. – № 4 (Ч. 2). – С. 125–130.

8. Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе // Утверждены приказом Минприроды России от 06.06.2017 № 273.

9. Рапута В.Ф., Шлычков В.А., Леженин А.А., Романов А.Н., Ярославцева Т.В. Численный анализ данных аэрозольных выпадений примесей от высотного источника // Оптика атмосферы и океана. - 2014. –Т. 27. - № 8. – С. 713-718.

REFERENCES

1. Byzova N.L., Ivanov V.N., Garger E.K. Jeksperimental'nye issledovanija atmosfer-noj diffuzii i raschety rassejanija primesi. - L.: Gidrometeoizdat, 1991. - 278 s.

2. Gorchakov G. I., Koprov B. M., Shukurov K. A. Vlijanie vetra na vynos ajerozolja s podstilajushhej poverhnosti // Izvestija RAN. Fizika atmosfery i okeana. – 2004. – T. 40. – № 6. – S. 759–775.

3. Cesari D., De Benedetto G.E., Bonasoni P., Busetto M., Dinoi A., Merico E., Chirizzi D., Cristofanelli P., Donateo A., Grasso F.M. et al. Seasonal variability of PM2.5 and PM10 composition and sources in an urban background site in Southern Italy. //Sci. TotalEnviron. – 2018. – 612. – P. 202–213.

4. Prokacheva V.G., Usachev V.F. Snezhnyj pokrov kak indikator kumuljativnogo zagrjaznenija v sfere vlijanija gorodov i dorog // Meteorologija i gidrologija. - 2013. - № 3. - S. 94-106.

5. Vasilenko V. N., Nazarov I. M., Fridman Sh. D. Monitoring zagrjaznenija snezhnogo pokrova. - L.: Gidrometeoizdat, 1985. - 182 s.

6. Shherbatov A.F., Raputa V.F., Turbinskij V.V., Jaroslavceva T.V. Ocenka zagrjaznenija atmosfernogo vozduha pyl'ju po dannym snegos#jomki na osnove rekonstrukcii polej vypadenij // Analiz riska zdorov'ju. -2014. - № 2. - S. 42-47.

7. Jaroslavceva T. V., Raputa V. F. Modeli ocenivanija ajerozol'nogo zagrjaznenija atmosfernogo vozduha ot nazemnogo ploshhadnogo istochnika // Polzunovskij vestnik. – 2005. – № 4 (Ch. 2). – S. 125–130.

8. Metody raschetov rasseivanija vybrosov vrednyh (zagrjaznjajushhih) veshhestv v atmosfernom vozduhe // Utverzhdeny prikazom Minprirody Rossii ot 06.06.2017 № 273.

9. Raputa V.F., Shlychkov V.A., Lezhenin A.A., Romanov A.N., Jaroslavceva T.V. Chislennyj analiz dannyh ajerozol'nyh vypadenij primesej ot vysotnogo istochnika // Optika atmosfery i okeana. - 2014. –T. 27. - № 8. – S. 713-718.

© Т. В. Ярославцева, В. Ф. Рапута, И. А. Соловьёва, 2018

УДК 534:621.382

АКУСТООПТИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НА ИНФРАНИЗКИХ ЧАСТОТАХ

Марат Саматович Хайретдинов
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, главный научный сотрудник, тел. (383)330-87-43, e-mail: marat@opg.sscc.ru; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Борис Викторович Поллер
Институт лазерной физики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13/3, зав. лабораторией, тел. (383)306-28-20, e-mail: lablis@mail.ru; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Александр Викторович Бритвин
Институт лазерной физики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13/3, старший научный сотрудник, тел. (383)306-28-20, e-mail: lablis@mail.ru

Дмитрий Яковлевич Машников
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, аспирант, тел. (383)330-87-43, e-mail: mashnikovdmitriy@gmail.com

Изучаются процессы акустооптического взаимодействия на инфранизких частотах с применением сейсмических вибраторов в качестве источников низкочастотных акустических колебаний, распространяющихся в атмосфере, и лазерных измерительных линий как оптических приемников колебаний. Предложенные тип источника и приемника в интересах изучения акустооптического взаимодействия определяют новизну и оригинальность предлагаемого подхода. Приводятся результаты экспериментов по оцениванию характеристик акустооптического взаимодействия на инфранизких частотах.

Ключевые слова: акустооптическое взаимодействие, инфранизкие частоты, сейсмический вибратор, лазерная измерительная линия, оптический стенд, экспериментальные исследования.

ACOUSTOOPTIC INTERACTION ON LOW FREQUENCIES

Marat S. Khairetdinov
Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Chief Researcher, phone: (383)330-87-43, e-mail: marat@opg.sscc.ru; Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia

Boris V. Poller
Institute of Laser Physic SB RAS, 13/3, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Head of Laboratory, phone: (383)306-28-20, e-mail: lablis@mail.ru

Aleksander V. Britvin
Institute of Laser Physic SB RAS, 13/3, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Senior Researcher, phone: (383)306-28-20, e-mail: lablis@mail.ru

Dmitriy Y. Mashnikov
Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D. Student, phone: (383)330-87-43, e-mail: mashnikovdmitriy@gmail.com

Processes acoustooptic interactions on low frequencies with application of seismic vibrators as sources of the low-frequency acoustic fluctuations, extending in atmosphere, and laser measuring lines as optical receivers of fluctuations are studied. Offered source and receiver type in interests of studying acoustooptic interactions define novelty and originality of the offered approach. Results of experiments on evaluation characteristics interactions on low frequencies are resulted.

Key words: acoustooptic interaction, low frequencies, seismic vibrator, laser measuring line, optical stand, experimental researches.

Введение

Вопросы акустооптического взаимодействия имеют давнюю историю и связаны они в основном с изучением дифракции света в ультразвуковом и радиочастотном диапазонах [1-3]. При этом практически неисследованными остаются вопросы акустооптического взаимодействия в области инфранизких частот. Это обусловлено отсутствием специальных акустических излучателей в этом диапазоне частот. В тоже время авторами данной работы и другими исследователями показано, что альтернативой указанным источникам являются сейсмические вибраторы, которые способны наряду с сейсмическим волнами в земле излучать акустические колебания в атмосфере [4,5]. К ним, в частности, относятся центробежные вибраторы ЦВ-100 и ЦВ-40 [6]. Благодаря высокой синхронности излучения акустических колебаний сигналы от таких источников могут регистрироваться на больших удалениях за счет использования методов корреляционно-спектрального накопления. При этом благодаря ограниченной мощности излучения решается одновременно проблема экологической безопасности использования данного класса источников в отличие от мощных взрывных источников. Все это вместе взятое открывает возможности проведения экспериментальных исследований по изучению закономерностей процессов акустооптического взаимодействия, результаты которых представляют интерес для создания комбинированных сейсмо-акусто-оптических информационных технологий.

Актуальность темы исследований, наряду с ее фундаментальной компонентой, определяется необходимостью решения задач акустического обнаружения и локации различных техногенных и природных объектов и событий с помощью световых измерительных колебаний наряду с использованием колебаний иной природы, например, сейсмических. Если для регистрации последних используется группирование датчиков с определенной пространственной

расстановкой, то измерительный луч по отношению к низкочастотным акустическим колебаниям представляет собой непрерывную когерентную антенну, позволяющую определять с высокой точностью углы прихода низкочастотных акустических волн от внешних источников.

Предложенный подход к изучению акустооптического взаимодействия на инфранизких частотах определяют новизну и оригинальность методической части проводимых исследований.

В основе рассматриваемого типа акустооптического взаимодействия лежат процессы, связанные с волновым возмущением лазерных световых колебаний внешним акустическим полем, сквозь которое в атмосфере распространяется световой луч. Возмущенная атмосфера в локальных точках пространства обуславливает изменение параметров распространения лазерного излучения, включая его характеристики преломления, поглощения и рассеяния. Следствием этого могут быть вариации амплитудных уровней и скоростей распространения измерительных волн, их фазо-частотные преобразования, определяющие возможности «лучевого приема» акустических колебаний. Постановка задачи. Рассматривается взаимодействие волновых колебаний разной природы-акустический волновой процесс

$$\nabla^2 x - \frac{1}{\upsilon^2}\frac{d^2 x}{d t^2} = 0 \qquad (1)$$

и процесс в измерительном луче

$$\nabla^2 y - \frac{1}{c^2}\frac{d^2 y}{d t^2} = 0 \qquad (2)$$

где υ, c – скорости распространения акустической и измерительных волн соответственно, ∇^2 – оператор Лапласа. Уравнение (1) допускает решение в виде плоской гармонической волны с амплитудой A: $x(t) = A\sin\left(\omega t - \bar{k}\,\bar{r}\right)$, где $\bar{r}$ – радиус-вектор, $\bar{k}$ – волновой вектор, причем $\left|\bar{k}\right| = k = \omega/\upsilon$.

Взаимодействие обоих волновых процессов основывается на том, акустический волновой фронт, характеризуемый в точках среды значениями акустических давлений, обуславливает возникновение в среде механических деформаций a_j. Вследствие этого каждая акустическая волна сопровождается изменением показателя преломления среды n. С учетом этого для плоской монохроматической акустической волны, распространяющейся вдоль заданного направления z, меняющийся показатель преломления может быть представлен в виде

$$n(z,t) = n + \Delta n\cos(2\pi f t - kz)\,. \qquad (3)$$

Здесь n- невозмущенный показатель преломления , f и k –частота и волновое число, Δn-амплитуда изменения показателя преломления под действием акустической волны. Для падающего света среда с показателем преломления (3) представляет собой дифракционную решетку, движущуюся со скоростью звука υ. Проходя через такую среду, свет дифрагирует на неоднородностях показателя преломления в зависимости от частоты колебаний акустической волны. Условия осуществимости лучевого приема, основанные на соотношениях параметров внешнего акустического поля и измерительных колебаний, определяются следующими соотношениями:

$$\nu/\omega >> c_0/\upsilon,\ \ L/r\,l >> 1,\ \ \lambda/d > 0.82$$

$$L/\lambda << \begin{cases} c_0^2/c_m\upsilon \ \ при\ c_0/\upsilon >> 1 \\ c_0^2/c_m\upsilon,\ \ c_0/(\upsilon - c_0) \ \ при\ c_0/\upsilon < 1 \end{cases}$$

Здесь $\nu, c_0, \bar{c_m}$ – угловая частота, средняя скорость и амплитуда параметрического изменения скорости распространения колебаний в измерительном луче; L, d – длина и диаметр измерительного луча; $\omega, \lambda, \upsilon$ – угловая частота, длина волны и скорость распространения внешних акустических колебаний; $r\,l$ – радиус пространственной корреляции неоднородностей среды.

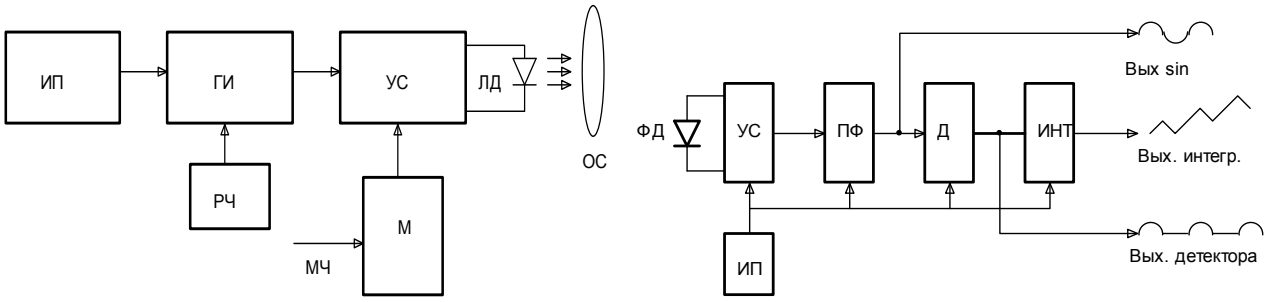
Приведенные соотношения определяют требования к выбору условий регистрации акустических колебаний с помощью лазерной измерительной линии. В реальных условиях на процессы регистрации влияют ряд факторов: неоднородность атмосферы, внешние шумы и освещенность и др. Полнота учета всех внешних факторов достигается в условиях проведения экспериментальных исследований.

Для проведения исследований авторами создан макет акусто-оптической информационной системы (рис. 1) в составе сейсмического вибратора ЦВ-40 (акустического излучателя), оптического стенда в составе лазерного излучателя, оптического приемника. Для прямой регистрации акустических колебаний используются автономные регистрирующие цифровые станции, располагаемые вдоль измерительного луча. Метеостанция предназначена для регистрации метеоусловий в окружающей атмосфере. Схема оптического стенда представлена на рис. 2. На представленных схемах вибратор ЦВ-40 играет роль внешнего низкочастотного генератора акустических колебаний, распространяющихся в атмосфере в диапазоне частот 6.25-11.23 Гц. Роль оптического стенда состоит в формировании импульсов накачки длительностью 50 мкс с частотой следования 1-10 кгц с помощью генератора импульсов (ГИ) и модуля регулировки частоты (РЧ), передачи – приема их по оптической линии связи с последующим выделением огибающей импульсов с применением интегратора (ИНТ), как это показано на рис. 3. Выделяемая огибающая несет в себе информацию о внешних воздействиях на измерительный лазерный луч в виде фазо-частотно-временных характеристик. Измерения их проводились в условиях лаборатории и открытой атмосферы с использованием отражателей.

а)

б)

Рис. 1. Компоненты акустооптической системы:
а) сейсмический вибратор ЦВ-40; *б*) акусто-оптический стенд



а) *б*)

Рис. 2. *а*) функциональная схема модуля излучателя оптических импульсов; *б*) фун-кциональная схема оптического приемника. Здесь ИП – источник питания, ГИ-генератор импульсов, РЧ-регулятор частоты, УС-усилитель, М-модулятор, МЧ-модулирующая частота, ЛД-лазерный полупроводниковый детектор, ОС-оптическая система, ФД-фазовый детектор, ПФ-полосовой фильтр, Д-детектор, ИНТ-интегратор

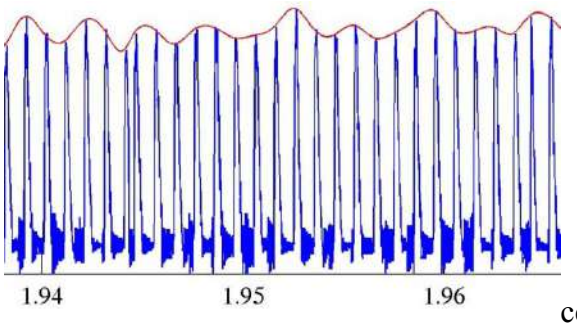


Рис. 3. Запись оптического сигнала с несущей 1 кГц, модулированного по амплитуде акустическим сигналом и внешним шумом

В экспериментах выполнено оценивание предельно низкого уровня глубины амплитудной модуляции измерительного луча, характеризующего чувствительность акустооптического взаимодействия. Идея измерений в лабораторных условиях основывается на принципах амплитудной модуляции (АМ) импульсов накачки лазерного излучения до задаваемой глубины модуляции от модулятора М прецезионными гармоническими сигналами в диапазоне частот 2-20 Гц (рис. 2а) с последующей передачей – приемом по оптической линии длиною 80 м. В частности, примеры осциллограмм передачи АМ модулированных сигналов и приема демодулированных, представлены на рис. 4, 5.

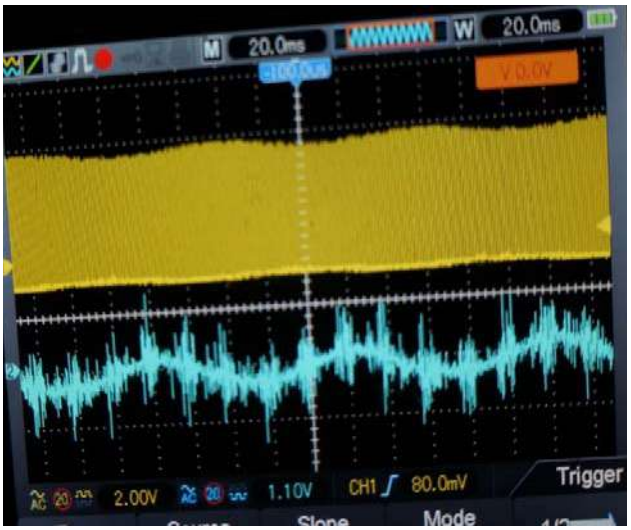


Рис. 4. Осциллограмма 5,1 % АМ сигнала и выходного сигнала на трассе протяженностью 80 м в лаборатории

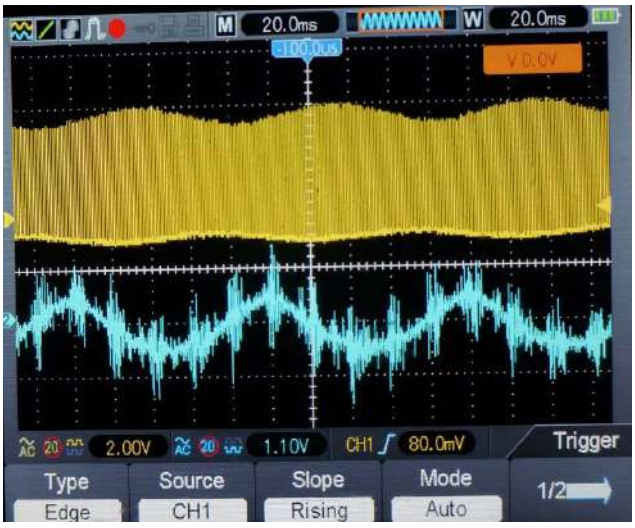


Рис. 5. Осциллограмма 10 % АМ сигнала и выходного сигнала на атмосферной трассе

Рис. 4 соответствует случаю «передачи-приема» в условиях лаборатории на трассе протяженностью 80 м и глубине модуляции 5.1%, рис. 5 – «передаче-приему» по атмосферной трассе при глубине модуляции 10%. Очевидно, предельные чувствительности в условиях воздействия шумов можно достигать за

счет применения цифровых методов обработки огибающей оптического сигнала. К числу таких методов относятся алгоритмы квадратурного измерения амплитуд и фаз гармонических колебаний [7]. С помощью этих алгоритмов для случая использования внешнего модулирующего колебания с частотой 5 Гц с глубиной модуляции 0.4% на рис.6а и 6б соответственно получены текущие значения оценок амплитуд и фаз огибающей оптического сигнала на каждом шаге m_i (i= 1…N, где N-множество дискретных отсчетов огибающей, укладывающихся на временном интервале анализа T. В рассматриваемом случае T=60c) итерационного оценивания дискретных значений параметров. Количественные значения шагов представлены на оси абцисс. Конечные результаты оценивания амплитуд и фаз определяются их установившемися значениями начиная с некоторой итерации $m_{уст.}$ Аналогичные результаты для глубины модуляции 16% и частоты 10 Гц представлены соответственно на рис. 7 а,б,с. На рис. 6с и рис. 7с для рассматриваемых случаев представлены результаты спектрального выделения модулирующего сигнала на фоне шумов.

Глубина модуляции 0.4%

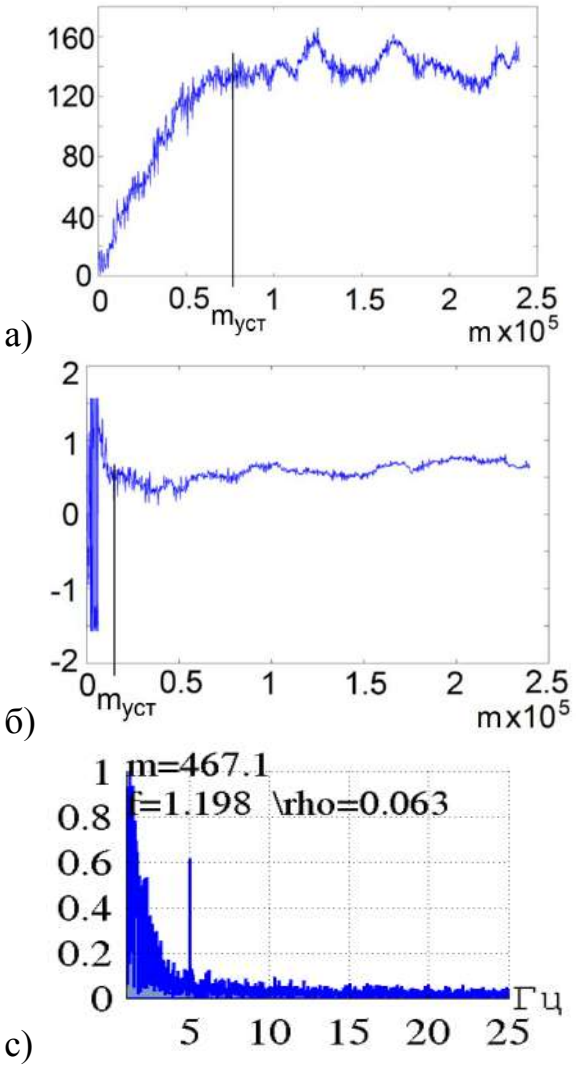


Рис. 6

Глубина модуляции 16%

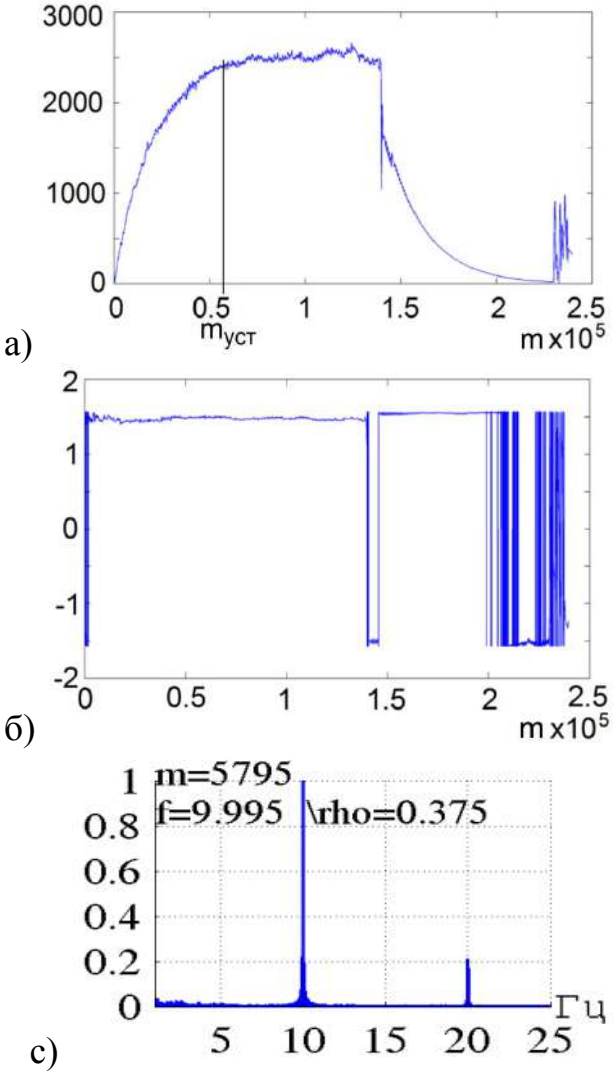


Рис. 7

В проведенных тестовых экспериментах показано, что наиболее чувствительными к акустооптическому взаимодействию является фазо-частотные характеристики, позволящие обеспечить достижимость определения в оптическом сигнале глубины модуляции до уровня в 0.1%.

Акустооптические взамодействия с использованием акустических колебаний вибрационных источников относятся к числу слабых взаимодействий, которые можно обнаружить лишь методами накопления сигналов в шумах. С учетом этого важно оценить верхние граничные значения по дальности, которые достижимы для выбранного типа вибрационного источника, каковым является вибратор ЦВ-40. Теоретически рассчитанные траектории распространения инфразвуковых волн могут охватывать линейную базу на поверхности земли до 100 км [6]. С учетом такого обоснования выполнен эксперимент по регистрации акустических колебаний от вибратора ЦВ-40 вдоль линейного профиля протяженностью 100 км. Соответственно разработана и успешно опробирована в экспериментах с вибратором ЦВ-40 методика корреляционного накопления зондирующих ЛЧМ-сигналов вида $s(t)=A\cos(\omega_0 t+\beta t^2/2)$, где β- скорость нарастания частоты излучения источника в пределах 7.91- 11.23 Гц. Результаты сверток в зависимости от дальности представлены на рис. 8.

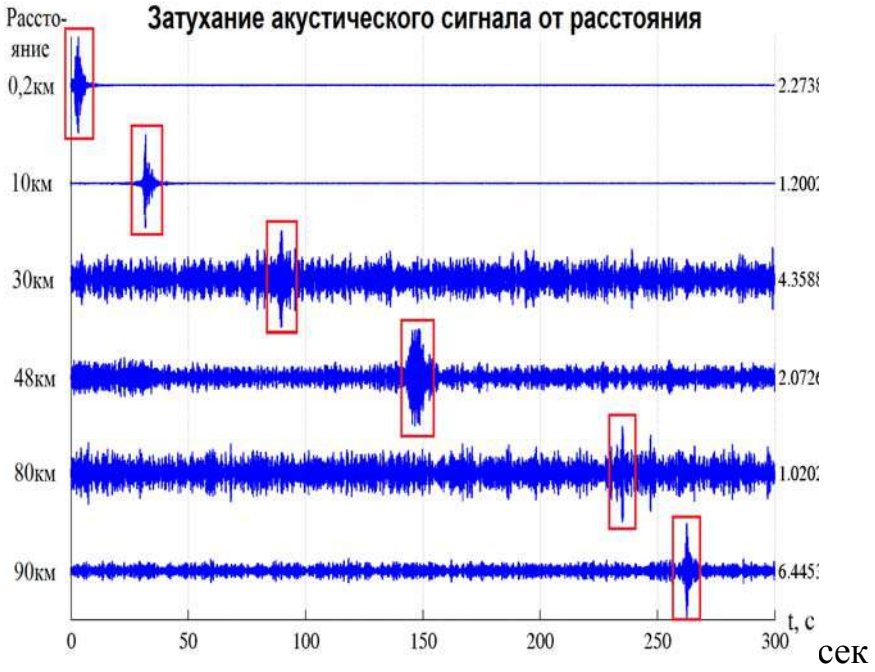


Рис. 8. Результаты сверток ЛЧМ-сигналов от вибратора ЦВ-40
в зависимости от дальности

Как следует из полученных сигналов помехоустойчивость результатов накопления во многом определяется зашумленностью пунктов регистрации. На рис. 9 приведены нормированные графики затухания акустических и сейсмических сигналов по расстоянию. Как следует из полученных данных, усреднен-

ное ослабление силы звука в пределах 100 км составляет 4 порядка, т.е. 40 дб. Принимая во внимание, что сила звука убывает обратнопропорционально квадрату расстояния от источника, в данном случае в 100^2 раз (40 дб), приходим к тому, что на инфранизких частотах ослабление звука по расстоянию полностью определяется фактором геометрического расхождения волнового фронта акустической волны. Это означает, что фактором поглощения акустической энергии в атмосфере практически можно пренебречь.

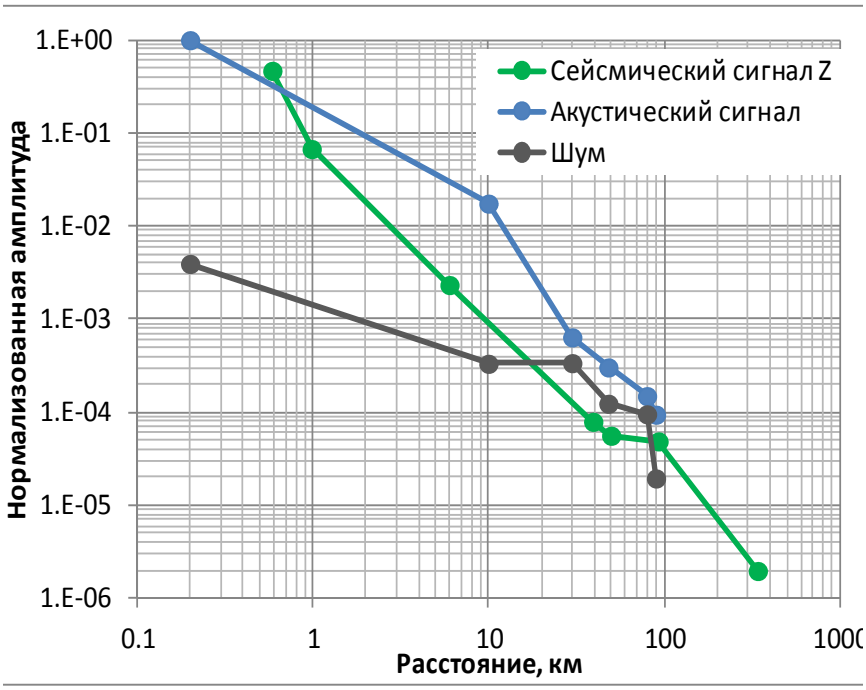


Рис. 9. Графики затухания
акустических и сейсмических волн по дальности

В этом несомненное достоинство способа изучения акустооптического взаимодействия на инфранизких частотах.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №№ 17-07-00872-а, 16-07-01052-а.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Молчанов В.Я., Китаев Ю.И., Колесников А.И., Нарвер В.Н., Розенштейн А.З., Солодовников Н.П., Шаповаленко К.Г. Теория и практика современной акустооптики. Изд. Дом МИСиС, Москва. – 2015. – 459 с.

2. Богданов С.В. Акустооптические методы измерения скорости звука. Новосибирск: Изд-во СО РАН. – 2013. – 142 с.

3. Корпел А. Акустооптика- Acousto-optics – М.: Мир. – 1993.

4. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Дряхдов С.И., Ковалевский В.В., Михайленко Б.Г., Пушной Б.М., Фатьянов А.Г., Хайретдинов М.С., Шорохов М.Н. Эффект акустосейсмической индукции при вибросейсмическом зондировании // Докл. РАН. – 1996.

5. Глинский Б.М., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С. Взаимосвязь волновых полей мощных вибраторов с атмосферными и гидродинамическими процессами. Геология и геофизика. – 1999. – т. 40. – № 3. – С. 431-441.

6. Гуляев В.Т., Кузнецов В.В., Плоткин В.В., Хомутов С.Ю. Генерация и распространение инфразвука в атмосфере при работе мощных сейсмовибраторов. Изв. АН СССР: Физика атмосферы и океана. – 2001. – т.37. – №3. – С.303-312.

7. Хайретдинов М.С., Родионов Ю.И., Дворецкая Л.Г. Программно-технические средства обработки вибросейсмических сигналов и анализа микросейсм. Препринт 969, ВЦ СО РАН, Новосибирск. – 1993. – с.42.

© М. С. Хайретдинов, Б. В. Поллер, А. В. Бритвин, Д. Я. Машников, 2018

УДК 550.34:621.039

КОМБИНИРОВАННАЯ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКАЯ ЛОКАЦИЯ В ПРОБЛЕМЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Владимир Игоревич Доброродный
Тюменское высшее военно-инженерное командное училище им. маршала инженерных войск А. И. Прошлякова, 625001, Россия, г. Тюмень, ул. Льва Толстого, 1, ст. преподаватель, тел. (919)950-88-45, e-mail: vovan2172@mail.ru

Галина Федоровна Седухина
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, научный сотрудник, тел. (383)330-87-43, e-mail: galya@opg.sscc.ru

Марат Саматович Хайретдинов
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, главный научный сотрудник, тел. (383)330-87-43, e-mail: marat@opg.sscc.ru; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Работа связана с учетом закономерностей образования пары сейсмических и акустических волн, порождаемых многими сейсмическими процессами. Обосновывается необходимость их одновременного учета при решении задач активного и пассивного геофизического мониторинга окружающей природной среды. В качестве одной из них рассматривается задача геолокации тестовых полигонных взрывов с повышенной точностью. Приводится разработанная авторами информационная технология решения задачи.

Ключевые слова: сейсмоакустические волны, землетрясения, сейсмические вибраторы, полигонные взрывы, геоэкологический мониторинг, информационная технология, натурные эксперименты.

COMBINED SEISMOACOUSTIC LOCATION IN THE PROBLEM OF THE GEO-ECOLOGICAL MONITORING OF THE NATURAL MEDIUM

Vladimir I. Dobrorodny
Tyumen' High Military-Engineering Command College, 1, Lev Tolstoy St., Tyumen, 625001, Russia, Senior Lecturer, phone: (919)950-88-45, e-mail: vovan2172@mail.ru

Galina F. Sedukhina
Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher, phone: (383)330-87-43, e-mail: galya@opg.sscc.ru

Marat S. Khairetdinov
Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Chief Researcher, phone: (383)330-87-43, e-mail: marat@opg.sscc.ru; Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia

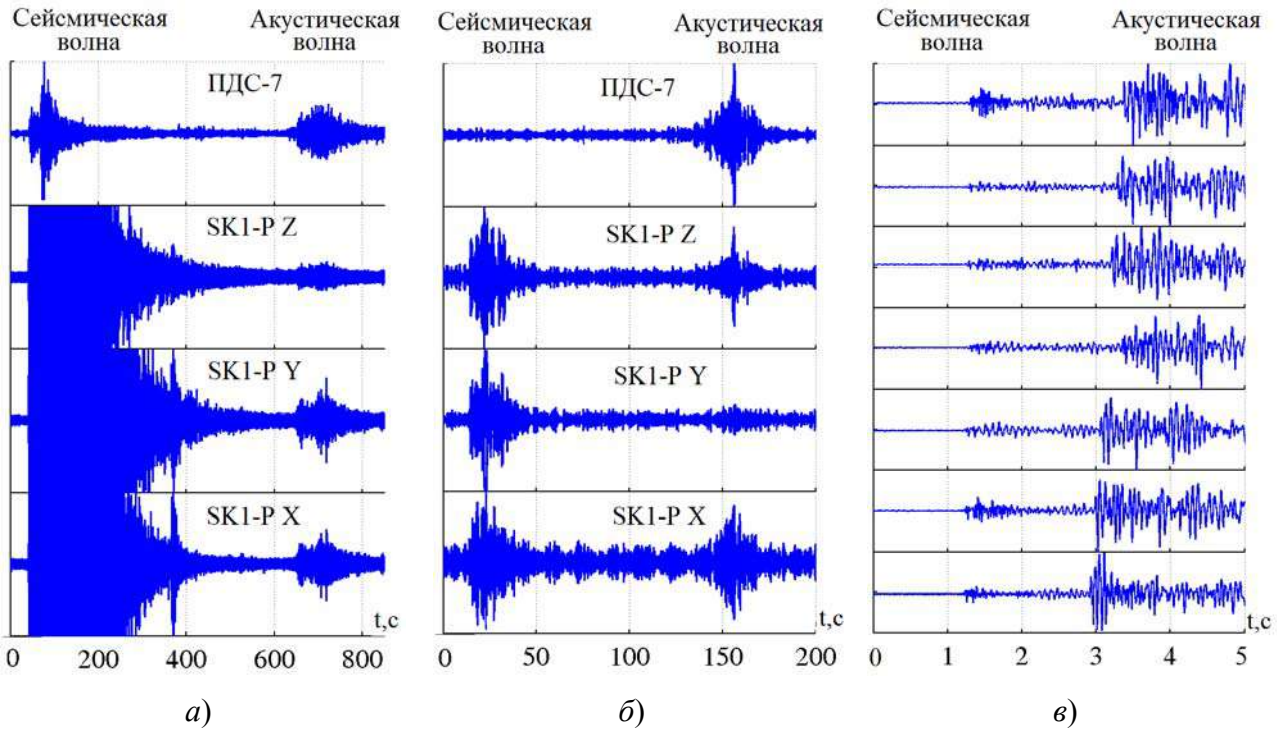
Work is connected with the account of laws of formation of pair the seismic and acoustic waves generated by many seismic processes. Necessity of their simultaneous account is proved at the deci-

sion of problems of active and passive geophysical monitoring of a surrounding environment. As one of them the problem of a geolocation test field explosions with the raised accuracy is considered. The information technology of the decision of a problem developed by authors is resulted.

Key words: seismoacoustic waves, earthquake, seismic vibrator, explosions, geoecological monitoring, information technology, natural experiments.

Введение

Многие природные и техногенные процессы сейсмической природы сопровождаются образованием сопряженных процессов в атмосфере. В первую очередь, это касается образования акустических полей. В качестве примера на рис. 1 процесс акустического возмущения атмосферы иллюстрируется по отношению к трем разным источникам- техногенному землетрясению (эпицентр-угольный разрез «Бачатский», дата 19.06.2013, магнитуда 5.3), сейсмовибратору ЦВ-40 [1-3], полигонному взрыву малой мощности. Приведенные записи отражают процесс образования акустических волн, сопровождающих сейсмические процессы. При этом уровни акустических волн в отдельных случаях сопоставимы, а иногда выше уровней сейсмических. Это определяет целесообразность учета параметров акустических волн наряду с сейсмическими в задачах геофизического мониторинга окружающей среды, а также в решении некоторых прикладных задач сейсмики. Пример такого подхода рассматривается в настоящей работе по отношению к полигонным взрывам.



а) *б*) *в*)

Рис. 1. Записи сейсмических и акустических волн от разного класса источников:

а) запись землетрясения на удалении 205 км (эпицентр – п.Старо-Бачаты, 19.06.2013); *б*) запись вибратора на удалении 50 км; *в*) запись полигонного взрыва на небольшом расстоянии

Постановка задачи

Одна из основных целей настоящей работы состоит в оценивании точности определения координат тестовых полигонных взрывов на основе совместного использования параметров сейсмических и акустических волн, а также созданных программно-технических средств и методики проведения натурных экспериментов. Последние включают в себя набор программ помехоустойчивого выделения и оценивания времен вступлений сейсмических и акустических волн с последующим вычислением координат источников, используемых в натурных экспериментах. Полученные результаты сопоставляются с заданными координатами, полученными на основе высокоточных данных GPS. Получаемые невязки позволяют определять точности используемой методики проведения работ.

Методика проведения работ

Экспериментальная часть проведения работ базируется на серии взрывов мощностью от 200 до 2600г в тротиловом эквиваленте, находящихся на расстояниях от 570 до 750 м. от места регистрации (рис. 2). Для одновременной регистрации сейсмических и акустических сигналов от взрывов применяется полевая аппаратура «РОСА» [4] в комплекте с сейсмическими датчиками типа СВ-5 (сейсмоприемник вертикальный) с коэффициентом преобразования – 15 в/м/с. Применяется расстановка сейсмодатчиков в виде «Креста» (рис. 3) с линейными размерами 207 м × 207 м с шагом между датчиками 30 м. В каждой точке расстановки использовалось группирование 4-х датчиков.

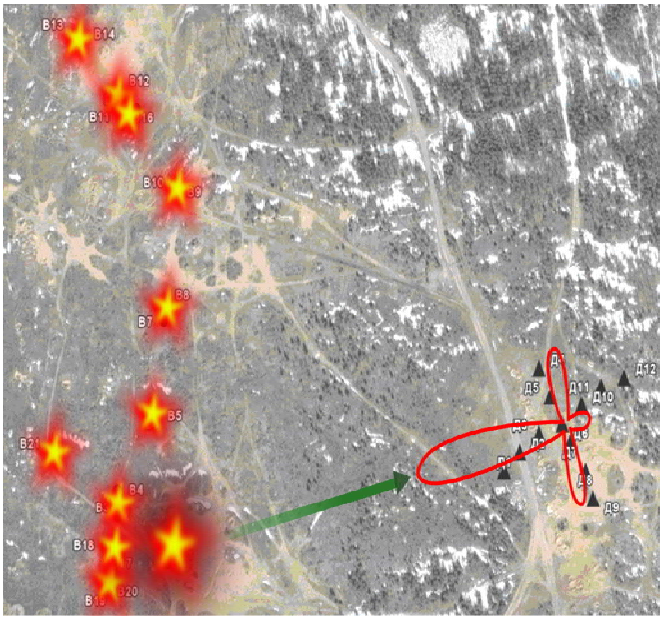


Рис. 2. Схема расстановки пунктов взрывов и регистрирующих датчиков в виде «креста»

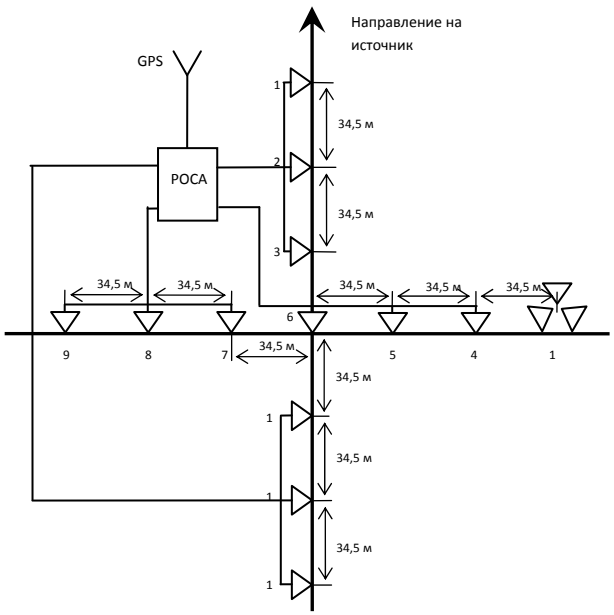


Рис. 3. Схема регистрирующей аппаратуры с набором датчиков СВ-5, расположенных в виде креста

Расстановка «Крест» ориентирована на измерения времен вступлений разного типа волн на всех датчиках одновременно с последующим определением координат каждого источника – взрыва – путем вычисления азимутального направления и расстояния до источника. Синхронизация сейсмических записей по отношению к Мировому времени осуществляется по сигналам GPS перед началом каждого сеанса записи. После пуска на запись регистрация сигналов осуществляется непрерывно на протяжении всего интервала проведения взрывов.

Программно-алгоритмические средства системы регистрации

Повышение точности измерений времен вступлений волн достигается путем использования алгоритма и программы вейвлет-фильтрации. Наиболее эффективна она по отношению к солитоноподобным функциям, описывающим компактные по времени волновые импульсы от взрывов. Как известно, вейвлет-фильтрация основана на разложении одномерного сигнала по базису, скомпонованному из компактных вейвлетов, обладающих свойствами масштабных изменений и переносов. В основе вейвлет-фильтрации лежит интегральное преобразование:

$$X(\tau,s)=\int_{-\infty}^{\infty} f(t)\Psi_{\tau,s}(t)dt\,, \quad \text{где } f(t) \text{ - волновой импульс} \qquad (1)$$

$$\psi_{\tau,s}(t)=\frac{1}{\sqrt{s}}\psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right),\ \ \tau,s\in R\ ;\ \ \psi\in L^2(R)\,.$$

Базис функционального пространства $L^2(R)$ может быть построен с помощью непрерывных масштабных преобразований и переносов вейвлета $\psi(t)$ с произвольными значениями базисных параметров – масштабного коэффициента *s* и параметра сдвига τ. Наиболее подходящими для аппроксимации сейсмических и акустических волн являются вейвлеты Добеши [5,6]. Для вычисления времен вступления волн в автоматическом режиме предварительно рассчитывается огибающая *A(t)* волнового импульса *f(t)* через преобразование Гильберта:

$$A(t)=\sqrt{f^2(t)+f^{*2}(t)}\,,$$

где $f^*(t)=\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{f(x)}{t-x}dx$ – преобразование Гильберта.

В процессе обработки [7] в одноканальном режиме исходная зашумленная запись подвергается вейвлет-фильтрации (рис. 4а), далее рассчитывается ам-

плитудная огибающая через преобразование Гильберта (рис. 4б), затем применяется алгоритм STA/LTA [8] со значением порога 1.1 (рис. 4в). Алгоритм означает, что в процессе обработки вычисляется усреднённое значение огибающей вдоль двух окон: короткого (STA) и длинного (LTA). STA представляет собой оценку значения «мгновенной» амплитуды полезного сигнала (например, Р-волны взрыва), LTA оценивает среднее значение шума на длительном участке. Далее производится вычисление соотношения STA/LTA для каждого нового отсчёта сигнала, поступающего на вход алгоритма:

$$STA_i = \frac{1}{NS}\sum_{j=i-NS}^{i}\left|X_j\right|, \qquad LTA_i = \frac{1}{NL}\sum_{j=i-NL}^{i}\left|X_j\right|,$$

$$r_i = STA_i / LTA_i, \tag{2}$$

где *NS* и *NL* – число отсчетов в коротком и длинном временных окнах соответственно (*NS*<<*NL*). Тогда r_i – отношение *STA/LTA*, представляющее собой оценку отношения сигнал-шум. Момент времени вступления сигнала T определяется:

$$r(T) \geq C > 1, \tag{3}$$

где *C* – порог срабатывания обнаружителя. Временная сложность детектора *STA/LTA* равна *O(N)*, где *N* – число отчетов анализируемой записи.

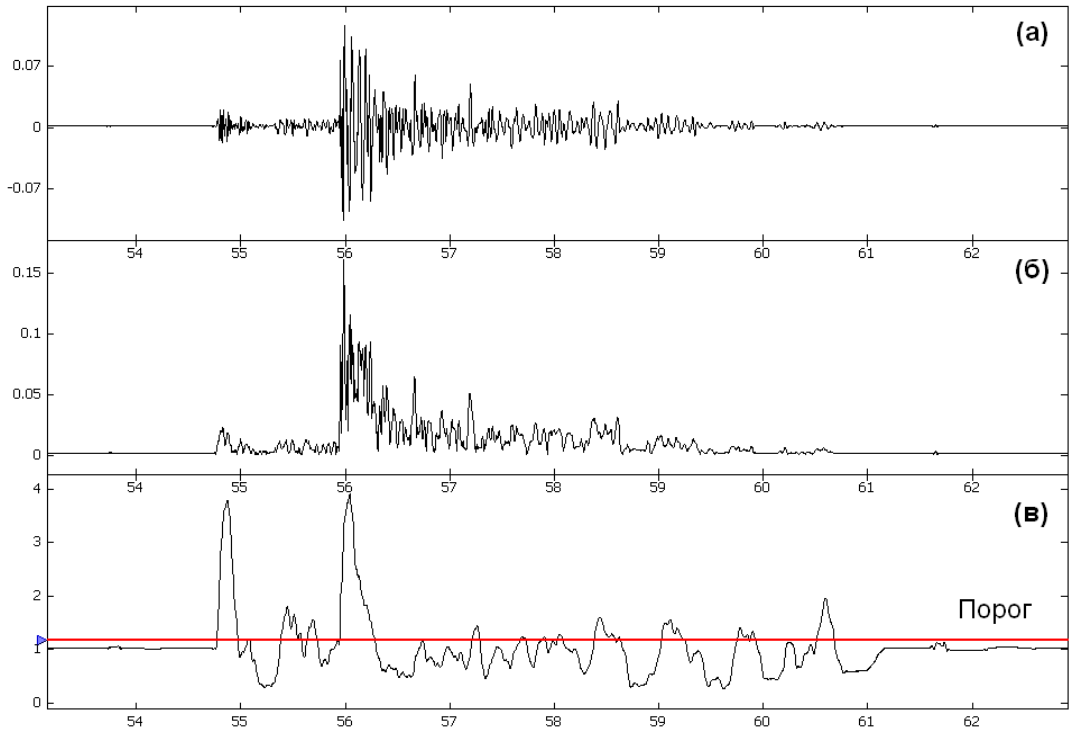


Рис. 4. Отфильтрованная запись полигонного взрыва (а), амплитудная огибающая (б) и результат обработки STA/LTA с параметрами 0.1 с/0.5 с; значение порога обнаружения составляет 1.1

Вычисление координат источника

Для вычисления координат источника необходимо знать две составляющие: расстояние от пункта регистрации и азимут. Расстояние «источник-приёмник» рассчитывается по формуле:

$$S = \frac{V_S V_A}{V_S - V_A} \Delta T \,, \tag{4}$$

где V_s, V_a – скорости сейсмических и акустических волн соответственно, ΔT – разность времён прихода сейсмических и акустических волн.

Для анализа скоростных характеристик волн по данным профильной регистрации сейсмических сигналов (рис. 3) построены годографы обоих типов волн. Примеры построения годографов для разных взрывов приведены на рис. 5а – для сейсмических волн, 5б – для акустических волн. Приведенным годографам соответствуют кажущиеся скорости волн $\boldsymbol{V}^*$.

Располагая значением азимутального направления профильной расстановки датчиков на «Кресте», а также азимутального направления приемника на взрыв вычисляется угол невязки $\boldsymbol{\alpha}$ между обоими направлениями. Истинные скорости распространения волн вычисляются в виде: $V = V^* cos\ \alpha$.

Таким образом были оценены скорости обоих типов сейсмической и акустической волн V_S , V_A. Значения их вычисляются по отношению к каждому взрыву.

Азимут на источник (относительно азимута ориентации в пространстве линейного профиля датчиков) определяется по направлению максимума диаграммы направленности регистрирующей линейки сейсмоприемников, выступающей в качестве приемной антенны. Диаграмма направленности вычисляется путём расчёта коэффициента направленного действия (КНД) сейсмической антенны.

Сейсмическая волна

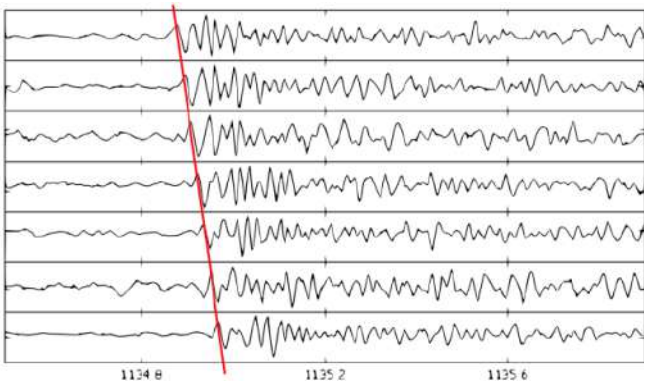


Рис. 5а. Записи сейсмических волн

Акустическая волна

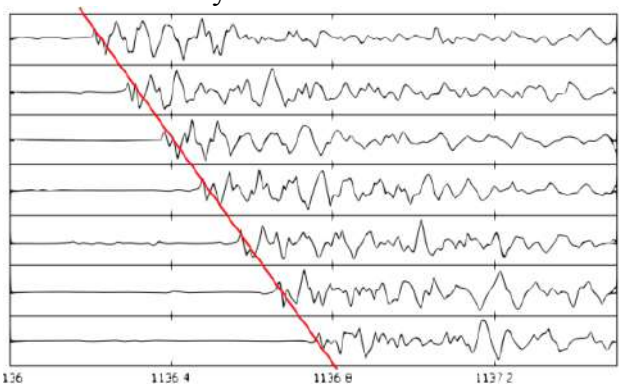


Рис. 5б. Записи акустических волн

Вычисление коэффициента производится по формуле:

$$К.Н.Д. = E_{сум} / E_{\max}, \quad (5)$$

где $E_{сум} = \sum_n (f_1(t_n) + f_2(t_n + \Delta t) + \ldots + f_k(t_n + \Delta t \cdot (k-1)))^2$, $E_{\max} = 1/k^2 \cdot \sum_n f_n^2$

На рис. 6 изображен пример диаграммы направленности для волны взрыва в полярной системе координат.

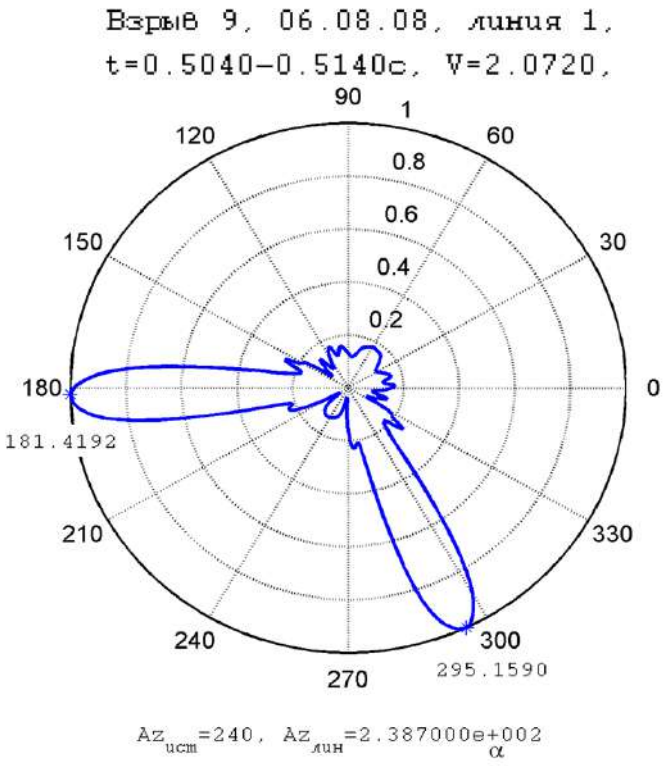


Рис. 6. Пример диаграммы направленности сейсмической волны. Максимум функции направленности соответствует азимуту 295.16° и 181.42°

Результаты натурных экспериментов

В данной работе в качестве прикладных задач применения разработанных алгоритмов и программ рассмотрены задачи обнаружения и локации событий от тестовых (полигонных) взрывов, удалённых на расстояния 600-800 м.

Используя созданные алгоритмы программы обнаружения и вычислений координат источников сейсмоакустических сигналов был обработан набор записей, содержащих 19 полевых взрывов мощностью от 200 до 2600г в тротиловом эквиваленте, находящихся на расстоянии от 570 до 750 м. Помимо обработки в автоматическом режиме производилась ручная обработка оператором в режиме визуального просмотра сейсмограмм. В таблице представлены ре-

зультаты автоматического и ручного вычислений расстояний «источник-приёмник» *R*, азимутальных направлений на источник и погрешности определения расстояния *R* при ручной и автоматической обработках с учётом угла азимута. Погрешность вычисляется как расстояние между координатами вычисленного эпицентра и полученного на основе высокоточных данных GPS. Как следует из анализа данных таблицы, по отношению к большинству рассматриваемых событий автоматический метод локации превосходит по точности ручной способ и лежит в пределах 0.025% до 6%, что в среднем составляет около 3%. При этом измеренные средние значения невязки для сейсмических и акустических волн составляют соответственно 0,03 и 0,02 с. Такое расхождение связано со значительным превышением уровней акустических волн над сейсмическими, что является важным фактором в условиях повышенных шумов.

№ события	Расстояние R, м			Азимут, град.		Погрешность, м	
	Автомат.	Ручн.	Истинное	Автомат.	Истинное	Автомат.	Ручн.
1	508,94	499,48	512,37	256,92	253,49	30,76	32,91
2	613,77	569,65	576,28	264,35	260,16	57,42	42,41
3	573,19	559,34	570,52	262,79	261,60	12,17	16,21
4	574,89	563,39	570,70	262,79	263,09	5,15	7,89
5	507,25	509,71	519,66	269,00	269,30	12,70	10,31
6	511,48	509,20	521,51	270,18	270,48	10,39	12,60
7	519,93	520,02	533,53	282,59	281,20	18,66	18,60
8	515,71	526,79	538,05	283,57	283,25	22,54	11,65
9	579,11	575,23	586,68	295,16	295,16	7,57	11,45
10	574,89	581,15	593,02	296,80	296,27	18,92	13,05
11	710,15	709,82	710,77	300,77	300,02	9,32	9,35
12	731,29	731,04	729,54	300,77	300,93	2,69	2,53
13	693,24	684,20	690,42	299,98	300,26	4,41	7,07
14	693,24	690,71	694,36	298,40	298,08	4,03	5,32
15	574,89	574,00	576,54	256,60	256,63	1,68	2,56
16	596,02	591,12	596,18	257,25	257,25	0,16	5,06

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №№ 17-07-00872-а, 16-07-01052-а.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С. и др. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками / Отв. ред. Г.М. Цибульчик. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, Филиал "Гео" Издательства СО РАН, 2004.

2. Глинский Б.М., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С. Взаимосвязь волновых полей мощных вибраторов с атмосферными и гидродинамическими процессами. // Геология и геофизика. – 1999. – Т.40, №3. – С.431-441.

3. Гуляев В.Т., Кузнецов В.В., Плоткин В.В., Хомутов С.Ю. Генерация и распространение инфразвука в атмосфере при работе мощных сейсмовибраторов. // Изв. АН СССР: Физика атмосферы и океана. – 2001. – Т.37, №3. – С.303-312

4. P.R.Andreev, A.P.Grigoruk, M.N.Shorokhov. Systems for reception and recording of vibroseismic signals. // Bull. Nov. Comp. Center, Math. Model. in Geoph., v. 7 (2002), p.1–11.

5. Авроров С.А., Хайретдинов М.С. Автоматизированная процедура поточного обнаружения и идентификации сейсмических событий // Периодич. Науч.-техн. журн. Национального ядерного центра республики Казахстан. –2008. – Вып. 2. – С. 70-75

6. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. - М.: РХД, 2001.

7. С.А. Авроров, Хайретдинов М.С.Распределенная обработка данных в мониторинговых системах и сетях // Научный вестник НГТУ. – 2010. – №1. – С.1-11.

8. Stewart, S. (1977). Real-time detection and location of local seismic events in central California, Bull Seism. Soc. Am. 67, 433-452.

© В. И. Доброродный, Г. Ф. Седухина, М. С. Хайретдинов, 2018

УДК 528.44

ВЛИЯНИЕ КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ И ПРОВОДИМОСТЬЮ НА ЭФФЕКТИВНУЮ ОЦЕНКУ ЭНЕРГИИ В СКИН-СЛОЕ

Ольга Николаевна Соболева
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6; Новосибирский государственный университет – лаборатория многомасштабной физики и механики фирмы Бейкер Хьюз, 630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, доктор физико-математических наук, тел. (383)330-60-46, e-mail: olga@nmsf.sscc.ru

Метод электромагнитного каротажа очень эффективен при изучении строения Земли. Основной целью этого метода является оценка электропроводности в неоднородной среде. Расчеты с учетом всех вариаций физических параметров требуют громадных вычислительных затрат. Чтобы решить эту проблему при численном моделировании многомасштабных неоднородных сред используют эффективные коэффициенты. В работе, получены эффективные коэффициенты в уравнениях Максвелла. Коэффициенты электропроводности и диэлектрической проницаемости аппроксимируются мультипликативными каскадами Колмогорова с логарифмически нормальным распределением вероятностей. Показано влияние корреляций между параметрами на эффективную оценку энергии в скин-слое. Теоретические результаты проверяются прямым численным 3D-моделированием.

Ключевые слова: уравнения Максвелла, эффективные коэффициенты, мультипликативные каскады Колмогорова, логарифмически нормальные распределения вероятностей.

INFLUENCE OF CORRELATIONS BETWEEN PERMITTIVITY AND CONDUCTIVITY ON EFFECTIVE ESTIMATE OF ENERGY FOR SKIN-LAYER

Olga N. Soboleva
Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia; State University – Baker Hughes Joint Laboratory of The Multi-Scale Geophysics and Mechanics, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630090, Russia; Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, D. Sc., phone: (383)330-60-46, e-mail: olga@nmsf.sscc.ru

Electromagnetic logging is an effective tool for studying Earth structure. The main aim is to estimate the medium conductivity as correctly as possible. The numerical solution of the problem with variations of parameters on all the scales requires high computer costs. The small-scale heterogeneities are taken into account in the effective parameters used. The effective coefficients in the Maxwell's equations are calculated for a multiscale isotropic medium. The conductivity and permittivity are mathematically represented by a Kolmogorov multiplicative cascade with a log-normal probability distribution. The theoretical results obtained in the paper are compared with the results of a direct 3D numerical simulation.

Key words: Maxwell's equations, effective coefficients, Kolmogorov multiplicative cascades, log-normal probability distribution.

The quasi-steady condition in a nomagnetic medium are $\omega\rho_0\varepsilon < 0.1$, where $\varepsilon = \varepsilon^*\varepsilon_0$, $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} F/m$ and $\varepsilon^* < 5 - 10$ is the relative permittivity, $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} H/m$ is the magnetic permeability, $\sigma = 1/\rho_0$, σ is the conductivity. For long probes of the well logging, the quasi-steady condition is satisfied with a high accuracy. However, in heterogeneous media, the quasi-steady condition may be violated, the permittivity affects a measured signal and ε^* may be equal to 40. In natural condition as a rule, the spatial geometry of small-scale heterogeneities is not exactly known, and the irregularity of electric conductivity and permittivity abruptly increases as the scale of measurements decreases. The numerical solution of the problem with variations of parameters at all the scales requires high computer costs. So, the small-scale heterogeneities are described by random fields with the joint probability distribution functions and they are taken into account with the help of the effective parameters. Many natural media are "scale regular" in the sense that they can be described by multifractals and hierarchical cascade models by [1], [2].

In this paper, by the method of subgrid modeling we obtain formulas of effective coefficients for Maxwell's equations in the frequency domain taking into account the first order terms of $\omega\varepsilon(\mathbf{x})/\sigma(\mathbf{x})$. In this case, effective coefficients depend not only on means and variances of the parameters, but also on the correlation between the conductivity and permeability. The theoretical results are verified with the help of direct 3D numerical simulation.

Governing equations and the electrical conductivity and permittivity model

Maxwell's equations for monochromatic fields $\widetilde{\boldsymbol{E}}(\mathbf{x},t) = Re\left(\boldsymbol{E}(\mathbf{x})e^{-i\omega t}\right)$, $\widetilde{\boldsymbol{H}}(\mathbf{x},t) = Re\left(\boldsymbol{H}(\mathbf{x})e^{-i\omega t}\right)$, in the absence of extraneous currents can be written as

$$rot\boldsymbol{H}(\mathbf{x}) = \sigma(\mathbf{x})\boldsymbol{E}(\mathbf{x}) - i\omega\varepsilon(\mathbf{x})\boldsymbol{E}(\mathbf{x}),\ \ rot\boldsymbol{E}(\mathbf{x}) = i\omega\boldsymbol{H}(\mathbf{x}), \qquad (1)$$

where $\boldsymbol{E}$ and $\boldsymbol{H}$ are the vectors of electric and magnetic field strengths, respectively; $\mathbf{x}$ is the vector of spatial coordinates. The magnetic permeability is assumed to be equal to the magnetic permeability of vacuum. We also assume that the electrical conductivity is constant outside of a finite volume V with a sufficiently smooth surface S. At the surface S, the tangent components of electric and magnetic field strengths are continuous. The wavelength is assumed to be large as compared with the maximum scale of heterogeneities of the medium L.

For the approximation of the coefficients $\sigma(\mathbf{x})$, $\varepsilon(\mathbf{x})$, we use the approach described in [3].Let the field of permittivity be known. This means that the fields are measured on a small scale l_0 at each point $\mathbf{x}$, $\sigma_{l_0}(\mathbf{x}) = \sigma(\mathbf{x})$, $\varepsilon_{l_0}(\mathbf{x}) = \varepsilon(\mathbf{x})$. To pass to a coarser scale grid, it is not sufficient to smooth the fields $\sigma_{l_0}(\mathbf{x})$, $\varepsilon_{l_0}(\mathbf{x})$ on the scale l, $l > l_0$. The fields thus smoothed are not a physical parameter that can describe the physical process on the scales (l, L), where L is the maximum scale of heterogeneities. This is due to the fact that the fluctuations of electrical conductivity and permittivity on the scale interval (l_0, l) correlate with the fluctuations of electric field

strength $\boldsymbol{E}$ induced by the electrical conductivity and permittivity. To find an electrical conductivity that can describe a physical process on the scales (l, L) system (1) will be used a subgrid modeling. Following [3] we can write down

$$\varepsilon_{l_0}(\mathbf{x}) = \varepsilon_{00}\exp\left(\int_{l_0}^{L}\chi(\mathbf{x}, l_1)\frac{dl_1}{l_1}\right), \tag{2}$$

$$\sigma_{l_0}(\mathbf{x}) = \sigma_{00}\exp\left(\int_{l_0}^{L}\varphi(\mathbf{x}, l_1)\frac{dl_1}{l_1}\right), \tag{3}$$

where σ_{00}, ε_{00} are constants. The fields χ, φ determine the statistical properties of the electrical conductivity and the permittivity. According to the theorem of the sums of independent random variables if the variances of $\chi(\mathbf{x}, l)$, $\varphi(\mathbf{x}, l)$are finite, the integrals in (2), (3) tends to a field with normal distribution as the ratio L/l_0 increases. If the variances of $\chi(\mathbf{x}, l)$, $\varphi(\mathbf{x}, l)$ are infinite and there exists a non-degenerate limit of the integrals in (2),(3), the integrals tend to a fields with a stable distribution. In the present paper it is assumed that the fields $\chi(\mathbf{x}, l)$, $\varphi(\mathbf{x}, l)$ are isotropic, statistically homogeneous with a normal distributions. We also assume that the fluctuations of $\chi(\mathbf{x}, l)$, $\varphi(\mathbf{x}, l)$ on different scales do not correlate. This assumption is standard in the scaling models [3]:

$$\begin{gathered}\langle\chi(\mathbf{x}, l)\chi(\mathbf{y}, l')\rangle - \langle\chi(\mathbf{x}, l)\rangle\langle\chi(\mathbf{y}, l')\rangle = \Phi^{\chi\chi}(|\mathbf{x}-\mathbf{y}|, l)\delta(\ln l - \ln l') \\ \langle\varphi(\mathbf{x}, l)\varphi(\mathbf{y}, l')\rangle - \langle\varphi(\mathbf{x}, l)\rangle\langle\varphi(\mathbf{y}, l')\rangle = \Phi^{\varphi\varphi}(|\mathbf{x}-\mathbf{y}|, l)\delta(\ln l - \ln l') \\ \langle\varphi(\mathbf{x}, l)\chi(\mathbf{y}, l')\rangle - \langle\varphi(\mathbf{x}, l)\rangle\langle\chi(\mathbf{y}, l')\rangle = \Phi^{\varphi\chi}(|\mathbf{x}-\mathbf{y}|, l)\delta(\ln l - \ln l').\end{gathered} \tag{4}$$

Here the angle brackets denote the ensemble averaging. . For a scale invariant medium, the following relation holds for any positive *K*

$$\Phi(|\mathbf{x}-\mathbf{y}|, l) = \Phi(K|\mathbf{x}-\mathbf{y}|, Kl)$$

If for any l the equality $\langle\varepsilon(\mathbf{x})_l\rangle = \varepsilon_0$ is valid (the conservative cascade), then it follows from (3), (4) that

$$\Phi_0^{\chi\chi} = 2\langle\chi\rangle$$

As the minimum scale l_0 tends to zero, the permittivity and conductivity fields described in (2), (3) become multifractals, and we obtain an irregular fields on a Cantor-type set to be nonzero.

Subgrid modeling

The functions $\sigma_{l_0}(\mathbf{x}) = \sigma(\mathbf{x})$, $\varepsilon_{l_0}(\mathbf{x}) = \varepsilon(\mathbf{x})$ are divided into two components with respect to the scale l. The large-scale (ongrid) components $\sigma(\mathbf{x}, l)$, $\varepsilon(\mathbf{x}, l)$ are obtained by statistical averaging over all $\varphi(\mathbf{x}, l_1)$, $\chi(\mathbf{x}, l_1)$ with $l_0 < l_1 < l$, $l - l_0 = dl$, where dl is small. A small-scale (subgrid) components are equal to, $\sigma'(\mathbf{x}) = \sigma(\mathbf{x}) - \sigma(\mathbf{x}, l)$,

$\varepsilon'(\mathbf{x}) = \varepsilon(\mathbf{x}) - \varepsilon(\mathbf{x}, l)$. The large-scale (ongrid) components of electric and magnetic field strengths $(\mathbf{x}, l)$, $\boldsymbol{H}(\mathbf{x}, l)$ are obtained by statistical averaging solutions to system (1) in which the large-scale components of $\sigma(\mathbf{x}, l)$, $\varepsilon(\mathbf{x}, l)$ are fixed and the small component $\sigma'(\mathbf{x})$, $\varepsilon'(\mathbf{x})$ are a random variables. The subgrid components of the electric and of the magnetic field strengths are equal to $\boldsymbol{H}'(\mathbf{x}) = \boldsymbol{H}(\mathbf{x}) - \boldsymbol{H}(\mathbf{x}, l)$, $\boldsymbol{E}'(\mathbf{x}) = \boldsymbol{E}(\mathbf{x}) - \boldsymbol{E}(\mathbf{x}, l)$. Substituting relations for $\boldsymbol{E}(\mathbf{x})$, $\boldsymbol{H}(\mathbf{x})$ and $\sigma(\mathbf{x})$ in system (1) and averaging over the small-scale components we obtain

$$rot\boldsymbol{H}(\mathbf{x}, l) = \big(\sigma(\mathbf{x}, l) - i\omega\varepsilon(\mathbf{x}, l)\big)\boldsymbol{E}(\mathbf{x}, l) + \langle(\sigma' - i\omega\varepsilon')\boldsymbol{E}'\rangle \tag{5}$$

$$rot\boldsymbol{E}(\mathbf{x}, l) = i\omega\boldsymbol{H}(\mathbf{x}, l).$$

The subgrid term $\langle(\sigma' - i\omega\varepsilon')\boldsymbol{E}'\rangle$ in system (5) is unknown. This term cannot be neglected without preliminary estimation, since the correlation between the electrical conductivity and the electric field strength may be significant. The form of this term in (5) determines the subgrid model. The subgrid term is estimated using the perturbation theory for the fields, in which a small variation of the scale causes significant fluctuations of the field itself. This is a property of multiplicative cascades. Therefore we suppose that $\sigma(\mathbf{x}, l), \boldsymbol{E}(\mathbf{x}, l), \boldsymbol{H}(\mathbf{x}, l)$ and their first derivatives are believed to change slower than $\sigma', \boldsymbol{E}', \boldsymbol{H}'$ and their derivatives. Subtracting system (4) from system (1), and, taking into account only the first order terms, we obtain the subgrid equations:

$$rot\boldsymbol{H}'(\mathbf{x}) = \big(\sigma(\mathbf{x}, l) - i\omega\varepsilon(\mathbf{x}, l)\big)\boldsymbol{E}'(\mathbf{x}) + (\sigma' - i\omega\varepsilon')\boldsymbol{E}(\mathbf{x}, l), \tag{6}$$

$$rot\boldsymbol{E}' = i\omega\boldsymbol{H}'$$

If $|\sigma(\mathbf{x}, l) - i\omega\varepsilon(\mathbf{x}, l)|\omega\mu L^2 \ll 1$, using the solution of equation (6), we obtain the estimation of subgrid term. Substituting this estimation in (5), as $dl \to 0$ we obtain the equation for new $\sigma_0(l)$, $\varepsilon_0(l)$, neglecting the terms of second order of smallness of $\omega\varepsilon(\mathbf{x}, l)/\sigma(\mathbf{x}, l)$:

$$\frac{\partial \ln \sigma_0(l)}{\partial \ln l} = \Phi(0, l)\frac{2(1-2^{\alpha})+3}{6\cos\frac{\pi\alpha}{2}} - \langle\varphi\rangle,\ \sigma_0(l_0) = \sigma_{00} \tag{7}$$

Numerical testing

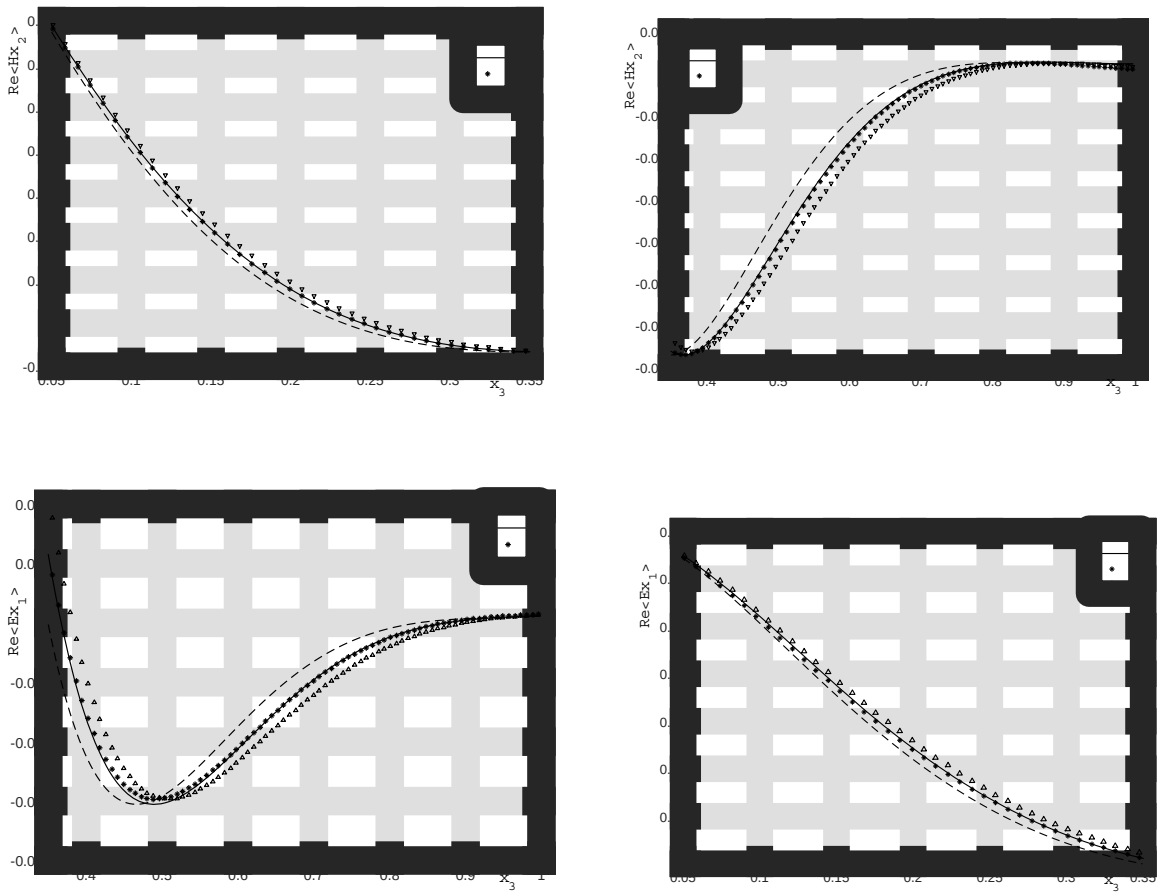
Equations (1) are solved in a unit cube with $\sigma_{00} = 1$, $H_0 = 1$ in dimensionless form. An alternating magnetic field with cyclic frequency ω acts on a conducting medium. This field satisfies the condition $\boldsymbol{H} = \big(0, H_y(z), 0\big)$. On the boundary with vacuum, $z = 0$, the component $H_y(z)$ is assumed to be constant, $H_y(0) = H_0$. Outside the cube and on the cube boundaries, the magnetic and electric fields strengths are specified by the formulas

$$H_y = \exp\left(-k_1 z/\sqrt{2}\right)\exp\left(ik_1 z/\sqrt{2}\right),\ H_x = H_z = 0,$$
$$E_x = \exp\left(-k_1 z/\sqrt{2}\right)\exp\left(ik_1 z/\sqrt{2} - \gamma/4\right),$$
$$E_y = E_z = 0.$$

The conductivity field in the cube is simulated by formula (3) in which it is convenient to pass to a logarithm to base 2:

$$\sigma_l(\mathbf{x}) = 2^{\sum_{j=-6}^{-4}\varphi(\mathbf{x},\tau_i)\Delta\tau},$$

where $l = 2^{\tau}$, $\Delta\tau$ is the τ grid size. In our calculations $\Delta\tau$ is taken to be one. A 256×256×256 grid is used for the space variables. The field $\varphi(\mathbf{x},\tau_i)$ has the stable distribution with $\beta = 1$. In the calculations we use: $\Phi(0,l) = 0.2$, $\langle\varphi\rangle = 0$, $L_0 = 6h_{skin}$, where h_{skin} is the thickness of the skin-layer at $\sigma = 1$. Figure presents the average real parts of the component of electric and magnetic field strengths at $\alpha = 1.7$ (log-stable distribution of σ): line 1 is the result for $\langle\sigma\rangle = 1$, line 2 is the result with for σ_{ef}, line 3 is the result numerical modeling for 30 realizations and line 4 is the numerical and theoretical result for $\alpha = 2$ (lognormal distribution of σ).



The average real parts of the component of electric and magnetic field strengths

REFERENCES

1. Sahimi M. (1993). Flow phenomena in rocks: from continuum models, to fractals, percolation, cellular automata, and simulated annealing. Reviews of Modern Physics.,.65, P. 1393-1534

2. Bekele A., Hudnall H. W., Daigle J.J., Prudente A. and Wolcott M. (2005). Scale dependent variability of soil electrical conductivity by indirect measures of soil properties. Journal of Terramechanics, 42, P. 339-350.

3. Landau L. D. and Lifshitz E. M. Electrodynamics of Continuous Media. New York: Pergamon Press, Oxford-Elmsford; 1984.

4. Kolmogorov A. N. A refinement of previous hypotheses concerning the local structure of turbulence in a viscous incompressible fluid at high Reynolds number. J. Fluid Mech. 1962, V. 13, pp.82–85.

5. Kuz'min G. A., Soboleva O. N. Subgrid modeling of filtration in porous self-similar media. J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2002, V.43, pp.583–592.

© О. Н. Соболева, 2018

УДК 550.34

ОБ ОДНОЙ НЕКОРРЕКТНОЙ ЗАДАЧЕ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ В ТЕОРИИ ПОРОУПРУГОСТИ

Бунед Холматжонович Имомназаров
Новосибирский национальный исследовательский государственный университет (НГУ), 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1, студент, тел. (383)330-83-52

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, тел. (383)330-83-52, e-mail: imom@omzg.sscc.ru

Петр Владимирович Коробов
Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (ФГБУ ААНИИ), 199397, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38, научный сотрудник, тел. (812)337-31-23, e-mail: pekorob@yandex.ru

В статье рассмотрена некорректная задача для двумерной стационарной системы уравнений пороупругости описываемой тремя упругими постоянными, двумя физическими плотностями и пористостью в бездиссипативном гидродинамическом приближении. Исходная задача Коши для системы стационарной пороупругости сводится к двум независимом задачам Коши для системы стационарной теории упругости и оператора Лапласа. Получена явная формула решений на основе метода Карлемана. Показано влияние физических параметров среды на решение рассмотренной некорректной задачи.

Ключевые слова: двухфазная среда, некорректная задача, формула Карлемана, оператор Лапласа, пористость.

ABOUT ONE INCORRECT PROBLEM ARISING IN THE POROELASTICITY THEORY

Bunyod Kh. Imomnazarov
Novosibirsk National Research University (NSU), 1, Pirogova St., Novosibirsk, 630090, Russia, student, phone: (383)330-83-52

Kholmatzhon Kh. Imomnazarov
Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Leading Researcher, phone: (383)330-83-52, e-mail: imom@omzg.sscc.ru

Petr V. Korobov
Federal State Budgetary Institution Arctic and Antarctic Research (AARI), 38, Bering St., Sankt-Peterburg, 199397, Russia, Researcher, phone: (812)337-31-23, e-mail: pekorob@yandex.ru

In this paper, we consider an ill-posed problem for a two-dimensional stationary system the poroelasticity equations described by three elastic constants, two physical densities and porosity in nondissipative hydrodynamic approximation. The initial Cauchy problem for the system of stationary poreelasticity reduces to two independent Cauchy problems for the system of stationary theory of elasticity and the Laplace operator. We obtained an explicit formula for solutions based on the

Carleman method. The influence of the physical parameters of the medium on the solution of the ill-posed problem considered is shown.

Key words: two-phase medium, ill-posed problem, Carleman's formula, Laplace operator, porosity.

Введение

Моделирование двухфазных потоков через гетерогенные пористые среды широко используется в нефтедобыче. Например, моделирование бассейна стремится восстановить геологическую историю осадочного бассейна и в особенности перемещение компонентов углеводорода в геологическом масштабе времени. Моделирование бассейна посвящено пониманию и предсказанию жидких потоков, встречающихся в течение процессов в нефтедобыче. С другой стороны, моделирование двухфазных потоков через пористые среды важную роль играет для прогноза землетрясений, так как процесс подготовки землетрясений является энергонасыщенным процессом. Наиболее универсальным механизмом развития изменений в пористой среде является раскрытие трещин в зонах повышенных значений сдвиговых и растягивающих напряжений. Такие зоны образуются в окрестности очагов будущих землетрясений, если здесь неравномерно в пространстве распределены силы. Начальную стадию раскрытия трещин и последующее состояние среды, при котором развиваются процессы разрушения, большинство сейсмологов связывают с состоянием дилатансии пористой среды [1–3].

Дилатансия – это нелинейное разуплотнение среды за счет образования трещин сдвига вследствие превышения наибольших касательных напряжений некоторого порога. К области дилатансии относят множество точек упруго–пористой среды, для которых при заданном поле напряжений $\{\sigma_{ij}\}$ в среде выполнено следующее условие:

$$D_\tau \equiv \tau - \alpha\left(P + \rho g z\right) - Y \geq 0, \tag{1}$$

где ρ – плотность породы, g – ускорение свободного падения, z –глубина точки, P – гидродинамическое давление, α – коэффициент внутреннего трения, Y – сцепление породы, τ – интенсивность касательных напряжений

$$\tau = \frac{\sqrt{3}}{2}\left[\left(\sigma_{11} - \sigma_{22}\right)^2 + \left(\sigma_{22} - \sigma_{33}\right)^2 + \left(\sigma_{11} - \sigma_{33}\right)^2 + 6\left(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2\right)\right]^{1/2}$$

Условие (1) совпадает с критерием Шлейхера_Надаи разрушения материала под действием скалывающих нагрузок. Критерий удовлетворительно описывает начало процесса разрушения горных пород. Критерий применим и в стадии “предразрушения” (при нагрузке до 60–90% от критической) для качественного описания формы областей активизации раскрытия трещин.

Постановка задачи

Рассмотрим задачу Коши для стационарной системы уравнений пороупругости в некоторой области $\Omega \subset \mathbf{C}$ [4, 5]:

$$\mu\Delta\mathbf{u} - (\lambda + \mu - K^2/(\alpha\rho^2))\nabla \operatorname{div}\mathbf{u} = 0, \tag{2}$$

$$\mathbf{u}\big|_M = \mathbf{G}(\mathbf{x}), \qquad T_\partial \mathbf{u}\big|_M = \mathbf{H}(\mathbf{x}) \tag{3}$$

$$\Delta P = 0 \tag{4}$$

$$\frac{\rho_{0,l}}{\rho_0} P\big|_M = P_0(\mathbf{x}), \qquad \left.\frac{\partial P}{\partial \nu}\right|_M = 0 \tag{5}$$

где $\rho = \rho_s + \rho_l$, $\mathbf{u} = (\mathrm{u}_1, u_2, u_3)$ – вектор смещений упругого пористого тела с парциальной плотностью $\rho_s = \rho_s^f (1 - d_0)$, $\rho_l = \rho_l^f d_0$ – парциальной плотность насыщающей жидкости, d_0 - пористость, p - поровое давление, T_∂ - оператор тензор напряжений, ρ_s^f и ρ_l^f - физические плотности упругого пористого тела и жидкости соответственно, λ, μ константы Ламе, $\alpha = \rho\alpha_3 + K/\rho^2$ [6, 7], $K = \lambda + 2\mu/3$, $\rho^3 \cdot \alpha_3 > 0$ -- модуль объемного сжатия жидкой компоненты гетерофазной среды. Упругие параметры K, μ и α_3 выражаются через скорость распространения поперечной волны c_s и две скорости продольных волн c_{p_1}, c_{p_2} соответствующими формулами:

$$\mu = \rho_s c_s^2,$$

$$K = \frac{\rho}{2}\frac{\rho_s}{\rho_l}\left(c_{p_1}^2 + c_{p_2}^2 - \frac{8}{3}\frac{\rho_l}{\rho}c_s^2 - \sqrt{\left(c_{p_1}^2 - c_{p_2}^2\right)^2 - \frac{64}{9}\frac{\rho_l\rho_s}{\rho^2}c_s^4}\right),$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{2\rho^2}\left(c_{p_1}^2 + c_{p_2}^2 - \frac{8}{3}\frac{\rho_l}{\rho}c_s^2 + \sqrt{\left(c_{p_1}^2 - c_{p_2}^2\right)^2 - \frac{64}{9}\frac{\rho_l\rho_s}{\rho^2}c_s^4}\right).$$

Далее предположим, что вектор функция $\mathbf{u}(x, y)$ и поровое давление $P(x, y)$ являются достаточно гладким решением задачи (2)—(5). Тогда $\mathbf{u}(x, y)$, $P(x, y)$ находится по формуле [8--10]

$$\mathbf{u} = \mathrm{Re}\,\Theta\tilde{u},$$

$$P = \mathrm{Re}\tilde{\mathrm{P}},$$

где $\Theta = \begin{pmatrix} i & i \\ -1 & 2k-1 \end{pmatrix}$, $k = \dfrac{\lambda + 3\mu}{\lambda + \mu}$,

а $\tilde{P}(z)$ есть аналитическая функция, $\tilde{\mathbf{u}}(z)$ есть A-аналитическая функция для матрицы

$$A=\begin{pmatrix}0 & -1\\ 0 & 0\end{pmatrix},$$

принимающая на множестве M значения

$$\tilde{\mathbf{u}}\big|_M=\mathbf{f}=\mathbf{g}+i\mathbf{h},$$

где функции $\mathbf{g}(z)$, $\mathbf{h}(z)$ определяются из системы

$$\begin{pmatrix}\mathrm{Re}\,\Theta & -\mathrm{Im}\,\Theta\\ \mathrm{Re}\,\Theta' & -\mathrm{Im}\,\Theta\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\mathbf{g}(x)\\ \mathbf{h}(x)\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\mathbf{G}(x)\\ \int_{(x_0,y_0)}^{(x,y)}\mathbf{H}(x,y)ds\end{pmatrix},\qquad(6)$$

где $\Theta'=2\mu\begin{pmatrix}1 & 2-k\\ i & -ik\end{pmatrix}$.

Значения функции $\tilde{\mathbf{u}}(z)$, $z=x+iy\in\Omega$ находятся по формулам типа Карлемана [10-13]:

$$\tilde{\mathbf{u}}(z)=\lim_{N\to\infty}\frac{1}{2\pi i}\cdot$$

$$\cdot\left(\int_M\left(e^{N(\phi_0(\zeta)-\phi_0(z))}\begin{pmatrix}f_1\\ f_2\end{pmatrix}(\zeta)+\left(N\left(\partial\phi_0(\zeta)\overline{\zeta}-\partial\phi_0(z)\overline{z}\right)+\frac{\overline{\zeta-z}}{\zeta-z}\right)\begin{pmatrix}f_2\\ 0\end{pmatrix}(\zeta)\right)\frac{d\zeta}{\zeta-z}-\right.$$

$$\left.-\int_M e^{N(\phi_0(\zeta)-\phi_0(z))}\begin{pmatrix}f_2\\ 0\end{pmatrix}(\zeta)\frac{d\overline{\zeta}}{\zeta-z}\right),$$

$$\tilde{P}(z)=\frac{\rho}{2\pi\rho_l i}\lim_{N\to\infty}\int_M P_0(\tau)\left[\frac{(\zeta-z_2)(z-z_1)}{(\zeta-z_1)(z-z_2)}\right]^{\frac{N}{\pi i}}\frac{d\tau}{\zeta-z}.$$

Компоненты тензора напряжений вычисляются через компоненты вектора смещений $\mathbf{u}$ и поровое давление P по формулам [14, 15]

$$\sigma_{ij}=\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)+\tilde{\lambda}\delta_{ij}\,\mathrm{div}\,\mathbf{u}-\left(1-\frac{K}{\alpha\rho^2}\right)\delta_{ij}P,$$

где $\tilde{\lambda}=\lambda-\frac{K^2}{\alpha\rho^2}$, δ_{ik} - символ Кронекера.

Заключение

Рассмотрена некорректная задача для двумерной стационарной системы уравнений пороупругости описываемой тремя упругими постоянными, двумя физическими плотностями и пористостью в бездиссипативном гидродинамическом приближении. Исходная задача Коши для системы стационарной пороупругости сводится к двум независимом задачам Коши для системы стационарной теории упругости и оператора Лапласа. Получена явная формула решений на основе метода Карлемана. Показано влияние физических параметров среды на решение рассмотренной некорректной задачи.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты No.16-01-00729 и 18-31-00120).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Brace W.F., Pauling B.W., Scholz C. Dilatancy in the fracture of crystalline rocks // J. Geophys. Res. – 1966. – Vol. 71. – No. 16. – p. 3939–3952.

2. Николаевский В.Н. Обзор: Земная кора, дилатансия и землетрясения // Успехи науки и техники, М.: Мир. – 1982. – С. 133–215.

3. Алексеев А.С., Белоносов А.С., Петренко В.Е. О концепции многодисциплинарного прогноза землетрясений с использованием интегрального предвестника // Вычислительная сейсмология, Проблемы динамики литосферы и сейсмичности, вып. 32, М.: Геос. – 2001. – с. 81–97.

4. Грачев Е.В., Жабборов Н.М., Имомназаров Х.Х. Сосредоточенная сила в упруго-пористом полупространстве // Доклады РАН. – 2003. – т. 391. – N0. 3. – с. 331—333.

5. Grachev E., Zhabborov N.M., Imomnazarov Kh.Kh. A concentrated forece in an elastic porous half-plane //Dokl. Ross. Akad. Nauk.-2003.-vol.391. – №3.-P.331-333.

6. Доровский В.Н., Перепечко Ю.В., Роменский Е.И. Волновые процессы в насыщенных пористых упругодеформируемых средах // Физика горения и взрыва - 1993. - No 1. - С. 100-111.

7. Blokhin A.M., Dorovsky V.N. Mathematical modelling in the theory of multivelocity continuum. – Nova Science, New York, 1995.

8. Бицадзе А.В. Краевые задачи для эллиптических уравнений второго порядка. – М.: Наука, 1966.

9. Солдатов А.П. Одномерные сингулярные операторы и краевые задачи теории функций. – М.: «Высшая школа», 1991.

10. Arbuzov E.V., Bukhgeim A.L. Carleman's formulas for A-analytic functions in a half-plane // J. Inv. Ill-Posed Problems. – 1997. – v. 5. – No 6. – pp.491–505.

11. Айзенберг Л.А. Формулы Карлемана в комплексном анализе. – Новосибирск: Наука, 1990.

12. Айзенберг Л.А., Кытманов А.М. О возможности голоморфного продолжения в область функций, заданных на связном куске ее границы. Красноярск. – 1990. (Препринт/АН СССР, Сиб. отд-ние. Ин-т физики им. Л. В. Киренского; № 50М).

13. Ниезов И.Э. Задача Коши для системы теории упругости на плоскости // Узбекский мат. Журнал. – 1996. – № 1. – С. 27—34.

14. Grachev E., Zhabborov N.M., Imomnazarov Kh. On one problem for the static equations of elastic-deformed porous media in a half-plane // Bull. Nov.Comp. Center, Math. Model. In Geoph. – 2003. №8. – P. 43-46.

15. Grachev E., Imomnazarov Kh., Zhabborov N. One nonclassical problem for the statics equations of elastic-deformed porous media in a half-plane // Applied Matematics Letters. – 2004. – Vol. 17. – Issue 1. – p.31–34.

© Б. Х. Имомназаров, Х. Х. Имомназаров, П. В. Коробов, 2018

УДК 512.812.4

ЯДРО ОСНОВНЫХ ГРУПП ЛИ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ОДНОМЕРНОЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ДВУХСКОРОСТНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ

Георгий Сергеевич Васильев
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, аспирант, тел. (923)243-07-67, e-mail: george.vasiliev@yandex.ru

Бахтиер Журамирзаевич Мамасолиев
Национальный университет Узбекистана им. Мирзо Улугбека, 100174, Республика Узбекистан, г. Ташкент, ул. Университетская, 4, аспирант, e-mail: Baxtier_Mamasoliev@nuu.uz

Используя аппарат теории групп и алгебр Ли, для одномерной изотермической системы уравнений движения двухскоростной среды в диссипативном случае с одним давлением, при условии отсутствия вектора массовой силы, найден базис ядра основной алгебры Ли. Также найдены оптимальные системы подалгебр ядра основных алгебр Ли.

Ключевые слова: группа Ли, алгебра Ли, инфинитезимальный оператор, продолжение оператора, оптимальная система подалгебр, автоморфизм.

MAIN CORE OF LIE GROUPS OF TRANSFORMATIONS FOR A ONE-DIMENSIONAL SYSTEM OF TWO-VELOCITY HYDRODYNAMIC EQUATIONS

Georgy S. Vasiliev
Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D. Student, phone: (923)243-07-67, e-mail: george.vasiliev@yandex.ru

Baxtier J. Mamasoliev
National University of Uzbekistan Named after Mirzo Ulugbek, 4, University St., Tashkent, 100174, Republic Uzbekistan, Ph. D. Student, e-mail: Baxtier_Mamasoliev@nuu.uz

We found the main core of Lie groups of transformations for a one-dimensional system of two-velocity hydrodynamic equations with equilibrium of pressure phases, using the theory of Lie groups and Lie algebra. The optimum kernel of subalgebras of basic Lie algebra also were found.

Key words: Lie group, Lie algebra, infinitesimal operator, operator continuation, optimum kernel of subalgebras, automorphism.

Введение

Хорошо известно, что нелинейные эволюционные уравнения связаны с нелинейными явлениями в различных областях науки и техники. Понимание этих явлений имеет первостепенное значение для построения точных решений, задача отыскания которых весьма трудноразрешима. К тому же построение точных решений возможно только для особых случаев. Тем не менее, в последние годы были предложены различные способы решения этих типов нелинейных эволю-

ционных уравнений, включая: билинейной метод Хироты [1], метод обратной задачи рассеяния [2], использование преобразования Бэклунда [3] или преобразования Дарбу [4], усеченное разложение Пенлеве [5], метод группового анализа [6-12], метод баланса [13], вариационный метод итераций [14] и полуобратный метод [15]. Метод группового анализа имеет ряд особенностей при поиске решений для нелинейных дифференциальных уравнений. Он основан на изучении инвариантности дифференциальных уравнений при одном из параметров групп Ли точечных преобразований [6-12], систематически унифицирует и расширяет хорошо известные специальные методы для построения явных решений дифференциальных уравнений, особенно для нелинейных уравнений с частными производными. В [16] исследована на основе метода группового анализа нелинейная система уравнений в частных производных, описывающая механику двухфазной среды без учёта температурных эффектов и с диссипацией энергии, обусловленной с силой вязкого трения между фазами.

В данной работе на основе метода группового анализа найдено ядро основных групп Ли преобразований одномерной системы уравнений двухскоростной гидродинамики с равновесием фаз по давлению. Также найдены оптимальные системы подалгебр ядра основных алгебр Ли. В отличие от [16], в рассматриваемой системе отсутствует диссипация энергии и уравнение состояния является более общим. Оно не только является функцией плотностей подсистем, но также является функцией относительной скорости.

Уравнения двухскоростной гидродинамики

Уравнение движения двухскоростной среды в диссипативном случае с одним давлением в системе, в изотермическом случае имеет вид [17]

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + div(\rho_s u) = 0\,, \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho_l}{\partial t} + div(\rho_l v) = 0\,, \tag{2}$$

$$\rho(\frac{\partial u}{\partial t} + (u,\nabla)u) = -\nabla P + \tilde{\upsilon}\Delta u + (\frac{\tilde{\nu}}{3} + \tilde{\mu})\nabla div(u) - \frac{\rho_l}{2}\nabla(u-v)^2 + \rho f\,, \tag{3}$$

$$\rho(\frac{\partial v}{\partial t} + (v,\nabla)v) = -\nabla P + \upsilon\Delta v + (\frac{\nu}{3} + \mu)\nabla div(v) + \frac{\rho_s}{2}\nabla(u-v)^2 + \rho f\,, \tag{4}$$

где u и v – векторы скоростей подсистем, составляющих двухскоростной континуум с соответствующими парциальными плотностями ρ_s и ρ_l, $\upsilon(\mu)$ и $\tilde{\upsilon}(\tilde{\mu})$ – соответствующие сдвиговые (объемные) вязкости, $\rho = \rho_s + \rho_l$ – общая плотность двухскоростного континуума, f – вектор массовой силы, отнесенной к единице массы.

Данная система замыкается уравнением состояния:

$$P = P(\rho, (u-v)^2).$$

Рассмотрим одномерный случай системы (1) – (4), в обратимом приближении и отсутствии вектора массовой силы

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_s u)}{\partial x} = 0, \tag{5}$$

$$\frac{\partial \rho_l}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_l v)}{\partial x} = 0, \tag{6}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\rho_l}{2\rho}\frac{\partial}{\partial x}(u-v)^2, \tag{7}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v\frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\rho_s}{2\rho}\frac{\partial}{\partial x}(u-v)^2. \tag{8}$$

Для сокращения записи введем обозначения

$$\overline{\rho} = \rho = \rho_s + \rho_l,\ \rho = \rho_s,\ \sigma = \rho_l,\ \overline{w} = w^2,\ w = u - v.$$

Выразим производную функции P по x через функции ее аргументов:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial P}{\partial \overline{\rho}}\frac{\partial \overline{\rho}}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial \overline{w}}\frac{\partial \overline{w}}{\partial x} = P_{\overline{\rho}}(\rho_x + \sigma_x) + 2P_{\overline{w}} w(u_x - v_x).$$

Тогда система (5) – (8) примет вид

$$\rho_t + \rho_x u + u_x \rho = 0, \tag{9}$$

$$\sigma_t + \sigma_x v + v_x \sigma = 0, \tag{10}$$

$$u_t + uu_x + \overline{\rho}^{-1}(P_{\overline{\rho}}(\rho_x + \sigma_x) + w(u_x - v_x)(2P_{\overline{w}} + \sigma)) = 0, \tag{11}$$

$$v_t + vv_x + \overline{\rho}^{-1}(P_{\overline{\rho}}(\rho_x + \sigma_x) + w(u_x - v_x)(2P_{\overline{w}} - \rho)) = 0. \tag{12}$$

Ядро основных алгебр системы

Зададим вид допускаемого системой (9) – (12) инфинитезимального оператора

$$X = \tau\frac{\partial}{\partial t} + \xi\frac{\partial}{\partial x} + \alpha\frac{\partial}{\partial \rho} + \beta\frac{\partial}{\partial \sigma} + \delta\frac{\partial}{\partial u} + \gamma\frac{\partial}{\partial v},$$

где функции τ, ξ, α, β, δ, γ зависят от переменных t, x, ρ, σ, u, v. Построим первое продолжение оператора X

$$X^1 = X + \varphi^t \frac{\partial}{\partial \rho_t} + \varphi^x \frac{\partial}{\partial \rho_x} + \psi^t \frac{\partial}{\partial \sigma_t} + \psi^x \frac{\partial}{\partial \sigma_x} + U^t \frac{\partial}{\partial u_t} + U^x \frac{\partial}{\partial u_x} + V^t \frac{\partial}{\partial v_t} + V^x \frac{\partial}{\partial v_x},$$

где коэффициенты φ^t, φ^x, ψ^t, ψ^x, U^t, U^x, V^t, V^x зависят от t, x, ρ, σ, u, v, ρ_t, ρ_x, σ_t, σ_x, u_t, u_x, v_t, v_x. Данные коэффициенты вычисляются по формулам продолжения [10].

Подействуем оператором X^1 на каждое уравнение системы (9) – (12), что приведет к уравнениям

$$\varphi^t + \delta\rho_x + \varphi^x u + \alpha u_x + U^x \rho = 0, \tag{13}$$

$$\psi^t + \gamma\sigma_x + \psi^x v + \beta v_x + V^x \sigma = 0, \tag{14}$$

$$U^t + \delta u_x + U^x u - \overline{\rho}^{-2}(P_{\overline{\rho}}(\rho_x + \sigma_x) + 2P_{\overline{w}} w(u_x - v_x))(\alpha + \beta) +$$

$$+\overline{\rho}^{-1}(P_{\overline{\rho}\overline{\rho}}(\rho_x + \sigma_x) + 2P_{\overline{w}\overline{\rho}} w(u_x - v_x))(\alpha + \beta) + 2\overline{\rho}^{-1} P_{\overline{w}}(u_x - v_x)(\delta - \gamma) +$$

$$+\overline{\rho}^{-1}(2P_{\overline{w}\overline{\rho}} w(\rho_x + \sigma_x) + 4P_{\overline{w}\overline{w}} w^2(u_x - v_x))(\delta - \gamma) + \overline{\rho}^{-1} P_{\overline{\rho}}(\varphi^x + \psi^x) +$$

$$+2\overline{\rho}^{-1} P_{\overline{w}} w(U^x - V^x) - \overline{\rho}^{-2}\sigma w(u_x - v_x)(\alpha + \beta) + \overline{\rho}^{-1} w(u_x - v_x)\beta +$$

$$+\overline{\rho}^{-1}\sigma(u_x - v_x)(\delta - \gamma) + \overline{\rho}^{-1}\sigma w(U^x - V^x) = 0,$$

$$V^t + \gamma v_x + V^x v - \overline{\rho}^{-2}(P_{\overline{\rho}}(\rho_x + \sigma_x) + 2P_{\overline{w}} w(u_x - v_x))(\alpha + \beta) +$$

$$+\overline{\rho}^{-1}(P_{\overline{\rho}\overline{\rho}}(\rho_x + \sigma_x) + 2P_{\overline{w}\overline{\rho}} w(u_x - v_x))(\alpha + \beta) + 2\overline{\rho}^{-1} P_{\overline{w}}(u_x - v_x)(\delta - \gamma) +$$

$$+\overline{\rho}^{-1}(2P_{\overline{w}\overline{\rho}} w(\rho_x + \sigma_x) + 4P_{\overline{w}\overline{w}} w^2(u_x - v_x))(\delta - \gamma) + \overline{\rho}^{-1} P_{\overline{\rho}}(\varphi^x + \psi^x) +$$

$$+2\overline{\rho}^{-1} P_{\overline{w}} w(U^x - V^x) + \overline{\rho}^{-2}\rho w(u_x - v_x)(\alpha + \beta) - \overline{\rho}^{-1} w(u_x - v_x)\alpha -$$

$$-\overline{\rho}^{-1}\rho(u_x - v_x)(\delta - \gamma) - \overline{\rho}^{-1}\rho w(U^x - V^x) = 0. \tag{16}$$

Подставив формулы продолжения в уравнения (13) – (16), перейдем на многообразие (9) – (12), заменой производных по t через остальные величины. Полученные таким образом уравнения являются неоднородными квадратичными формами от свободных переменных ρ_x, σ_x, u_x, v_x, функции P и ее производных. Выполнив расщепление условий инвариантности, т.е. приравняв нулю

коэффициенты при свободных переменных, при этом допуская предположения о том, что $P_{\bar{\rho}} \neq 0$ и $u \neq v$, в конечном итоге получим

$$\tau = Bt + C,\ \xi = Bx + Dt + E,\ \alpha = \beta = 0,\ \delta = \gamma = D.$$

Выбирая одну из постоянных B, C, D, E равной единице, а остальные равными нулю, получим базис ядра основной алгебры Ли системы (5) – (8), образуемый операторами

$$X_1 = t\frac{\partial}{\partial t} + x\frac{\partial}{\partial x},\ X_2 = \frac{\partial}{\partial t},\ X_3 = \frac{\partial}{\partial x},\ X_4 = t\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial u} + \frac{\partial}{\partial v}.$$

Оптимальные системы подалгебр

Нахождение оптимальной системы Θ_1 одномерных подалгебр ядра основных алгебр Ли $L_4 = \langle X_1, X_2, X_3, X_4 \rangle$ достигается подбором значений параметров, от которых зависит общий автоморфизм группы $IntL^4$. Данные параметры подбираются таким образом, чтобы достигалось максимально возможное число нулевых значений координат базисного вектора общего автоморфизма с целью выбора представителя того класса подобных подалгебр, к которому принадлежит произвольный элемент алгебры Ли L_4. Возникающие при этом альтернативные случаи дают классы подобных однопараметрических подалгебр и, тем самым, оптимальную систему Θ_1.

При этом подалгебра $\Theta_S \subset L^n$ описывается набором своих базисных элементов [11]

$$\Theta_S = \left\{ H_\alpha = e_\alpha^i X_i; \alpha = 1, ..., S \right\}.$$

Матрица, элементами которой являются коэффициенты операторов H_α имеет следующий вид:

$$\zeta = \begin{pmatrix} e_1^1 & \dots & e_1^n \\ \dots & \dots & \dots \\ e_S^1 & \dots & e_S^n \end{pmatrix}.$$

Матрица ζ определяет некоторую S-мерную подалгебру в L^n только если выполнены следующие два условия:

$$rank(\zeta) = S; \tag{17}$$

$$\left[H_\alpha, H_\beta \right] = K_{\alpha\beta}^\gamma H_\gamma. \tag{18}$$

На множестве матриц ζ действуют преобразования строк (B-преобразования) $H'_\alpha = \omega^\beta_\alpha H_\beta$, $\det\omega \neq 0$ и преобразования столбцов, определяемые внутренними автоморфизмами $A \in IntL^n : \zeta' = \zeta A$. Используя данные преобразования с целью максимального упрощения матрицы, может быть найдена оптимальная система подалгебр Θ_S.

Очевидно, что для Θ_1 условия выполнены, а представителем Θ_4 является сама алгебра Ли L_4. Действительно, матрица четырехмерной подалгебры квадратная и невырождена, а значит при помощи -преобразований всегда может быть приведена к единичной.

Далее с учетом условий (17) и (18) находятся двумерные и трехмерные подалгебры. При построении оптимальной системы Θ_2, можно заранее предполагать, что один из базисных векторов $X = e^i X_i$ двумерной подалгебры взят из системы Θ_1. К нему подбирается такой вектор $Y = e^j Y_j$, чтобы он удовлетворял системе

$$\left[e^i X_i, e^j Y_j\right] = \alpha e^i X_i + \beta e^j Y_j .$$

В свою очередь, система Θ_3 строится методом расширения двумерных подалгебр [6].

Окончательно придем к следующей таблице оптимальных систем Θ_S для алгебры Ли L_4.

Оптимальные системы подалгебр

S	1	2	3	4
Θ_S	$X_1 + q_1 X_4$ $X_2 + q_2 X_4$ X_3 X_4	X_1, X_2 $X_1 + q_1 X_4, X_3$ $X_1 + q_1 X_4, X_4$ $X_2 + q_2 X_4, X_3$ X_3, X_4	X_1, X_2, X_3 $X_1 + q_1 X_4, X_3, X_4$ $X_2 + q_2 X_4, X_3, X_4$	X_1, X_2, X_3, X_4

Заключение

В работе получен базис ядра основной алгебры Ли одномерной системы уравнений двухскоростной гидродинамики с равновесием фаз по давлению. Для данного ядра найдены оптимальные системы подалгебр.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №16-01-00729).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hirota R. Exact solution of the Korteweg-de Vries equation for multiple collisions of solitons // Phys. Rev. Lett. – 1971. – Vol. 27. – C. 1192-1194.

2. Ablowitz M.J., Clarkson P.A. Solitons, Nonlinear Evolution Equations and Inverse Scattering. Cambridge: Cambridge University Press, 1991. – 532 c.

3. Rogers C., Shadwick W.F. Backlund Transformations and Their Applications. New York: Academic Press, 1982. – 352 c.

4. Matveev V.A., Salle M.A. Darboux Transformations and Solitons. Berlin: Springer, 1991. – 129 c.

5. Cariello F., Tabor M. Similarity reductions from extended Painleve expansions for nonintegrable evolution equations // Physica D. – 1991. – Vol. 53. – C. 59–70.

6. Овсянников Л.В. Групповой анализ дифференциальных уравнений. – М. : Наука, 1978. – 399 с.

7. Bluman G.W., Kumei S. Symmetries and Differential Equations. New York: Springer, 1989. – 412 c.

8. Olver P.J. Applications of Lie Groups to Differential Equations. New York: Springer, 1993. – 500 c.

9. Bluman G.W., Anco S. Symmetry and Integration Methods for Differential Equations. New York: Springer, 2002. – 422 c.

10. Лагно В.И., Спичак С.В., Стогний В.И. Симметрийный анализ уравнений эволюционного типа. Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2004. – 392 с.

11. Головин С.В., Чесноков А.А. Групповой анализ дифференциальных уравнений. Новосибирск, 2009. – 119 с.

12. Bluman G.W., Cheviakov A., Anco S. Applications of Symmetry Methods to Partial Differential Equations. New York: Springer, 2010. – 398 c.

13. Wang M.L., Zhou Y.B., Li Z.B. Application of a homogeneous balance method to exact solutions of nonlinear equations in mathematical physics // Phys. Lett. A. – 1996. – Vol. 216. – C. 67–75.

14. He J.H. Variational iteration method-a kind of non-linear analytical technique: Some examples // Int. J. Nonlinear Mech. – 1999. – Vol. 34. – C. 699–708.

15. He J.H. Semi-inverse method of establishing generalized variational principles for fluid mechanics with emphasis on turbomachinery aerodynamics // Int. J. Turbo Jet-Engines. – 1997. – Vol. 14. – №. 1. – C. 23-28.

16. Панов А.В. Групповая классификация системы уравнений механики двухфазной среды // Вестн. Челяб. гос. ун-та. – 2011. – № 26. – Математика. Механика. Информатика. Вып. 13. – С. 39-48.

17. Доровский В.Н., Перепечко Ю.В. Теория частичного плавления // Геология и геофизика. – 1989. – № 9. – С. 56–64.

© Г. С. Васильев, Б. Ж. Мамасолиев, 2018

УДК 550.83

КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ КАРЬЕРНОГО ВЗРЫВА КАК ИСТОЧНИКА СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

Сергей Александрович Ефимов
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, научный сотрудник, тел. (913)906-59-29, e-mail: sergesaesa@yandex.ru

В статье представлен качественный анализ карьерного взрыва как источника сейсмических волн. Предложен подход улучшения качества сейсмограмм в дальней зоне путем использования записи взрыва в ближней зоне в качестве ядра. Эффективность предложенного подхода показана на примере обработки экспериментальной сейсмической записи.

Ключевые слова: карьерный взрыв, сейсмическая запись, волновая зона, ядро преобразования, метод обработки.

QUALITATIVE ANALYSIS OF CAREER BLAST AS THE SOURCE OF SEISMIC WAVES

Sergey A. Efimov
Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher, phone: (913)906-59-29, e-mail: sergesaesa@yandex.ru

The article presents a qualitative analysis of the quarry explosion as a source of seismic waves. An approach to improving the quality of seismograms in the far zone by using near-zone explosion recording as a core is proposed. The effectiveness of the proposed approach is shown on the example of experimental seismic record processing.

Key words: career blast, seismic recording, wave zone, the core of the transformation processing method.

Введение

Постановка задачи. Вопрос использования энергии промышленных взрывов в качестве зондирующих сигналов для проведения исследовательских геофизических работ, связанных с изучением литосферы земли, привлекает внимание геофизиков на протяжении многих лет. Технология проведения геофизических работ включает в себя процедуру построения сейсмограмм. В естественном виде (непосредственная регистрация колебаний поверхности земли) качество сейсмограмм не всегда приводит к удовлетворительным результатам. Поэтому используется согласованный или оптимальный приемник, осуществляющий дополнительную обработку данных регистрации по следующему алгоритму:

$$q(t) = \int_0^t s(\tau) \cdot R(t-\tau) \cdot d\tau \qquad (1)$$

где *s(t)* – сигнал на входе приемника; *R(t)* – ядро преобразования; *q(t)* – сигнал на выходе приемника.

В работе [1] показано, что при использовании согласованного или оптимального приемника для выделения зондирующего сигнала из шума можно получить отношение наибольшего значения сигнальной функции на выходе приемника к среднеквадратическому значению выходного шума равное:

$$q_{\text{s.max}}(\tau_0)/\sqrt{D_n} = \sqrt{2E/N}; \quad (2)$$

где E – энергия сигнала; N - спектральная плотность шума.

При этом ядро преобразования для оптимального фильтра должно удовлетворять условию [1]:

$$R(t-\tau) = s_0(t-\tau). \quad (3)$$

где $s_0(t)$ – функция зондирующего сигнала, формируемого распределенным карьерным взрывом в однородной среде в волновой зоне.

Методы и материалы

Распределенный карьерный взрыв как физическое явление представляет собой сложный процесс формирования сейсмической волны. По аналогии с атомным взрывом пространство формирования ударной и сейсмической волны разделяется на две области: области нелинейных и линейных деформаций. Для получения сейсмограммы от карьерного взрыва в дальней зоне по формуле (1) необходимо иметь ядро преобразования *R(t)*. Построение математической модели этого ядра является задачей нетривиальной. Поэтому более конструктивным подходом для решения этой задачи, по мнению автора, является экспериментальное измерение сейсмического сигнала в ближней волновой зоне с дальнейшим использованием его в качестве функции ядра.

Исследование сейсмического сигнала.

На рис. 1 представлена запись карьерного распределенного взрыва в волновой зоне в районе Бачатского угольного разреза Кемеровской области. Для регистрации использована сейсмостанция «РОСА» и трехкомпонентный сейсмометр СК1-П. Время регистрации – 10 августа 2001 г. Взрыв формируется из 220 скважин по 180 кг взрывчатого вещества в каждой скважине. Одновременно взрываются 10 скважин. Время между взрывами – 25-30 мс. Значение общего времени взрыва находится в диапазоне 550 – 660 мс. Среда взрыва – угольный блок.

На рис. 2 представлена запись карьерного распределенного взрыва в дальней зоне в районе Быстровского полигона Новосибирской области. Сейсмостанция – ВИРС-М. Количество сейсмометров СК-1П - 5.

На рис. 3 представлены результаты обработки по формуле (1) сейсмических сигналов в дальней зоне. При этом в качестве ядра преобразования использована экспериментальная запись карьерного взрыва в ближней зоне, соответствующая рис. 1.

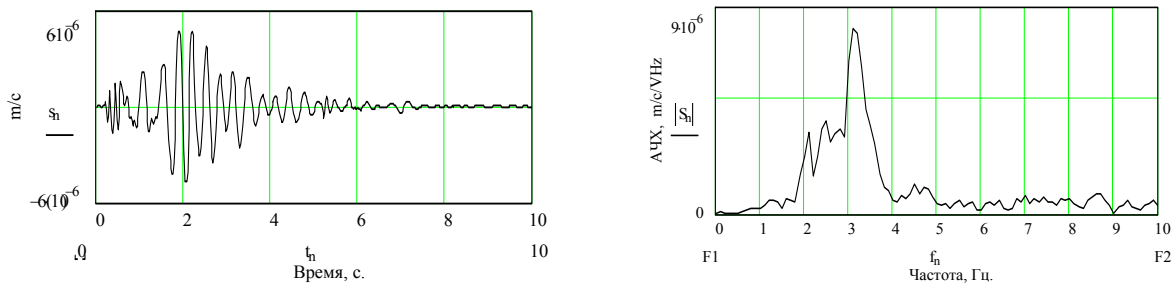


Рис. 1. Сейсмический сигнал от карьерного взрыва в волновой зоне, сейсмометр СК1-П №1, Z компонента (рис. слева); спектральная характеристика сейсмического сигнала (рис. справа)

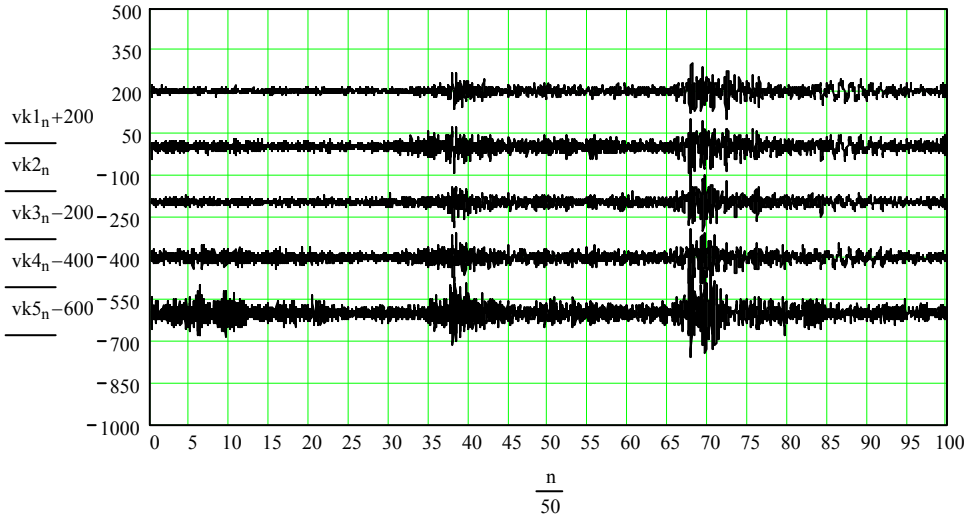


Рис. 2. Сейсмический сигнал от карьерного взрыва в дальней зоне, 5 сейсмометров СК1-П, Z компонента. Расстояние между сейсмометрами 200 м

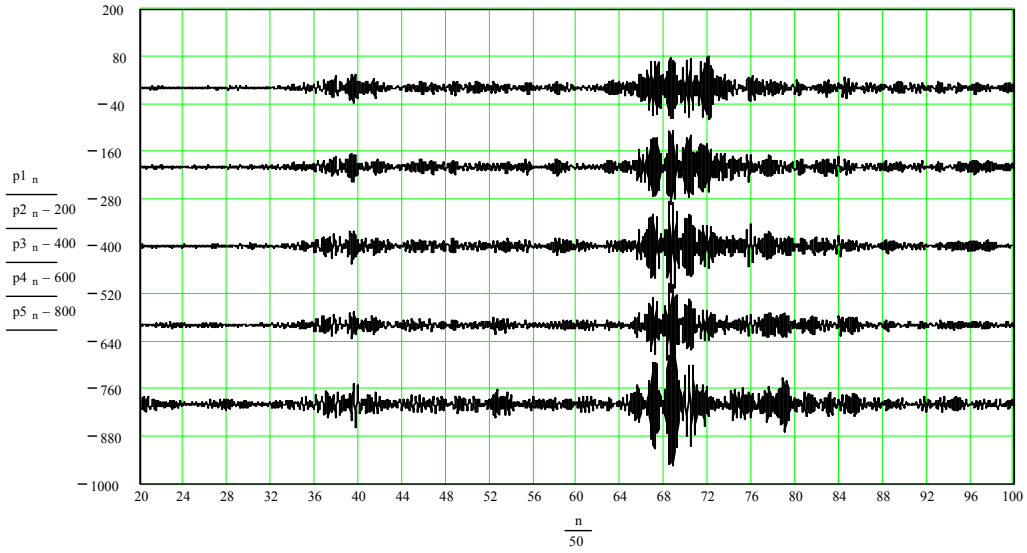


Рис. 3. Результаты обработки сейсмического сигнала от карьерного взрыва в дальней зоне, 5 сейсмометров СК1-П, Z компонента. Расстояние между сейсмометрами 200 м

Сравнение сейсмических сигналов от карьерного взрыва в дальней зоне по рис. 2 с результатами обработки этих сигналов (рис. 3) показывает целесообразность предлагаемого способа обработки с целью повышения достоверности определения времени вступления сейсмических волн. На следующих рисунках показаны графики сейсмограмм, на которых выделены временные интервалы, соответствующие первым вступлениям сейсмических волн.

Для успешного использования записей взрыва в ближней зоне при формировании сейсмограммы необходимо провести регистрацию взрыва в волновой зоне. Граница раздела нелинейных и линейных деформаций находится на определенном расстоянии от точки или области взрыва. Исследователь расставляет сейсмометры для регистрации взрыва в ближней зоне, учитывая мощность, геометрию взрывных скважин и характеристику среды. При этом всегда существует неопределенность, которая может привести к ситуации, когда часть сейсмометров регистрируют сигнал в нелинейной зоне, а часть сейсмометров – в линейной (волновой) зоне. Для анализа данных регистрации с целью определения: относится сигнал к волновой зоне или зоне деформации, - можно использовать следующую функцию:

$$G(\omega,\tau) = [\, Re\{ S(\omega) \cdot e^{j\cdot\omega\cdot\tau} \}]^2 . \qquad (4)$$

Использование этой функции для анализа записей взрыва позволяет формировать своеобразную «голограмму», вид которой достаточно точно идентифицирует область регистрации – волновая или область деформации. В качестве примера рассмотрим «голограммы» записи карьерного взрыва двух сейсмометров, полученных в соответствии с формулой (4). При этом один сейсмометр располагался ближе к точке взрыва. На рис. 4 показаны «голограммы» карьерных распределенных взрывов и соответствующие им временные сигналы в волновой зоне (слева) и на границе нелинейная - линейная область (справа). Место регистрации: район Бачатского угольного разреза Кемеровской области, сейсмостанция «РОССА», трехкомпонентный сейсмометр СК1-П, Z компонента, дата регистрации – 10.08.2001. Ось ординат рис. 4 соответствует аргументу ω и имеет масштаб 0,1*Гц. Ось абсцисс рис. 5 соответствует аргументу τ и имеет масштаб 0,02*с.

Особенностью «голограммы» распределенного карьерного взрыва в точке регистрации, соответствующей волновой зоне, является наличие определенной структурности рисунка - единства структурного рисунка, - и концентрация энергии сигнала в небольшом частотном диапазоне, в данном случае в диапазоне от 2 до 4 Гц. На «голограмме» распределенного карьерного взрыва на границе нелинейная - линейная область видно нарушение единства рисунка структуры и расширение частотного диапазона. В качестве примера «голограммы» записи карьерного взрыва в зоне деформации (нелинейная область), рассмотрим запись карьерного взрыва в районе поселка Таштагол Кемеровской области, дата регистрации – 26.06.2004. На рис. 5 показаны «голограммы» карьерного распределенного взрыва и соответствующие им временные сигналы с сейсмометров, расположенных в зоне деформации (нелинейная область).

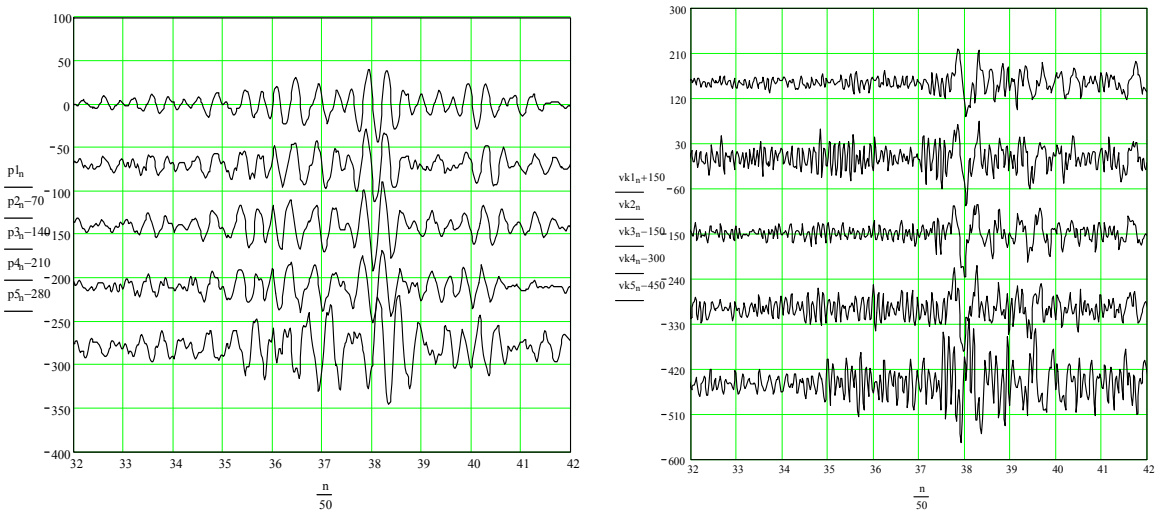


Рис. 4. Сейсмограмма после обработки сейсмического сигнала от карьерного взрыва в дальней зоне (слева); сейсмограмма без обработки сейсмического сигнала (справа). Первое вступление волн – 38 с

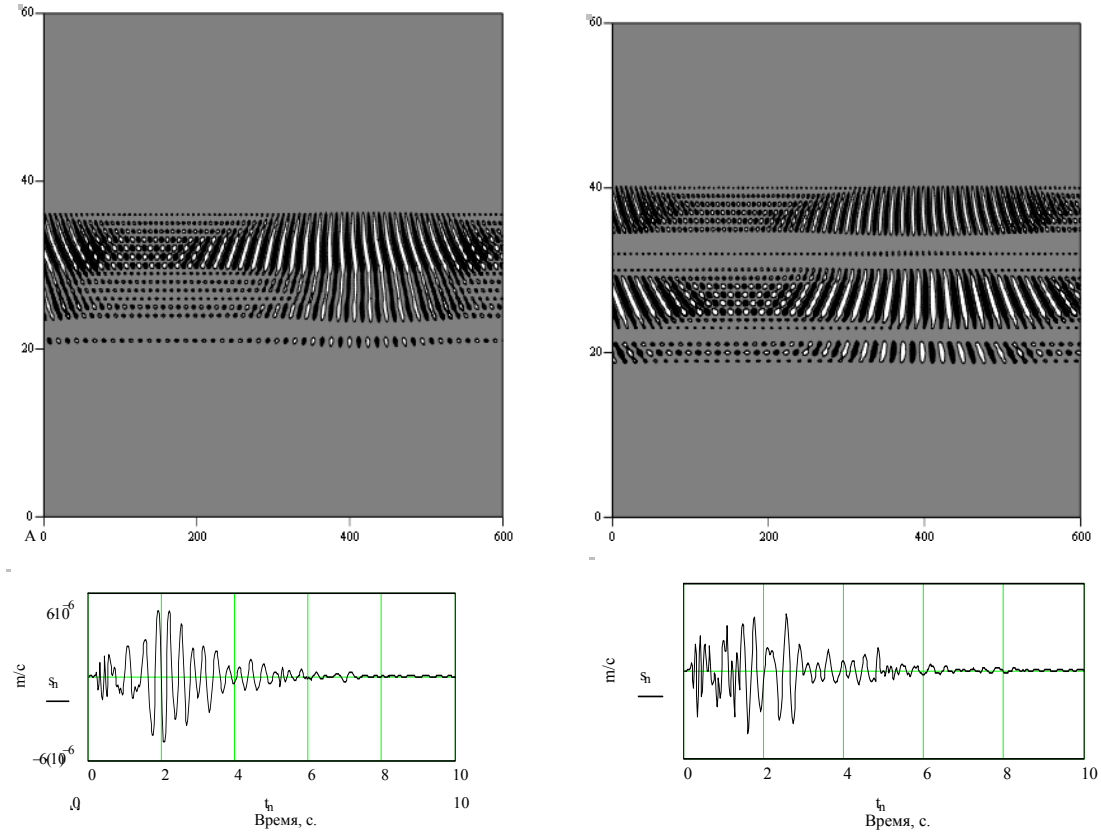


Рис. 5. «Голограммы» карьерного распределенного взрыва и соответствующие им временные сигналы в волновой зоне (слева) и на границе нелинейная – линейная область. Место регистрации: район Бачатского угольного разреза Кемеровской области, Z компонента, сейсмостанция «РОССА», дата регистрации – 10.08.2001

Представленные на рис. 6 «голограммы» карьерного взрыва объективно характеризуют место расположения сейсмометров как нелинейную область – зону деформации. На всех «голограммах» распределенного карьерного взрыва, зарегистрированного в нелинейной зоне деформаций, видно нарушение единства рисунка структуры и существенное расширение частотного диапазона.

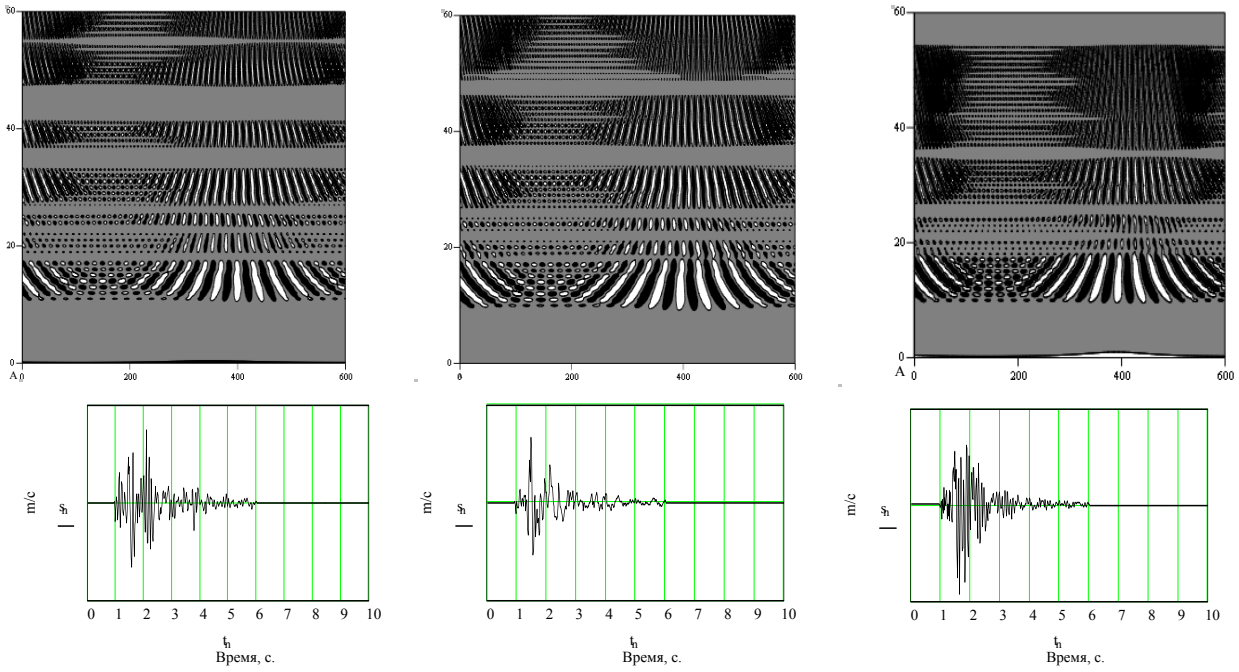


Рис. 6. «Голограммы» карьерного распределенного взрыва.
Место регистрации: район поселка Таштагол Кемеровской области,
дата регистрации – 26.06.2004

Результаты

В ходе исследования экспериментальной сейсмической записи карьерного взрыва в ближней и дальней зоне установлены особенности спектральных характеристик распределенного взрыва. Использование записи карьерного взрыва в ближней зоне в качестве ядра преобразования приводит к повышению качества синтетической сейсмограммы в дальней зоне. Предложенный способ идентификации нелинейных и линейных (волновых) зон дает исследователю возможность выбора качественных записей взрыва для формирования ядра преобразования.

Обсуждение

Эффективность использования карьерных взрывов при решении задач геофизики зависит от местоположения регистраторов в ближней зоне. Для повышения качества сейсмограмм в дальней зоне важно получить запись взрыва

в волновой зоне, которая будет использована в качестве ядра преобразования. Представленный алгоритм формирования «голограммы» взрыва является эффективным инструментом выбора волновой зоны.

Заключение

Предложенный способ обработки позволяет формировать более качественные «взрывные» сейсмограммы с использованием функции ядра преобразования, полученной на основе экспериментальных данных. Увеличение качества сейсмограмм для точек регистрации в дальней зоне обусловлено дополнительной фильтрацией за счет использования процедуры свертки. «Голограммы» карьерных взрывов, полученные с использованием функции (4), представляют для исследователя полезный и оперативный инструмент анализа качества сейсмических данных. Представленный в данной работе способ обработки позволяет более эффективно использовать энергию промышленных взрывов для проведения исследовательских геофизических работ, связанных с изучением литосферы земли.

Благодарности

Автор выражает благодарность всем участникам научных семинаров лаборатории геофизической информатики ИВМиМГ СО РАН, в атмосфере которых формировалась постановка задач и проблем обработки сигналов в геофизике.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.
2. Трахтман А.М. Введение в обобщенную спектральную теорию сигналов. М. Изд-во «Советское радио», 1972, 352 с.
3. Сильвиа М.Т. Робинсон Э.А. Обратная фильтрация геофизических временных рядов при разведке на нефть и газ. – Пер. с англ. М.: Недра, 1983, 1983, - 447 с.

© С. А. Ефимов, 2018

УДК 550.83

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ МЕТОДАМИ ВОЛНОВОЙ СЕЙСМИКИ

Сергей Александрович Ефимов
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, научный сотрудник, тел. (913)906-59-29, e-mail: sergesaesa@yandex.ru

В статье представлен количественный анализ очага и эпицентра сейсмического события методами волновой сейсмики. Анализ проведен на основе реальной сейсмической записи, сформированной на базе сигналов от одного трехкомпонентного сейсмометра. Эффективность проведенного анализа показана на примере обработки экспериментальной сейсмической записи.

Ключевые слова: сейсмическая запись, сейсмическое событие, местоположение землетрясения, эпицентр, очаг землетрясения.

QUANTITATIVE ANALYSIS OF THE LOCATION OF THE EARTHQUAKE WAVE SEISMIC METHODS

Sergey A. Efimov
Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher, phone: (913)906-59-29, e-mail: sergesaesa@yandex.ru

The article presents a quantitative analysis of the focus and epicenter of the seismic event by wave seismic methods. The analysis is carried out on the basis of real seismic record formed on the basis of signals from one three-component seismometer. The effectiveness of the analysis is shown on the example of experimental seismic record processing.

Key words: seismic record, seismic event, earthquake location, epicenter, earthquake focus.

Введение

Задача визуализации сейсмических волновых полей является одной из актуальных задач геофизики [1]. Объективная визуализация сейсмических волновых полей позволяет исследовать геодинамические процессы недр планеты. Исследователи, объединенные одной целью: как заглянуть в глубь Земли, - используют теоретические и экспериментальные инструменты для достижения поставленной цели [2]. Однако решение этой задачи чаще всего основано на временном годографе, который формируется на данных о времени пробега сейсмических волн. Таким образом, основная часть современных подходов формирования изображения недр земли, относится к косвенным методам измерений, которые получают изображение на основе данных о времени пробега волн и скорости волн.

Методы и материалы

В рамках общей проблемы визуализации сейсмических волновых полей существует задача идентификации сейсмических событий, в частности землетрясений. В статье [3] представлен качественный анализ способа волновой сейсмики, показывающий возможность определения местоположения сейсмического события. В данном способе физическая модель формирования волнового поля представляет собой трехкомпонентный сейсмодатчик, сигналы которого через сейсмическую линзу формируют изображение, соответствующее структуре недр. Сейсмической линзе соответствует определенная программа обработки сейсмической записи.

В данной статье представлен количественный анализ способа волновой сейсмики, показывающий возможность определения эпицентра и глубины сейсмического события методами волновой сейсмики.

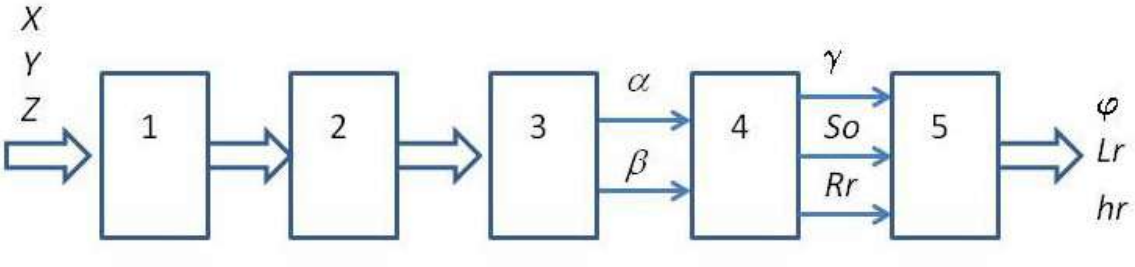


Рис. 1. Блок-схема формирования координат землетрясения

Блок-схема поясняет процедуру количественного анализа и содержит блоки, выполняющие следующие функции:

X,Y,Z – сейсмические сигналы, формируемые на выходе трехкомпонентного сейсмоприемника;

блок 1 – регистрация сейсмических сигналов;

блок 2 – формирование изображения волнового поля;

блок 3 – интерпретация изображения волнового поля (выделение параметров сейсмического события: угол α и β);

блок 4 – вычисление параметров сейсмического события: γ, S_0, Rr;

блок 5 – вычисление параметров сейсмического события: φ, Lr, hr.

Далее использованы следующие обозначения:

φ – угол между азимутом X-компоненты сейсмодатчика и направлением сейсмодатчик - эпицентр;

γ - угол между линиями: сейсмодатчик – центр Земли; сейсмодатчик - очаг;

δ - угол между линиями: сейсмодатчик – центр Земли; очаг – центр Земли;

R - расстояние от точки регистрации до эпицентра (без учета кривизны поверхности земли);

Rr - расстояние от точки регистрации до эпицентра;

Lr - расстояние от точки регистрации до эпицентра (с учетом кривизны поверхности земли: длина дуги от точки регистрации до эпицентра);

S_0 - расстояние от точки регистрации до очага;

r - радиус Земли;

h - глубина сейсмического события без учета кривизны поверхности;

hr - глубина сейсмического события с учетом кривизны поверхности.

Для количественного анализа координат землетрясения использованы экспериментальные данные, полученные в период 15-19 сентября 2000 года сотрудниками ИВМиМГ СО РАН при проведении сейсмических экспериментов в районе п.Курья Алтайского края. План проведения эксперимента и результаты регистрации сейсмических сигналов представлены в информационно-вычислительной системе «Вибросейсмическое Просвечивание Земли» - сайт http://opg.sscc.ru/db. Условное название данного эксперимента в базе данных – «002 Курья». Местоположение (координаты) точки регистрации: широта (град) 51,6522; долгота (град) 82,3338.

Фрагмент сейсмической записи, полученной в рамках данного эксперимента 17 сентября 2000 года (начало записи регистратора 06:00 часов по местному времени), представлен на рис. 2.

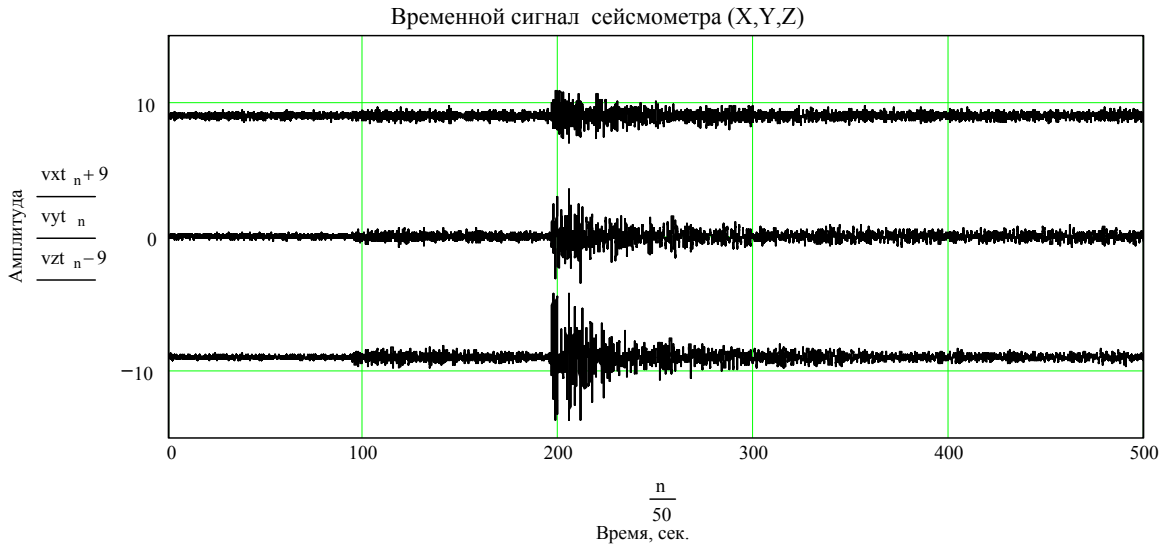


Рис. 2. Фрагмент сейсмической записи эксперимента «002 Курья»; регистратор ВИРС-М, сейсмометр СК1-П, X,Y,Z – компонента

Блок 2 осуществляет формирование изображения волнового поля (программа «Nelumbo»). В данной программе волновое сейсмическое поле – амплитуда и фаза - представлено в виде совокупности векторов (лучей) в пространстве телесного угла с размерностью π, что соответствует полусфере с центром в точке регистрации. Процесс сканирования сейсмического луча в сферическом полупространстве поясняет рис. 3.

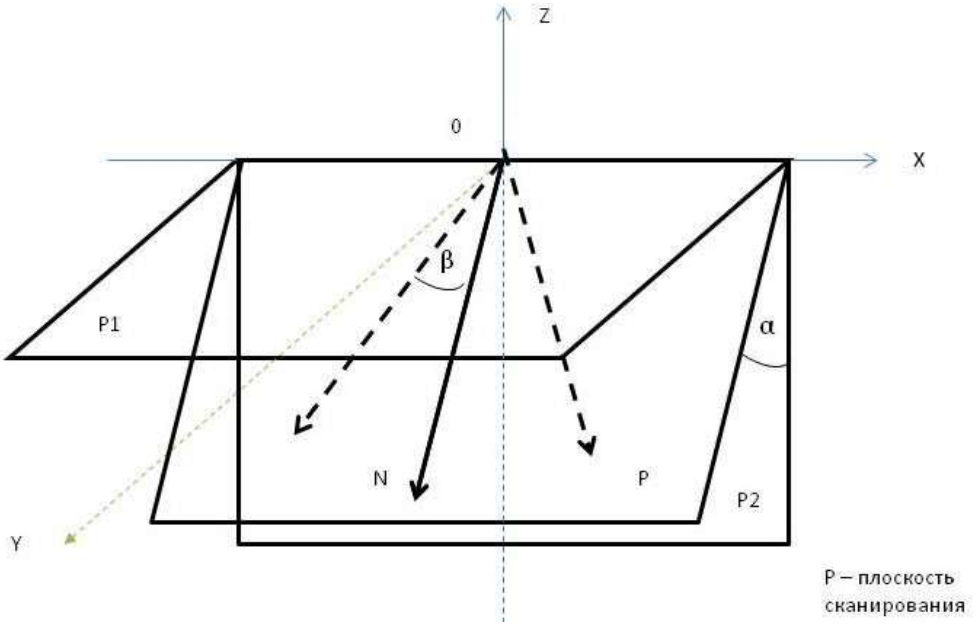


Рис. 3. Процесс сканирования сейсмического луча
в сферическом полупространстве

Сейсмический датчик имеет три компоненты: X,Y,Z. Проекции колебаний точки поверхности Земли в декартовом пространстве будут соответствовать сигналам компонент сейсмического датчика X(t), Y(t), Z(t). Это позволяет с помощью трехкомпонентного сейсмодатчика получить полную информацию о траектории смещения точки поверхности Земли в трехмерном пространстве. Сейсмический датчик имеет координаты (0,0,0). Сканирование сейсмического луча в сферическом полупространстве проводится в плоскости P. Исходные данные сканирования сейсмического луча в сферическом полупространстве – это два угла α и β. Диапазон изменения значений углов α и β: от $-\pi/2$ до $+\pi/2$.

На выходе блока 2 формируется изображение волнового поля. Изображение на рис. 4 сформировано на основе сейсмических волн с частотным диапазоном 0,5 – 25,0 Гц. Результаты использования программы «Nelumbo» представлены на рис. 4.

В блоке 3 осуществляется интерпретация изображения волнового поля (выделение параметров сейсмического события: угол α и β). Изображение волнового поля на рис. 4 содержит признак сейсмического события (землетрясение) – черное пятно с координатами (-15; 20). Координаты сейсмометра на изображении рис. 4 (0;0). Местоположение сейсмического события однозначно определяют два пространственных угла поворота вертикального вектора (по отношению к поверхности земли) в точке регистрации. В соответствии с рис. 4 угол α = (-0,5890 рад), а угол β = 0,7854 рад.

В блоке 4 осуществляется вычисление параметров сейсмического события: γ, S_0, Rr. В блоке 5 осуществляется вычисление параметров сейсмического события: φ, Lr, hr.

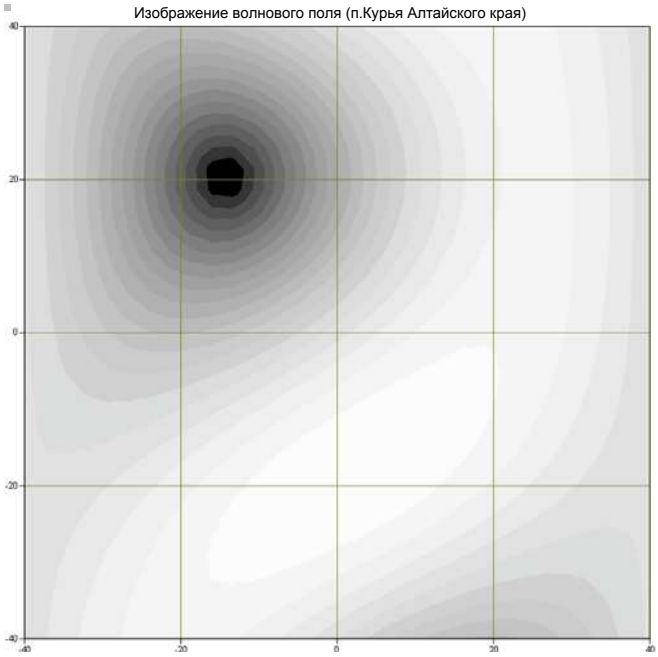


Рис. 4. Изображение волнового поля

На основе местоположения сейсмического события на изображении рис. 4 определяется направление: очаг сейсмического события - точка регистрации.

Формулы для вычисления параметров сейсмического события основаны на следующих геометрических моделях, представленных на рис. 5 и 6.

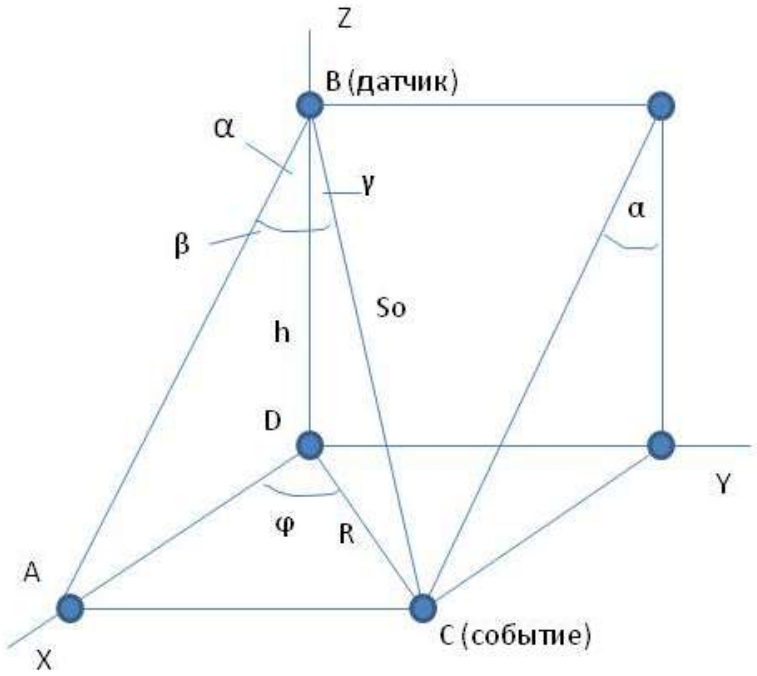


Рис. 5. Геометрическая модель без учета кривизны поверхности Земли

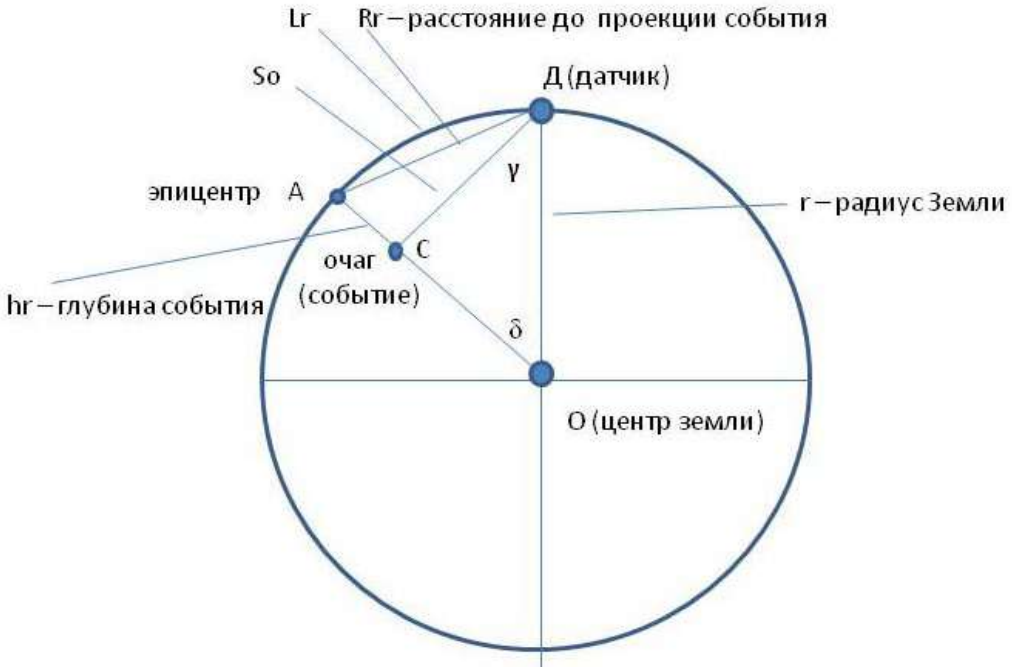


Рис. 6. Геометрическая модель с учетом кривизны поверхности Земли

В блоке 5 и блоке 6 рис.1 для вычисления параметров сейсмического события в соответствии с геометрическими моделями на рис.5 и рис.6 использованы следующие формулы:

$$\varphi = \arccos\left\{ \sin\beta \Big/ (1 - \cos^2\beta \times \cos^2\alpha)^{0,5} \right\} \tag{1}$$

$$\gamma = \arccos(\cos\ \beta \times \cos\alpha) \tag{2}$$

$$R = S_0(1 - \cos^2\beta \times \cos^2\alpha)^{0,5} \tag{3}$$

$$h = S_0(\cos\beta \times \cos\alpha) = S_0(\cos\gamma) \tag{4}$$

$$hr = r \times \left\{ 1 - \sqrt{1 + \left(\frac{S_0}{r}\right)^2 - 2\frac{S_0}{r}\cos\gamma} \right\} \tag{5}$$

$$Rr = r \times \left\{ 2 \times \left(1 - \cos\left[\arcsin\left(\frac{R}{C}\right) \right] \right) \right\}^{0.5}; \quad C = \left(r^2 + S_0^2 - 2 \times r \times S_0 \times \cos\gamma \right)^{0.5} \tag{6}$$

$$Lr = \frac{\pi \cdot r}{180} \cdot \delta; \quad \delta = \arccos\left(\frac{C^2 + r^2 - S_0^2}{2 \cdot C \cdot r} \right) \tag{7}$$

Идентификация символов формул приведена в начале статьи.

Для определения расстояния S_0 до сейсмического события в рамках данного способа использована формула:

$$S_0 = \frac{V_p \times V_s}{V_p - V_s} \times (T_2 - T_1) = \frac{V_p}{\frac{V_p}{V_s} - 1} \times (T_2 - T_1), \quad (8)$$

где V_p – скорость сейсмических p–волн; V_s - скорость сейсмических s–волн; T_1 - время прихода p–волн; T_2 - время прихода s–волн.

Величина $T_2 - T_1$ определяется по рис.2 и составляет 100с. Скорости сейсмических волн определены по источнику [4].

В таблице представлен итоговый расчет местоположения сейсмического события.

Расчет местоположения сейсмического события

Наименование	Значение
Исходные экспериментальные данные (изображение волнового поля)	
α, рад	-0,5890
β, рад	0,7854
T_2 - время прихода сейсмических p – волн, с	100
T_1 - время прихода сейсмических s – волн, с	200
Исходные публичные данные	
r - радиус Земли, км	6378
V_p - скорость сейсмических p – волн, км/с	8,2
V_s - скорость сейсмических s – волн, км/с	4,1
Расчетные данные	
S_0 - расстояние от точки регистрации до очага, км	820,00
φ - угол между азимутом X-компоненты сейсмодатчика и направлением сейсмодатчик - эпицентр, рад	0,51
γ - угол между направлениями: сейсмодатчик – центр Земли; сейсмодатчик - очаг, рад	0,94
R - расстояние от точки регистрации до эпицентра (без учета кривизны поверхности земли), км	663,30
φ , град	29,07
γ , град	54,02
h - глубина сейсмического события (расстояние от очага до эпицентра без учета кривизны поверхности земли), км	482,11
hr - глубина сейсмического события (расстояние от очага до эпицентра с учетом кривизны поверхности земли), км	444,91
C, км	5 933,085
Rr -расстояние от точки регистрации до эпицентра (с учетом кривизны поверхности земли), км	714,163

Результаты расчетов таблицы показывают, что эпицентр землетрясения расположен на расстоянии 714 км от точки регистрации. Глубина очага – 444 км. Угол между направлениями: точка регистрации – эпицентр; азимут Х-компоненты сейсмометра, - равен 29 градусов. Эти параметры землетрясения определяют местоположение эпицентра: Казахстан, район озера Балхаш. На рис. 7 представлен фрагмент карты с положением точки регистрации и эпицентра землетрясения по данным расчета в таблице.

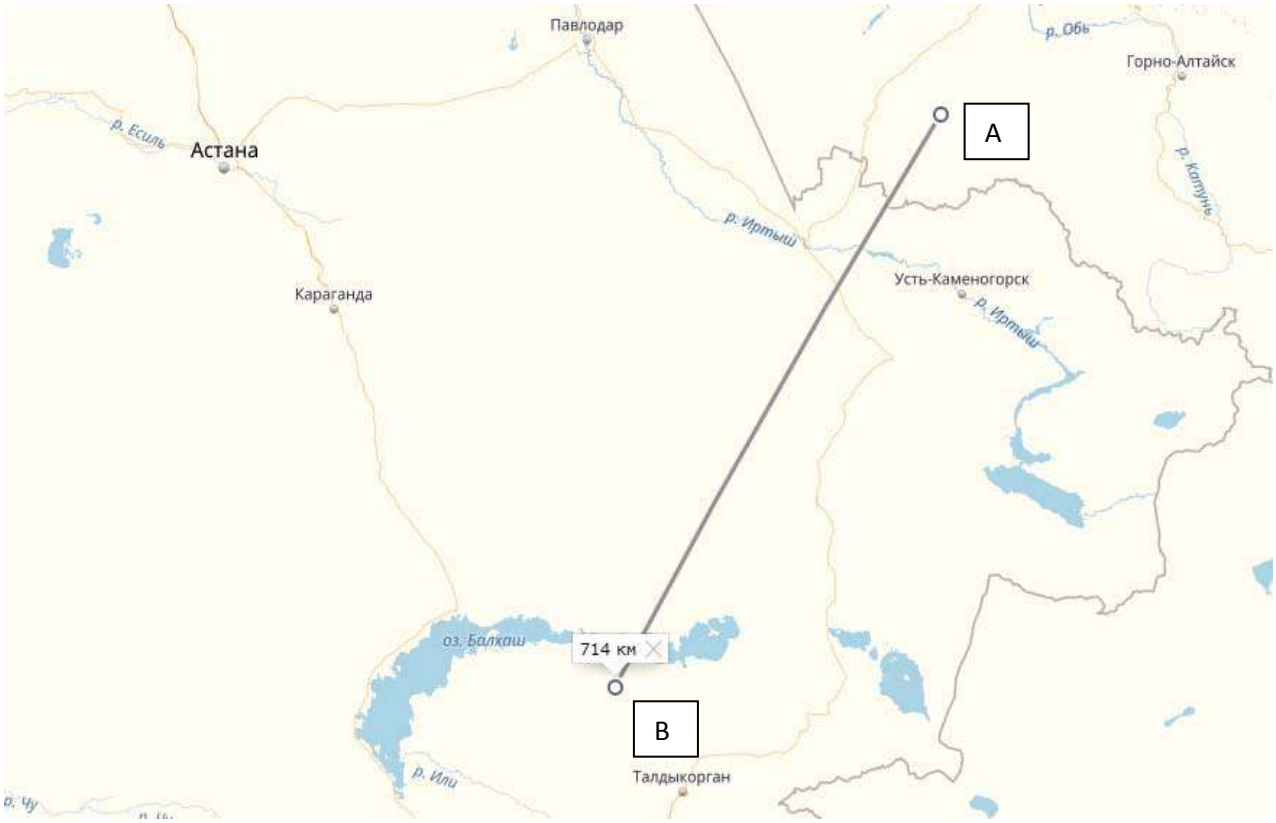


Рис. 7. Фрагмент карты с положением точки регистрации и эпицентра землетрясения:

А – точка регистрации; В – эпицентр землетрясения

Результаты

В ходе исследования экспериментальной сейсмической записи землетрясения, полученной в районе п.Курья Алтайского края, установлено местоположение сейсмического очага и эпицентра: эпицентр – район озера Балхаш, Казахстан; глубина очага – 444 км.

Обсуждение

Задача определения местоположения сейсмического события решалась нетрадиционным подходом: вектор направления от регистратора до очага определен методами волновой сейсмики. Расстояние до очага определено традиционным методом, который основан на различии скоростей сейсмических P и S волн. При наличии двух точкек регистрации записи сейсмического события метод волновой оптики позволяет определить и расстояние до очага, и расстояние до эпицентра.

Заключение

Представленный подход количественного анализа местоположения очага сейсмического события, основанный на методах волновой сейсмики, является эффективным инструментом мониторинга геодинамических процессов в недрах земли.

Благодарности

Автор выражает благодарность сотрудникам ИВМиМГ СО РАН, замечания и критика которых на семинарах и в личных беседах формировали постановку задачи, решаемой в данной работе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методы решения прямых и обратных задач сейсмологии, электромагнетизма и экспериментальные исследования в проблемах изучения геодинамических процессов в коре и верхней мантии Земли / отв. ред. Б.Г. Михайленко, М.И. Эпов; Рос. Акад. Наук, Сиб отдние, Ин-т вычислительной математики и математической геофизики [и др.]. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010.-310 с. – (Интеграционные проекты СО РАН; вып.27).

2. Алексеев А.С., Ряшенцев Н.П., Чичинин И.С. Как заглянуть в глубь планеты // Наука в СССР. 1982. №3. С.31-37.

3. С.А. Ефимов. Способ визуализации сейсмических волновых полей для локации сейсмических событий // Международный научно-исследовательский журнал, ISN 2303-9868 PRINT, ISN 2227-6017 ONLINE, №11, 2016, часть 5, Екатеринбург, с.73-76.

4. Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет.-М.; Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1978.-192 с.

© С. А. Ефимов, 2018

УДК 551.482.215.1

ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВОДОТОКОВ В ДЕЛЬТЕ РЕКИ ЛЕНЫ

Алла Ивановна Крылова
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (913)725-94-00, e-mail: alla@climate.sscc.ru

Екатерина Андреевна Антипова
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, инженер, тел. (953)787-45-83, e-mail: antipova_aea@mail.ru

Статья посвящена численному моделированию водного режима дельты р. Лены на основе гидродинамического метода описания неустановившегося движения речного потока в одномерном приближении. На основе данных измерений расходов воды в основных протоках дельты, полученных в рамках российско-германских экспедиций с 2002 по 2012 гг., выполнены оценки по современному распределению стока воды в русловой сети дельты, которые подтвердили характер его многолетнего перераспределения. Численные эксперименты показали, что большая часть речных вод поступает в северо-восточную часть дельты.

Ключевые слова: гидродинамическая модель, расход воды, распределение стока воды, неявная разностная схема, протоки дельты реки Лена.

HIDRODINAMIC SIMULATION OF THE STREAM FLOW MOTION IN THE LENA RIVER DELTA

Alla I. Krylova
Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (913)725-94-00, e-mail: alla@climate.sscc.ru

Ekaterina A. Antipova
Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Engineer, phone: (953)787-45-83, e-mail: antipova_aea@mail.ru

The article is devoted to numerical modeling of the water regime of the Lena River Delta on the basis of the hydrodynamic method of describing the unsteady flow of a river flow in the one-dimensional approximation. Based on water flow measurements in the main delta channels obtained within the framework of the Russian-German expeditions from 2002 to 2012, estimates were obtained for the current distribution of water flow in the delta water network, and the nature of its long-term redistribution. Numerical experiments have shown that most of the river water enters the northeastern part of the delta.

Key words: hydrodynamic model, water discharge, distribution of water flow, implicit difference scheme, branches of Lena River Delta.

Введение

Исследования водного режима устьев рек является одним из важных вопросов гидрологии речных дельт в условиях изменяющегося климата и увеличивающейся антропогенной нагрузки на природные речные объекты. Ещё несколько лет назад существовали объективные ограничения для изучения гидрологического режима дельты р. Лены гидродинамическими методами расчёта продольной трансформации речного стока. Благодаря многочисленным измерениям гидрологических и морфометрических характеристик в основных протоках дельты в рамках международных российско-германских экспедиций в летние сезоны 2002-2012 гг. [1, 2, 3], а также материалам по многолетнему распределению стока [4, 5] стало возможным рассмотрение гидродинамических методов описания сложной русловой системы дельты р. Лены.

В устьевой области речные воды проходят через систему рукавов дельты, где происходит дробление магистрального расхода воды и его перераспределение по рукавам с уменьшением стоковых скоростей. Изменяется кинематическая структура основного водотока. Важным вопросом является получение достоверных оценок по распределению стока по основным протокам русловой сети дельты и изменению его общей величины и скоростей потока от вершины дельты к её нижней границе на взморье.

С помощью гидродинамического метода описания неустановившегося движения воды в сложной дельтовой системе реки Лены осуществляется расчёт основных характеристик речного стока. Изучение закономерностей изменений расхода воды и уровня свободной поверхности с учётом данных экспедиций 2002-2012 гг. является основной задачей данной работы. Определённую трудность представляет качественное информационное обеспечение задачи, так как гидрометрическая и морфометрическая информация имеется лишь для небольших участков дельты.

Исследуется водный режим пяти магистральных проток дельты: Быковской, Трофимовской, Сардахской, Туматской и Оленёкской.

Метод исследования

Для изучения неустановившегося движения воды в дельте р. Лены, его особенностей и проведения численных экспериментов используется одномерная математическая модель явления, представленная в [7]. Система гиперболических дифференциальных уравнений, описывающая неустановившееся медленно изменяющееся движение воды в открытом русле без учета ветрового воздействия, без бокового притока и в предположении об одномерности потока имеет следующий вид:

$$B\frac{\partial Z}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}=0, \qquad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Q^2}{\omega}\right)=-g\omega\left(\frac{\partial Z}{\partial x}+\frac{Q|Q|}{K^2}\right), \qquad (2)$$

где x – координата, отсчитываемая вдоль оси русла; t – время; $Q(x,t)$ – расход воды; $Z(x,t)$ – отметка свободной поверхности воды; $B(x,h)$ – ширина свободной поверхности воды при глубине $h(x,t)$; $\omega(x,h)$ – площадь поперечного сечения потока; $K(x,h)=\omega\frac{1}{n}h^{\frac{2}{3}}$ – модуль расхода [9], где $n(x)$ коэффициент шероховатости; g – ускорение силы тяжести.

Для моделирования движения воды в речном русле сложноразветвлённый устьевой участок реки представляется в виде плоского графа, на каждом отрезке которого решается система уравнений Сен-Венана (1) – (2). Расход воды $Q(x,t)$ и уровень свободной поверхности $Z(x,t)$ являются величинами, полностью описывающими движение потока воды. Поэтому в качестве неизвестных функций системы выбираются функции $Q(x,t)$ и $Z(x,t)$ как распределённые параметры, а в вершинах графа – $Q_*(t)$ и $Z_*(t)$ как сосредоточенные параметры.

Для решения системы уравнений (1)-(2) используется численный метод, основанный на неявной разностной схеме с первым порядком аппроксимации по времени и со вторым по пространству. Полученная система разностных уравнений решается одним из вариантов метода прогонки [8], который учитывает тип системы русел. При решении получившейся системы линейных алгебраических уравнений для разветвлений с «кольцами» учитывается структура одномерного графа «дерево», а для простых разветвлений без «колец» используется метод параметрической прогонки.

В работе [7] проведено тестирование численного решения системы уравнений Сен-Венана, которое показало сходимость численного решения для выбранного режима потока.

Численное моделирование неустановившегося движения воды в устье р. Лены и данные измерений

На основе вышеприведённой модели дельты р. Лены [7] моделируется водный режим реки от с. Кюсюр, где проводятся регулярные гидрологические наблюдения, до впадения реки в море Лаптевых. Предполагается, что водный режим формируется под влиянием изменений речного стока (половодья и паводки) и не учитывается ветровое воздействие на водотоки в дельте.

Построение цифровой модели рельефа дельты, необходимой для учёта в уравнениях движения, и, как её следствия, топологической модели дельты, осуществлялось при помощи географических карт и онлайновой системы «Google Earth». По спутниковым фотографиям были выявлены основные наи-

более водные протоки дельты, а также второстепенные протоки, которые имеют либо самостоятельный выход к морю, либо не пересыхают во время межени, а увеличивают водность основных проток. Начальный вариант геометрической схематизации русловой сети дельты Лены был взят из работы [9]. В ходе решения данной задачи схема русловой сети уточнялась и на данном этапе исследования имеет следующий вид

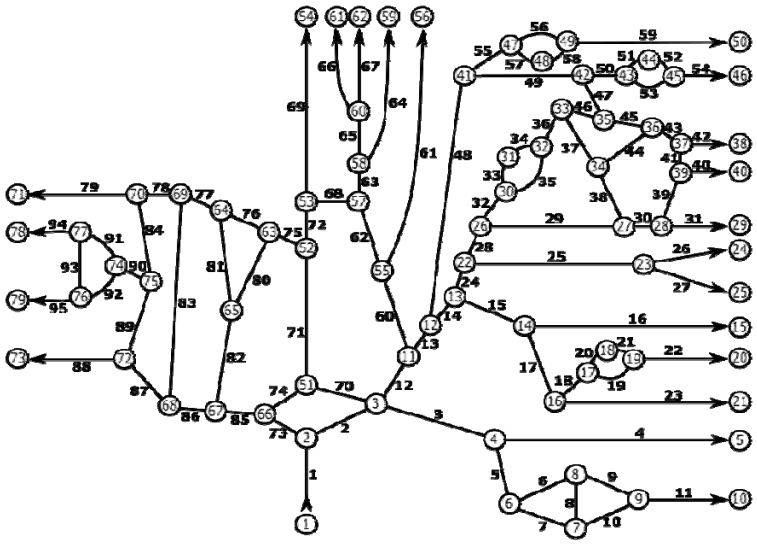


Рис. 1. Схематизация русловой сети дельты р. Лены в виде графа, где в кружках указаны номера вершин, а возле отрезков – номера участков

Данная схема включает пять магистральных проток: Быковскую, Сардахскую, Трофимовскую, Туматскую и Оленёкскую.

Для численной модели необходимо определить основные морфометрические характеристики русла, такие как ширина и глубина водотоков и форма поперечного сечения русла. Ширина измерялась в каждом узле системы на основе космических снимков из программы «Google Earth». Глубина вычислялась по известной эмпирической формуле $h = 0.42B^{0.33}$ [10], полученной на основе многочисленных натурных измерений, и уточнялась с промерами глубины из [3,4]. Форма русла описывалась в виде квадратного трехчлена, за исключением некоторых участков Трофимовской протоки, для которых принималась призматическая форма русла [6].

Ввиду того, что на начальный момент времени значения расхода и уровня в рукавах дельты неизвестны, был проведен процесс установления. Значения расхода воды и уровня свободной поверхности, полученные при решении стационарной задачи, задавались в качестве начальных условий при расчете неустановившегося движения. В качестве граничного условия использовались данные расхода воды на гидростворе в п. Кюсюр. Моделирование гидравлического режима в дельте р. Лены проводилось в период открытой воды с мая по октябрь.

На рис. 2, 3 представлены результаты численного эксперимента: 2) сравнение измеренного и расчетного уровня свободной поверхности на гидропосту в п. Кюсюр за период отрытой воды в 2008 году; 3) изменение во времени расхода воды по всех пяти главным протокам дельты р. Лены за исследуемый период, включающий две фазы гидрологического режима: половодье и межень.

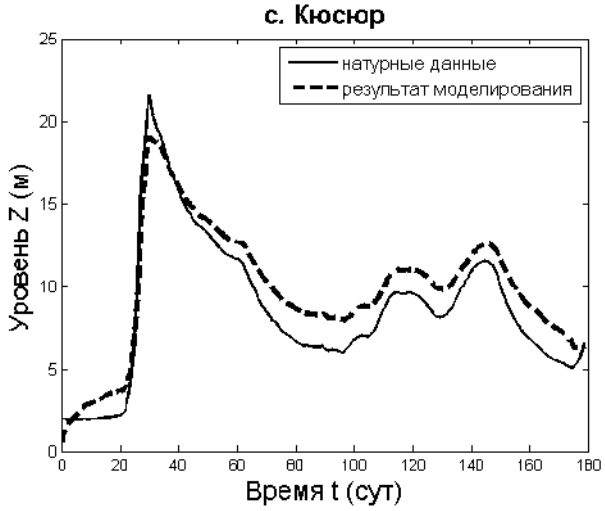


Рис. 2. Динамика уровня свободной поверхности воды:
измеренная и смоделированная в п. Кюсюр за 2008 год

Рис. 3. Смоделированная динамика расхода воды
в пяти главных протоках дельты реки Лены

Точность расчёта неустановившегося движения воды в сложной устьевой области реки требует подробного задания исходных морфометрических характеристик в виде функций глубины русла от ширины. С помощью многолетних гидрологических данных из монографии [6], измеренных экспедиционных данных в дельте реки Лены с 2002 по 2012 гг. [3, 4], космических снимков из про-

граммы «Google Earth», такие параметры как глубина и ширина русла постоянно корректировались.

В августе 2005 года были проведены измерения расхода воды по длине Оленёкской протоки от места впадения в нее Булкурской протоки и до её устья [3,4]. В табл. 1 приведено сравнение результатов моделирования с этими данными. Новые данные по расходу воды и глубине Оленёкской протоки [4] позволили уточнить расчетные расходы воды и получить относительные ошибки, не превышающие 15%.

Таблица 1

Расход воды (измеренный и смоделированный)
на гидрометрических створах Оленёкской протоки в августе 2005 года

Дата замера	Долгота	Широта	Измеренный расход $Q(m^3/c)$	Расход смоделированный после уточнения $Q(m^3/c)$	Расход смоделированный до уточнения $Q(m^3/c)$
15-17.08.	72,88008	123,2149	956,53	1113,1	647,04
18.08.	72,75706	123,6484	1343,27	1266,9	672,58
19.08.	72,657	124,3391	1810,29	1844	847,62
19.08.	72,50581	125,2862	2065,19	1893,1	867,51
20.08.	72,359	125,6712	1510,71	1535,5	826,4
20.08.	72,29614	126,0944	1700,53	1535,5	826,4

В табл. 2 представлены результаты моделирования процентного распределения стока воды по основным магистральным протокам дельты р. Лены в сравнении с данными многолетних наблюдений за период 1953-1990 гг. [6].

Таблица 2

Процентное распределение расхода воды по протокам
относительно суммарного количества поступающей в дельту воды:
а — данные моделирования, б — данные, представленные в работе [6]

Период	Главные протоки							
	Быковская		Трофимовская и Сардахская		Туматская		Оленекская	
	а	б	а	б	а	б	а	б
Половодье (20 мая — 5 июня)	23.4	28	63.5	54	6.2	10	6.9	8
Межень (15 июля — 15 августа)	24.1	25	63.8	65	5.5	5	6.6	5
Период открытой воды	23.8	27	63.7	57	5.8	9	6.8	7

Табл. 3 показывает, что относительная ошибка измеренного и расчётного расходов воды в Трофимовской протоке составляет не более 14%, в то время как площади поперечного сечения отличаются значительно.

Таблица 3

Гидрологические характеристики Трофимовской протоки, август 2002 года

Дата замера	Створ		$Q, m^3/c$		F, m^2		$V, m/c$	
	широта (°с.ш.)	долгота (°в.д.)	а	б	а	б	а	б
02.08.	72,58245	127,2013	19433	20056	14305	45076,6	0,46	0,44
03.08.	72,61633	127,2618	7881	8023	7786	3584,3	1,01	2,2
08.08.	72,58245	127,2013	16437	14188,2	14154	43838	0,38	0,32
08.08.	72,61633	127,2618	6459	5929,9	-	3038,9	-	1,9

Примечание: Q – (а – измеренный, б–расчётный) расход воды, F – площадь поперечного сечения, V – средняя скорость течения.

Из табл. 4 видно, что Трофимовская и Быковская протоки имеют самые высокие скорости течения. Для Туматской протоки характерна малая водность и низкие скорости течения.

Таблица 4

Гидрологические характеристики основных проток дельты, август 2007 года

Дата	названия проток	створ		$Q, m^3/c$		F, m^2		$V, m/c$	
		широта (°с.ш.)	долгота (°в.д.)	а	б	а	б	а	б
02	Оленек.	72,49915	125,2836	2868,7	2722,5	4675	7903	0,58	0,34
03	Тумат.	72,41844	126,4566	1685,6	1110,8	5299	4737	0,32	0,23
08	Быков.	72,40778	126,9133	6142,4	6880,2	6758	7922	0,87	0,86
08	Трофимов.	72,45139	126,6584	14822,1	20030,2	24266	22072	0,59	0,9

Заключение

Анализ результатов расчета расходов и уровней воды в дельте р. Лены по гидродинамической модели и их сравнение с данными измерений показали, что модель воспроизводит основные закономерности пространственно-временного

распределения двух основных характеристик потока по основным протокам дельты. Точность расчёта неустановившегося движения в дельте р. Лены в большой степени зависит от наличия и качества необходимых исходных данных, от принятой схематизация русловой сети дельты, от погрешности значений исходных гидравлико-морфометрических характеристик основных проток дельты. Уточнение морфометрических характеристик русла приводит к меньшим относительным ошибкам при сравнении результатов моделирования с данными измерений. На данном этапе исследования модель включает описание только руслового потока без пойменной составляющей и бокового притока, что также сказалось на результатах моделирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фёдорова И.В., Большиянов Д.Ю., Макаров А.С., Третьяков М.В., Четверова А.А. Современное гидрологическое состояние дельты р. Лены // Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития. М.: Изд-во МГУ. - 2009. - С.278-291.
2. Fedorova I., Chetverova A., Bolshiyanov D. et al. Lena Delta hydrology and geochemistry: long-term hydrological data and recent field observations // Biogeosciences. - 2015. - Vol. 12. - P. 345–363.
3. Большиянов Д.Ю., Макаров А.С., Шнайдер В., Штоф Г. Происхождение и развитие дельты реки Лена. С.-П.: Ренова. -2013. - 267 с.
4. Fedorova I., Bolshiyanov D. Chetverova A., Makarov A., Tretiyakov M. Measured water discharges, suspended supply and morphometric parameters of cross-sections in the Lena River Delta during summer period 2002-2013 // PANGAEA. – 2013. – doi: 10.1594/PANGAEA.808854.
5. Иванов В.В., Пискун А.А., Корабель Р.А. Распределение стока по основным рукавам дельты Лены // Труды ААНИИ. -1983. - Т.387. - С.59 -71.
6. Гуков А.Ю. Гидрология устьевой области реки Лена. – М.: Научный мир, 2001. – 288 с.
7. Крылова А.И., Антипова Е.А. Численное моделирование неустановившегося движения воды в дельте р. Лены // Труды Международной конференции по вычислительной и прикладной математики «ВПМ’17» в рамках «Марчуковских научных чтений», Новосибирск, 25 июня-14 июля 2017. [Электронный ресурс] http//conf/nsc/ru/cam17/ru/proceedings. - С. 470-476.
8. Воеводин А.Ф., Никифоровская В.С., Овчарова А.С. Численные методы решения задачи о неустановившемся движении воды на устьевых участках рек // Труды ААНИИ. - 1983. -Т. 378. - С. 23–34.
9. Shlychkov V.A., Platov G.A., Krylova A.I. A coupled hydrodynamic system of the Lena River delta and the Laptev Sea shelf zone: the model tuning and preliminary results of numerical simulation // Bull. NCC. Ser.: Num. Model. in Atmosph., 2014. - Vol. 14. - P. 81–103.
10. Чалов Р.С., Панченко В.М., Зернов С.Я. Водные пути бассейна Лены. М.: МИКИС, 1995. - 600 с.

© А. И. Крылова, Е. А. Антипова, 2018

УДК 519.6:551.5

РАССЕИВАНИЕ ПРИМЕСЕЙ ОТ ВЫСОТНЫХ ИСТОЧНИКОВ В УСТОЙЧИВО СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ АТМОСФЕРЕ

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: pyanova@ommgp.sscc.ru

Владимир Викторович Пененко
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математический наук, профессор, зав. лабораторией, e-mail: penenko@sscc.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

Представлено описание системы моделирования, состоящей из новой версии негидростатической модели гидротермодинамики атмосферы и модели переноса загрязняющих примесей. Модели адаптированы с применением ГИС-технологий к природным условиям Красноярского индустриального района. На базе этой системы выполнены расчеты распространения примесей в г. Красноярске от высотных источников. Рассмотрены два типичных зимних сценария устойчивой атмосферы: с отсутствием и наличием инверсионных условий. Расчеты выполнены на вложенных сетках. Результаты моделирования согласуются с современными представлениями о механизмах формирования мезоклиматов и качества атмосферы в критических ситуациях Красноярска.

Ключевые слова: гидротермодинамика и качество атмосферы, математическое моделирование атмосферных процессов, природоохранное прогнозирование.

THE DISPERSION OF IMPURITIES FROM THE HIGH-ALTITUDE SOURCES IN THE STABLY STRATIFIED ATMOSPHERE

Elza A. Pyanova
Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., e-mail: pyanova@ommgp.sscc.ru

Vladimir V. Penenko
Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Professor, Head of Laboratory, e-mail: penenko@sscc.ru

Larisa M. Faleychik
Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, 16a, Nedorezov St., Chita, 672014, Russia, Ph. D., Associate Professor, Senior Researcher, e-mail: lfaleychik@bk.ru

A description of the modeling system consisting of a new version of the nonhydrostatic model of hydrothermodynamics of the atmosphere and a model of transport of contaminants is presented.

With the use of GIS technologies, the models are adapted to the natural conditions of the Krasnoyarsk industrial district. Based on this system, the calculations of impurity distribution in Krasnoyarsk from the high-altitude sources have been performed. Two typical winter scenarios of the stable atmosphere are considered: in the absence and presence of inversion conditions. Calculations are performed on the nested grids. The results of simulation are consistent with modern concepts of the mechanisms of mesoclimate formation and the quality of the atmosphere in critical situations in Krasnoyarsk region.

Key words: atmospheric dynamics, air quality, mathematical modeling of atmospheric processes, environmental prediction.

Водохранилища и летом и зимой оказывают существенное влияние на формирование мезо- и микроклимата окружающих территорий. В зимний период это влияние в большей мере связано с наличием незамерзающей полыньи. Ярким примером является полынья Красноярского водохранилища, которая участвует в формировании мезоклимата г. Красноярска. Изучению процессов в городском пограничном слое Красноярска посвящены работы [1, 2] и др.

Мы также проводим цикл работ по исследованию особенностей формирования городских мезоклиматов [3, 4]. Особое внимание уделяется математическому моделированию условий формирования экстремально опасных ситуаций, при которых возможно возникновение высоких концентраций от выбросов местных загрязнителей.

В данной работе моделируются процессы распространения загрязняющих примесей в черте г. Красноярска. Рассматривались два типичных зимних сценария, когда атмосфера устойчива без инверсионного распределения температуры и при инверсионных условиях.

Для описания динамических процессов атмосферы и процессов рассеивания примесей над территорией Красноярской агломерации использовалась мезомасштабная негидростатическая модель, разрабатываемая в ИВМиМГ СО РАН и предназначенная для сценарных расчетов в областях со сложным рельефом [5, 6, 7]. Модель представляет собой систему уравнений гидротермодинамики атмосферы и совокупность различных параметризационных моделей для описания турбулентных слагаемых, процессов взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью [8, 9], процессов фазовых переходов влаги [10] и прочих.

Для согласования многочисленных процессов, составляющих общую модель динамики атмосферы, требуются согласованные по точности конечно-разностные схемы. Численная реализация нашей модели основана на вариационно-разностном подходе. Наиболее общий и универсальный подход к их построению на основе интегрального тождества заложен в работах [6, 11]. На этапе численной реализации моделей для правильного описания процессов распространения вредных примесей также требуется использование конечно-разностных схем, обладающих свойствами монотонности, консервативности и транспортивности [12].

Целью работы было исследовать, как ведет себя модель в условиях устойчиво, в том числе и инверсионно, стратифицированной атмосферы. Как извест-

но, эти условия максимально способствуют накоплению примесей в нижних слоях атмосферы. Другой важной задачей была проверка работоспособности новых дополнений в различных блоках модели. Адаптация математической мезомасштабной модели к условиям региона Красноярска для целей природоохранного прогнозирования также является одной из целей данной работы.

Для корректной реализации уравнений модели большое значение имеет правильное задание начальных и граничных условий. Как правило, информации для их задания не хватает. Мы использовали в данной работе идею телескопизации. На первом этапе расчет вели на грубой сетке, охватывающей большую территорию 150x140 км^2. Рассматриваемый объект – город Красноярск – находится в центре области (рис. 1). На боковых границах задавались однородные условия Неймана. Результаты этих расчетов использовались для получения начальных и граничных условий при реализации модели на более подробной сетке для меньшей территории 75,5x72,5 км^2 – белый прямоугольник на рис. 1.

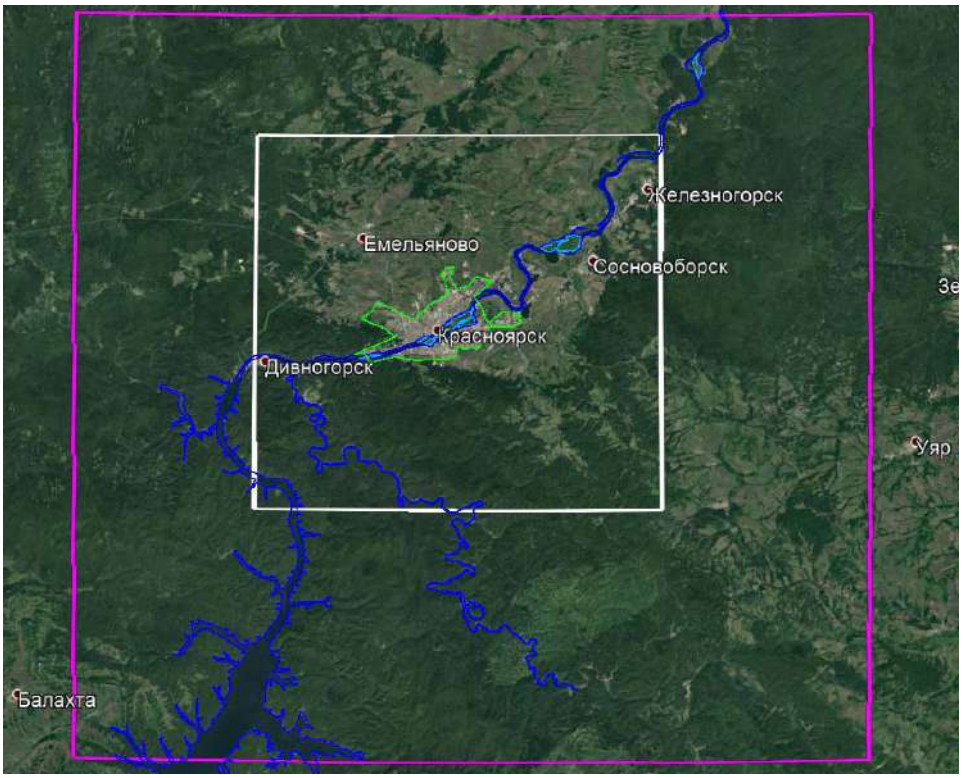


Рис. 1. Области моделирования

Одной из важных целей использования такого подхода была отладка блока программы, отвечающего за технологию интерполяции данных с более грубых сеток для расчетов на более подробных. Использование данных глобальных прогностических моделей в качестве входной информации для проведения расчетов в значительной степени может разрешить проблему привязки наших моделей к конкретным метеорологическим ситуациям в наших будущих исследованиях.

Итак, для моделирования процессов переноса примесей модель адаптировалась к орографическим условиям Красноярского края. Данные об орографии получены с использованием ГИС-технологий [13] из находящихся в свободном доступе данных интерферометрической съемки земного шара – Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). В работе были использованы данные SRTM 4 с разрешением 3 угловых секунды ≈ 90 м [14]. Учет рельефа осуществлялся на этапе численной реализации в рамках вариационного принципа и идей метода фиктивных областей [15].

Сценарные численные расчеты выполнялись в 3D областях с прямоугольной системой координат (x,y,z) на регулярных сетках. Для большей территории задавалась сетка 301×281×35 узлов с шагами по горизонтали $\Delta x=\Delta y=500$ м, для вложенной области – 303×291×35 узлов с шагами по горизонтали $\Delta x=\Delta y=250$ м. Вертикальный шаг Δz для обеих расчетных областей задавался единообразно и постепенно менялся от 50 м над рельефом до 200 м у верхней расчетной границы. Моделирование по вертикали велось до высоты 3050 м. Базовый шаг по времени $\Delta t=60$ с.

Для выделенных территорий рассмотрены два типичных зимних метеорологических сценария с устойчивой фоновой атмосферой: 1) без инверсионного распределения температуры и 2) с фоновыми инверсионными условиями.

При моделировании сценариев предполагалось, что в начальный момент атмосфера над выбранными территориями находится в состоянии покоя (фоновый штиль). Фоновое вертикальное распределение температуры пограничного слоя задавалось как $T(z)=T_0-\gamma z$, где T_0 – температура атмосферы на уровне нижней точки поверхности, γ – вертикальный градиент температуры.

Для сценария 1:

$$T_0 = -18°C, \quad \gamma = \begin{cases} 0.0028, & 0 < z \le 1500 м, \\ 0.0045, & z > 1500 м. \end{cases}$$

Для сценария 2 (фоновая инверсия):

$$T_0 = -18°C, \quad \gamma = \begin{cases} -0.0005, & z \le 600 м, \\ 0.0028, & 600 < z \le 1500 м, \\ 0.0045, & z > 1500 м. \end{cases}$$

Для температуры почвы в модели рассчитывался ее суточный ход. Температура воды в численных экспериментах полагалась равной 10ºС и не менялась в течение всего расчета.

В данной работе под фоновым штилем подразумевается, что внешнего по отношению к рассматриваемой территории набегающего ветрового потока нет, и все атмосферные движения развиваются под влиянием температурной неоднородности подстилающей поверхности, вызванной неравномерным поступлением солнечной радиации на отдельные ее участки.

На фоне развивающихся локальных циркуляций моделировался перенос двух пассивных невесомых примесей, назовем их c1 и c2, поступающих в атмосферу от двух постоянно действующих точечных источников выбросов, приподнятых на высоту 200 м и 300 м, соответственно. Источники имитируют трубы различной высоты, основания труб в численных экспериментах совпадают.

Как показали результаты сценарных расчетов, модель правильно отражает основные черты распространения примесей в заданных условиях. Чем выше источник выброса, тем больше зона его влияния, но при этом концентрации в нижних слоях атмосферы вблизи источника ниже, чем от более низкого источника той же мощности. Эти процессы проиллюстрированы на рис. 2.

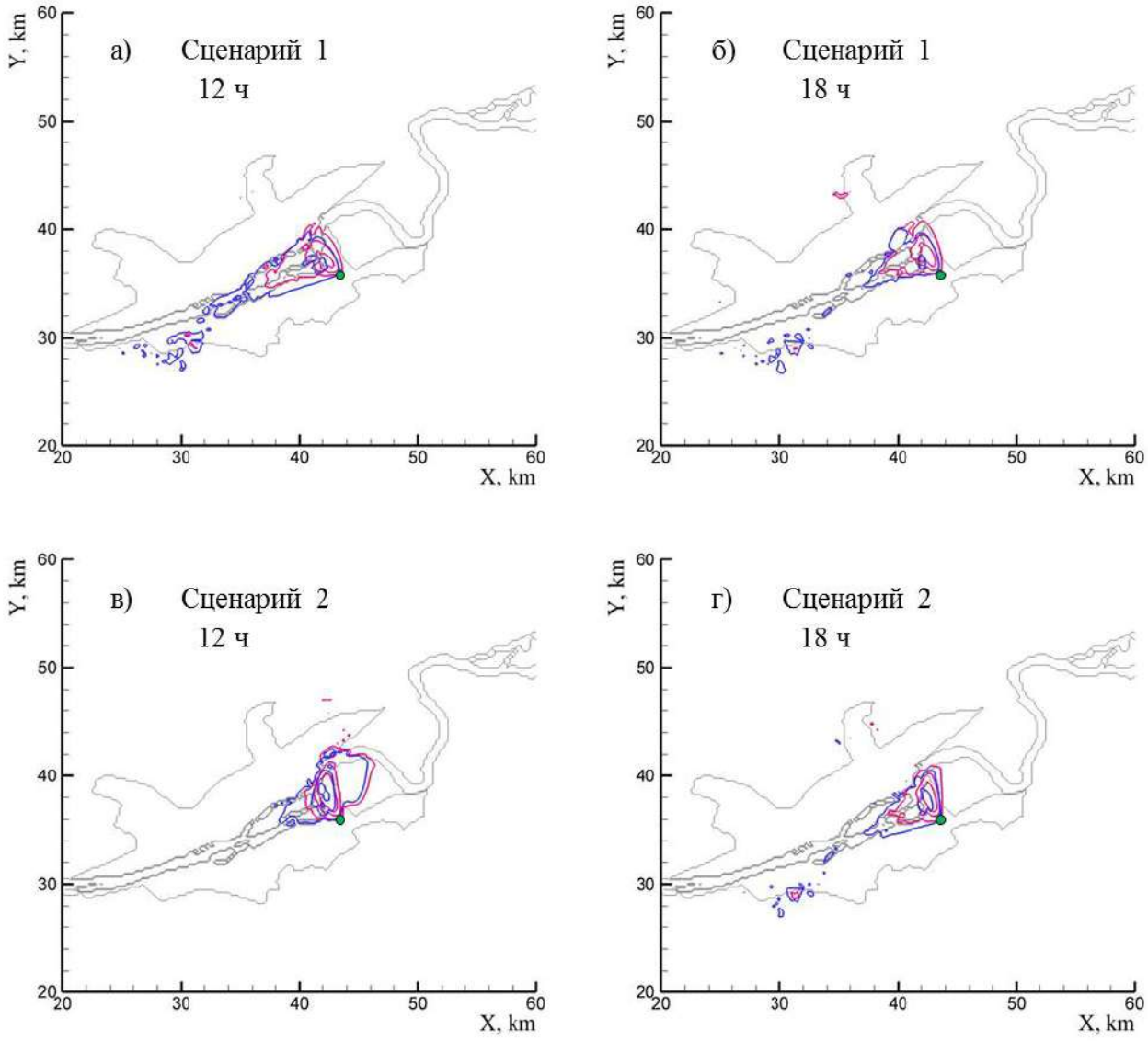


Рис. 2. Изолинии концентрации примесей (усл. ед.) на высоте 50 м над поверхностью. Розовые соответствуют выбросам от источника высотой 200 м, синие – 300 м. Внешние изолинии каждого цвета соответствуют концентрации 0.1 усл. ед., внутренние – 0.5 и 1усл.ед. Положение источников выбросов отмечено зеленым кружком

На рис. 2 а, б представлены изолинии концентрации примесей с1 и с2 для двух моментов времени (12 ч и 18 ч местного времени) в условиях сценария 1, на рис. 2 в, г – для тех же моментов времени в условиях сценария 2.

Прежде всего, следует отметить, что характеры распространения примесей в обоих сценариях схожи. От источника высотой 300 м примесь с2 (синие изолинии) распространяется на большее расстояние, нежели примесь с1 (розовые изолинии) от более низкого источника высотой 200 м. Приземные концентрации с1 вблизи источников выше, чем концентрации с2. В то же время есть некоторые различия в динамике распространения. В сценарии 1 примеси в течение суток преимущественно распространяется вдоль реки в юго-западном направлении. В сценарии 2 (с фоновой инверсией) существенная доля примесей рассеивается еще и в северо-восточном направлении вдоль реки, то есть в обе стороны по долине.

На основе представленных расчетов можно сделать вывод о том, что предложенная новая версия мезомасштабной модели динамики атмосферы и переноса примесей адекватно описывает процессы рассеивания выбросов от высоких точечных источников. Результаты моделирования согласуются с современными представлениями о механизмах формирования мезоклиматов и качества атмосферы в критических ситуациях Красноярска.

Работа в части развития базовых математических моделей выполняется в рамках темы государственного задания ИВМиМГ СО РАН № 0315-2016-0004, проведение исследований для г. Красноярска при поддержке проекта РФФИ № 17-01-00137. Работа также частично поддерживается Проектом XI.174.1.8. по Программе ФНИ СО РАН (геоинформационное обеспечение). Расчеты выполнены с использованием ресурсов ЦКП Сибирский Суперкомпьютерный Центр ИВМиМГ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Битехтина М. А., Михайлюта С. В., Леженин А. А., Тасейко О. В. Эволюция пограничного слоя и особенности загрязнения атмосферы города // Вестник Кемеровского государственного университета. – 2012. – Т. 4, № 2. – С. 143-148.

2. Hrebtov M., Hanjalić K. Numerical Study of Winter Diurnal Convection Over the City of Krasnoyarsk: Effects of Nonfreezing River, Undulating Fog and Steam Devils // Boundary Layer Meteorology. – 2017. – P. 1-27. doi: 10.1007/s10546-016-0231-0

3. Pyanova E. A., Penenko V. V., Faleychik L. M. Simulation of winter mesoclimates in Krasnoyarsk urban agglomeration // Proc. SPIE 10466, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 104666J (30 November 2017); doi: 10.1117/12.2287754; http://dx.doi.org/10.1117/12.2287754

4. Pyanova E. A., Penenko V. V. and Faleychik L. M. Scenario studies of local atmospheric circulations in the Krasnoyarsk region // Proc. SPIE 10035, 22nd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 100356D (November 29, 2016); doi:10.1117/12.2249043.

5. Пененко В. В., Алоян А. Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. – Новосибирск: Наука, 1985. – 256 с.

6. Пьянова Э. А. Исследование трансформации воздушного потока над термически и орографически неоднородной подстилающей поверхностью // Вычислительные технологии. – 2005. – Т. 10, № S3. – С. 106–111.

7. 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.

8. Казаков А. Л., Лыкосов В. Н. О параметризации взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью при численном моделировании атмосферных процессов // Труды ЗапСибНИИ. – 1982. – Вып. 55. – С. 3-20.

9. Казаков А. Л., Леженин А. А. Метод определения температуры подстилающей поверхности в моделях пограничного слоя // Метеорология, климатология и гидрология. – 1998. – Вып. 35. – С. 158-174.

10. Hurley, P. The Air Pollution Model (TAPM) Version 3. Part 1: Technical Description // CSIRO Atmospheric Research Technical Paper. – 2005. – № 71. – 54 p.

11. Пененко В. В. Методы численного моделирования атмосферных процессов. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1981. – 252 с.

12. 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.

13. Фалейчик Л. М. Геоинформационное обеспечение численного моделирования локальных атмосферных процессов // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. – 2012. – Т. 10, № 2. – С. 14-24.

14. Jarvis A., Reuter H. I., Nelson A., Guevara E. Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90 m Database. – 2008. http://srtm.csi.cgiar.org

15. Алоян А. Е., Фалейчик А. А., Фалейчик Л. М. Алгоритм численного решения метеорологических задач в случае криволинейной области // Математические модели рационального природопользования. – Новосибирск: Наука, 1989. – С. 14-35.

© Э. А. Пьянова, В. В. Пененко, Л. М. Фалейчик, 2018

УДК 504.064.37

ИТЕРАТИВНАЯ РЕГУЛЯРИЗАЦИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ХИМИИ АТМОСФЕРЫ С ДАННЫМИ ТИПА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ КОНЦЕНТРАЦИЙ

Алексей Владимирович Пененко
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник; Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, научный сотрудник, тел. (383)330-61-52, e-mail: a.penenko@yandex.ru

Операторы чувствительности, сформированные на основе набора решений сопряженных уравнений модели химических трансформаций, позволяют преобразовать обратную задачу идентификации источников, сформулированную в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений к семейству нелинейных интегральных уравнений, зависящих от выбора базиса для проектирования данных измерений. Для его решения в случае неточных данных можно применять итеративную регуляризацию совместно с принципом невязки. В работе представлено исследование оценки проекции шума в данных для применения принципа невязки в предположении об известных вероятностных характеристиках шума.

Ключевые слова: модели трансформации примесей, обратная задача идентификации источников, сопряженные уравнения, оператор чувствительности, итеративная регуляризация, принцип невязки.

ITERATIVE REGULARIZATION IN SOLVING INVERSE PROBLEMS OF ATMOSPHERIC CHEMISTRY WITH TIME SERIES-TYPE CONCENTRATIONS DATA

Alexey V. Penenko
Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher; Novosibirsk National Research State University, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher, phone: (383)330-61-52, e-mail: a.penenko@yandex.ru

Sensitivity operators, formed of a set of solutions of adjoint equations of the chemical transformation model, allow transforming the inverse source problem, formulated as a system of nonlinear differential equations to a family of nonlinear integral equations, depending on the choice of the basis of the measurement data projection. To solve it in case of inaccurate data, iterative regularization can be used in conjunction with the discrepancy principle. The paper presents a study of the noise projection estimate for the application of the discrepancy principle in the assumption of the known probabilistic characteristics of the noise.

Key words: chemical transformation model, inverse source problem, adjoint equations, sensitivity operator, iterative regularization, discrepancy principle.

Введение

Основной сложностью при решении обратных и некорректных задач является работа с зашумлёнными данными. В силу некорректности, малые воз-

мущения во входных данных могут привести к большим возмущениям в получаемом решении. Для устранения этого эффекта применяются методы регуляризации. Широко известны регуляризация по А.Н. Тихонову, итеративная регуляризация, регуляризация с помощью усеченного сингулярного разложения и т. д. При использовании итерационных алгоритмов наиболее перспективной представляется итеративная регуляризации, когда итерационный алгоритм решения задачи останавливается на определённой итерации. Для поиска этого номера можно использовать принцип невязки, состоящий в том, что алгоритм останавливается при достижении невязкой заданного уровня шума.

В цикле работ [1], [2], [3] разрабатывается подход к решению обратных задач на основе сведения обратной задачи, сформулированной в виде системы дифференциальных уравнений, к семейству нелинейных операторных уравнений, зависящих от выбора базиса проектирования, с последующим его решением методами на основе алгоритмов Ньютона-Канторовича. При использовании принципа невязки было численно установлено [2], что необходимо оценивать норму проекции шума на заданный базис, кроме того была высказана гипотеза, что эту оценку можно провести статистическими методами.

Целью данной работы является численное исследование возможности оценки проекции погрешности измерений на заданный базис при условии заданных вероятностных характеристик шума.

Методы и материалы

Рассмотрим временной интервал $[0,T]$ и задачу Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений в форме продукции-деструкции:

$$\frac{d\varphi_l}{dt}(t) + P_l(t,\varphi(t))\varphi_l(t) = \Pi_l(t,\varphi(t)) + r_l(t), t \in [0,T], l = 1,...,N_c, \quad (1)$$

$$\varphi_l(0) = \varphi_l^0, l = 1,...,N_c, \quad (2)$$

где N_c - количество рассматриваемых компонентов, $\varphi_l(t)$ - значение компонента l в момент времени t, $\varphi(t) \in \mathbb{R}^{N_c}$ - вектор функция с элементами $\varphi_l(t)$, $r_l(t)$ - функция источника для компонента l в зависимости от времени. Вектор функции $P, \Pi : [0,T] \times \mathbb{R}^{N_c} \to \mathbb{R}^{N_c}$ - описывают процессы деструкции и продукции, соответственно. Пусть $r \in F \subset L_2^{N_c}(0,T)$ - пространство источников, а $\Phi \subset L_2^{N_c}(0,T)$ - соответствующее множество решений (1)-(2). Будем считать все функции достаточно гладкими для того, чтобы все последующие выкладки имели смысл. Например, $P_l(t,\varphi), \Pi_l(t,\varphi)$ могут быть вещественными полиномами от элементов φ_l с коэффициентами, зависящими от t.

Для численного решения задачи введем расчетную сетку $\omega_t = \{t^j\}_{j=1}^{N_t} \subset [0,T]$ с интервалами длины $\Delta t^{j+0.5}$, где $t^1 = 0$ и $t^{N_t} = T$. Будем использовать ту же численную схему, что и в [3]:

$$\phi_l^{j+1} = \phi_l^j L^j(P_l(t^j,\phi^j)) + G^j(P_l(t^j,\phi^j))(\Pi_l(t^j,\phi^j) + r_l^j),\ j = 1,...,N_t - 1, \qquad (4)$$

$$\phi_l^1 = \phi_l^0, \qquad (5)$$

где $l = 1,...,N_c$ и

$$L^j(P) = \begin{cases} 0 & P\Delta t > \varepsilon_{\max} \\ e^{-P\Delta t} & P\Delta t \in [\varepsilon_{\min}, \varepsilon_{\max}] \\ 1 - P\Delta t & 0 < P\Delta t < \varepsilon_{\min} < 1 \end{cases},\ G^j(P) = \begin{cases} 1/P & P\Delta t > \varepsilon_{\max} \\ \dfrac{1 - e^{-P\Delta t}}{P\Delta t}\Delta t & P\Delta t \in [\varepsilon_{\min}, \varepsilon_{\max}], \\ \Delta t & 0 < P\Delta t < \varepsilon_{\min} < 1 \end{cases}$$

где $\Delta t = \Delta t^{j+0.5}$. Прямой задачей будем называть задачу определения ϕ из $(4)-(5)$ по известным $\phi^0 \in \mathbb{R}^{N_c}$ и $r \in \mathbb{R}^{N_c \times N_t - 1}$. Обозначим решение прямой задачи через $\phi[\phi^0, r] \in \mathbb{R}^{N_c \times N_t}$. Определим U_{mes} и оператор A:

$$\overline{U}_{mes} = \left\{ \left\{ \begin{cases} h_l, l \in L_{mes} \\ 0, l \notin L_{mes} \end{cases} \right\}_{l=1}^{N_c} \middle| \, h_l \in \mathbb{R}^{N_t} \right\} \subset \mathbb{R}^{N_c \times N_t},\ \overline{A}: \begin{cases} \mathbb{R}^{N_c} \times \mathbb{R}^{N_c \times N_t - 1} \to \overline{U}_{mes} \\ \{\phi^0, r\} \mapsto \left\{ \begin{cases} \phi_l[\phi^0, r], l \in L_{mes} \\ 0, l \notin L_{mes} \end{cases} \right\}_{l=1}^{N_c}. \end{cases}$$

Зададим некоторое значение $\overline{r}^{(*)} \in \mathbb{R}^{N_c \times N_t - 1}$, которое назовем точным решением обратной задачи, и определим вектор данных измерений:

$$\overline{I} = \overline{A}\left(\phi^0, \overline{r}^{(*)}\right) + \delta\overline{I}, \qquad (6)$$

где $\delta\overline{I} \in \overline{U}_{mes}$ - погрешность измерений. Она неизвестна, но известна некоторая информация о ней, например, норма $\|\delta\overline{I}\| = \overline{\delta}$. Обратной задачей идентификации источника назовем задачу определения $\overline{r}^{(*)}$ из (6) по ϕ^0, $\overline{I}$, $\overline{\delta}$.

Определим скалярное произведение, оператор псевдо-измерений, соответствующий набору из Ξ ортогональных функций $\overline{U} = \{\overline{u}_\xi\}_{\xi=1}^{\Xi} \subset \overline{U}_{mes}$:

$$\cdot\cdot: \begin{cases} \mathbb{R}^{N_c} \times \mathbb{R}^{N_c} \to \mathbb{R} \\ \{a,b\} \mapsto a^T diag(\rho) b = \sum_{l=1}^{N_c} a_l b_l \rho_l \end{cases},\quad \delta t^j = \begin{cases} \Delta t^{j+0.5} & j = 1 \\ \left(\Delta t^{(j-1)+0.5} + \Delta t^{j+0.5}\right)/2 & 1 < j < N_t, \delta t^0 = \delta t^1. \\ \Delta t^{(j-1)+0.5} & j = N_t \end{cases}$$

$$\langle .,. \rangle_{\overline{L_2^{N_c}(0,T)}} : \begin{cases} \mathbb{R}^{N_c \times N_t} \times \mathbb{R}^{N_c \times N_t} \to \mathbb{R} \\ \{h, \phi\} \mapsto \sum_{j=1}^{N_t} \phi^j \cdot h^j \delta t^j \end{cases}, \quad \overline{H}_{\overline{U}} : \begin{cases} \mathbb{R}^{N_c \times N_t} \to \mathbb{R}^{\Xi} \\ \phi \mapsto \sum_{\xi=1}^{\Xi} \langle \overline{u}_\xi, \phi \rangle_{\overline{L_2^{N_c}(0,T)}} e_\xi \end{cases},$$

Аналогично [3] можно сформулировать теорему для случая данных измерений в виде временных рядов.

Теорема [4]**:** *Для любых* $\phi^0, \phi^0 + \delta\phi^0 \in \mathbb{R}^{N_c}$ *и* $r, r + \delta r \in \mathbb{R}^{N_c \times N_t - 1}$ *верно тождество*

$$\overline{H}_{\overline{U}} \overline{A}(r + \delta r, \phi^0 + \delta\phi^0) - \overline{H}_{\overline{U}} \overline{A}(r, \phi^0) = m^0_{\overline{U}}[\phi^0, r, \delta\phi^0, \delta r]\delta\phi^0 + m_{\overline{U}}[\phi^0, r, \delta\phi^0, \delta r]\delta r,$$

$$m^0_{\overline{U}}[\phi^0, r, \delta\phi^0, \delta r] : \begin{cases} \mathbb{R}^{N_c} \to \mathbb{R}^{\Xi} \\ z \mapsto \left\{ \psi_l^0 \left[\overline{u}_\xi \right] \delta t^0 \right\}_{\xi=1, l=1}^{\Xi, N_c} diag(\rho)\, z \end{cases},$$

$$m_{\overline{U}}[\phi^0, r, \delta\phi^0, \delta r] : \begin{cases} \mathbb{R}^{N_c \times N_t - 1} \to \mathbb{R}^{\Xi} \\ z \mapsto \sum_{j=1}^{N_t - 1} \left\{ R_l(t^j, \phi^j) \psi_l{}^j \left[\overline{u}_\xi \right] \right\}_{\xi=1, l=1}^{\Xi, N_c} diag(\rho)\, z^j \delta t^j \end{cases},$$

где $\psi\left[\overline{u}_\xi\right] = \psi\left[\phi^0, r, \delta\phi^0, \delta r, \overline{u}_\xi\right]$, $\psi\left[\phi^0, r, \delta\phi^0, \delta r, h\right]$ обозначает решение сопряженной задачи

$$\psi^{j-1} \frac{\delta t^{j-1}}{\delta t^j} = \left(w^j(t^j, \phi^j, r^j, \delta\phi^j, \delta r^j) \right)^* \psi^j + h^j, \; j = 1, ..., N_t, \tag{7}$$

$$\psi^{N_t} = 0, \tag{8}$$

и h^j - столбцы h и

$$w^j(t^j, \phi^j, r^j, \delta\phi^j, \delta r^j) = \underset{l=1,...,N_c}{diag}\, L^j\left(p_l^2\right) + \left\{ S_l^j\left(t^j, \phi^j, r^j, \delta\phi^j, \delta r^j\right) \right\}_{l=1}^{N_c},$$

$$R^j(t^j, \phi^j) = \underset{l=1,..,N_c}{diag}\, G^j\left(p_l^1\right), \; p_l^2 = P_l(t^j, \phi^j + \delta\phi^j), \; p_l^1 = P_l(t^j, \phi^j).$$

Здесь $\{S_l\}_{l=1}^{N_c}$ обозначает матрицу со строками S_l. Если $p_l^2 = p_l^1$, то

$$S_l^j\left(t^j, \phi^j, r^j, \delta\phi^j, \delta r^j\right) = G^j\left(p_l^1\right) \overline{\nabla} \Pi_l\left(t, \phi^j + \delta\phi^j, \phi^j\right),$$

иначе

$$S_l^j\left(t^j, \phi^j, r^j, \delta\phi^j, \delta r^j\right) = G^j\left(p_l^1\right) \overline{\nabla} \Pi_l\left(t, \phi^j + \delta\phi^j, \phi^j\right) +$$

$$\left(\phi_l^j \frac{L^j(p_l^2) - L^j(p_l^1)}{p_l^2 - p_l^1} + \frac{G^j\left(p_l^2\right) - G^j\left(p_l^1\right)}{p_l^2 - p_l^1} (\Pi_l(t, \phi^j + \delta\phi^j) + r_l^j + \delta r_l^j) \right) \overline{\nabla} P_l\left(t, \phi^j + \delta\phi^j, \phi^j\right).$$

При вычислении оператора чувствительности требуется, во-первых, параллельно решить две независимые прямые задачи, и, во-вторых, параллельно решить Ξ независимых сопряженных задач с различными правыми частями.

Следствие [4]**:** *Для любого* $r \in \mathbb{R}^{N_c \times N_t - 1}$ *и системы ортогональных функций* $\bar{U} \subset \bar{U}_{mes}$ *выполняется тождество*

$$\bar{H}_{\bar{U}}\left(\bar{I} - \bar{A}\left(\phi^0, r\right)\right) = m_{\bar{U}}[\phi^0, r, 0, \bar{r}^{(*)} - r]\left(\bar{r}^{(*)} - r\right) + \bar{H}_{\bar{U}}\delta\bar{I} =$$

$$= m_{\bar{U}}[\phi^0, r, 0, 0]\left(\bar{r}^{(*)} - r\right) + \left(m_{\bar{U}}[\phi^0, r, 0, \bar{r}^{(*)} - r] - m_{\bar{U}}[\phi^0, r, 0, 0]\right)\left(\bar{r}^{(*)} - r\right) + \bar{H}_{\bar{U}}\delta\bar{I}.$$

Таким образом, для успешного решения обратной задачи нужно оценить $\left\|\bar{H}_{\bar{U}}\delta\bar{I}\right\|_{\mathbb{R}^{\Xi}}$. Пусть

$$\delta\bar{I} = \delta Diag\left(\bar{\xi}\right)\bar{A}\left(\phi^0, r^{(*)}\right),$$

где $\bar{\xi}$ - некоторая реализация гауссова случайного вектора с нулевыми средними и единичными дисперсиями, δ - известный уровень шума. По определению

$$\left\|\bar{H}_{\bar{U}}\delta\bar{I}\right\|^2_{\mathbb{R}^{\Xi}} = \sum_{\xi=1}^{\Xi}\left\langle \bar{u}_{\xi}, \delta\bar{I}\right\rangle^2_{L_2^{N_c}(0,T)},$$

$$\left\langle \bar{u}_{\xi}, \delta\bar{I}\right\rangle_{L_2^{N_c}(0,T)} = \sum_{l \in L_{mes}}\sum_{j=1}^{N_t}\delta\,\bar{\xi}_l^{\,j}\left(\bar{\phi}_l^{\,j}[\phi^0, r^{(*)}]\rho_l\left(\bar{u}_{\xi}\right)_l^j\delta t^j\right).$$

Следовательно $\left\langle \bar{u}_{\xi}, \delta\bar{I}\right\rangle_{L_2^{N_c}(0,T)}$ распределена как гауссова случайная величина с нулевым средним и дисперсией

$$\sigma_{\xi}^2 = \delta^2\sum_{l \in L_{mes}}\rho_l\sum_{j=1}^{N_t}\left(\left(\bar{\phi}_l^{\,j}[\phi^0, r^{(*)}]\right)^2\sqrt{\rho_l\delta t^j}\left(\left(\bar{u}_{\xi}\right)_l^j\right)^2\sqrt{\rho_l\delta t^j}\right)\delta t^j$$

Объединяя, получим, что $\left\|\bar{H}_{\bar{U}}\delta\bar{I}\right\|^2_{\mathbb{R}^{\Xi}}$ - сумма квадратов гауссовых случайных величин с нулевыми срединами и дисперсиями σ_{ξ}^2. Однако напрямую оценить эти дисперсии нельзя, так как точные данные измерений недоступны. Рассмотрим случайную величину

$$\left\|\bar{H}_{\bar{U}}\left(\delta Diag(\bar{\eta})\bar{I}\right)\right\|_{\mathbb{R}^{\Xi}},$$

где случайный вектор $\bar{\eta}$ распределен также, как $\bar{\xi}$. Численно изучим, как соотносятся случайные величины $\left\|\bar{H}_{\bar{U}}\delta\bar{I}\right\|_{\mathbb{R}^{\Xi}}$ и $\left\|\bar{H}_{\bar{U}}\left(\delta Diag(\bar{\eta})\bar{I}\right)\right\|_{\mathbb{R}^{\Xi}}$ и для этого рассмотрим сценарий из [4].

В качестве пространства проектирования $\bar{U}$ временных рядов будем рассматривать

$$U_\Theta = \left\{ e_{\eta\theta} \,|\, 1 \le \theta \le \Theta, \eta \in L_{mes} \right\},\ e^j_{\eta\theta} = \left\{ \left\{ \begin{cases} \dfrac{\sqrt{2}}{\sqrt{T\,\rho_\eta}} \cos\left(\dfrac{\pi\theta t^j}{T} \right), \theta > 0 \\ \dfrac{1}{\sqrt{T\,\rho_\eta}}, \theta = 0 \\ 0,\ l \ne \eta \end{cases} , l = \eta \right\}_{l=1}^{N_c} , j = 1,\ldots,N_t.$$

Выбор Θ можно осуществлять на основе временного разрешения получаемых временных рядов и возможностей вычислительной системы. Таким образом, число элементов базиса возрастает как с увеличением числа измеряемых компонент, так и с увеличением их детализации. Кроме разрешения, количество рассматриваемых базисных векторов можно ограничивать уровнем шума. В этом случае $\Xi = \Theta \left| L_{mes} \right|$, где $\left| L_{mes} \right|$ - количество элементов L_{mes}.

В качестве примера рассмотрим химический механизм из [5], содержащий 22 вещества. Скорости реакций зависят от времени. Систему химических реакций можно переписать в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений типа продукции-деструкции. Предположим, что источники выбрасывают вещества NO и NO_2. Временной ход интенсивности источников представлен на рис. 1.

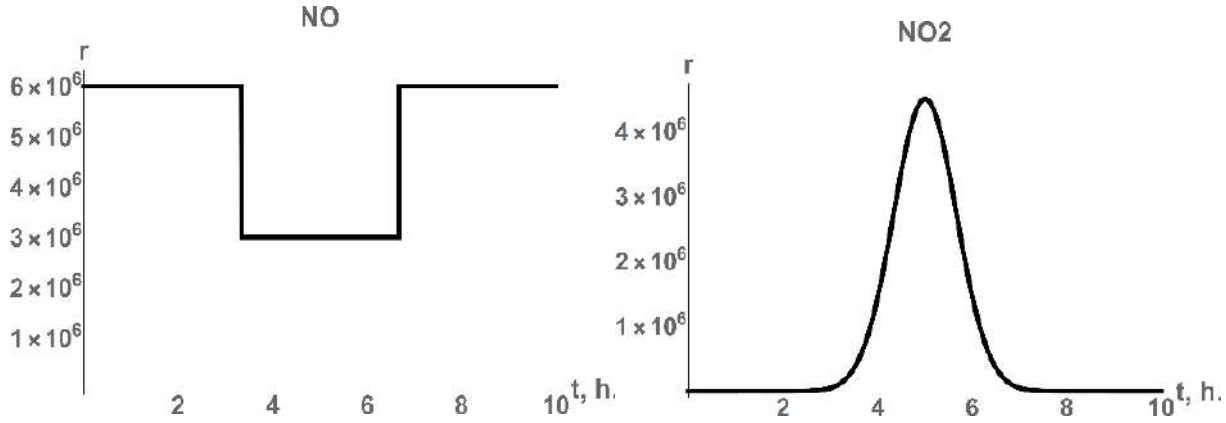


Рис. 1. Форма источников по времени

При решении обратной задачи конкретный вид источников не известен, однако будем предполагать, что выбросов других веществ нет ($L_{src} = \{NO, NO_2\}$). Выбросы NO и NO_2 являются следствием работы транспорта и промышленных предприятий. Эти вещества слабо разделимы и часто учитываются вместе

как NO_X. Измерению доступны вещества CO_2 и O_3 ($L_{mes} = \{CO_2, O_3\}$). Эти вещества были выбраны из-за того, что, во-первых, их мониторинг осуществим, и, во-вторых, в них наблюдается наибольший отклик на работу источников NO и NO_2. Интервал модельного времени - 10 часов ($T = 10 \times 3600$ сек). Число точек по времени $N_t = 3000$. В качестве начального приближения $r^{(0)}$ к источникам выберем нулевое.

При постановке численного эксперимента с заданными источниками, вычислим решение прямой задачи на сетке ω_t. Временные ряды концентраций соответствующих веществ зададим алгоритму решения обратной задачи в качестве данных измерений.

Результаты

На рис. 2 представлены гистограммы 104-х реализаций сравниваемых случайной величины $\left\| \bar{H}_{\bar{U}} \delta Diag\left(\bar{\xi}\right) \bar{A}\left(\phi^0, r^{(*)}\right) \right\|_{\mathbb{R}^\Xi}$ и ее приближения $\left\| \bar{H}_{\bar{U}} \left(\delta Diag(\bar{\eta}) \bar{I}\right) \right\|_{\mathbb{R}^\Xi}$ для различного Θ при $\delta = 0.1$.

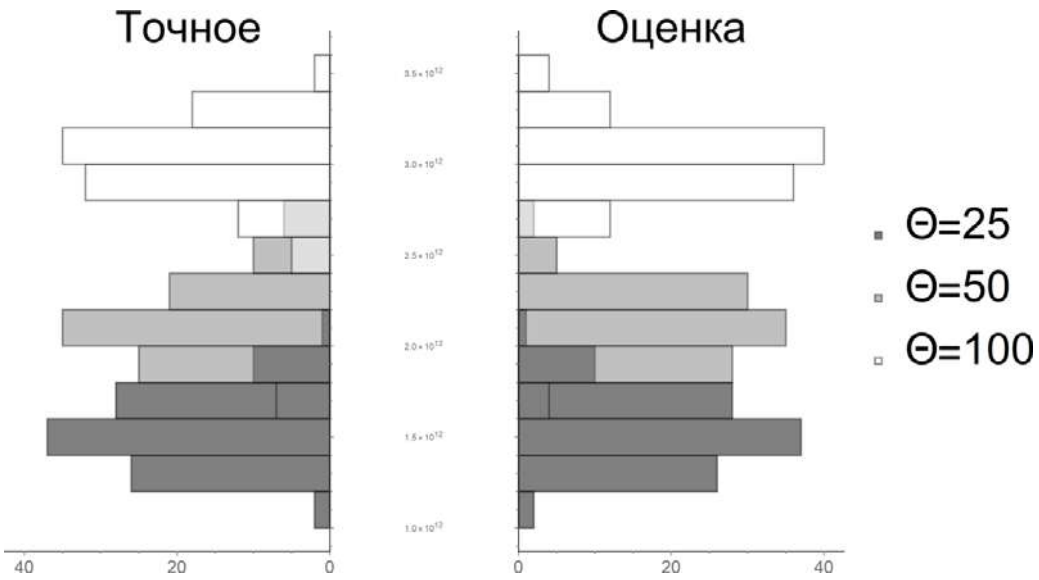


Рис. 2. Гистограммы реализаций оцениваемой случайной величины (слева) и ее приближения (справа) для разных Θ при $\delta = 0.1$.

Обсуждение

Сложностью при получении оценки уровня шума для приницпа невязки является необходимость получения ошибки с высокой точностью. Если оценка будет занижена, то, вследствие некорректности обратной задачи, решение может потерять устойчивость. Если же она будет завышена, то информация, содержащаяся в данных измерений будет использована не полностью.

Можно отметить, что гистограммы на рис. 2 схожи, что позволяет для данного численного экспермента сделать вывод о возможности использования такой оценки для применения принципа невязки. При этом на основе оценки можно вычислить вероятность получения оценки нормы погрешности ошибки измерений.

Заключение

Можно заключить, что в проведенном численном эксперименте для модели переноса и трансформации примесей, при известном распределении шума в данных измерений, оценка проекции шума может быть получена на основе случайной величины, строящейся на основе имеющихся зашумленных данных измерений.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда по проекту 17-71-10184 (в части разработки алгоритмов и их исследовании). Векторизация и оптимизация программ для ЭВМ выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (4.1.3 Совместные лаборатории НГУ-ННЦ СО РАН).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пененко А.В. О решении обратной коэффициентной задачи теплопроводности методом проекции градиента // Сибирские электронные математические известия. -2010. - Т. 23. -С. 178-198.

2. Пененко А.В., Николаев С.В., Голушко С.К., Ромащенко А.В., Кирилова И.А. Численные алгоритмы идентификации коэффициента диффузии в задачах тканевой инженерии // Мат. биол. и биоинф.- 2016.- Vol. 11.-P. 426-444.

3. Пененко А.В. Согласованные численные схемы для решения нелинейных обратных задач идентификации источников градиентными алгоритмами и методами Ньютона-Канторовича // Сиб. журн. вычисл. матем.,- 2018.- Т. 11.-С. 426-444.

4. А.В. Пененко. Метод Ньютона-Канторовича для решения обратных задач идентификации источников в моделях продукции-деструкции с данными типа временных рядов // Сиб. журн. вычисл. матем., (представлено).

5. Stockwell W.R. Comment on Simulation of a reacting pollutant puff using an adaptive grid algorithm by R.K. Srivastava et al. // Journal of Geophysical Research.-2002.- Vol. 107.- P. 4643-4650.

6. Hesstvedt E., Hov O., Isaksen I.S.A. Quasi-steady-state approximations in air pollution modeling: Comparison of two numerical schemes for oxidant prediction // International Journal of Chemical Kinetics. -1978.-Vol. 10.- P. 971-994.

7. Penenko V.V., Tsvetova E.A., Penenko A.V. Variational approach and Euler's integrating factors for environmental studies // Computers & Mathematics with Applications. -2014. -Vol. 67.- P. 2240-2256.

© А. В. Пененко, 2018

УДК 504.064.37

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ВАРИАЦИОННОГО УСВОЕНИЯ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА АТМОСФЕРЫ В УСЛОВИЯХ ГОРОДА НОВОСИБИРСКА

Алексей Владимирович Пененко
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник; Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, научный сотрудник, тел. (383)330-61-52, e-mail: a.penenko@yandex.ru

Александр Владимирович Гочаков
Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт (ФГБУ СибНИГМИ), 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Советская, 30, старший научный сотрудник, тел. (961)874-33-93, e-mail: gochakov@sibnigmi.ru

Жадыра Саматовна Мукатова
Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, студент; Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Академика Лаврентьева, 6, техник, тел. (903)997-81-89, e-mail: zmukatova@ya.ru

Павел Николаевич Антохин
Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, 634055, Россия, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1, научный сотрудник, тел. (3822)49-10-23, e-mail: apn@iao.ru

В работе представлены результаты численного исследования эффективности вариационного алгоритма усвоения данных для модели переноса и трансформации атмосферных примесей. Алгоритм основан на схеме расщепления. На стадии переноса используется прямой алгоритм вариационного усвоения данных, а на стадии трансформации – итерационный. Алгоритм показал свою эффективность в численном эксперименте для города Новосибирска.

Ключевые слова: усвоение данных, перенос и трансформация примесей, вариационный подход, мониторинг загрязнений воздуха, схема расщепления.

NUMERICAL STUDY OF THE ALGORITHM OF VARIATIONAL DATA ASSIMILATION FOR MONITORING THE CHEMICAL COMPOSITION OF THE ATMOSPHERE IN THE CITY OF NOVOSIBIRSK

Alexey V. Penenko
Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher; Novosibirsk National Research State University, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher, phone: (383)330-61-52, e-mail: a.penenko@yandex.ru

Alexander V. Gochakov
Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute (fgbi, Shinigmi), 30, Sovetskaya St., Novosibirsk, 630099, Russia, Senior Researcher, phone: (961)874-33-93, e-mail: gochakov@sibnigmi.ru

Zhadyra S. Mukatova
Novosibirsk National Research State University, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630090, Russia, Student; Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Technician, phone: (903)997-81-89, e-mail: zmukatova@ya.ru

Pavel N. Antokhin
Institute of atmospheric optics. Atmospheric optics SB RAS, 1, Academician Zuev Square, Tomsk, 634055, Russia, Researcher, phone: (3822)49-10-23, e-mail: apn@iao.ru

The results of a numerical study of the efficiency of the variational data assimilation algorithm for the transport and transformation model of atmospheric pollution are presented. The algorithm is based on a splitting scheme. The direct algorithm of variational data assimilation is used at the transport stage, and the iterative algorithm is used at the transformation stage. The algorithm shown its effectiveness in the numerical experiment for the city of Novosibirsk.

Key words: data assimilation, transport and transformation models, variational approach, air pollution monitoring, splitting scheme.

Введение

Методы математического моделирования с оперативным усвоением данных измерений уровня загрязнения, полученных на стационарных или мобильных постах мониторинга позволяют получать информацию о распределении и динамике загрязняющих веществ в атмосфере города. Обзор современных алгоритмов усвоения данных можно найти в [1].

Данная работа обобщает [2] на случай двух пространственных переменных. Современные модели химии атмосферы обычно являются трехмерным по пространству, однако их использование, особенно в контексте обратного моделирования, сопряжено с необходимостью задействования суперкомпьютеров. Для работы на машинах со средними харакетристиками интерес представляют двумерные по пространству модели.

Усвоение одного и того же набора данных измерений в рассматриваемом алгоритме производится квази-независимо на отдельных стадиях схемы расщепления.Таким образом на каждом шаге модели параллельно решается три группы задач варационного усвоения данных. На каждой стадии схемы расщепления, на ограничениях математической модели, находится условный минимум целевого функционала, совмещающего невязку между измеренными значениями и их смоделированными аналогами, а также некоторый стабилизатор, включающий норму функции неопределенности (управления).

На стадии переноса рассматривается один шаг по времени математической модели. Для такой постановки в [3] рассмотрен и теоретически исследован прямой (без итераций) алгоритм усвоения данных. Численные схемы для реализации усвоения на стадии трансформации были представлены в [4]. При этом схемы для получения прямых и сопряженных задач, необходимых для построения градиентов целевого функционала согласованы в смысле тождества Ла-

гранжа. Целью работы является проверка эффективности алгоритма усвоения данных на правдоподобном сценарии для города Новосибирска.

Методы и материалы

Рассмотрим прямоугольную пространственно-временную область $D:=[0,X]\times[0,Y]$, $(\vec{x},t)\in\Omega_T := D\times[0,T]$, ограниченную $\partial\Omega_T = \partial\Omega\times[0,T]$. В этой области решается задача о транспорте и трансформации набора химических веществ в атмосфере:

$$\frac{\partial\varphi_l}{\partial t} + div(u\varphi_l - \mu grad\,\varphi_l) + P_l(\varphi)\varphi_l = \Pi_l(\varphi) + f_l + r_l,\ (\vec{x},t)\in\Omega_T. \qquad (1)$$

$$\mu\frac{\partial\varphi_l}{\partial n} = 0,\quad (\vec{x},t)\in\Gamma_{out};\ \varphi_l = (\varphi_b)_l,\quad (\vec{x},t)\in\Gamma_{in};\ \varphi_l(.,0) = (\varphi_0)_l,\quad \vec{x}\in D, \qquad (2)$$

где $\varphi\in\mathbb{R}^{Nc}$ – вектор-функция состояния, различные элементы которой $\varphi_l, l=1,...,N_c$ представляют концентрации рассматриваемых примесей, N_c – их количество, $P_l(\varphi)>0$ – коэффициенты деструкции рассматриваемых веществ, $\Pi_l(\varphi)>0$ – скорости продукции, $u(\vec{x},t)\in\mathbb{R}^3$ – вектор скорости ветра, Γ_{out} - части границы области, где скорость ветра направлена наружу из области, Γ_{in} - части границы, где скорость ветра направлена внутрь области, $\mu(\vec{x},t)$ - коэффициент диффузии, $f_l,(\varphi_0)_l$ – априорные значения источников и начальных данных, $(\varphi_b)_l$ – концентрация вещества на границе области, r_l - управляющая функция (неопределенность), которая добавляется в жесткую структуру модели для усвоения данных. Операторы продукции и деструкции задаются системой кинетических уравнений Прямая задача состоит в определении φ из (1)-(2) по известным $f_l,(\varphi_0)_l,(\varphi_b)_l,r_l$. Предположим, что доступны результаты контактных измерений концентраций $\{I_m\}_{m=1,...,M}$ в заданные моменты времени $\{\theta_m\}_{m=1,...,M}$ в точках $\{\chi_m\}_{m=1,...,M}$ для заданных веществ $\{l_m\}_{m=1,...,M}$. Измерения могут содержать погрешности $\{\eta_m\}_{m=1,...,M}$:

$$I_m = \varphi_{l_m}(\chi_m,\theta_m) + \eta_m,\ m=1,...,M. \qquad (3)$$

Ошибка измерений η_m предполагается ограниченной во (взвешенной) Эвклидовой норме в пространстве измерений $\|\eta\|_M \le \delta_\eta$. Мы предполагаем, что все функции и модельные параметры достаточно гладкие, чтобы решения существовали и преобразования имели смысл. Задачу определения φ для $t>t^*$ по (1)-(2) и (3) при заданных функциях $f_l,(\varphi_0)_l,(\varphi_b)_l$ и результатах измерений $\{I_m\}_{m=1,...,M}$ таких, что $0<\theta_m<t^*$ назовем задачей усвоения данных.

Для решения многомерных задач применяется метод расщепления. Мы будем использовать аддитивно усредненные схемы расщепления. Основная идея подхода состоит в том, чтобы усваивать данные локально на отдельных шагах расщепления. Введем временную сетку $\omega_t = \left\{0 < t^1 < ... < t^k < ... < t^{N_t} = T\right\}$. На каждом временном интервале $\left[t^{k-1}, t^k\right]$ приблизим общую модель конвекции-диффузии-реакции (1)-(2) схемой расщепления по физическим процессам и пространственным переменным, порожденной разбиением $\sum_{\xi \in \Xi} \gamma_\xi = 1,\ \gamma_\xi \geq 0,\ \Xi = \{x, y, t\}$.

Для примера рассмотрим шаг расщепления, соответствующий только одному пространственному измерению x ($\xi = x$) для любого $l = 1, ..., N_c$:

$$\gamma_\xi \frac{\partial \varphi_l^{(\xi)}}{\partial t} + \frac{\partial (u_\xi \varphi_l^{(\xi)})}{\partial \xi} - \frac{\partial}{\partial \xi} \mu \frac{\partial \varphi_l^{(\xi)}}{\partial \xi} = \gamma_\xi f_l + r_l^{(\xi)}, \quad (\vec{x}, t) \in [0, X] \times [t^{k-1}, t^k], \tag{4}$$

$$\mu \frac{\partial \varphi_l^{(\xi)}}{\partial n} = 0, \quad (\vec{x}, t) \in \Gamma_{out} \cap (\{x = 0\} \cup \{x = X\}) \times [t^{k-1}, t^k], \tag{5}$$

$$\varphi_l^{(\xi)} = (\varphi_b)_l, \quad (\vec{x}, t) \in \Gamma_{out} \cap (\{x = 0\} \cup \{x = X\}) \times [t^{k-1}, t^k], \tag{6}$$

$$\varphi_l^{(\xi)}(., t^{k-1}) = \varphi_l(., t^{k-1}). \tag{7}$$

В качестве решения задачи усвоения данных рассмотрим минимум целевого функционала

$$\left(J^{(\xi)}\right)_{jnl}^k \left(\left(\phi^{(\xi)}\right)_{.jl}^k, \left(r^{(\xi)}\right)_{.jl}^k\right) = \sigma \sum_{i=1}^N \left(\left(\phi^{(\xi)}\right)_{ijl}^k - I_{ijl}^k\right)^2 M_{ijl}^k + \rho \sum_{i=1}^N \left(\left(r^{(\xi)}\right)_{ijl}^k\right)^2$$

на ограничениях (4) - (7), аппроксимированных трехдиагональной неявной разностной схемой, считая $\left[t^{k-1}, t^k\right]$ одним шагом по времени:

$$-L_i \left(\phi^{(\xi)}\right)_{i-1\,jl}^k + C_i \left(\phi^{(\xi)}\right)_{ijl}^k - R_i \left(\phi^{(\xi)}\right)_{i+1\,jl}^k = \left(\phi^{(\xi)}\right)_{ijl}^{k-1} + \Delta t F_i^k + \Delta t \left(r^{(\xi)}\right)_{ijl}^k, \quad i = 1, ..., N.$$

Здесь σ - параметр усвоения, $M_{ijnl}^k = 1$, если в узле с координатами (x_i, y_j, t^k) есть измерение вещества l, иначе $M_{ijnl}^k = 0$. Аналогично, I_{ijnl}^k равно результату измерения, если в узле с координатами (x_i, y_j, t^k) есть измерение вещества l, иначе оно равно 0. Решение этой задачи оптимизации задается трехдиагональным матричным уравнением [3], которое можно решить прямым методом матричной прогонки.

Условный минимум функционала $\tilde{\phi}^{(\xi)}$ назовем решением задачи усвоения данных на стадии переноса.

В силу жесткости системы дифференциальных уравнений, модель процессов трансформации ($\xi = c$)

$$\gamma_\xi \frac{\partial \varphi_l^{(\xi)}}{\partial t} + P_l\left(\varphi^{(\xi)}\right)\varphi_l^{(\xi)} = \Pi_l\left(\varphi^{(\xi)}\right) + \gamma_\xi f_l + r_l^{(\xi)},\ (\vec{x},t) \in D \times [t^{k-1}, t^k],$$

$$\varphi_l^{(\xi)}(.,t^{k-1}) = \varphi_l(.,t^{k-1}),\ \ \vec{x} \in D,$$

требуется решать на более тонкой сетке по времени, нежели модель для процессов переноса. Введем на каждом шаге $\left[t^{k-1}, t^k\right]$ равномерную подсетку $\overline{\omega}_t^{j-0.5} = \left\{t^{k-1} = \overline{t}^1 < \ldots < \overline{t}^p < \ldots < \overline{t}^{\overline{N}_t} = t^k\right\}$ с $\overline{N}_t$ точками и длиной интервала $\Delta\overline{t}$. Для решения системы используется монотонная дискретно-аналитическая схема первого порядка из семейства схем, представленных в [5], аналогичная части схемы QSSA [6]. Для $l = 1,\ldots,N_c$ при $\phi_l^p = \left(\phi^{(\xi)}\right)_{ijl}^p$ и $r_l = r_{ijl}^{(\xi)}$:

$$\phi_l^{p+1} = \phi_l^p L^p(P_l(\overline{t}^p, \phi^j)) + G^p(P_l(\overline{t}^p, \phi^p))(\Pi_l(\overline{t}^p, \phi^p) + r_l),\ p = 1,\ldots,\overline{N}_t - 1, \qquad (8)$$

$$\phi_l^1 = \left(\phi^{(\xi)}\right)_{ijl}^k, \qquad (9)$$

$$L^j(P) = \begin{cases} 0 & P\Delta\overline{t} > \varepsilon_{\max} \\ e^{-P\Delta\overline{t}} & P\Delta\overline{t} \in \left[\varepsilon_{\min}, \varepsilon_{\max}\right] \\ 1 - P\Delta\overline{t} & 0 < P\Delta\overline{t} < \varepsilon_{\min} < 1 \end{cases}, \qquad G^j(P) = \begin{cases} 1/P & P\Delta\overline{t} > \varepsilon_{\max} \\ \dfrac{1 - e^{-P\Delta\overline{t}}}{P\Delta\overline{t}}\Delta t & P\Delta\overline{t} \in \left[\varepsilon_{\min}, \varepsilon_{\max}\right] \\ \Delta\overline{t} & 0 < P\Delta\overline{t} < \varepsilon_{\min} < 1 \end{cases}.$$

Данные измерений на сетке $\overline{\omega}_t^{j-0.5}$ будем интерпретировать как значение I_l концентраций вещества l в точке t^k, при этом функцию управления $r_{ijl}^{(\xi)}$ будем считать постоянной на $\left[t^{k-1}, t^k\right]$. Рассмотрим целевой функционал

$$\left(J^{(\xi)}\right)_{ij}^k\left(\phi_{ij.}^{(\xi)}, r_{ij.}^{(\xi)}\right) = \sum_{l=1}^{N_c}\left(\left(\phi^{(\xi)}\right)_{ijl}^{\overline{N}_t} - I_{ijl}^k\right)^2 M_{ijl}^k + \sum_{l=1}^{N_c}\rho_l^{(\xi)}\left(r_{ijl}^{(\xi)}\right)^2, \qquad (10)$$

где $\phi_{ijl}^{(\xi)}$ - решение (8)-(9), M_{ijl}^k равно 1, если в узле с координатами (x_i, y_j, t^k) есть измерение вещества l, иначе оно равно 0, I_{ijnl}^k равно результату измерения, если в узле с координатами (x_i, y_j, t^k) есть измерение вещества l, иначе оно равно 0. С помощью сопряженных уравнений можно вычислить градиент (10):

$$\left(\nabla_r\left(J^{(\xi)}\right)_{ij}^k\left(\left(\phi^{(\xi)}\right)_{ij.}^k, \left(r^{(\xi)}\right)_{ij.}^k\right)\right)_l = \sum_{j=1}^{N_t - 1} R_l(t^j, \phi^j)\psi_l^j + 2\rho_l\left(r^{(\xi)}\right)_{ijl}^k,\ \ l = 1,\ldots,N_c,$$

где ψ - решение сопряженной задачи

$$\psi^{j-1} = \left(W(t^j, \phi^j, r^j)\right)^* \psi^j,\ j = 1,..., \bar{N}_t - 1,$$

$$\psi_l^{\bar{N}_t - 1} = \begin{cases} \phi_{ijl}^{(\xi)} - I_{ijl}^k, & M_{ijl}^k = 1 \\ 0, & M_{ijl}^k = 0 \end{cases};\ R(t^{k-1}, \phi^{k-1}) = \underset{l=1,..,N_c}{diag}\ G\left(p_l\right),\quad p_l = P_l(t^{k-1}, \phi^{k-1}),$$

$$W(t^{k-1}, \phi^{k-1}, r) = \underset{l=1,...,N_c}{diag}\ L\left(p_l^2\right) + \left\{S_l\left(t^j, \phi^{k-1}, r\right)\right\}_{l=1}^{N_c}.$$

Здесь $\left\{S_l\right\}_{l=1}^{N_c}$ обозначает матрицу со строками S_l

$$S_l\left(t, \phi, r\right) = G\left(p_l^1\right)\bar{\nabla}\Pi_l\left(t, \phi, \phi\right) + \left(\phi_l^j L'(p_l) + G'\left(p_l\right)(\Pi_l(t, \phi) + r_l)\right)\bar{\nabla}P_l\left(t, \phi, \phi\right).$$

Аналогично [7], при минимизации функционала используется регуляризация через проекцию градиентов на вещества, которые соответствуют первичным загрязнителям. После чего задача оптимизации решается методом сопряженных градиентов. Обозначим ее минимум через $\tilde{\phi}^{(\xi)}$.

В качестве оценки решения задачи усвоения данных, примем усреднение на шаге t^k

$$\tilde{\phi}_{ijl}^k = \sum_{\xi \in \Xi} \gamma_\xi \left(\tilde{\phi}^{(\xi)}\right)_{ijl}^k.$$

Для подготовки коэффициентов модели переноса примесей в составе алгоритма усвоения данных использовались метеорологические величины, рассчитанные с помощью модели WRF-Chem [8] в области, ограниченной координатами $54.75^\circ - 55.16^\circ$ с.ш. и $82.66^\circ - 83.37^\circ$ в.д. (рис. 1). Параметры сеток в экспериментах с усвоением данных: $N = 25$, $N_t = 720 \times 5$, $T = 24 \times 3600$. Для таких параметров расчет 24 часов модельного времени на настольном компьютере средних характеристик занимает примерно 2 часа.

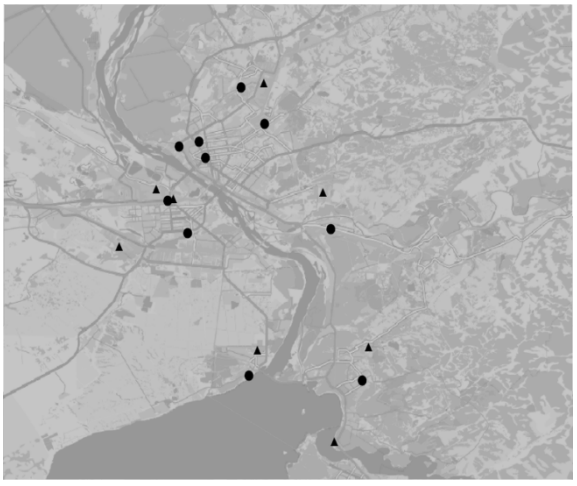


Рис. 1. Расположение основных источников (треугольники) и постов мониторинга (круги)

Для описания механизмов трансформации использована модификация схемы из [9], содержащая 22 вещества и 20 химических реакций. Скорости фотохимических реакций зависят от времени суток.

В качестве информации о расположении источников $\bar{r}$ использовались данные о городских ТЭЦ и котельных (рис. 1, отмечены треугольниками). Все источники считались одинаковыми с постоянной мощностью по времени и выбросами CO, NO, SO_2. С заданным $\bar{r}$ решалась прямая задача для генерации «точного значения» полей концентраций примесей $\bar{\phi}$. Измерения концентраций CO_2, SO_2, O_3, NO_2, проводятся с шагом в 2 минуты на 9ти пунктах мониторинга города (рис. 1, отмечены кругами) [10].

Результаты

По отношению к задачам обратного моделирования химические вещества можно разделить на несколько пересекающихся множеств: вещества, которые выбрасываются источниками, вещества концентрации которых измеряются, и «ненаблюдаемые вещества».

На рис. 2 представлен результат усвоения данных, «точное решение» и результат без усвоения в сценарии для города Новосибирска для вещества из группы «ненаблюдаемых» (HCHO) в один из моментов времени.

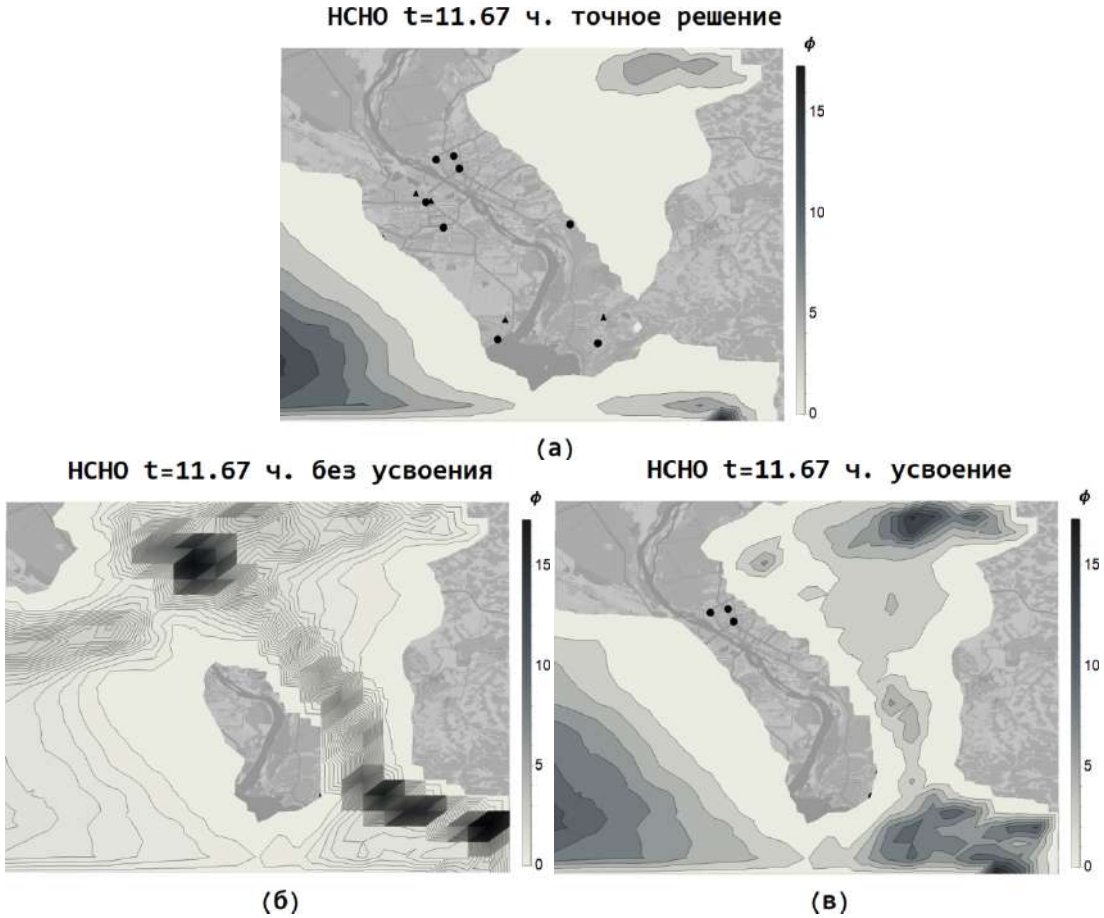
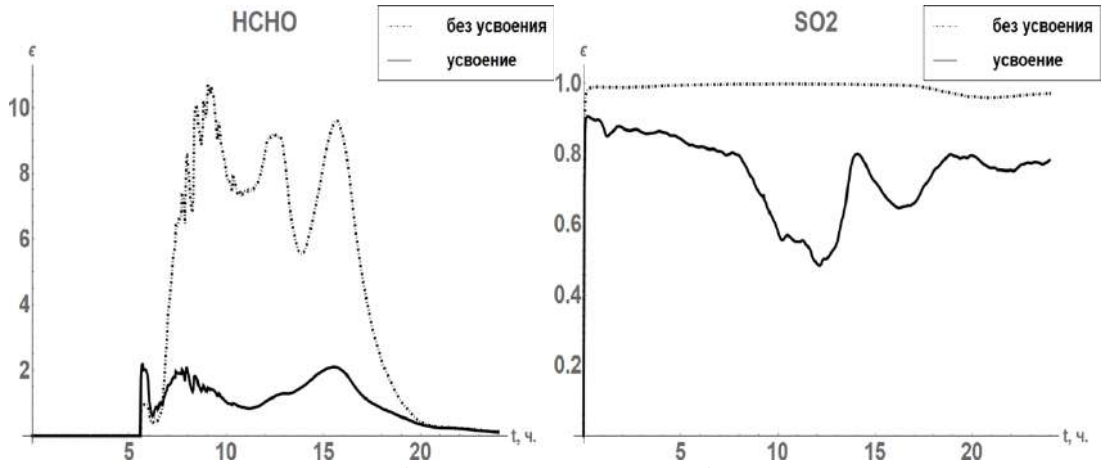


Рис. 2. Сравнение «точного решения» (а) с решением без усвоения (б) и с решением с усвоением данных (в)

На рис. 3 представлены относительные ошибки для вещества из группы «ненаблюдаемых» (HCHO) и вещества, которое одновременно и выбрасывается и «наблюдается» (SO_2).



а) б)

Рис. 3. Сравнение относительных ошибок для решений с усвоением данных и без него для различных химических веществ: а) для HCHO, б) для SO_2

Обсуждение

Анализируя рис. 2, можно сделать вывод, что качественно решение с усвоением данных наблюдений лучше соответствует «точному решению», нежели решение без усвоения. Количественные оценки сходимости алгоритмов (рис. 3) подтверждают выводы, полученные качественно при рассмотрении рис. 2. Можно также отметить, что ошибка в «ненаблюдаемом» HCHO начинает возрастать после «восхода солнца» в 5 часов, когда «запускаются» фотохимические реакции. Для «выбрасываемого» и «наблюдаемого» вещества SO_2 связь между «восходом солнца» и поведением ошибки не возникает.

Таким образом, можно заключить, что в рассмотренном численном эксперименте рассмотренный алгоритм усвоения оказался более эффективным, чем алгоритмом без усвоения данных.

Заключение

Таким образом, усвоение данных сети мониторинга позволяет улучшить качество моделирования. Используя схему расщепления, можно построить вычислительно эффективный алгоритм для усвоения данных контактных измерений для моделей конвекции-диффузии-реакции, способный при небольших разрешениях сеток работать в реальном времени на вычислительных машинах средних характеристик, что важно, например, при проведении полевых экспериментов.

Благодарности

Разработка новой модификации прямого алгоритма усвоения данных выполнена в рамках темы госзадания ИВМиМГ СО РАН № 0315-2016-0004, построение сценария для моделирования, адаптация алгоритма к условиям города Новосибирска и численные эксперименты выполнены при поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках научного проекта № 17-41-543309.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bocquet M., Elbern H., Eskes H., Hirtl M., Carmichael G.R., Flemming J., Inness A., Pagowski M., Cama, et al. Data assimilation in atmospheric chemistry models: current status and future prospects for coupled chemistry meteorology models // Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, -2014. -Vol. 14.- P. 32233-32323.

2. Penenko A., Penenko V., Tsvetova E., Grishina A., Antokhin P. Sequential Variational Data Assimilation Algorithms at the Splitting Stages of a Numerical Atmospheric Chemistry Model // In: Large-Scale Scientific Computing. Springer International Publishing.- 2018.-P. 536-543.

3. Penenko A.V., Penenko V.V., Tsvetova E.A. Sequential data assimilation algorithms for air quality monitoring models based on a weak-constraint variational principle // Numerical Analysis and Applications. -2016. -Vol. 9. -P. 312-325.

4. Penenko A.V. Consistent Numerical Schemes for Solving Nonlinear Inverse Source Problems with Gradient-Type Algorithms and Newton-Kantorovich Methods // Numerical Analysis and Applications. - 2018.-Vol. 11. -P. 73-88.

5. Penenko V.V., Tsvetova E.A., Penenko A.V. Variational approach and Euler's integrating factors for environmental studies // Computers & Mathematics with Applications. - 2014. - Vol. 67. - P. 2240-2256.

6. Hesstvedt E., Hov O., Isaksen I.S.A. Quasi-steady-state approximations in air pollution modeling: Comparison of two numerical schemes for oxidant prediction // International Journal of Chemical Kinetics. - 1978.-Vol. 10.-P. 971-994.

7. Пененко А. В., Гришина А. А. Численное исследование алгоритмов оценки источников для модели трансформации примесей в атмосфере // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 1. – С. 136–140.

8. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X.Y., Wang W., Powers J.G. A Description of the Advanced Research WRF Version 3, Boulder, Colorado, USA, 2008.

9. Stockwell W.R. Comment on Simulation of a reacting pollutant puff using an adaptive grid algorithm by R.K. Srivastava et al. // Journal of Geophysical Research. - 2002. - Vol. 107.- P. 4643-4650.

10. Департамент природных ресурсов и охраны окружающей новосибирской области. О состоянии и об охране окружающей среды Новосибирской области в 2015 году, Новосибирск, Государственный доклад 2016. [Online]. http://www.nso.ru/sites/test.new.nso.ru/wodby_files/files/wiki/2014/01/korrektura_gosdoklad-2015.compressed.pdf.

© А. В. Пененко, А. В. Гочаков, Ж. С. Мукатова, П. Н. Антохин, 2018

УДК 519.6:551.588.74

АЛГОРИТМЫ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ПРОДОЛЖЕНИЯ В ПРИЛОЖЕНИЯХ К ПРОБЛЕМАМ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

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

Представлен новый подход к решению условно-корректных и обратных задач, возникающих при моделировании процессов в Земной системе. Здесь этот подход применяется к одному классу задач, так называемым задачам продолжения. Такие задачи возникают, например, при решении задач распространения тепла, влаги и других субстанций в почве. Математически они описываются уравнениями конвекции-диффузии -реакции. Их специфика такова, что имеются два краевых условия и данные наблюдений на верхней вертикальной границе и отсутствуют условия на нижней границе. Предложены корректные алгоритмы для решения задач продолжения с использованием вариационных принципов со слабыми ограничениями и концепции сопряженных интегрирующих множителей в сочетании с методами декомпозиции и расщепления.

Ключевые слова: условно-корректные и обратные задачи, задачи продолжения, корректные алгоритмы, вариационный принцип, сопряженные интегрирующие множители.

ALGORITHMS OF CONTINUATION INVERSE PROBLEMS IN APPLICATIONS TO ENVIRONMENTAL PROBLEMS

Vladimir V. Penenko
Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Professor, Head of Laboratory, phone: (383)330-61-52, e-mail: penenko@sscc.ru

A new approach to solving the conditionally correct and inverse problems arising in the modeling of processes in the Earth's system is presented. Here, this approach is applied to one class of problems, the so-called continuation problems. Such problems arise, for example, in solving the problems of heat, moisture and other substances in the soil. Mathematically, they are described by the equations of convection-diffusion-reaction. Their specificity is such that there are two boundary conditions and observational data at the upper boundary and there are no conditions on the lower boundary. We propose correct algorithms for solving continuation problems using variational principles with weak constraints and the concept of adjoint integrating factors in combination with decomposition and splitting methods.

Key words: conditionally correct and inverse problems, continuation problems, correct algorithms, variational principle, adjoint integrating factors.

Здесь мы рассматриваем некоторые аспекты решения задач динамики климата и качества окружающей среды в системе Земля при учете совместных воздействий природных и техногенных факторов. Для решения задач природоохранного прогнозирования используются математические модели геофизической гидротермодинамики и процессов переноса и трансформации различных

субстанций в жидком и газо-аэрозольном состояниях. Фундаментальные элементы в этих моделях исследуемых процессов представляют уравнения конвекции-диффузии-реакции в 4D пространственно-временных областях [1-3].

В задачах такого класса приходится работать в условиях неопределенности в моделях процессов, во внутренних и внешних источниках воздействий, в оценках текущего состояния природной среды и в доступных данных наблюдений. Для объединения всех этих объектов в технологии математического моделирования мы используем вариационные принципы со слабыми ограничениями.

Задачи продолжения сформулированы, например, в [4-6]. Они широко используются в различных формулировках для решения фундаментальных и прикладных задач. Здесь представлен новый подход к решению условно-корректных и обратных задач, возникающих при моделировании процессов в Земной системе. Такие задачи возникают, например, при исследовании процессов распространения тепла, влаги и других субстанций в почве.

В рамках развиваемого нами вариационного подхода естественно объединяются основные и сопряженные задачи и задачи продолжения, позволяющие построить условно-корректные прямые и обратные задачи и методы их решения по заданным целевым критериям в условиях недостатка информации.

Для наглядности, продемонстрируем системную организацию вариационных методов последовательного продолжения с использованием концепции сопряженных интегрирующих множителей и техники конечных элементов на примере типичной постановки одномерных задач рассматриваемого класса.

Сформулируем следующую задачу продолжения на примере уравнения конвекции-диффузии-реакции:

$$L\varphi \equiv -\frac{\partial}{\partial x}\mu\frac{\partial \varphi}{\partial x} + u\frac{\partial \varphi}{\partial x} + d\varphi = f(x) + r(x),\ 0 \le x \le 1 \qquad (1)$$

с начальными условиями типа Коши при $x = 0$:

$$\varphi(0) = q_0, \qquad (2)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = q_1\ . \qquad (3)$$

Здесь $\varphi(x) \in Q(D) \subset L_2(D)$ - функции состояния исследуемого процесса. Обозначим через $\mathbf{Y} = \{\mu, u, d, f, q_0, q_1\}$ совокупность функциональных параметров модели процессов (1)-(3) в области $D = \{0 \le x \le 1\} : \mu(x) > 0$ - коэффициент диффузии, $u(x)$ -скорость конвективного переноса. $f(x)$ -функция источников, q_0, q_1-заданные значения функций на границе области $x = 0$; $r(x)$ - функция неопределенности, подлежащая определению при анализе данных измерений.

Для построения численных схем для задачи (1)-(3) и алгоритмов для их реализации будем исходить из определения обобщенного решения

$$I(\varphi,v)=\int_0^1\left(L\varphi-f\right)vdx=0\,, \tag{4}$$

где $v(x)$- произвольная достаточно гладкая функция, определенная в области $D:\left\{v(x)\in Q^*(D)\subset L_2(D)\right\}$.

Далее, на основе уравнений (1)-(4) сформулируем вариационный принцип и воспользуемся концепцией сопряженных интегрирующих множителей. Опишем кратко основные положения этого подхода применительно к задачам продолжения:

$$0=\int_0^l\left(L\varphi-f\right)vdx=\int_0^l\left(L^*v\varphi\right)dx-\int_0^l fvdx+\left(A\varphi,v\right)\Big|_0^l=0,\ 0\le l\le 1. \tag{5}$$

Здесь l некоторая текущая точка области D , L^* оператор, сопряженный по отношению к оператору L в (1), $\left(A\varphi,v\right)$ билинейная относительно φ,v форма, которая получается в результате интегрирования по частям в (4), (5) с учетом условий (2), (3).

Определим в области D конечно-элементную структуру вида:

$$\omega_x^h=\left\{\left[x_{i-1},x_i\right],\ x_i=x_{i-1}+\Delta x_i,\ i=\overline{1,n},\ x_0=0,x=1\right\}\ . \tag{6}$$

Относительно функций $\varphi(x)$предположим, что на границах конечных элементов в (6) выполняются условия непрерывности:

$$\varphi_{i-0}=\varphi_{i+0};\ \left[\mu\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right]_{i-0}=\left[\mu\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right]_{i+0},i=\overline{1,n-1}\ . \tag{7}$$

Выбор внутренней структуры области ω_x^h в нашем распоряжении, в частности, точки l в определении (5) могут совпадать с точками x_i в (6). Будем считать, что интервалы $\Delta x_i=\left[x_i-x_{i-1}\right],i=\overline{1,n}$ достаточно малые, чтобы в случае переменных параметров $\left\{\mu,u,d,f\right\}$ их можно было аппроксимировать с достаточной точностью в пределах интервалов Δx_i объектами $\left\{\mu,u,d,f\right\}_{i-1/2},i=\overline{1,n}$ с выполнением условий (7). Для удобства записи в пределах интервалов Δx_i будем опускать обозначения индексов $i+1/2$.

Сначала определим конечно-элементный аналог соотношений (5), (6) в соответствии со структурой области ω_x^h и схемой декомпозиции функционалов (4):

$$0=\int_0^1 \left(L\varphi - f\right)v dx = \sum_{i=1}^{n}\int_{x_{i-1}}^{x_i}\left(L\varphi - f\right)v dx = 0\,. \tag{10}$$

Так как уравнение (1) выполняется в каждой точке области D, то из (10) получаем систему уравнений в интервалах $\left[x_{i-1}, x_i\right] \subset \omega_x^h,\ i=\overline{1,n}$:

$$0=\int_{x_{i-1}}^{x_i}\left(L\varphi - f\right)v dx = \int_{x_{i-1}}^{x_i}\left(L^* v\varphi\right)dx - \int_{x_{i-1}}^{x_i} fv dx + \left(A\varphi, v\right)\Big|_{i-1}^{i} = 0. \tag{11}$$

Если в (10), (11) функции v выбрать из пространства решений сопряженных уравнений

$$L^* v = 0,\ x_{i-1} \le x \le x_i,\ i=\overline{1,n}\,, \tag{12}$$

то из (11) получим совокупность соотношений баланса

$$\left(A\varphi, v\right)\Big|_{i-1}^{i} - \int_{x_{i-1}}^{x_i} fv dx = 0 \tag{13}$$

типа законов сохранения в каждой ячейке сеточной области ω_x^h и в целом на интервале $0 \le x \le 1$. Здесь, в (11), (13)

$$\left(A\varphi, v\right)\Big|_{i-1}^{i} = \left[\mu_{i-1/2}\left(-\frac{\partial\varphi}{\partial x}v + \varphi\frac{\partial v}{\partial x} + \left(a/\mu\right)_{i-1/2}\varphi v\right]_{i-1}^{i} = 0\right. \tag{14}$$

билинейная форма, которая определяется в результате интегрирования в (11).

Для удобства дальнейшего изложения представим системы уравнений (12), (13) в виде:

$$L^* v \equiv \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \tilde{a}\frac{\partial v}{\partial x} - \tilde{d}v = 0,\ x_{i-1} \le x \le x_i,\ i=\overline{1,n}\ , \tag{15}$$

$$\left(-v\frac{\partial\varphi}{\partial x} + w\varphi\right)_i = \left(-v\frac{\partial\varphi}{\partial x} + w\varphi\right)_{i-1} + \Gamma_{i-1/2} f_{i-1/2},\ i=\overline{1,n}\,. \tag{16}$$

Здесь приняты следующие обозначения:

$$\left\{\tilde{a} = a/\mu,\ \tilde{d} = d/\mu\right\}_{i-1/2};\ w = \frac{\partial v}{\partial x} + \tilde{a}v,\ i=\overline{1,n}\,,$$

$$\Gamma_{i-1/2}^{(\alpha)} = \frac{1}{\mu_{i-1/2}}\int_{x_{i-1}}^{x_i} v^{(\alpha)}(x)dx,\ \ \alpha=\overline{1,3}\,.$$

Опишем метод последовательного решения задачи продолжения в области (6). Предположим, что на интервалах $\Delta x_i = [x_i - x_{i-1}], i = \overline{1,n}$, начиная с условий (2), (3), известны условия при $x = x_{i-1}$. Требуется найти значения функций $\left\{\varphi_i, \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_i, f_{i+1/2}\right\}, i = \overline{1,n}$. В этой постановке нужно решить три сопряженные задачи с заданными краевыми условиями:

$$I. \quad L^* v_i^{(1)} = 0; \quad v_i^{(1)} = 0, \quad w_{i-1}^{(1)} = 1,$$

$$II. \quad L^* v_i^{(2)} = 0; \quad v_{i-1}^{(2)} = 1, \quad w_i^{(2)} = 0,$$

$$III. \quad L^* v_i^{(3)} = 0; \quad v_i^{(3)} = 1, \quad w_{i-1}^{(3)} = 1.$$

Это корректные задачи с кусочно-постоянным параметрами в пределах каждого интервала. Они решаются аналитически. Метод решения таких задач описан в [3].

После решения этих сопряженных задач получаем систему трех уравнений с искомыми функциями $\left\{\varphi_i, \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_i, f_{i+1/2}\right\}, i = \overline{1,n}$ при заданных $u_0, \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_0$:

$$\left[w^{(1)}(x)\right]_i \varphi_i = v^{(1)} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_{i-1} + \varphi_{i-1} + f_{i-1/2} \Gamma_{i-1/2}^{(1)}$$

$$-v_i^{(2)} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_i = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_{i-1} + \varphi_{i-1} w_{i-1}^{(2)} + f_{i-1/2} \Gamma_{i-1/2}^{(2)}$$

$$-v_i^{(2)} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_i + w_i^{(3)} \varphi_i = \left[v^{(3)} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right) + \varphi \right]_{i-1} + f_{i-1/2} \Gamma_{i-1/2}^{(3)}$$

$$i = \overline{1,n} \ .$$

Выводы. Разработаны корректные алгоритмы для решения некорректных задач переноса тепла, влаги и других субстанций в почве для различных категорий землепользования. Алгоритм в одномерном варианте легко распространяется на многомерный случай при использовании схем расщепления.

Работа выполняется в рамках темы государственного задания ИВМиМГ СО РАН № 0315-2016-0004 и гранта РФФИ №17-01-00137-а.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пененко В. В., Цветова Е. А., 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.

2. Пененко В. В., Цветова Е. А., Пененко А. В. Методы совместного использования моделей и данных наблюдений в рамках вариационного подхода для прогнозирования погоды и качества состава атмосферы // Метеорология и гидрология 2015, №6, 13-24.

3. Penenko V.V., Tsvetova E.A., Penenko A.V. Variational approach and Euler's integrating factors for environmental studies// Computers and Mathematics with Applications.-2014.- Vol.67.- Issue 12.- P. 2240–2256.

4. Douglas J. A numerical Method for Analytic Continuation. Boundary Problems Differential Equations. Madison: Univ. Wisconsin Press. 1960.

5. Кабанихин С.И. Обратные и некорректные задачи. – Новосибирск: Сибирское научное издательство, 2009. -456 с.

6. A. Ismail-Zadeh, A. Korotkii, I. Tsepelev. Data-Griven Numerical Modelling in Geogynamics: Methods and Applications. Springer, 2016. – 105 P.

© В. В. Пененко, 2018

УДК 504.064.2

КОНЦЕНТРАЦИИ БЕНЗ(А)ПИРЕНА В АТМОСФЕРЕ Г. КРАСНОЯРСКА В ЛЕТНИЙ И ЗИМНИЙ ПЕРИОДЫ

Сергей Владимирович Михайлюта
Ассоциация экологических расследований, 660098, Россия, г. Красноярск, ул. 9 Мая, 69-106, кандидат технических наук, руководитель, тел. (923)280-47-80, e-mail: mikhailuta@gmail.com

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

Павел Геннадьевич Гудовский
Ассоциация экологических расследований, 660098, Россия, г. Красноярск, ул. 9 Мая, 69-106, председатель, тел. (905)976-13-46, e-mail: ookrkr@mail.ru

Представлены результаты измерений концентраций бенз(а)пирена в 10 пунктах на территории г. Красноярска в летний и зимний периоды. Пункты для отбора проб воздух выбирались в зонах расположения автономных источников теплоснабжения и в районах крупнейших автомагистралей г. Красноярска. Показано влияние летнего и зимнего метеорологических режимов на регистрируемые значения концентраций. Предложена гипотеза, объясняющая соотношение вкладов в загрязнение приземного слоя атмосферы в г. Красноярске в системе промышленные предприятия-автотранспорт.

Ключевые слова: атмосферный пограничный слой, загрязнение атмосферы, источники загрязнения, концентрации, загрязняющие вещества, автономные источники теплоснабжения.

BENZO(A)PYRENE CONCENTRATIONS IN AN URBAN AIR OF KRASNOYARSK IN SUMMER AND WINTER

Sergey V. Mikhailuta
Environmental inVestigation Association, 69-106, 9 Maya St., Krasnoyarsk, 660098, Russia, Ph. D., Chief Executive Officer, phone: (923)280-47-80, e-mail: mikhailuta@gmail.com

Anatoly A. Lezhenin
Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)330-64-50, e-mail: lezhenin@ommfao.sscc.ru

Pavel G. Gudovsky
Environmental inVestigation Association, 69-106, 9 Maya St., Krasnoyarsk, 660098, Russia, Chairman, phone: (905)976-13-46, e-mail: ookrkr@mail.ru

Observed data of benzo(a)pyrene concentrations in 10 points in the territory of Krasnoyarsk during the summer and winter. Air pollution samples were collected in of household coal combustion areas and in areas of the largest highways of Krasnoyarsk. Influence of the summer and winter meteorological conditions on urban air pollution has been shown. The hypothesis explaining a ratio between low and high levels sources of air pollution is offered.

Key words: atmospheric boundary layer, urban air pollution, industrial emissions.

Введение

Проблема загрязнения атмосферного воздуха – актуальная проблема крупных городов России. Часто первенство среди источников загрязнения необоснованно приписывают автотранспортным источникам [1]. При оценке соотношения вкладов среди источников загрязнения атмосферного воздуха необходимо учитывать не валовые показатели выбросов, а парциальные вклады по каждому из рискоформирующих показателей. Кроме этого, доминирующим фактором, определяющим степень перераспределения вкладов в загрязнение приземного слоя атмосферы от высоких и низких источников, является состояние пограничного слоя атмосферы, а именно развитость слоя перемешивания и степень обмена между верхним и нижним слоем атмосферы. В данной работе на примере бенз(а)пирена показано соотношение вкладов в загрязнение приземного слоя атмосферы от низких и высоких источников в г. Красноярске.

Объекты и методы исследования

Бенз(а)пирен - химическое вещество первого класса опасности с ярко выраженным канцерогенным действием. Является индикатором наличия в воздухе целого класса канцерогенных ароматических углеводородов [2]. В атмосферу поступает с частицами пыли и сажи, которые образуются при сгорании нефтяного мазута, сланцевых и каменноугольных смол. Также, бенз(а)пирен выделяется в атмосферу на предприятиях при производстве резинотехнических изделий, при сжигании твердого топлива на мелких котельных за счет его неполного сгорания. В период летнего и зимнего периодов на территории г. Красноярска выполнялся отбор и анализ проб бенз(а)пирена. Пункты для отбора проб выбирались вблизи крупных автомагистралей города (рис. 1) и в зонах с автономными источниками теплоснабжения (рис. 2).

Рис. 1. Пример пункта наблюдения в районе
крупных автомагистралей г. Красноярска

Рис. 2. Пример пункта наблюдения в районе расположения автономных источников теплоснабжения в г. Красноярске

Было выбрано пять пунктов в районе крупных автомагистралей и пять пунктов в зонах с автономными источниками теплоснабжения. Наблюдения и отбор проб выполнялся в летний период и в зимний, отапливаемый период. В каждом пункте был организован отбор проб с интервалом в 2 часа в течение суток. Всего за период исследования в 2017 году было отобрано 200 проб (100 в летний период и 100 – в зимний). Анализ проб выполнялся методами высокоэффективной жидкостной хроматографии в аккредитованной лаборатории Регионального центра по стандартизации метрологии и испытаний в Красноярском крае.

Результаты и обсуждение

По результатам исследования было обнаружено, что все пункты в районе автомагистралей демонстрируют классический суточный ход концентраций для летнего периода [3] с минимум концентраций в дневное время и повышением – в ночное (рис. 3, 4).

Напротив, пункты, расположенные в зонах с автономными источниками теплоснабжения, пос. Торгашено, пос. Суворовский, микрорайон Покровка – зоны с печным отоплением и минимумом автотранспорта, в летний период (в период, когда отопление не используется) демонстрируют атипичный суточный ход концентраций (рис. 5, 6).

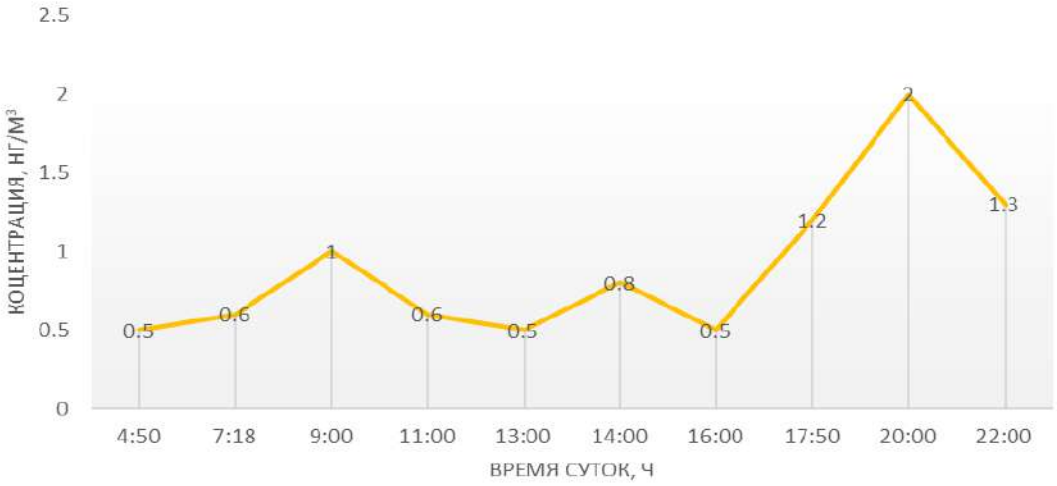


Рис. 3. Суточный ход концентраций бенз(а)пирена в районе крупной автомагистрали на ул. Малиновского, 1

Рис. 4. Суточный ход концентраций бенз(а)пирена в районе крупной автомагистрали на ул. им. П. Железняка, 6А

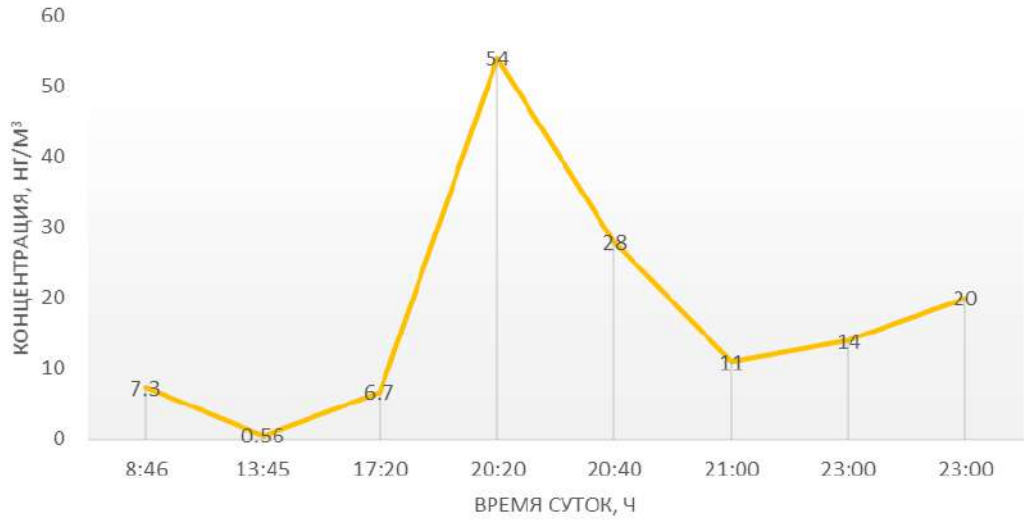


Рис. 5. Суточный ход концентраций бенз(а)пирена в поселке Торгашено, ул. Шиферников, 25

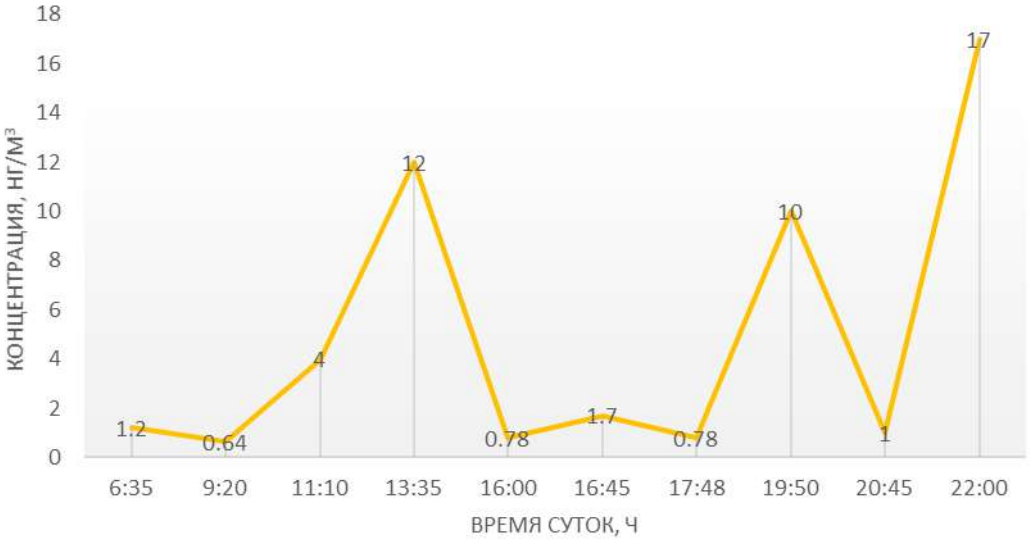


Рис. 6. Суточный ход концентраций бенз(а)пирена
на ул. Линейная, 1 в микрорайоне Покровка

Можно видеть (рис. 5, 6), что суточный ход в зонах автономных источников теплоснабжения, несмотря на летний период и отсутствие автотранспорта демонстрирует “пилообразный” ход концентраций, свидетельствующий о забросе концентраций из верхних слоев атмосферы, от высоких источников.

Взаимосвязь концентраций бенз(а)пирена в районах автомагистралей с интенсивностью транспортного потока во всех пунктах выглядит следующим образом рис. 7.

Рис. 7 показывает, что нарастающий в дневное время поток автотранспорта и, следовательно, выбросов, компенсируется уносом вертикальными потоками тепла [4, 5].

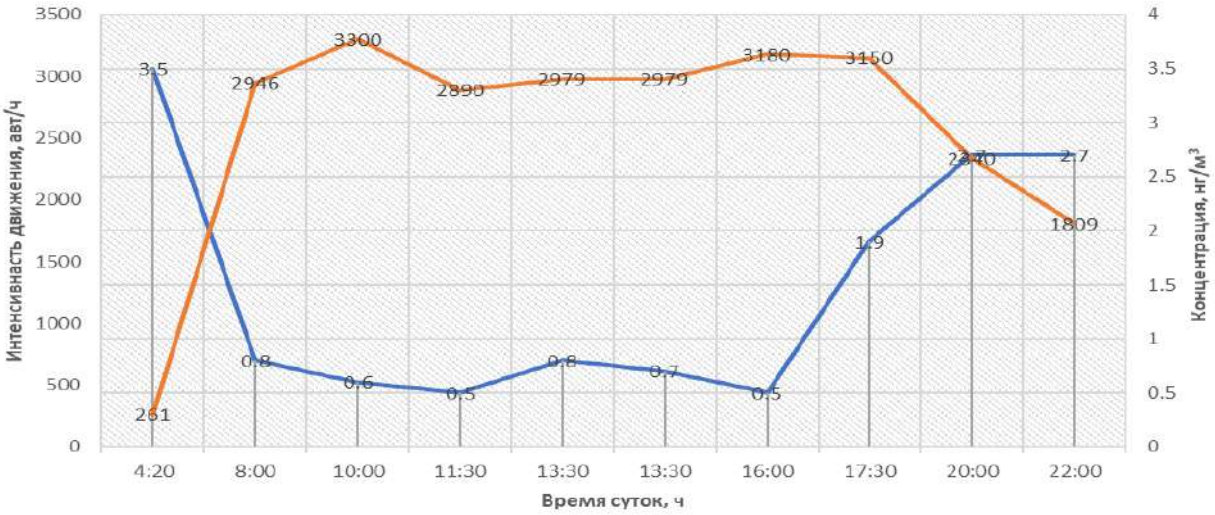


Рис. 7. Суточный траффик (авт/ч) и концентрация бенз(а)пирена
в атмосферном воздухе, ул. Брянская, 17, г. Красноярск

В зимний период происходит снижение интенсивности вертикального обмена между нижним и верхними слоями атмосферы. При этом работа предприятий теплоэнергетики и автономных источников теплоснабжения приводит к повышению выбросов бенз(а)пирена [6]. Следствием этого является и повышение концентраций бенз(а)пирена в отобранных пробах воздуха (рис.8, 9).

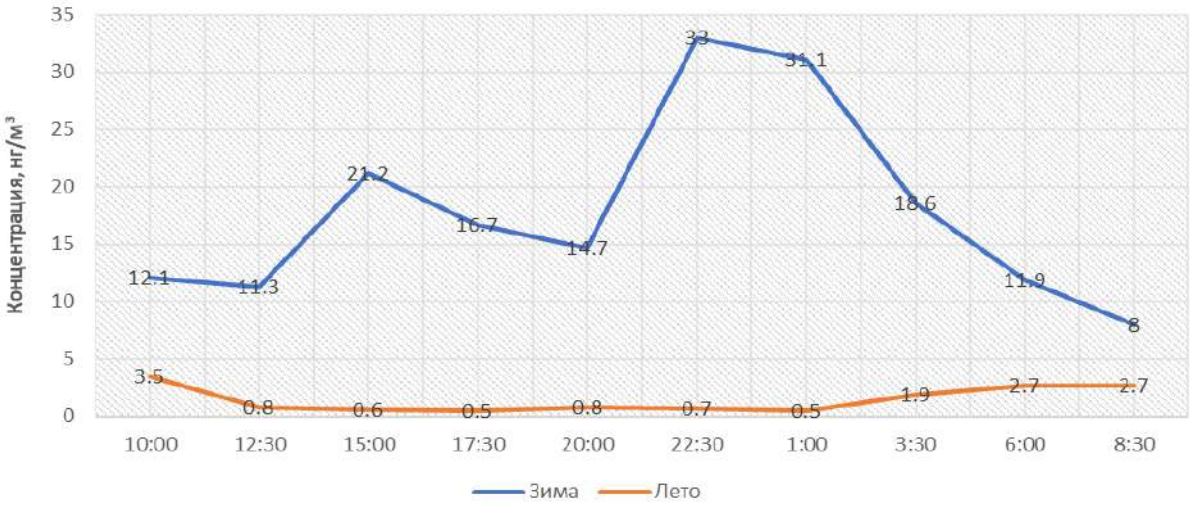


Рис. 8. Суточный ход бенз(а)пирена в районе крупной автомагистрали на ул. Брянская, 17 в зимний и летний период

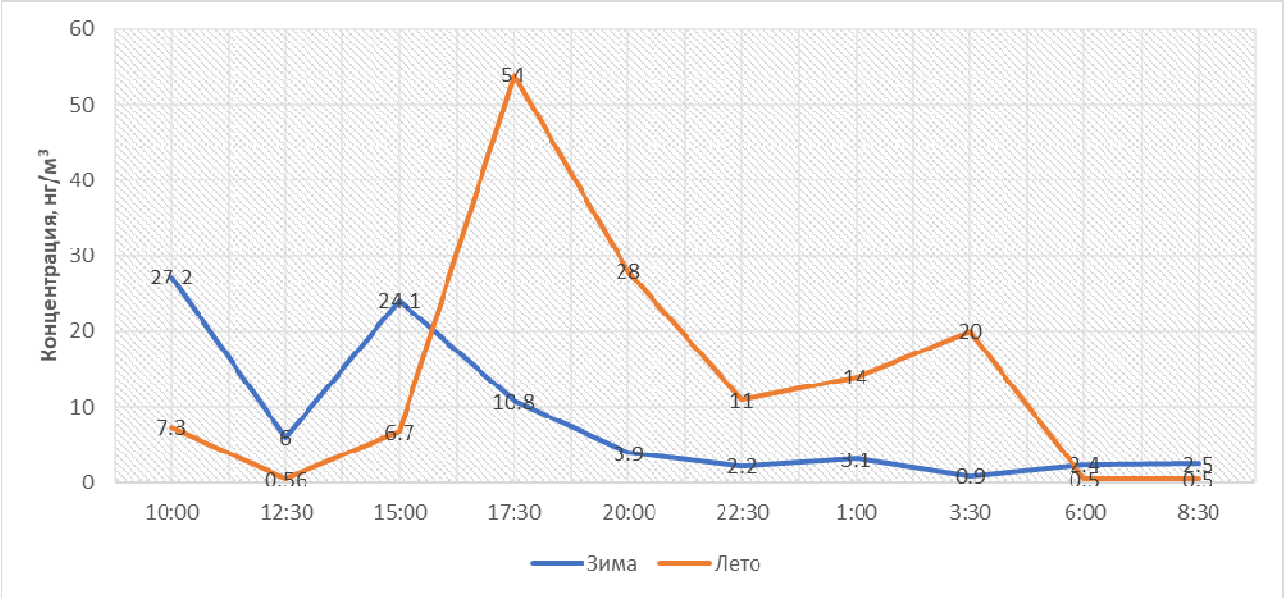


Рис. 9. Суточный ход концентраций бенз(а)пирена в поселке Торгашено, ул. Шиферников, 25м, в зимний и летний период

Можно видеть, что в зимний период времен на автомагистралях города наблюдается значительное, в среднем в 12 раз, повышение концентраций

бенз(а)пирена. При этом в зонах автономных источников теплоснабжения концентрация бенз(а)пирена в зимний период ниже, в среднем почти в 2 раза.

Такая картина перераспределения в суточном ходе бенз(а)пирена может быть связана с двумя факторами. Снижение интенсивности обмена и перемешивания между нижним и верхними слоями воздуха, при котором заброс загрязняющих веществ в зоны с автономными источниками теплоснабжения снижается, это можно видеть на рис. 9.

Повышение в 12 раз концентраций бенз(а)пирена на автомагистралях в зимний период связано на наш взгляд с тем, что районы крупных автомагистралей – это открытые широкие участки местности с перегретым у земли слоем воздуха, что в свою очередь, способствует забросу загрязняющих веществ от высоких источников.

Заключение

Выявленный эффект заброса загрязняющих веществ в приземный слой атмосферного воздуха городских территорий от высоких источников имеет необходимо учитывать при реализации программ по мониторингу и оценке состояния и загрязнения воздушной среды, а также при планировании мероприятий по уменьшению негативного воздействия со стороны высоких промышленных источников загрязнения.

Работа поддержана грантом РФФИ, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности № 16-41-240788.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михайлюта С., Кучеренко А., Леженин А. Проблемы оценки структуры выбросов в системе промышленные предприятия – автотранспорт // Экология и промышленность России. – 2017. – № 4. – С.54 – 58. DOI:10.18412/1816-0395-2017-4-54-58

2. Перечень и коды веществ, загрязняющих атмосферный воздух. – СПб. – 2008. – 438 с.

3. Ландсберг Г.Е. Климат города. – Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – 248 с.

4. Mayer H., Haustein Ch., Matzarakis A. Urban air pollution caused by motor-traffic. In: Air Pollution VII. WIT PRESS. Advances in Air Pollution. – 1999. – 6. – P. 251-260.

5. Hargreaves P., Leidi A., Grubb H., Howe M., Mugglestone Local and seasonal variations in atmospheric nitrogen dioxide levels at Rothamsted, UK, and relationships with meteorological conditions // Atmospheric Environment. – 2000. – Vol. 34. – P. 843-853.

6. Mikhailuta, S.V., Lezhenin A.A., Black Carbon, Soot and Dust Particles in the Atmosphere of an Industrial City // Химия в интересах устойчивого развития. – 2016. – Т. 24. – .С. 447–453.

© С. В. Михайлюта, А. А. Леженин, П. Г. Гудовский, 2018

УДК 519.6:556

О МЕЖФАЗНОМ ДИНАМИЧЕСКОМ ОБМЕНЕ В ГЕТЕРОГЕННОЙ ПРИРОДНОЙ СИСТЕМЕ

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.sscc.ru

Обсуждаются формулировки математических моделей и постановки задач для исследования поведения многофазных систем в природных условиях. В частности, здесь рассматривается гидродинамика системы жидкость-твердые частицы в контексте возможных всплытий газогидратов со дна озера Байкал. Изучаются параметризации межфазного динамического обмена. Для решения систем уравнений разработаны численные алгоритмы, основанные на методе расщепления и использовании дискретно-аналитических аппроксимаций с сопряженными интегрирующими множителями.

Ключевые слова: математическое моделирование, многофазные системы, система жидкость-твердые частицы, межфазный динамический обмен.

ON DYNAMIC INTERFACIAL EXCHANGE IN A HETEROGENEOUS NATURAL SYSTEM

Elena A. Tsvetova
Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Leading Researcher, phone: (383)330-61-52, e-mail: e.tsvetova@ommgp.sscc.ru

Formulations of mathematical models and statements of problems for investigating the behavior of multiphase systems under natural conditions are discussed. In particular, here we consider the hydrodynamics of the liquid-solid system in the context of possible surges of gas hydrates from the bottom of Lake Baikal. Parametrizations of the interphase dynamic exchange are studied. To solve the systems of equations, numerical algorithms based on the splitting method and the use of discrete-analytical approximations with adjoint integrating factors are developed.

Key words: numerical simulation, multiphase flows, two-phase liquid-solid system, interphase dynamic exchange.

По решению ЮНЕСКО озеро Байкал, содержащее более 23 000 км^3 чистой пресной воды, признано объектом Всемирного наследия. Поэтому после того, как были открыты значительные объемы газогидратов на дне и в донных отложениях озера, а также подводные выходы газов, возник вопрос об изучении поведения многофазных сред в природных условиях глубоких водоемов.

Исследования многофазных систем нашли широкое отражение в научной и технической литературе в основном для проблем замкнутых объемов, таких, например, как колонки, химические и биологические типы реакторов, трубопроводы различных диаметров и т.д. Однако очевидно, что существует некая разница между замкнутым объемом и открытыми природными средами, таки-

ми как океаны, моря и крупные глубокие водные объекты, где также встречаются подводные выходы газов и залежи гидратов. И такую разницу, как нам кажется, нужно, по возможности, оценить. Этому и посвящен цикл исследований [1-3], который продолжает данная работа.

Специфика озера Байкал состоит в том, что из-за больших глубин (максимальная более 1600 м) газогидраты могут сохраняться в воде, не подвергаясь разложению, не только на дне при больших давлениях, но также и в водной толще, до глубин примерно 380 м [4]. В натурных экспериментах, выполненных с борта подводной станции «Мир», было показано, что гидраты могут также и образовываться в толще вод из газа и воды и существовать не только в виде кристаллов, но и гидратного порошка и пены [5].

Существует ещё и другая специфическая черта озера, также связанная с его глубиной, которая, тем не менее, вытекает из общих законов физики. Речь идет об изменении температуры максимальной плотности, которая регулирует процессы естественного и вынужденного вертикального водообмена. Дело в том, что из-за влияния давления температура максимальной плотности понижается с 4 градусов С на поверхности примерно на 0,21 градуса каждые 100 м. В результате этого дважды в год весной и осенью процессы естественного перемешивания в озере ограничиваются верхними 300 метрами, не затрагивая всю остальную толщу вод. Глубины между 300 и 400 м являются в некотором смысле критическими: здесь малейшие изменения в теплосодержании могут вызвать существенные гидродинамические последствия из-за разложения гидратов, если они там окажутся, поскольку разложение происходит с потреблением тепла [3].

Одним из преимуществ математического моделирования является возможность изучения отдельных аспектов поведения физической системы, используя различные постановки задач и компоновки математических моделей. В данной работе мы ограничимся случаем рассмотрения только гидродинамических аспектов моделирования двухфазной системы «жидкость-твердые частицы» в трехмерной постановке. Обмен массами, термодинамические и химические процессы здесь не будут приниматься во внимание, чтобы рассмотреть в отдельности только динамические взаимодействия фаз.

Математическая модель, которую мы будем использовать для моделирования многофазных потоков, сформулирована в так называемой Эйлер-Эйлер формулировке. В ней фазы предполагаются взаимопроникающими континуумами. Объемная доля каждой фазы в единичном объеме двухфазной системы обозначим как $\varepsilon_k; k = \{l, h\}$, причем $\varepsilon_l + \varepsilon_h = 1$. Полагаем, что вода является несущей средой и $\varepsilon_l \gg \varepsilon_h$. В этой методике нет необходимости следить за подробным учетом границ между фазами.

Для каждой фазы решается полный набор из уравнений для моментов и уравнения неразрывности. Объединение фаз достигается посредством общего давления для двух фаз и описанием межфазного обмена.

Рассматриваются две системы уравнений сохранения массы и моментов для двух сред: вода и твердые частицы. В качестве твердых частиц в этой работе будем рассматривать кристаллы некого вещества заданных размеров, которые не подвергаются никаким изменениям во время процесса, $\rho_h = const$.

Уравнения неразрывности для описания балансов масс

$$\frac{\partial(\rho_k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_k u_k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_k v_k)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_k w_k)}{\partial z} = S_k, \quad k = l, h. \tag{1}$$

Уравнения для сохранения моментов количества движения имеют вид:

$$\frac{\partial(\rho_k u_k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_k u_k u_k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_k v_k u_k)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_k w_k u_k)}{\partial z} = -\varepsilon_k \frac{\partial p}{\partial x} \pm F_x + F_x^C + \rho_k D_x(u_k),$$

$$\frac{\partial(\rho_k v_k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_k u_k v_k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_k v_k v_k)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_k w_k v_k)}{z} = -\varepsilon_k \frac{\partial p}{\partial y} \pm F_y + F_y^C + \rho_k D_y(v_k), \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho_k w_k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_k u_k w_k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_k v_k w_k)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_k w_k w_k)}{\partial z} = -\varepsilon_k \frac{\partial p}{\partial z} + \rho_k g \pm F_z + F_z^C + \rho_k D_z(w_k).$$

Здесь индексами h,l обозначены твердые и жидкие компоненты системы, $\rho_k = \varepsilon_k \tilde{\rho}_k$, $k = h,l$; $\tilde{\rho}_k$ - истинные плотности; $\tilde{\rho}_h < \tilde{\rho}_l$. Единственная разница между этими системами - это разные знаки в слагаемых, описывающих силовые взаимодействия. Положительный знак у легкой фазы, отрицательный – у тяжелой. Эффект плавучести, приводящий к скольжению легкой фазы по отношению к тяжелой, это результат объединения двух фаз при одном и том же давлении. Поскольку речь идет о природных системах, здесь имеет смысл учитывать в системах уравнений влияние силы Кориолиса $\mathbf{F}^C$.

Межфазный динамический обмен описывается с помощью параметризаций. Чаще всего рассматривают три составляющих сил взаимодействия: силы трения, сила добавленной массы и подъемная сила: $\mathbf{F} = \mathbf{F}^f + \mathbf{F}^a + \mathbf{F}^u$. Самый большой вклад у силы трения, поэтому часто учитывают только её:

$$\mathbf{F}^f = -\varepsilon_h C_f (\mathbf{u}_h - \mathbf{u}_l),$$

где C_f - коэффициент трения, который зависит от объемной доли дисперсной фазы. Вместо линейного закона можно рассмотреть квадратичную зависимость

$$\mathbf{F}^f = -\varepsilon_h \tilde{C}_f \left|\mathbf{u}_h - \mathbf{u}_l\right| (\mathbf{u}_h - \mathbf{u}_l).$$

Сила добавленной массы возникает, когда при подъеме твердые частицы ускоряются относительно жидкости и вовлекают ближайшее окружение, кото-

рое тоже начинает ускоряться вслед за примесью. Эта дополнительная сила называется «добавленная массовая сила» и рассчитывается по формуле:

$$\mathbf{F}^a = -\varepsilon_h C_a \rho_l \frac{d(\mathbf{u}_h - \mathbf{u}_l)}{dt}.$$

Коэффициент C_a соответствует объемной доле жидкости, которая ускоряется за примесью.

Подъемная сила (сила Магнуса). Если частица с твердой оболочкой движется в неоднородной жидкости, течение жидкости может вызвать вращение частиц, что, в свою очередь, может создать дополнительную силу взаимодействия, перпендикулярную основному направлению движения

$$\mathbf{F}^u = -\varepsilon_h C_u \rho_l (\mathbf{u}_h - \mathbf{u}_l) \times \left(\nabla \times \mathbf{u}_l\right).$$

Для решения систем уравнений, описанных выше, разработаны численные алгоритмы, основанные на методе расщепления и использовании дискретно-аналитических аппроксимаций с сопряженными интегрирующими множителями [6].

Для оценки чисто гидродинамических факторов влияния параметризаций межфазного обмена, рассмотрены сценарии, в которых возмущения в системе задаются площадным источником примеси на нижней границе области. Чтобы учесть специфику озера Байкал, когда истинная плотность воды также является искомой функцией, будем рассчитывать её по международному уравнению состояния в зависимости от давления и температуры. Так как в данном конкретном сценарии термодинамические факторы не учитываются (и не решается уравнение для температуры), последняя задана постоянным по времени и горизонтальным координатам типичным вертикальным распределением для зимнего сезона.

Приводятся результаты сценариев, в которых соразмеряется оценка влияния различных параметризаций и количество вычислительной работы для их реализации.

Благодарности. Работа выполняется в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН 00315-2016-004.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.

2. Modeling of hydrodynamics of water-methane heterogeneous system/ Tsvetova E.A. // Proc. SPIE - 2015. - Vol.9680.- P. 968075-1- 968075-6 .

3. Tsvetova E.A. Natural and forced under-ice convection // Proc. SPIE,- 2016. - Vol. 10035.- P. 1003568-1-1003568-6.

4. Egorov, A. V., Nigmatulin, R. I. & Rozhkov, A. N. Transformation of deep-water methane bubbles into hydrate // Geofluids, Wiley-Blackwell.- 2014.- Vol. 14.- P. 430-442.

5. Egorov, A. V.; Nigmatulin, R. I.; Rozhkov, A. N.; Sagalevich, A. M. & Chernyaev, E. S. About transformation of the deep-water methane bubbles into hydrate powder and hydrate foam// Oceanology. - 2012.-Vol. 52.- P. 194-205.

6. Penenko V.V., Tsvetova E.A., Penenko A.V. Variational approach and Euler's integrating factors for environmental studies// Computers and Mathematics with Applications.-2014. - Vol.67.- Issue 12.- P. 2240–2256.

© Е. А. Цветова, 2018

УДК 551.46

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА

Валентина Владимировна Малахова
Институт вычислительных технологий СО РАН, 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 представлены результаты математического моделирования динамики и распространения субаквальной мерзлоты на шельфе Восточной Арктики с учетом географического распределения величины геотермического потока. Получены оценки мощности слоя многолетнемерзлых пород на шельфе морей Лаптевых и Восточно-Сибирского. Глубина залегания нижней границы многолетнемерзлого слоя на шельфе составила порядка 50-700 м. Положение верхней границы мерзлоты в донных отложениях морей Восточной Арктики существенно зависит от глубины моря и содержания солей. В численном эксперименте получено, что верхняя граница мерзлых пород расположена на глубине 12 - 27 м ниже морского дна в зависимости от области шельфа. Повышенный поток тепла приводит к значительному уменьшению мощности мерзлого слоя на внешнем шельфе и в областях рифтов.

Ключевые слова: субаквальная мерзлота, многолетнемерзлые породы, Арктический шельф, газогидраты метана, зона стабильности газогидратов, геотермический градиент, поток тепла.

ESTIMATION OF SUBSEA PERMAFROST LAYER THICKNESS ON THE ARCTIC SHELF

Valentina V. Malakhova
Institute of Computational Technologies SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)330-64-50, e-mail: malax@sscc.ru

The paper presents the results of mathematical modeling of subsea permafrost dynamics and distribution on the Eastern Arctic shelf. The geographic distribution of the geothermal flow values was taken into account in this study. Estimates of the permafrost thickness on the Laptev and the East Siberian seas shelf were obtained. The depth of occurrence of the lower boundary of the frozen layer on the shelf was about 50-700 m. The position of the submarine permafrost upper boundary in bottom sediments of the seas of the Eastern Arctic substantially depends on the depth of the sea and the content of salts. It was found that the upper boundary of frozen rocks is located at a depth of 12-27 m below the seabed, depending on the shelf region. The increased heat flux leads to a significant decrease in the thickness of the submarine permafrost on the outer shelf and in the rift areas.

Key words: submarine permafrost, Arctic shelf, methane hydrates, hydrate stability zone, geothermal gradient, heat flow.

Введение

Субаквальная мерзлота шельфа Арктических морей представляет собой реликтовые континентальные мерзлые породы, которые формировались десят-

ки-сотни тысяч лет назад в периоды оледенений и отступания моря. Длительное воздействие низких атмосферных температур способствовало образованию многолетнемерзлых пород (ММП) мощностью до нескольких сотен метров. В результате повышения уровня океана, произошло затопление ММП [1]. Существование подводной мерзлоты в пределах мелководных шельфов морей Арктики создает условия для формирования газогидратных залежей при небольших водных глубинах менее 100 м [2]. Под влиянием относительно теплых и солёных морских вод мерзлые толщи медленно разрушаются, что может приводить к нарушению термобарических условий устойчивого существования газовых гидратов метана [3, 4].

Внимание к проблеме подводной мерзлоты в последние годы объясняется формированием высоких концентраций метана в морских водах и в атмосфере арктического региона [5]. Одной из причин повышенной эмиссии метана считается оттаивание многолетнемёрзлых пород и разрушение газогидратных залежей. В связи с возможным промышленным освоением шельфа наличие субаквальных мерзлых пород является также причиной возможных инженерных рисков при освоении месторождений нефти и газа арктического шельфа. На основании этого необходимо изучение мощности, термического состояния и динамики многолетнемерзлых грунтов в условиях современных климатических изменений.

Достоверные сведения, полученные на основании буровых профилей, которые доказывают наличие субаквальных мерзлоты под дном Арктических морей, имеются в ограниченном количестве [6]. Отсутствуют данные исследований, фиксирующие мощности мерзлых отложений. Для изучения состояния субаквальной криолитозоны шельфа широко используется математическое моделирование [7-9]. Исследования на основе численного моделирования показали, что реликтовая мерзлота и газовые гидраты все еще могут существовать и в настоящее время на обширных участках Арктического шельфа [1, 10].

Используемые в настоящее время численные модели значительно различаются в исходных предположениях, в выбранных схемах развития палеогеографических событий и используемых представлениях о гидрогеологических особенностях шельфа и донных отложений, давая разные оценки мощности слоя мерзлых пород. Так, мощность ММП на внутреннем шельфе моря Лаптевых может достигать порядка 200-800 м по результатам разных моделей [1, 9,10].

Проведенные ранее исследования показали, что мощность многолетнемерзлого слоя морей восточной Арктики сильно зависит от интенсивности потока тепла из земных недр [1, 10]. Так как для шельфа арктических морей данные измерений интенсивности теплового потока из недр земли практически отсутствуют, при моделировании величина потока принимается равной значениям для подобных тектонических структур других районов. При этом проводится серия расчетов с разными геотермическими потоками, заданными одинаковыми для всей области шельфа в диапазоне от 40 до 70 мВт/м^2. Для изучения

состояния ММП разломных зон и рифтовых структур учитывается значение теплового потока до 100–150 мВт/м^2 .

Особенностью данного исследования является математическое моделирование состояния многолетнемерзлых пород морей восточной Арктики и зоны стабильности гидратов метана с учетом данных интенсивности теплового потока для всей области шельфа [11].

Методы численного моделирования

Район исследований – часть Арктического шельфа, включающая акватории двух шельфовых морей – Лаптевых и Восточно-Сибирского. Моделирование динамики мерзлых пород шельфа морей Лаптевых и Восточно-Сибирского проводилось с помощью математической модели, которая описывает перераспределение тепла в системе атмосфера - океан - донные отложения. Основой рассматриваемой модели теплопереноса для донных отложений является задача Стефана со смешанными краевыми условиями в одномерной постановке. Фазовые переходы происходят на границе промерзания с выделением двух зон, талой и мерзлой. На границе между мерзлыми и талыми породами (при этом в модели не налагаются какие-либо ограничения на число границ) используются условие равенства температуры грунта - температуре замерзания воды (с учетом ее солености). На нижней границе расчётной области донных отложений (z = 1500 м) используется условие соответствия градиента температуры величине геотермического потока. На верхней границе задано изменение температуры по времени в зависимости от условий, в которых находится область шельфа в данный момент, морских или субаэральных.

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 в [7, 10]. Так как в данной работе учитывается пространственное распределение геотермического градиента, палеогеографический сценарий строился для каждой точки шельфа.

Для оценки современного состояния подводной мерзлоты в качестве граничных условий задавалась температура придонной воды, полученная в результате расчётов по региональной модели Северного Ледовитого океана - Северной Атлантики ИВМиМГ СО РАН (СЛО-СА) [12]. Такой подход позволяет проанализировать не только временные, но и пространственные изменения в состоянии многолетнемерзлых пород на шельфе восточных сибирских морей, а также выделить области наиболее чувствительные к возможным климатическим изменениям.

В настоящем исследовании учитывается влияние солености поровых вод на температуру начала оттаивания - замерзания грунта. Мы исходим из предположения, что за время затопления шельфа морской водой происходит засоления

верхнего слоя донных отложений, и глубина засоления зависит от времени трансгрессии [13].

Одновременно с вычислением термического состояния донных отложений в модели вычисляются термодинамические границы зоны стабильности газогидратов метана с использованием соотношения из модели TOUGH$^+$HYDRATE [14].

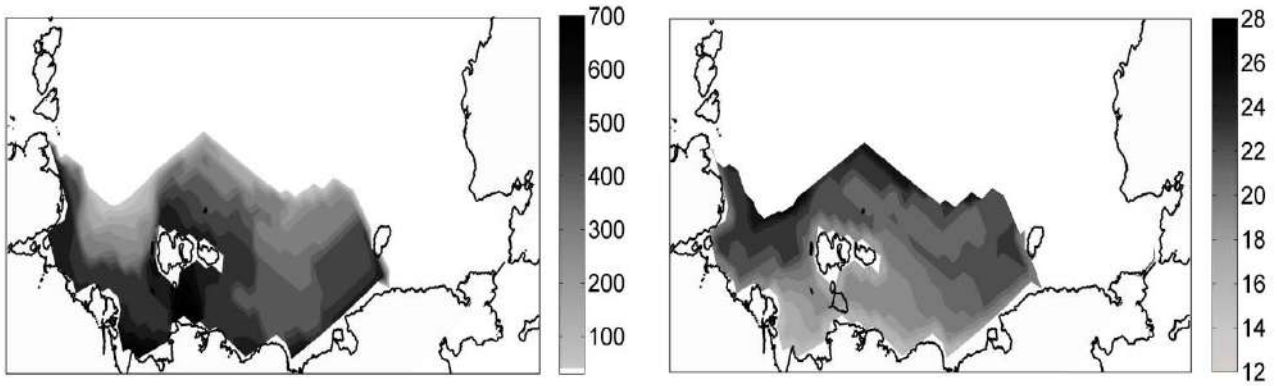
Обсуждение результатов

Предыдущие расчеты [10] показали, что при заданном одинаковом геотермическом потоке основным фактором, определяющим мощность подводной мерзлоты на шельфе Арктики, является глубина моря, как характеристика времени пребывания участков шельфа в субаквальных условиях от начала трансгрессии.

Полученная в данном исследовании карта положения нижней границы ММП для морей Восточной Арктики приведена на рис. 1а. Глубина залегания нижней границы многолетнемерзлого слоя на шельфе составляет порядка 50-700 м. Нижняя граница слоя мерзлых пород поднимается с увеличением расстояния от берега и глубины моря, но также зависит от заданного потока тепла, что приводит к значительному уменьшению мощности ММП не только на внешнем шельфе, но и в районах рифтов. К таким районам можно отнести северо-восточную часть моря Лаптевых, центральную и северную области Восточно-Сибирского моря, где подошва ММП находится на глубине 50-100 м. Для большей части шельфа характерна интенсивность потока тепла 60-70 мВт/м^2, что способствует залеганию нижней границы ММП на 400-500 м под морским дном.

Положение верхней границы ММП в осадочных разрезах морей Восточной Сибири существенно зависит от содержания солей. В численном эксперименте получено, что верхняя граница мерзлых осадков расположена на глубине 12-27 м ниже морского дна в зависимости от области шельфа, рис. 1б. В связи с неравномерностью засоления шельфа, которое определяется временем затопления и распределением солености в придонном слое воды, кровля мерзлоты понижается в направлении от берега, что приводит к дополнительному сокращению толщины ММП на внешнем шельфе.

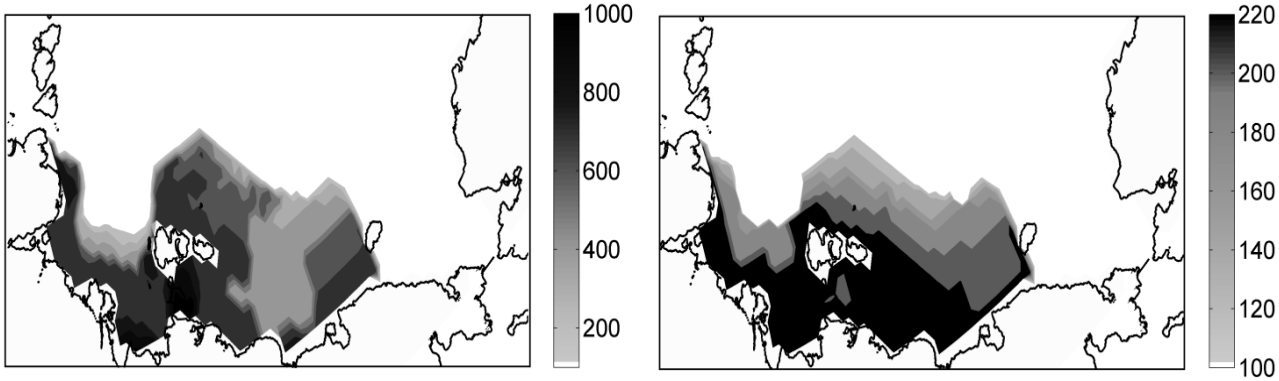
Подобно динамике подошвы слоя мерзлых пород, динамика залегания нижней границы зоны стабильности газовых гидратов (ЗСГГ) зависит от значений геотермического потока и современной глубины шельфа, рис. 2а. Влияние дополнительного давления за счет столба воды способствует незначительному увеличению мощности ЗСГГ на внешнем шельфе. Повышенная интенсивность потока тепла в рифтовых структурах приводит к отсутствию условий образования газогидратов в северной части моря Лаптевых. Положение верхней границы ЗСГГ метана в донных отложениях шельфа зависит от глубины моря, рис. 2б. Она расположена на 120-220 м ниже морского дна, что делает газовые гидраты изолированными слоем мерзлых пород.



а б

Рис. 1. Модель эволюции подводной мерзлоты
на шельфе морей Восточной Арктики:

а – положение нижней границы мерзлых пород в донных отложениях (в м); б – положение верхней границы мерзлых пород от морского дна (в м).



а б

Рис. 2. Модель эволюции ЗСГГ на шельфе морей Восточной Арктики:

а – положение нижней границы ЗСГГ метана в донных отложениях (в м); б – положение верхней границы ЗСГГ метана от морского дна (в м).

Заключение

Согласно проведенным расчетам толщина многолетнемерзлых пород и зоны стабильности метангидратов на шельфе морей Восточной Арктики зависит от величины потока тепла из земных недр и современной глубины моря, чем больше глубина, тем меньше мощность ММП и ЗСГГ. Повышенный поток тепла приводит к значительному уменьшению мощности мерзлого слоя на внешнем шельфе и в областях рифтов. На внешнем шельфе моря Лаптевых получено прерывистое распространение ММП, как следствие высоких значений потока тепла.

Положение верхней границы ММП в донных отложениях морей Восточной Арктики существенно зависит от глубины моря и содержания солей. В чис-

ленном эксперименте получено, что верхняя граница мерзлых пород расположена на глубине 12 - 27 м ниже морского дна в зависимости от области шельфа.

Работа выполнена при поддержке проектов РФФИ (№17-05-00396, №17-05-00382, 18-05-00087). Результаты, связанные с моделью субаквальной мерзлоты шельфа получены в рамках проектов 0315-2018-0016 и 0315-2016-0004.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Romanovskii N.N., Hubberten H.W., Gavrilov A.V., Eliseeva A. A., Tipenko G. S. Offshore permafrost and gas hydrate stability zone on the shelf of East Siberian Seas // Geo-Mar. Lett. - 2005. - V. 25. - P. 167–182.

2. Елисеев А.В., Малахова В.В., Аржанов М.М., Голубева Е.Н., Денисов С.Н., Мохов И.И.. Изменение границ многолетнемёрзлого слоя и зоны стабильности гидратов метана на арктическом шельфе Евразии в 1950-2100 гг. // ДАН. - 2015. - Т. 465. - № 5. - С. 598-603.

3. Щербаков А.В., Малахова В.В. Моделирование пространственного распределения метангидратов Мирового океана и потока метана в атмосферу // Оптика атмосферы и океана. - 2006. - Т.19. - №6. - С. 530-535.

4. Reagan, M., Moridis, G. Dynamic response of oceanic hydrate deposits to ocean temperature change // J. Geophys. Res.: Oceans. – 2008. – V. 113 (C12). - C12023.

5. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Sergienko V., Salyuk A., Kosmach D., Chernikh D., Stubbs Ch., Nicolsky D., Tumskoy V., Gustafsson O. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf // Nat. Geosci. – 2013. – V. 7. – P. 64–70.

6. Brothers, L. L., Hart P. E., Ruppel C. D. Minimum distribution of subsea icebearing permafrost on the U.S. Beaufort Sea continental shelf // Geophys. Res. Lett. - 2012. – V. 39. - L15501.

7. 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.

8. Portnov A., Mienert J., Serov P. Modeling the evolution of climate sensitive Arctic subsea permafrost in regions of extensive gas expulsion at the West Yamal shelf // J. Geophys. Res.: Biogeosciences. – 2014. – V. 119 (11). - P. 2082-2094.

9. 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.

10. Malakhova V.V., Eliseev A.V. The role of heat transfer time scale in the evolution of the subsea permafrost and associated methane hydrates stability zone during glacial cycles // Glob. Planet. Change. - 2017. - V. 157. - P. 18-25.

11. Davies J. H. Global map of Solid Earth surface heat flow // Geochem. Geophyst. Geosyst. - 2013. - V. 14. - № 10. - P. 4608-4622.

12. Голубева Е.Н., Платов Г.А. Численное моделирование отклика Арктической системы океан-лед на вариации атмосферной циркуляции 1948 – 2007 гг. // Известия РАН. ФАО. - 2009. - Т. 45. - №1. - С. 145-160.

13. Голубева Е.Н., Малахова В.В., Платов Г.А., Крайнева М.В., Якшина Д.Ф. Динамика и тенденции изменения состояния вод и криолитозоны моря Лаптевых в XX–XXI в**.** // Оптика атмосферы и океана. - 2017. - Т. 30. - № 06. - С. 529–535.

14. Moridis G. J. Numerical studies of gas production from methane hydrates // Society of Petroleum Engineers Journal. – 2003. – V. 32. – № 8. – P. 359-370.

© В. В. Малахова, 2018

УДК 556.535:004.9(571)

СПОСОБЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ЗОН ЗАТОПЛЕНИЯ ПОЙМЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ СРЕДСТВАМИ ГИС

Никита Анатольевич Балдаков
Институт водных и экологических проблем СО РАН, 656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1, инженер лаборатории гидрологии и геоинформатики, тел. (3852)66-65-01, e-mail: nikita-baldakov@yandex.ru

Ольга Вольфовна Ловцкая
Институт водных и экологических проблем СО РАН, 656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1, старший научный сотрудник лаборатории гидрологии и геоинформатики, тел. (3852)66-65-01, e-mail: lov_olga@inbox.ru

Визуальное отображение результатов моделирования изменения уровня воды в водных объектах позволяет эффективно представлять зоны затопления пойменных территорий. В статье описаны средства отображения результатов гидрологического моделирования в составе проблемно-ориентированной ГИС. Рассмотрены способы визуализации результатов гидрологических расчетов, а также одномерных и двухмерных гидродинамических моделей.

Ключевые слова: ГИС, гидрологические модели, цифровая модель рельефа, визуализация, зона затопления.

METHODS FOR VISUALIZATION OF HYDROLOGICAL STUDY OF FLOOD ZONES ON FLOODPLAINS USING GIS-TECHNIQUES

Nikita A. Baldakov
Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 1, Molodezhnaya St., Barnaul, 656038, Russia, Engineer of Laboratory of Hydrology and Geoinformatics, phone: (3852)66-65-01, e-mail: nikita-baldakov@yandex.ru

Olga V. Lovtskaya
Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 1, Molodezhnaya St., Barnaul, 656038, Russia, Senior Researcher of Laboratory of Hydrology and Geoinformatics, phone: (3852)66-65-01, e-mail: lov_olga@inbox.ru

Visual display of modeling of water fluctuation in water bodies provides the effective way to present flood zones on floodplains. The paper describes methods for presenting results of hydrological modeling in problem-oriented Web-GIS. Methods for visualization of results of hydrological study as well as one-dimensional and two-dimensional hydrodynamic models are considered.

Key words: GIS, hydrological models, digital elevation model, visualization, flood zone.

Введение

В настоящее время геоинформационные системы (ГИС) – неотъемлемая составляющая информационно-моделирующих систем, предназначенных для прогнозирования паводков и половодий на реках. Весьма важна роль ГИС на этапе интерпретации результатов мониторинга и прогнозирования развития гидрологи-

ческой обстановки для определения возможных социально-экономических последствий от прохождения опасных гидрологический явлений [1]. Визуальное отображение результатов моделирования изменения уровня воды в водных объектах позволяет эффективно представлять зоны затопления пойменных территорий.

В статье описаны средства отображения результатов гидрологического моделирования в составе проблемно-ориентированной ГИС.

В одномерном случае для отображения используются значения уровня водной поверхности, расположенные вдоль осевой линии русла. Для построения зоны затопления пойменных территорий по результатам одномерного моделирования с учетом ЦМР долины реки разработаны два алгоритма.

В двухмерном случае для отображения используется поле глубин затопления, представленное в виде набора географически привязанных точек со значением глубины в каждой точке.

Моделирование зон затопления

При расчете зон затопления в результате прохождения паводков и половодий редкой повторяемости необходимо проведение комплекса гидрологических расчетов для определения уровней и расходов воды различной обеспеченности в пределах населенных пунктов. Для каждого населенного пункта определяются значения расходов и уровней воды 1, 3, 5, 10%, обеспеченности [2, 3].

По цифровой модели рельефа, созданной на основе крупномасштабных топографических карт, проведены горизонтали, соответствующие рассчитанным уровням (рис. 1, 2).

Рис. 1. Карта-схема зон затопления реки Обь в районе г. Барнаула (фрагмент)

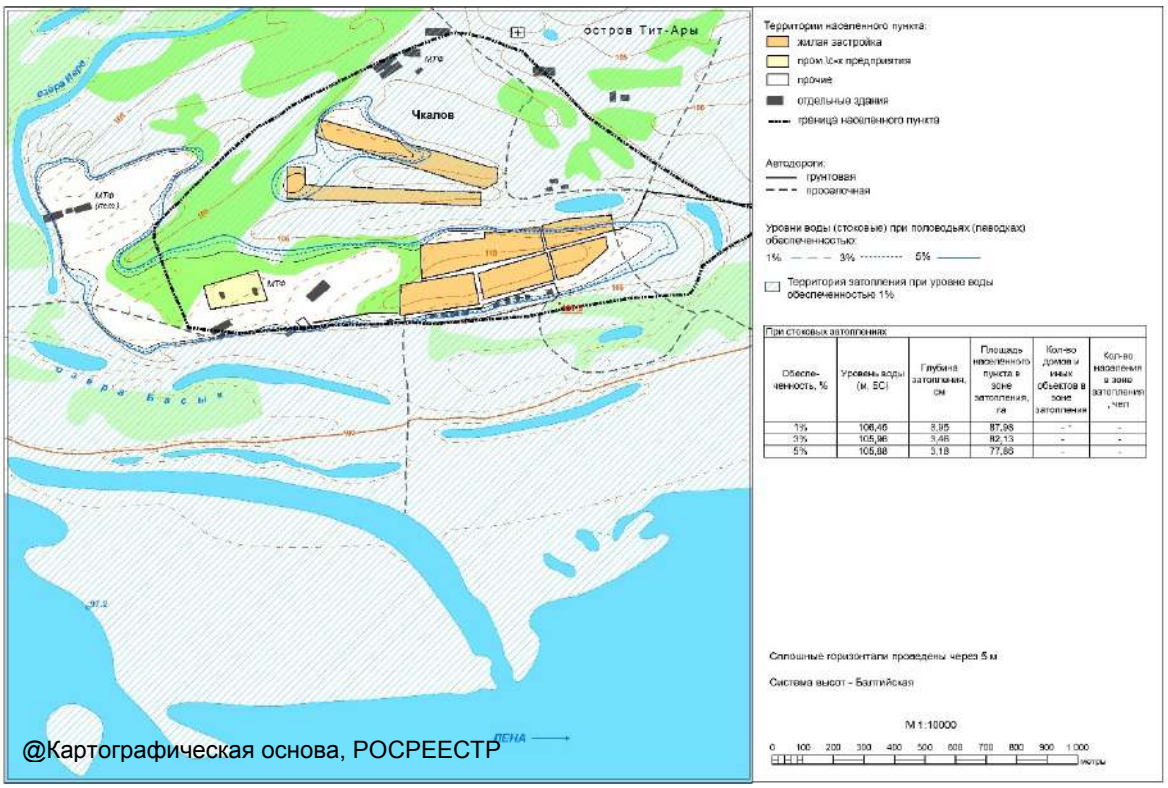


Рис. 2. Карта-схема зон затопления поймы реки Лена в районе с. Чкалов

Результаты проведенных гидрологических расчетов являются основой информационной базы для последующей калибровки и гидродинамического моделирования зон затопления в пределах населенных пунктов и определения границ негативного воздействия вод.

Создание компьютерных моделей течений в водотоках сложной конфигурации часто требует больших объемов разнородной пространственно-распределенной эмпирической информации. Это, прежде всего, цифровая модель рельефа (ЦМР) русла и речной долины, сведения о коэффициентах шероховатости подстилающей поверхности. Также привлекается изменяющаяся в пространстве и времени гидрологическая и метеорологическая информация [4].

Точность расчетов областей затоплений речных долин в большой степени зависит от используемого вида решения системы уравнений Сен-Венана, отражающей основные закономерности перемещения речных волн. В последние годы, с появлением доступных данных о рельефе высокого разрешения и увеличившимися вычислительными мощностями широкое распространение получило применение не только одномерных, но и двумерных и трехмерных гидравлических моделей [5].

Для описания течений на участках рек, в т. ч. и со сложной морфометрией русла и поймы, в Институте водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской Академии наук (ИВЭП СО РАН) разработаны вычислительные комплексы на основе одномерных и двумерных уравнений Сен-Венана, и построены компьютерные модели для расчета сценариев затопления

отдельных участков пойменных территорий и прогноза прохождения весенних половодий и дождевых паводков на Верхней Оби [6].

Расчет гидравлических характеристик р. Оби на участке от г/п Фоминское до створа плотины Новосибирской ГЭС опирается на численную одномерную горизонтальную (1DH) модель течения на основе уравнений Сен-Венана. Для построения компьютерной гидродинамической 1DH-модели течения на этом участке используются цифровые модели речной долины р. Оби и ложа Новосибирского водохранилища, построенные на основе топографических карт М 1:25000, полученных во временное пользование из Государственного картографического фонда, и лоции Верхней Оби.

Для построения цифровой модели рельефа (ЦМР) для гидродинамической 2DH-модели использовались:

– данные промеров русла, проток и затонов, а также данные топосъемочных и геодезических работ, полученные ИВЭП СО РАН (М1:2000);

– топографические карты М1:25000.

Визуализация результатов гидродинамического моделирования

Для определения затапливаемой площади необходимо знать абсолютную отметку водной поверхности в каждой точке водотока. Разность этой отметки и отметки рельефа, взятой по ЦМР, используется для определения зоны распространения разлива при прохождении паводка.

Результаты расчетов двумерных гидродинамических моделей дают области затопления непосредственно в виде набора географически привязанных точек со значением глубины в каждой точке. Данные такого вида для загрузки в ГИС требуют предобработки, состоящей из следующих действий:

– определение границ рассматриваемой области затопления. В качестве границ используется минимальный невыпуклый полигон (concave hull), содержащий точки с глубинами;

– создание растра глубин в формате GeoTiff билинейной интерполяцией глубины в рамках найденных границ.

Подготовленный растр может быть загружен на геосервер для просмотра через web- browser (рис. 3).

Однако, при использовании подобных моделей необходимы сравнительно высокие вычислительные мощности и ЦМР высокого разрешения, включающая в себя русло реки. Поэтому в случае недостаточно подробных входных данных или рассмотрения участка реки значительной протяженности, как правило, применяются одномерные гидродинамические модели.

В одномерном случае результаты моделирования составляют значения уровня водной поверхности, расположенные вдоль осевой линии русла. Для построения зон затопления пойменных территорий по результатам одномерного моделирования с учетом ЦМР долины реки используются подходы, основанные на геометрических принципах [7].

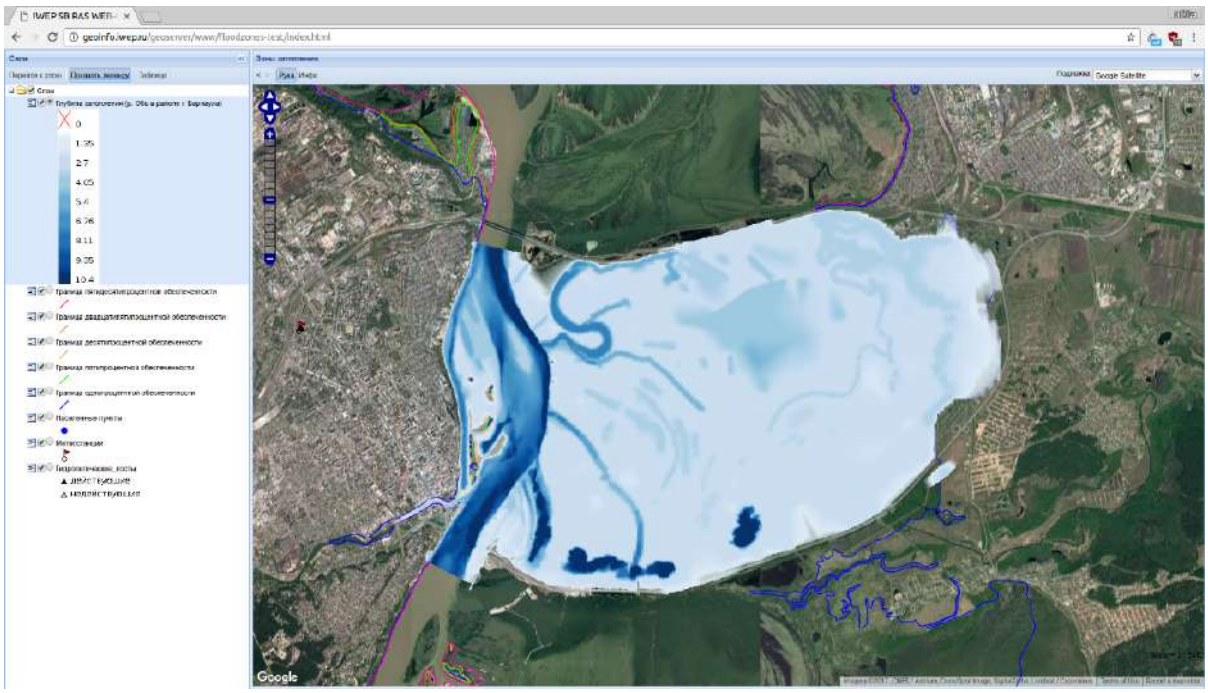


Рис. 3. Пример отображения глубин затопления
на геосервере ИВЭП СО РАН

Основная идея, на основе которой, как правило, реализуется моделирование паводкоопасной ситуации, заключается в построении пересечения поверхности рельефа с зеркалом водной поверхности.

Для выявления затопленной территории используются исходная цифровая модель рельефа и модель секущей плоскости водной поверхности, построенная на основе результатов моделирования уровней воды.

Для определения зоны затопления при расчетах по одномерной модели разработано два алгоритма.

Первый алгоритм распространяет значения высоты водной поверхности вдоль нормалей, проведенных к осевой линии русла в точках с известными из результатов моделирования уровнями водной поверхности. На основе расчетных данных и нормалей с помощью средств QGIS и GRASSи или ArcGIS Desktop с подключенным модулем Spatial Analyst строится цифровая модель водной поверхности:

Зона затопления вычисляется с помощью Растрового калькулятора: («цифровая модель водной поверхности» – «цифровая модель поймы») > 0.

Полученный растр конвертируется в векторный полигональный слой, соответствующий зоне затопления.

Для улучшения качества визуализации выполняются преобразования полученных полигонов (удаление «осколочных» полигонов, преобразование «дырок», объединение смежных полигонов).

Результат работы алгоритма представлен на рис. 4.

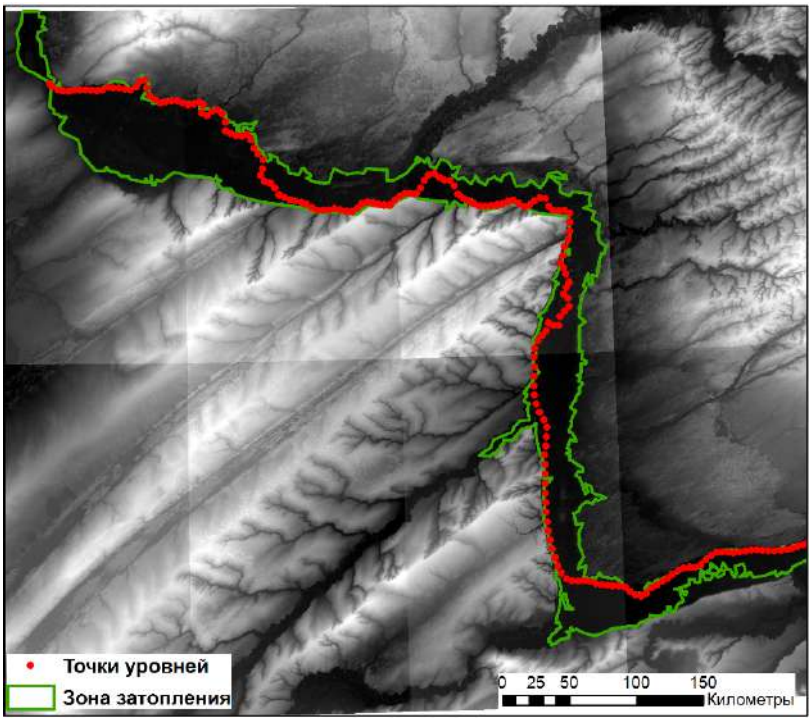


Рис. 4. Зона затопления в районе г. Барнаула (алгоритм 1)

Второй алгоритм имитирует подъем воды по склону из каждой ячейки растра водной поверхности и сравнивает текущее значение высоты по ЦМР с абсолютной отметкой водной поверхности, взятой в ячейке растра, из которой начат подъем. Высота водной поверхности для каждого пикселя вычисляется как среднее арифметическое высот водной поверхности соседних с ним затопленных пикселей. На первом шаге, затопленными принимаются пиксели, полученные от растеризации осевой линии русла. Алгоритм рекурсивно пополняет множество затопленных пикселей соседними с ними незатопленными, пока множество добавленных на текущем шаге пикселей не станет пустым.

Алгоритма построения реализован в виде следующей последовательности шагов:

1. Создать пустой растр, совпадающий с ЦМР размером, типом пикселя (float, integer) и географической привязкой;

2. Линейно интерполировать значения уровня в узлах осевой линии, используя точки с известным значением уровня из входных данных;

3. Растеризовать осевую линию на созданном растре (шаг 1), сохраняя значения уровня на пикселях растра, и, при необходимости, интерполируя их для пикселей, расположенных между вершинами осевой линии (используется функция библиотеки GDAL2.*);

4. Определить три множества пикселей созданного растра: Внутренние, Граничные, Кандидаты. На этом шаге Внутренние и Кандидаты – пустые множества, Граничные — множество пикселей растеризованной осевой линии;

5. Применить рекурсивную процедуру затопления.

Алгоритм реализован в виде утилиты командной строки на языке C++, для работы с растровыми и векторными данными с географической привязкой используется библиотека с открытым исходным кодом GDAL2.*. Результат алгоритма представлен на рисунке областью синего цвета с указанием глубин затопления.

Рис. 5 иллюстрирует результаты работы описанных в статье алгоритмов.

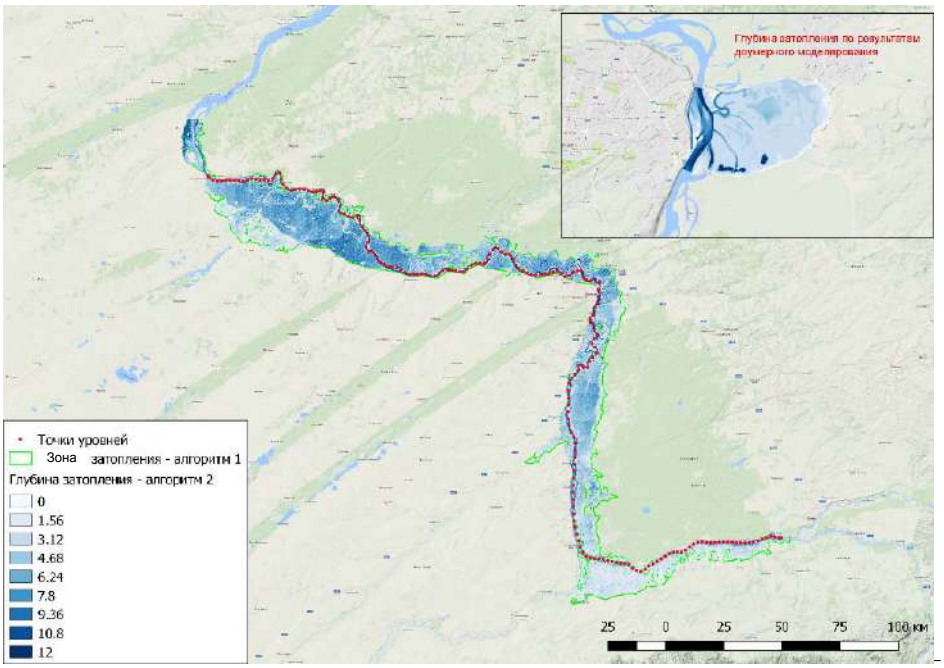


Рис. 5. Сопоставления результатов расчетов зон затопления
по рассмотренным алгоритмам

Выводы

Визуализацию на основе гидрологических расчетов предлагается использовать при исследовании большого количестве участков рек для определения границ зон возможного затопления при прохождении паводков и половодий редкой повторяемости.

При анализе нескольких участков рек, для которых важна динамика формирования зоны затопления даже при небольшом изменении уровня воды, необходимо проведение гидродинамических расчетов и визуализация их результатов.

Предложенный в статье алгоритм расчета “затопленных пикселей” по результатам одномерного моделирования позволяет улучшить качество визуализации зон затопления пойменных территорий по сравнению с определением их встроенными средствами ArcGIS Desktop и QGIS.

Разработанные ГИС-технологии используются ИВЭП СО РАН для визуализации фактической и прогностической гидрологической обстановки

на р. Обь в районе г. Барнаула (http://geoinfo.iwep.ru/geoserver/www/floodzones-test/index.html), а также для определения границ зон возможного затопления при прохождении паводков и половодий редкой повторяемости в бассейне Верхней Оби и реки Лена.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Борщ С. В., Самсонов Т. Е., Симонов Ю.А., Львовская Е. А. Визуализация гидрологической обстановки в бассейнах крупных рек средствами ГИС-технологий // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2013. № 349. С. 47–62.

2. Современное состояние водных ресурсов и функционирование водохозяйственного комплекса бассейна Оби и Иртыша / отв. ред. Ю.И. Винокуров, А.В. Пузанов, Д.М. Безматерных. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2012. – 242 с.

3. Исследование водного режима и русловых процессов реки Лена, разработка научно обоснованных рекомендаций и мероприятий по предотвращению вредного воздействия вод и противопаводковой защите: отчет о НИР / Институт водных и экологических проблем СО РАН; рук. Зиновьев А.Т. – Барнаул, 2014. – Книги 2, 3. – 363 с. – Регистрационный номер НИОКТР 010201278534 от 09.03.2016.

4. Зиновьев А.Т., Ловцкая О.В., Балдаков Н.А., Дьяченко А.В. Геоинформационное обеспечение для решения гидрологических задач // Вычислительные технологии. 2014. № 3. С. 60-72.

5. Maidment D.R., Djokic D. Hydrologic and Hydraulic Modeling Support with Geographic Information Systems. N.Y.: ESRI Press, 2000. 232 p.

6. Зиновьев А.Т., Кошелев К.Б., Марусин К.В., Кошелева Е.Д. Математическое моделирование руслового потока для прогнозов влияния строительства в поймах на гидрологический режим крупных рек (на примере реки Обь) // Водное хозяйство России. Проблемы, технологии, управление. 2017. № 2. С. 54-72.

7. Chen J., Hill A.A., Urbano L.D. A GIS-based model for urban flood inundation // J. Hydrology. – 2009. Vol. 373. No 1-2. P. 184–192.

© Н. А. Балдаков, О. В. Ловцкая, 2018

УДК 004.942:556.536

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПЕРЕФОРМИРОВАНИЯ ЛОЖА КРУПНОГО ДОЛИННОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В ЗОНЕ ПЕРЕМЕННОГО ПОДПОРА

Александр Тимофеевич Зиновьев
Институт водных и экологических проблем СО РАН, 656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1, доктор технических наук, зав. лабораторией гидрологии и геоинформатики, тел. (906)940-94-77, e-mail: zinoviev@iwep.ru

Константин Борисович Кошелев
Институт водных и экологических проблем СО РАН, 656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории гидрологии и геоинформатики, тел. (905)981-28-83, e-mail: koshelev@iwep.ru

Константин Валерьевич Марусин
Институт водных и экологических проблем СО РАН, 656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1, научный сотрудник лаборатории гидрологии и геоинформатики, тел. (913)275-56-39, e-mail: kat@iwep.ru

Рассматривается математическая модель русловых процессов в крупном долинном водохранилище для изучения процессов переформирования его ложа в различных условиях. Для описания процессов переноса и осаждения наносов предложена комбинированная модель на основе гидродинамической 3D-модели совместно с 2DH-моделями переноса взвешенных веществ и транспорта донных наносов. Для условий Камского водохранилища построена компьютерная модель русловых процессов, выполнены вариантные расчеты и приводятся их результаты, позволяющие оценивать и прогнозировать переформирования ложа водоема на участке переменного подпора.

Ключевые слова: русловые процессы, компьютерное моделирование, ГИС-технологии, Камское водохранилище, переменный подпор.

USE OF COMPUTER SIMULATION AND GIS-TECHNOLOGIES TO ASSESS THE REFORMATION OF THE BED OF A LARGE LOWLAND RESERVOIR IN ZONE OF VARIABLE BACKWATER

Alexander T. Zinoviev
Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 1, Molodezhnaya St., Barnaul, 656038, Russia, D. Sc., Head of Laboratory of Hydrology and Geoinformatics, phone: (906)940-94-77, e-mail: zinoviev@iwep.ru

Konstantin B. Koshelev
Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 1, Molodezhnaya St., Barnaul, 656038, Russia, Ph. D., Senior Researcher of Laboratory of Hydrology and Geoinformatics, phone: (905)981-28-83, e-mail: koshelev@iwep.ru

Konstantin V. Marusin
Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 1, Molodezhnaya St., Barnaul, 656038, Russia, Researcher of Laboratory of Hydrology and Geoinformatics, phone: (913)275-56-39, e-mail: kat@iwep.ru

A mathematical model of evolution of river bed in a large valley reservoir is considered to study the transformation of its floor under different conditions. A combined model based on 3D hydrodynamic model together with 2DH models of suspended matter and bottom sediments transport is proposed to describe the processes of sediment transport and deposition. For the conditions of the Kama reservoir, a computer model of evolution of river bed is constructed, variant calculations are performed and their results are presented, which allow to estimate and predict the transformation of the reservoir floor on the site of the variable backwater.

Key words: evolution of river bed, computer modeling, GIS-technologies, Kama reservoir, variable backwater.

Введение

Зона переменного подпора – эта такая область акватории водохранилища, где в ходе годового эксплуатационного цикла водоема (сезонного регулирования его уровня) гидрологические условия меняются с речных на озерные и обратно. Для крупных водохранилищ долинного типа протяженность такой зоны достигает несколько десятков километров.

Изучение процессов переформирования ложа водоема в зоне переменного подпора и разработка методов их прогнозирования имеет не только научное, но и практическое значение в том случае, если на данном участке осуществляется активное судоходство.

Цель данной работы – математическое моделирование процессов транспорта русловых наносов и переформирований рельефа дна в зоне переменного подпора крупного водохранилища в нестационарных условиях активной фазы гидрологического цикла: от момента вскрытия водоема ото льда до наступления осенней межени. Предложенная методика апробирована для условий Камского водохранилища.

Объект исследования

Камское водохранилище было образовано в 1954 г. на реке Каме в результате строительства Камской ГЭС в г. Перми. Его протяженность по долине реки составляет 300 км, а площадь акватории при НПУ - 1915 км^2 [1].

Зона переменного подпора водохранилища простирается вверх по затопленной долине Камы на 89 км (от п. Усть-Пожва до п. Керчевский). Внутри этой зоны выделяются три характерных участка. Нижний участок (Усть-Пожва – Березники), где практически в течение всего года наблюдаются озерные условия. Верхний участок (Тюлькино - Керчевский) - с преобладанием речных условий. Средний участок (Березники - Тюлькино) - со смешанными условиями [1, 2]. Именно это участок, протяженностью 59 км, и был выбран для изучения с использованием моделирования (рис. 1).

Следует отметить, что на выбранном участке акватории осуществляется весьма интенсивное грузовое судоходство, а Березники и Соликамск являются крупными речными портами.

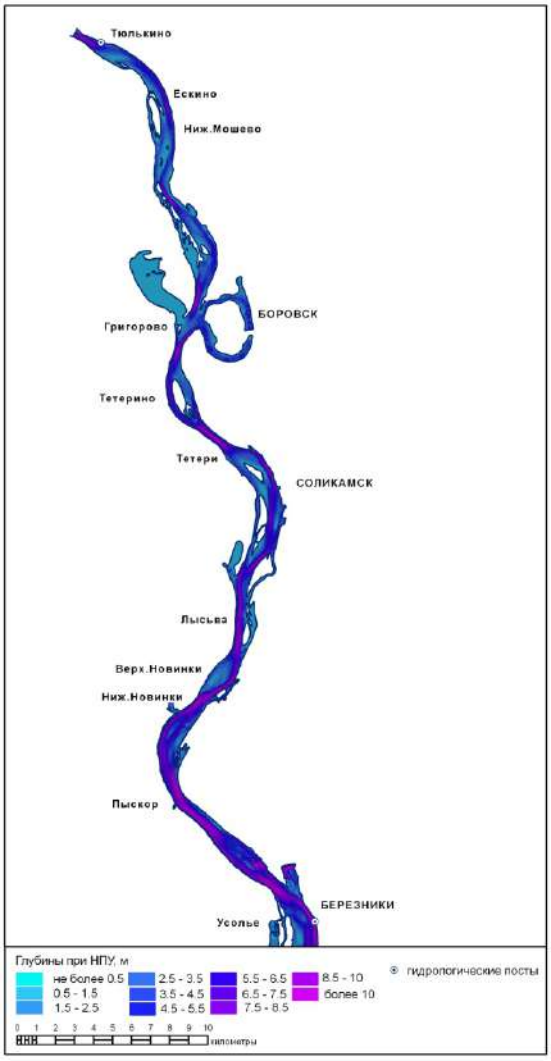


Рис. 1. Визуальное представление рельефа котловины Камского водохранилища в области моделирования

Методы и исходные данные

Для описания процессов транспорта русловых наносов и переформирований рельефа дна Камского водохранилища использована комплексная математическая модель на основе нестационарных трехмерных (3D) гидродинамических уравнений совместно с плановой (2DH) моделью транспорта русловых наносов. Выбор данной модели был обусловлен сложностью рельефа котловины водохранилища на рассматриваемом участке (наличием большого числа островов, отмелей и заливов).

Гидродинамическая 3D-модель базируется на уравнениях Навье-Стокса, полученных в предположении гидростатического приближения. Коэффициенты турбулентного обмена рассчитываются по двухпараметрической (k-ε)--модели турбулентности [3]. Для расчета расхода русловых наносов используются формулы Ван-Рейна [4].

Граничные условия во входном створе модельной области определяются исходя из заданного значения расхода воды. В выходном сечении задается отметка уровня воды.

Начальные условия формируются путем решения квазистационарной задачи с граничными условиями, соответствующими начальному моменту времени.

Основным источником данных о рельефе рассматриваемой области явились результаты русловых съемок, выполненных в июне – августе 2016 г. промерными партиями Верхнее-Камского района водных путей и судоходства (Верхнее-Камский РВПиС). Точность значений глубин – сантиметровая. Пространственная плотность отметок глубин – 6-8 отметок на гектар. Пространственное позиционирование осуществлялось средствами спутниковой навигации (GPS).

Дополнительно при построении цифровой модели рельефа (ЦМР) был принят ряд допущений, призванных восполнить недостаток необходимой информации. Например, высота берега принималась 2,5 м над урезом НПУ. Глубины участков акватории (заливов, проток и рукавов), для которых промерные данные отсутствуют, принимались равными 1 м в условиях НПУ. Кроме того, пространственное положение береговой линии, на неохваченных съемкой участках строилось по топографическим картам М 1:100000.

Все имеющиеся данные о глубинах приводились к единой стандартной системе координат и единому положению водной поверхности.

Затем на основе имеющихся данных и принятых допущений средствами геоинформационной системы ArcGis 9.3 была построена трехмерная нерегулярная модель (TIN-модель) рельефа котловины водохранилища на выбранном участке.

На заключительном этапе построенная TIN-модель рельефа дна водоема конвертировалась в иное представление, пригодное для использования в программной среде для гидравлического моделирования, а именно, в набор точечных отметок абсолютных высот (м БС), расположенных в узлах регулярной сетки с шагом 10 м.

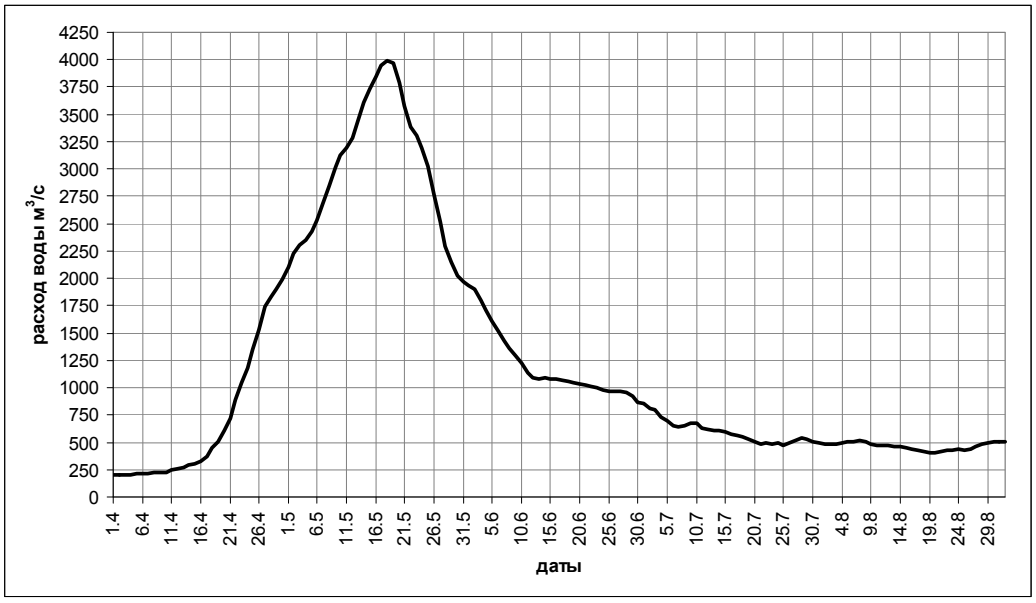
В качестве типичных гидрологических условий были взяты осредненный гидрограф по г\п Тюлькино и осредненный ход уровня по г\п Березники (рис. 2).

Максимальный расход воды в принятом модельном гидрографе составляет 3990 $м^3/с$ (18 мая). Максимальная отметка уровня на нижней границе участка (г\п Березники) – 108,97 м БС (23 – 24 мая).

Для моделирования транспорта наносов и вертикальных русловых деформаций необходимо знать: а) характеристики крупности наносов, слагающих дно; б) их исходный запас (толщину донного слоя); в) значение расхода русловых наносов на входе в расчетную область в течение всего модельного периода.

Информация о крупности русловых наносов была получена в ходе специальных полевых изысканий, проведенных в июле 2017 г. По результатам отбора проб русловых наносов в семи створах, распределенных по всей длине рассматриваемого участка, установлено, что их медианная крупность (D_{50}) составляет 0,32 мм, а крупность 10%-обеспеченности (D_{90}) – 0,39 мм. Следует отметить, что такие характеристики крупности русловых наносов являются достаточно типичными для крупных равнинных рек [6].

а)



б)

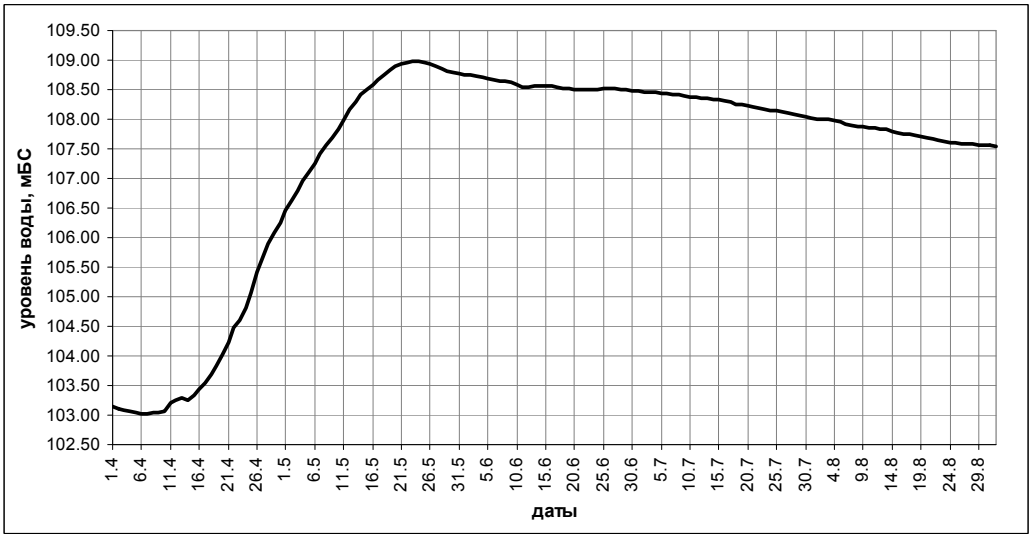


Рис. 2. Модельные гидрологические граничные условия:

а) осредненный гидрограф по г\п Тюлькино, б) осредненный ход уровня воды по г\п Березники. Период с 01 апреля по 01 сентября [5]

Поскольку точно измерить расход русловых наносов в натурных условиях практически невозможно, предполагается, что входной поток наносов является насыщенным [4]. То есть значение расхода наносов равно теоретической емкости потока, и, он транспортирует наносы с теми же параметрами крупности.

Поскольку получение натурных данных о толщине донного слоя русловых наносов на участке требует весьма значительных затрат ресурсов и времени, было решено в модельных расчетах рассмотреть две ситуации: малый запас донных наносов – исходная толщина слоя донных наносов 0,5 м, и, значительный запас – толщина слоя 5 м.

Моделирование выполнялось с применением специальной версии пакета с открытым исходным кодом Delft3D, реализующей комплексную компьютерную модель течения и транспорта русловых наносов. Расчеты выполнялись на регулярной пространственной сетке 2026 x 82 x 4.

Обсуждение

Как сказано выше, численные расчеты выполнены для сценарного (модельного) года со средними расходами за период с 15 апреля по 01 сентября (см. рис. 2). Начальные условия формировались путем решения квазистационарной задачи.

Обсуждая полученные результаты моделирования, рассмотрим вначале динамику профиля водной поверхности по линии, проложенной вдоль всего рассматриваемого участка примерно по тальвегу затопленного русла Камы. Продольные профили водной поверхности по указанной линии в различные моменты модельного периода приведены на рис. 3.

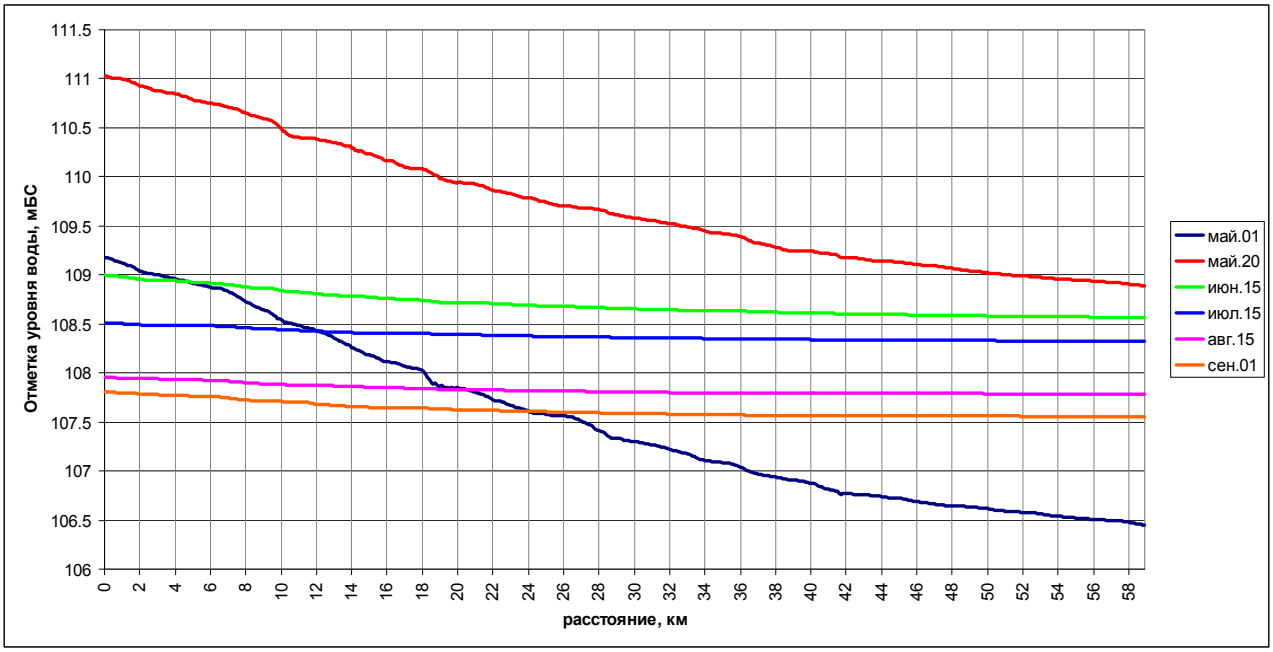


Рис. 3. Продольные профили водной поверхности
в различные моменты модельного периода

В условиях нарастания половодья уровень воды на протяжении большей части участка (до района Новинки) ведет себя вполне по «речному», т.е. меняется круто и в целом линейно (рис. 3). Уклон водной поверхности составляет здесь около 4,4 см/км. Влияние подпора начинает сказываться лишь на последних 15-ти км и выражается в снижении уклона до величины 1,7 см/км. Но уже к 15 июня, по мере спада половодья и наполнения водохранилища, подпор распространяется практически на весь рассматриваемый участок, весьма малый

уклон водной поверхности (0,8 см/км) наблюдается лишь в верхней его части (Тюлькино - Тетерино).

Вполне согласованно с динамикой уровня воды ведет себя и скорость течения. В период половодья осредненная по глубине скорость течения на большей части участка составляет около 1 м/с, в нижней его части величина скорости снижается до 0,6 – 0,8 м/с. По мере распространения подпора, скорости резко падают, и к концу периода моделирования имеют значения всего 0,1 – 0,3 м/с.

На рис. 4 приведены итоговые изменения отметок дна по состоянию на 15 июне, т.е. после прохождения половодья.

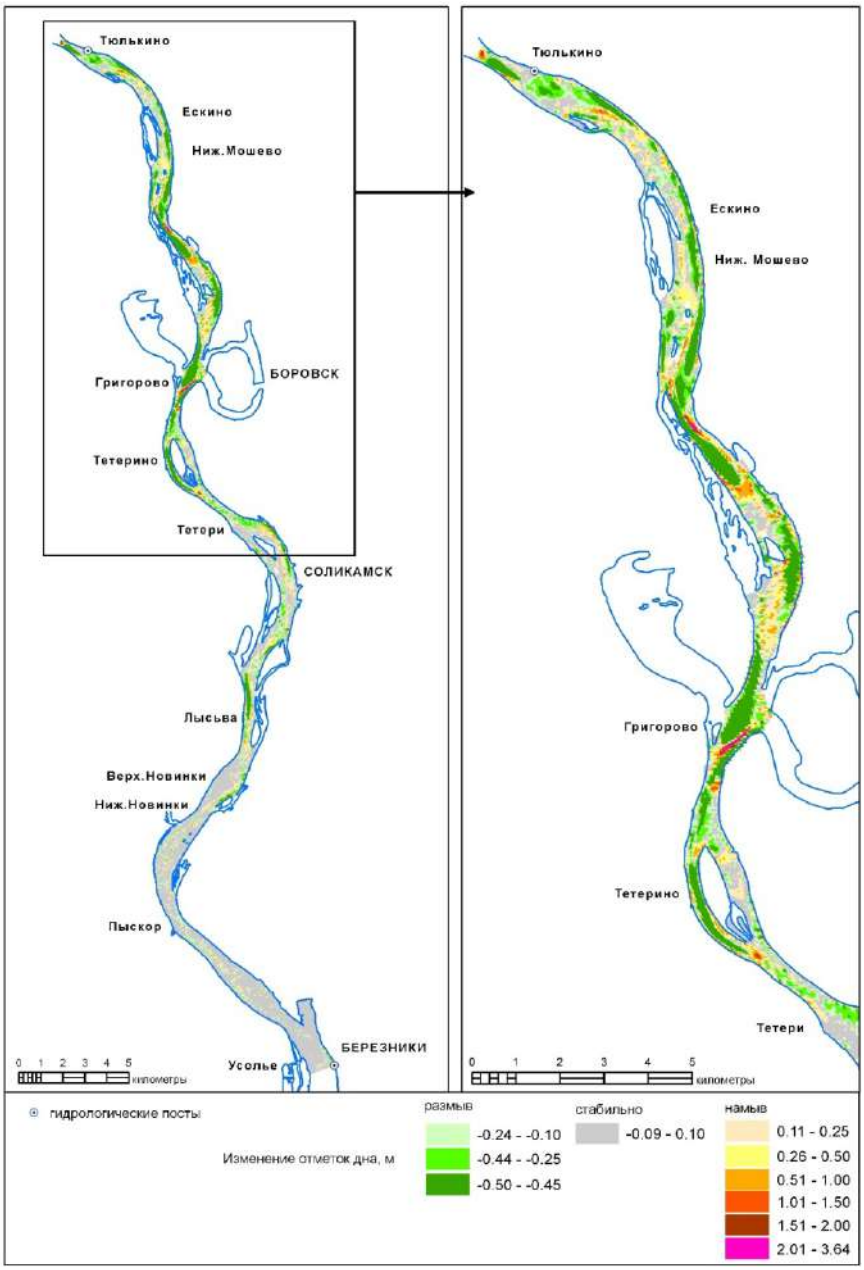


Рис. 4. Итоговое изменение отметок дна (размыв\намыв) на участке моделирования по состоянию на 15 июня. Исходная толщина слоя донных наносов – 0,5 м

Из него видно, что в нижней части участка, как раз там, где проявляется влияние подпора в период половодья (см. рис. 3) изменения донного рельефа весьма малы. На остальной части рассматриваемой области наблюдается повсеместный размыв плесовых ложбин (относительно глубоких участков) и рост отметок дна в более мелководных зонах (на перекатах). Причем, в ходе размыва в некоторых местах был выбран весь запас донных наносов, т.е. величина размыва достигла 0,5 м. Наиболее значительная аккумуляция наносов наблюдается в районе Боровской Затон – Григорово. Здесь сформировалась четко выраженная подводная гряда, перегораживающая затопленное русло Камы под острым углом.

Из теории руслового процесса известно, что в период половодья гребни подводных гряд намываются, а глубины в плёсовых ложбинах промываются увеличиваются, в условиях межени происходит обратный процесс [6]. Представленные выше результаты моделирования изменений рельефа дна на момент окончания половодья этой закономерности вполне соответствуют.

Однако, далее, как показали результаты расчетов, никаких существенных изменений рельефа дна не происходит. Финальная картина, по состоянию на 01 сентября, практически ничем не отличается от ситуации, представленной на рис. 4. То есть со спадом половодья намыв подводных гряд завершился, однако, последующего размыва перекатов, согласно процитированной выше закономерности, не произошло, что очевидно, объясняется влиянием подпора.

Следует также отметить, что увеличение исходной толщины слоя наносов на дне до 5 м принципиально не меняет полученной картины русловых деформаций.

Заключение

Предложена комплексная математическая модель русловых процессов в крупном долинном водохранилище для изучения процессов переформирования его ложа на участке переменного подпора.

Модель апробирована на примере Камского водохранилища. С использованием натурных гидрологических данных и цифровой модели рельефа ложа водохранилища построена нестационарная компьютерная модель течения и транспорта русловых наносов в зоне его переменного подпора и выполнены вариантные расчеты. Дана прогнозная картина изменения отметок дна (размыв\намыв) на исследуемом участке на конец расчетного периода - 01 сентября для разных гидрологических сценариев и выполнен анализ факторов, ее определяющих.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 16-45-590546).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Двинских С.А., Китаев А.Б. Гидрология Камских водохранилищ: монография. – Перм. гос. ун-т. – Пермь, 2008. – 266 с.

2. Шайдулина А.А., Двинских С.А. Режим скоростей течения в районе переменного подпора Камского водохранилища // Географический вестник – 2017, № 3 (42). – С. 61-70.

3. Зиновьев А.Т., Кошелев К.Б., Марусин К.В., Шайдулина А.А. Математическое моделирование русловых процессов на участке крупного долинного водохранилища в условиях переменного подпора // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: тр. VI Междунар. науч.-практ. конф. (г.Пермь, 29 мая-1 июня 2017 г.): в 3 т. Т.1: Гидро- и геодинамические процессы. Управление водными ресурсами. – ПГНИУ. – Пермь, 2017. – 249 с. - С.69-73.

4. van Rijn Leo.C. Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. – Amsterdam : Aqua Publications, 1993. – 690 с.

5. http://gis.vodinfo.ru. ГИС-портал Центра регистра и кадастра. Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России.

6. Гришанин К.В. Основы динамики русловых потоков: Учебник для институтов водн. трансп. – М. Транспорт, 1990. – 320 с.

© А. Т. Зиновьев, К. Б. Кошелев, К. В. Марусин, 2018

УДК 556.535:004.9(571)

АНАЛИЗ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВЯЗЕЙ СЕЗОННЫХ ОБЪЕМОВ СТОКА И ВЕЛИЧИН СНЕГОЗАПАСОВ НА КРУПНЫХ ПРИТОКАХ ВЕРХНЕЙ ОБИ

Валерий Юрьевич Филимонов
Институт водных и экологических проблем СО РАН, 656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории гидрологии и геоинформатики, тел. (3852)66-65-01, e-mail: vyfilimonov @rambler.ru

Никита Анатольевич Балдаков
Институт водных и экологических проблем СО РАН, 656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1, инженер лаборатории гидрологии и геоинформатики, тел. (3852)66-65-01, e-mail: nikita-baldakov@yandex.ru

Алексей Васильевич Кудишин
Институт водных и экологических проблем СО РАН, 656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории гидрологии и геоинформатики, тел. (3852)66-65-01, e-mail: kudishin@iwep.ru

Ольга Вольфовна Ловцкая
Институт водных и экологических проблем СО РАН, 656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1, старший научный сотрудник лаборатории гидрологии и геоинформатики, тел. (3852)66-65-01, e-mail: lov_olga@inbox.ru

Проведено исследование корреляционных связей суммарного объема стока рек Чарыш и Чумыш (Алтайский край) за весенне-летний период, и соответствующих снегозапасов по данным многолетних наблюдений. Проведен анализ достоверности корреляционных связей. Установлено, что для рассматриваемых рек зависимость коэффициента корреляции от временного интервала интегрирования гидрографа характеризуется наличием двух пиков. Для двух водных объектов проведен сравнительный анализ указанных зависимостей. Установлено, что значения коэффициента корреляции зависят от взаимного расположения метеостанций и гидропостов.

Ключевые слова: снегозапасы, снеготаяние, корреляция, интервал времени интегрирования.

THE CORRELATION ANALYSIS OF SEASONAL RUNOFF AND SNOW RESERVES IN LARGE TRIBUTARIES OF THE UPPER OB

Valery Yu. Filimonov
Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 1, Molodezhnaya St., Barnaul, 656038, Russia, D. Sc., Chief Researcher of Laboratory of Hydrology and Geoinformatics, phone: (3852)66-65-01, e-mail: vyfilimonov@rambler.ru

Nikita A. Baldakov
Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 1, Molodezhnaya St., Barnaul, 656038, Russia, Engineer of Laboratory of Hydrology and Geoinformatics, phone: (3852)66-65-01, e-mail: nikita-baldakov@yandex.ru

Alexey V. Kudishin
Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 1, Molodezhnaya St., Barnaul, 656038, Russia, Ph. D., Senior Researcher of Laboratory of Hydrology and Geoinformatics, phone: (3852)66-65-01, e-mail: kudishin@iwep.ru

Olga V. Lovtskaya
Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 1, Molodezhnaya St., Barnaul, 656038, Russia, Senior Researcher of Laboratory of Hydrology and Geoinformatics, phone: (3852)66-65-01, e-mail: lov_olga@inbox.ru

The study of correlations between the total runoff of rivers Charysh and Chumysh (Altai Krai) for the spring-summer period and the snow reserves was made based on the long-term observation data. The analysis of correlations veracity was performed. For both rivers, the correlation coefficient depended on the integration time interval; and such dependences had two peaks. The comparative analysis of the mentioned above dependences suggests that the correlation coefficient depends on the pairwise location of weather and gauging stations.

Key words: snow reserves, snowmelt, correlation, integration time interval.

Введение

Период снеготаяния в Западной Сибири характеризуется быстрым нарастанием положительных температур воздуха в период с третьей декады марта до первой половины апреля [1]. Как следствие, объем талых вод является основным фактором водного питания и формирования гидрологического режима рек указанного региона. Известно, что 70-80% весеннего половодья на крупных реках Западной Сибири составляют талые воды, поэтому чрезвычайно важной проблемой является установление корреляций снегозапасов на отдельных участках водосборов с интегральным объемом стока [2]. Кроме того, большой интерес представляют прогнозы стока, составляемые в период снеготаяния, на весь период половодья, величина которого определяется оставшимися в бассейне запасами снега [3]. В связи с этим следует заметить, что значительное количество крупных притоков верхней Оби (как левых, так и правых) характеризуется тем, что основная часть водосборного бассейна расположена на равнине, однако формирование стока происходит в горной части. К числу таких рек относятся: Чарыш, Чумыш, Алей, Майма, Лосиха и т.д. На берегах указанных рек на территории Алтайского края расположено большое количество населенных пунктов. Поэтому расчет и прогнозирование весеннего стока на локальных участках водосборов является актуальной задачей. Для корректной оценки объемов стока на данном участке за определенный период необходимо проанализировать данные многолетних наблюдений как по расходам, так и по снегозапасам в непосредственной близости от гидропостов [4]. Кроме того, с использованием данных по снегозапасам на различных метеостанциях появляется возможность определения оптимального сочетания гидропост-метеостанция с использованием критерия максимально тесной корреляции.

Целью настоящей работы является изучение корреляций снегозапасов и объемов весеннего стока по данным гидропостов и метеостанций, расположенных на реках Чарыш, Чумыш (Алтайский край), и проведение сравнительного анализа полученных результатов.

Объекты исследования

Река Чумыш образуется слиянием рек Кара-Чумыш и Томь-Чумыш, впадает в р. Обь справа, на 3321-м км от устья, у с. Усть-Чумышское. В верхнем течении имеет горный характер. Общее падение 167м, средний уклон 2,6‰. Долина извилистая, преобладающая ширина 0,4–0,7 км. В среднем течении долина постепенно расширяется. Питание реки преимущественно снеговое (70–80% годового стока). Гидрологические характеристики русла [5, 6, 7, 8] представлены в табл. 1. На рис. 1 представлен исследуемый участок водосбора реки.

Таблица 1

Гидрологические характеристики р. Чумыш

Длина, км.	Площадь водосбора, км^2	Средний расход, м^3/с	Объем стока, км^3/год	Максимальный расход, м^3/с
644	23900	146	4,6	540

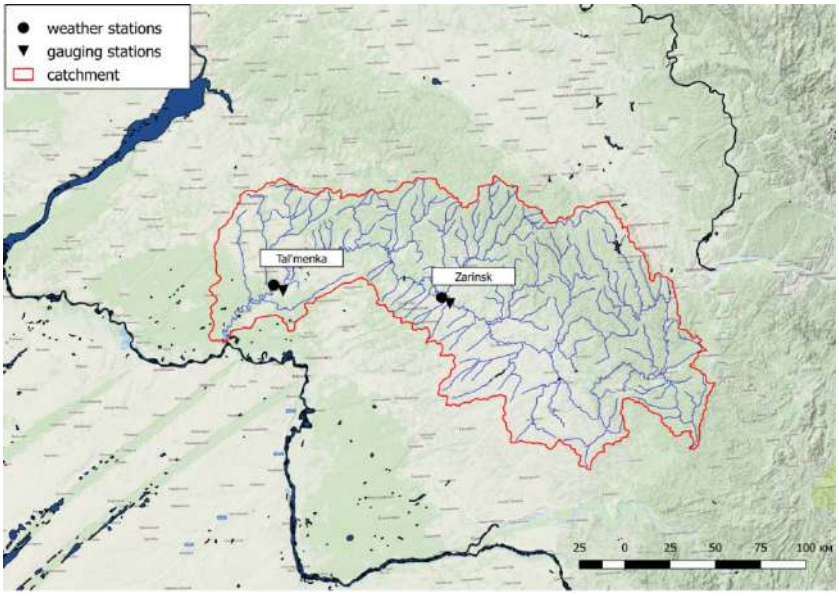


Рис. 1. Исследуемый участок водосбора р.Чумыш

Река Чарыш берет начало в месте сочленения Корогонского и Семинского хребтов на высоте 1800 м, впадает в реку Обь слева, у с. Усть-Чарыш, на 3522 км от устья р. Обь. Протяженность реки составляет 547 км. Гидрологические характеристики русла приведены в табл. 2. В верхнем течении р. Чарыш протека-

ет по горной местности, в нижнем течении выходит на широкую равнину (рис. 2), общее падение реки 1657 м, средний уклон 3,0‰. Верхняя часть водосбора (до 60% его площади) горная. На последних 25 км река течет по пойме р. Оби. Поверхностный сток в верховьях реки формируется за счет талых снеговых вод – 49%, дождевых – 30% и грунтовых – 21%. В целом на водосборе питание смешанное с преобладанием снегового.

Таблица 2

Гидрологические характеристики р.Чарыш

Длина, км	Площадь водосбора, км^2	Средний расход, м^3/с	Объем стока, км^3/год	Максимальный расход, м^3/с
547	22000	205	6,47	2090

На рис. 2 представлен исследуемый участок водосбора реки.

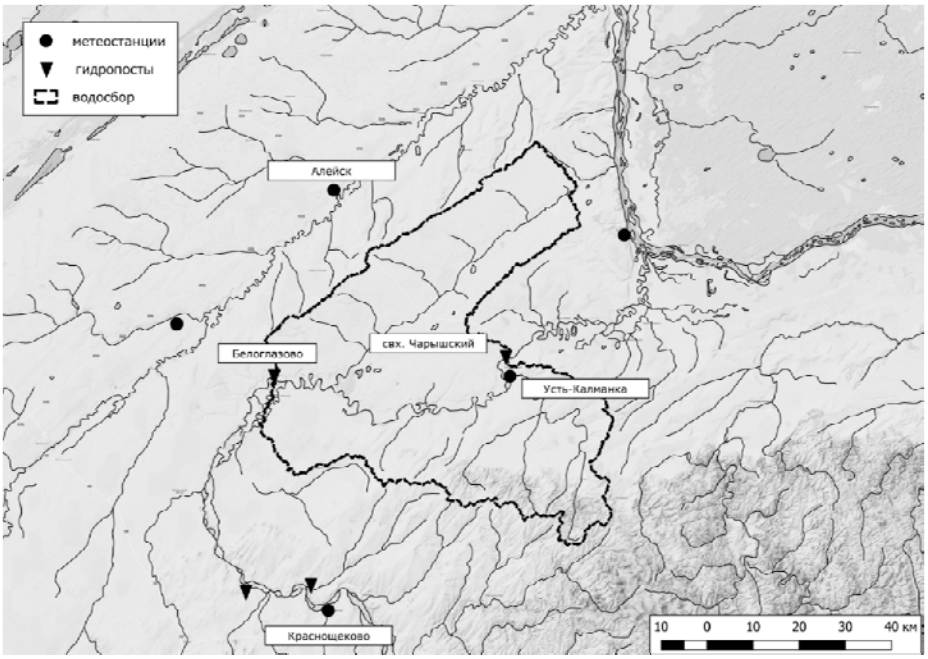


Рис. 2. Исследуемый участок водосбора р. Чарыш

Задачи и методы исследования

Интегральный объем талых вод, поступающих в реку в период снеготаяния, зависит главным образом от величины снегозапасов на водосборе. Однако эту величину весьма сложно определить однозначно. В связи с этим, целесообразно коррелировать величину стока за половодье с показателями снегозапасов, определенных по показаниям отдельных метеостанций. Кроме того, важным фактором является продолжительность процессов весеннего стока. Очевидно,

эта величина зависит от целого ряда условий, к которым следует отнести запасы воды в снежном покрове, температуру воздуха, дружность снеготаяния, скорость проникновения положительных температур воздуха на высоту зон с большими запасами снежного покрова, ветровой режим, который служит причиной переноса снега с верхних зон в долины, время начала снеготаяния. Следует заметить, что, если начало процесса снеготаяния можно определить по показаниям гидрографов (начало роста уровня и объемного расхода), то конец периода снеготаяния определить весьма затруднительно и он определяется с точностью до декады.

Целью настоящего исследования являлось изучение корреляций между величинами снегозапасов и объемом стока на участках водосбора рек Чумыш и Чарыш за многолетний период наблюдений. Продолжительность времени наблюдения *T*: от 01.04 до 31.07 каждого года. Фактически определялась кросс-корреляционная функция *r(t)* [9]

Объемные расходы и соответствующие объемы стоков рассчитывались по данным гидрологических ежегодников. Снегозапасы определялись по данным метеостанций и оценивались как произведение плотности снежного покрова на его высоту (г/см^2), т.е. фактически определялся запас воды в снежном покрове [10]

Объем стока определялся численным интегрированием гидрографа по формуле: $W(t) = \int_0^T Q(t)dt$, где *W* – объем стока, *Q(t)* – объемный расход.

Анализ корреляционных связей – река Чумыш

Анализ корреляционных связей проводился по данным двух метеостанций населенных пунктов Тальменка (74 км от устья, 570 км от истока) и Заринск (249 км от устья, 395 км от истока). Гидропосты расположены в районе этих же населенных пунктов (рис. 1).

На рис. 3. представлены результаты интегрирования характерного гидрографа по данным гидропоста р. Чумыш – пгт Тальменка.

Как следует из рисунка, соответствующий максимуму гидрографа объем стока, прошедший через створ гидропоста, составляет 0,8км^3, общий объем стока за период наблюдения (1.04 – 31.07) – 1,9км^3. На рис. 4 представлены зависимости объема стока от снегозапасов, рассчитанные по данным ГМС г.Заринска и г/п п.г.т Тальменка, на основании данных гидрологических ежегодников (1980 – 2001 гг.). Как следует из рисунка, теснота корреляционной связи зависит от периода наблюдения (интервала интегрирования). С ростом времени интегрирования наблюдается рост величины коэффициента корреляции. Для получения более детальных представлений, построена зависимость коэффициента корреляции от времени (рис. 5) для двух гидропостов. Можно сделать вывод, что, начиная с 25 суток от начала наблюдения, зависимости являются подобными.

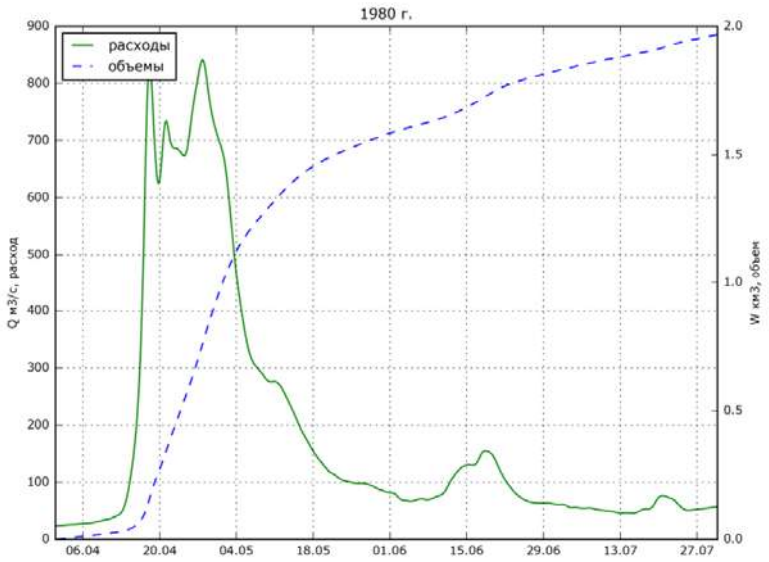


Рис. 3. Характерный гидрограф и кривая объема стока
по данным г/п р.Чумыш – пгт Тальменка за 1980 г.

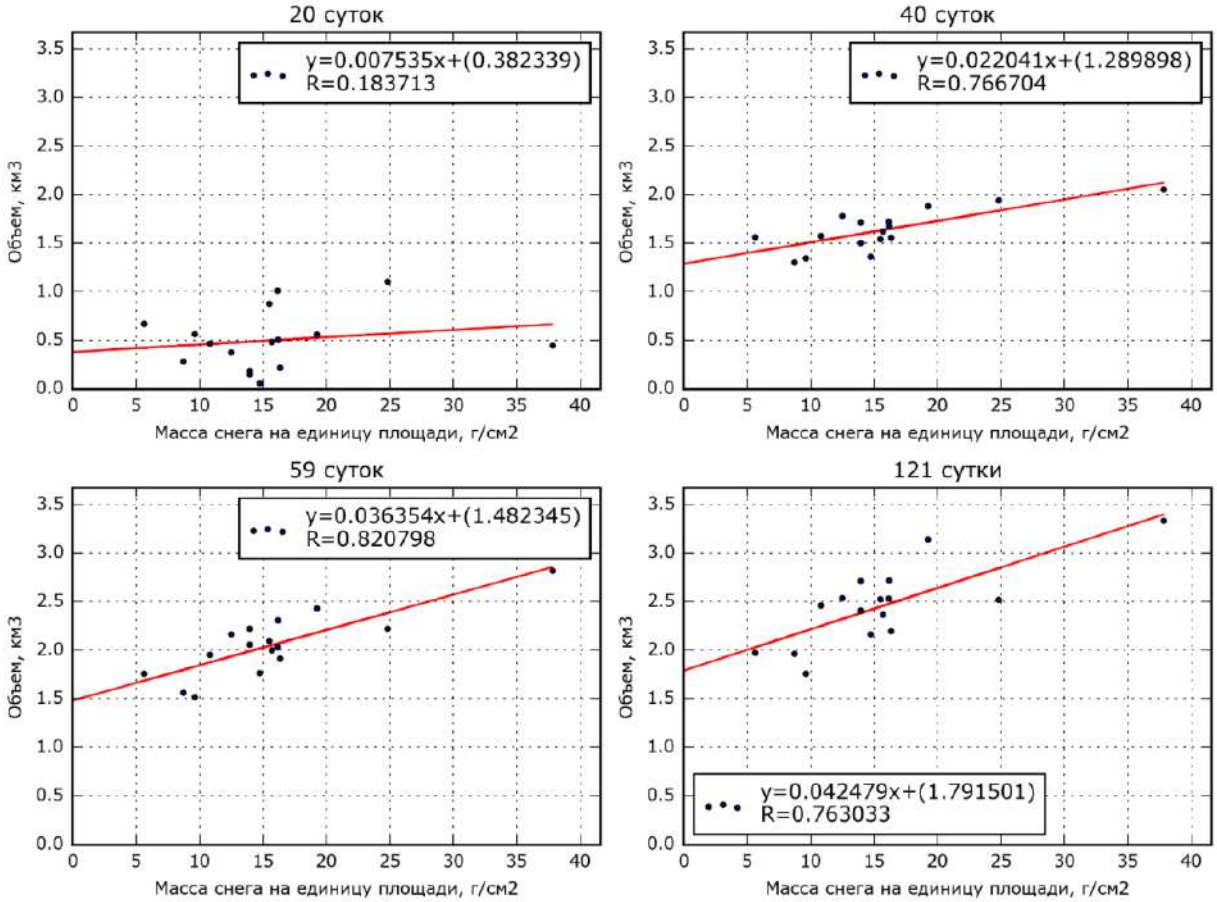


Рис. 4. Зависимости объемов стока, прошедшего через г/п р.Чумыш –
пгт Тальменка (для разных интервалов интегрирования)
от снегозапасов по данным ГМС Заринск

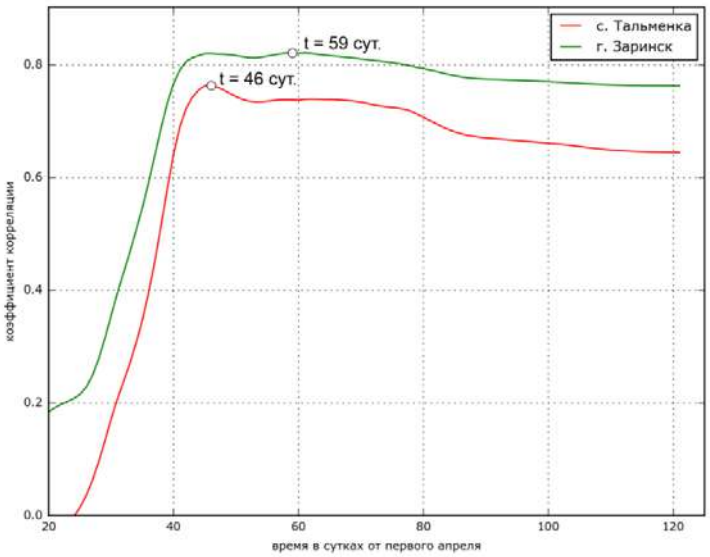


Рис. 5. Зависимость коэффициента корреляции
от времени интегрирования для двух гидропостов

С начала наблюдения наблюдается быстрый рост величины коэффициента корреляции вплоть до его максимального значения, которое по обоим кривым соответствует 46 суткам. Далее наблюдается его незначительное снижение. Второй (слабо выраженный) максимум соответствует 59 суткам. Ввиду того, что на интервале времени наблюдения от 46 до 80 сут. с начала наблюдения коэффициент корреляции меняется незначительно, можно предположить, что процессы снеготаяния вносят основной вклад в русловое питание в этот период. Вклад дополнительных источников является незначительным.

Анализ корреляционных связей – река Чарыш

Анализ корреляционных связей проводился по данным двух гидропостов р. Чарыш – с. Белоглазово и р. Чарыш – свх. Чарышский, расстояние между которыми вдоль русла составляет около 90 км, и ГМС с.Усть-Калманка и г. Алейск, приблизительно равноудаленных от с. Белоглазово (Усть-Калманка –51 км, Алейск – 46 км). Расстояние от г/п с.Белоглазово до устья 181 км, до истока 366 км, от г/п свх. Чарышский – 82 км и 465 км соответственно (рис. 2).

На рис. 6. представлены результаты интегрирования характерного гидрографа по данным гидропоста р.Чарыш – с. Белоглазово. Соответствующий максимуму гидрографа объем стока, прошедший через створ г/п, составляет около 2,5 км^3. Полный объем стока составляет около 4,5 км^3. В период снеготаяния среднесуточный расход более чем в семь раз превосходит среднее многолетнее значение (192 м^3/с).

На рис. 7 приведены зависимости объемов стока от снегозапасов по данным г/п р. Чарыш – с. Белоглазово и ГМС Усть-Калманка по 9 годам наблюдения. Как и в рассмотренном выше случае, коэффициент корреляции зависит от времени интегрирования.

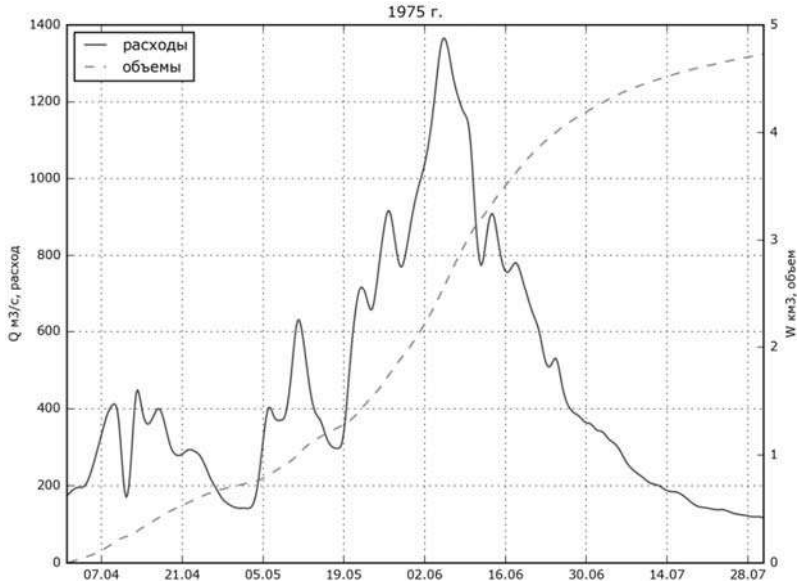


Рис. 6. Характерный гидрограф и кривая объема стока
по данным г/п р. Чарыш – с. Белоглазово за 1975 г.

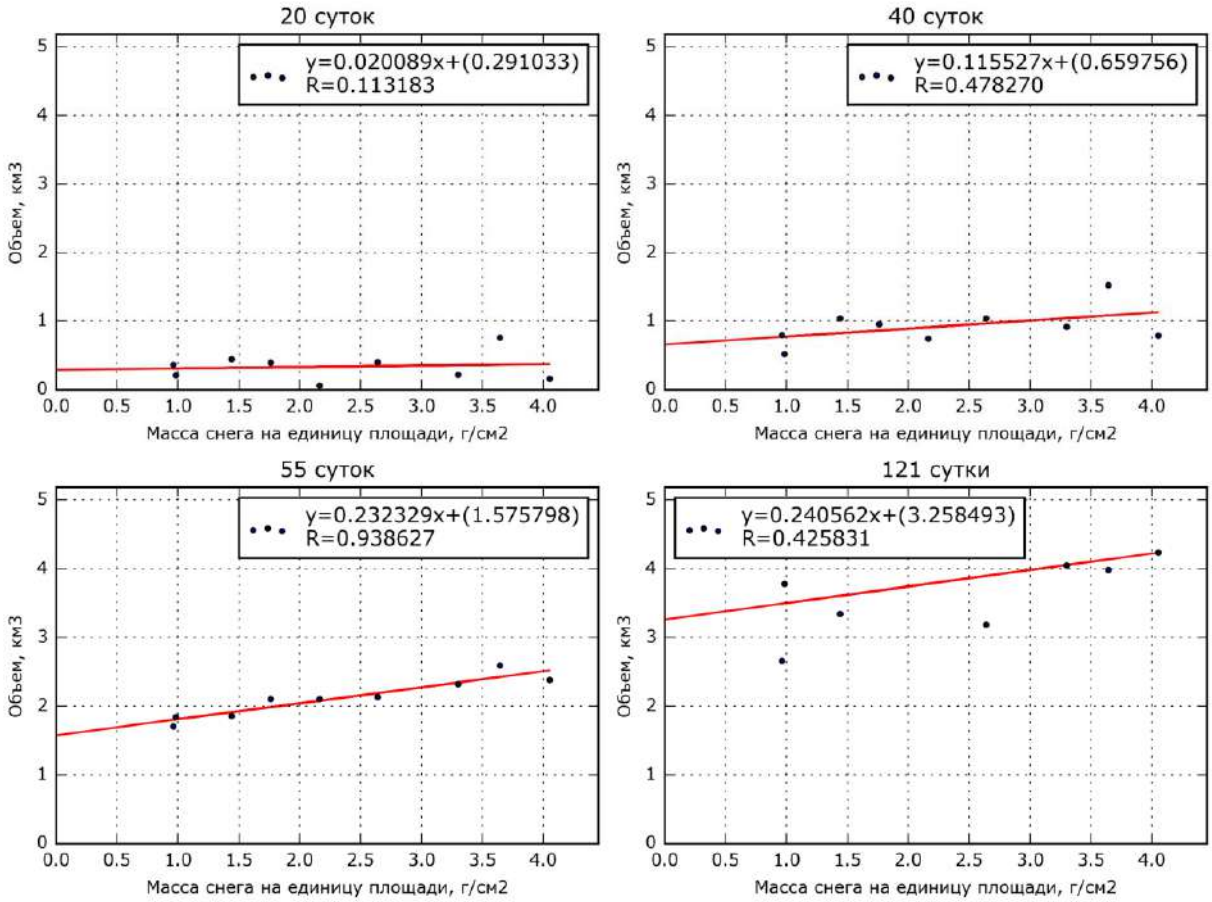


Рис. 7. Графики корреляционной связи между объемом стока, прошедшим через створ г/п р. Чарыш – с. Белоглазово за разные интервалы интегрирования (от 01.04), и снегозапасами по данным ГМС Усть-Калманка

На рис. 8 представлена зависимость коэффициента корреляции *r* от времени интегрирования по данным ГМС Алейск и Усть-Калманка и г/п Белоглазово. В данном случае, корреляционные зависимости заметно отличаются, однако пики на кривых проявляются более рельефно, при этом ординаты пиков близки. Сравнительно резкое падение коэффициента корреляции после второго пика (по сравнению с рис. 5), можно объяснить тем, что на этом участке объем стока определяется процессами, не связанными со снеготаянием (осадки, грунтовые воды и т. д.).

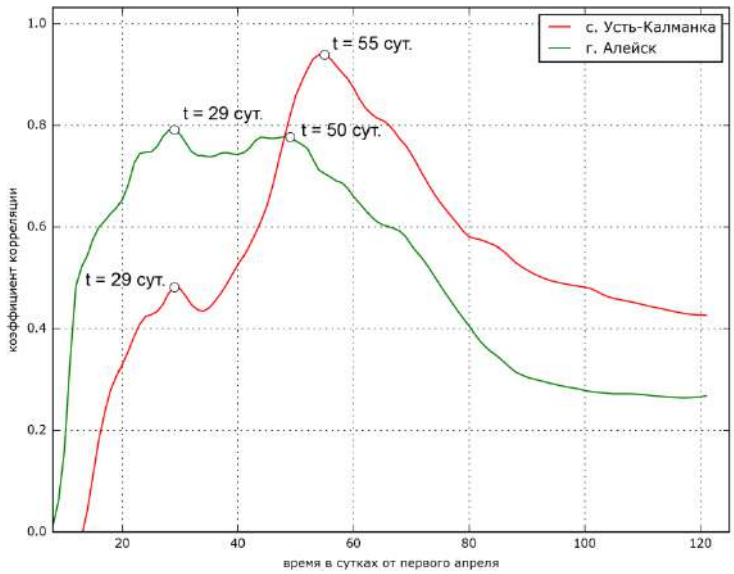


Рис. 8. Зависимость коэффициента корреляции от времени наблюдения по данным двух метеостанций (г/п с. Белоглазово)

Результаты и обсуждения

Исходя из полученных результатов (рис. 5, 8), можно сделать вывод, что зависимости коэффициента корреляции от времени интегрирования (наблюдения) характеризуются наличием двух пиков, при этом для р. Чарыш пики проявляются особенно рельефно. Можно предположить, что первый пик определяет завершение процесса снеготаяния на равнинной части. Второй пик связан с процессами снеготаяния в горной части, в верховьях реки. Величины соответствующих коэффициентов зависят от расположения метеостанций. Например, данные по метеостанции г. Алейск являются более репрезентативными в отношении определения равнинных снегозапасов. Однако при этом данные по метеостанции Усть-Калманка могут дать более точный прогноз в отношении объемов стока в верховьях реки (вторая паводковая волна). Это можно объяснить тем, что особенности процессов снеготаяния на равнине определяются целым рядом распределенных факторов, к которым следует отнести неравномерность распределения снежного покрова (например, за счет ветрового переноса), се-

зонную изменчивость составляющей грунтовых вод в общем объеме талых вод, возможной нерепрезентативностью снегомерных маршрутов и т.д. [3]. Снижение коэффициента корреляции после первого пика, можно объяснить влиянием дополнительных (не снеговых) источников питания. Последнее подтверждается резким падением коэффициента корреляции после второй волны паводка.

Для реки Чумыш, влияние не снеговых источников питания незначительно. Действительно, после первой волны паводка коэффициент корреляции практически не меняется. Временной интервал между пиками сравнительно невелик (порядка недели, тогда как для р.Чарыш он составляет порядка трех недель). Таким образом, влияние не снеговых источников питания либо не успевает проявиться, либо оно крайне незначительно. В пользу этого свидетельствует тот факт, что снижение коэффициента корреляции происходит сравнительно медленно, вплоть до июля месяца. Тогда как для р. Чарыш за этот же период наблюдения коэффициент корреляции уменьшается более чем в два раза.

Предложенный метод корреляционного анализа позволяет прогнозировать объем талых вод, поступающих в реку за период снеготаяния, по величинам снегозапасов. Вместе с тем, системный подход к анализу этой проблемы дает возможность выявить оптимальную пару гидропост-метеопост для более точных прогнозов стока за период равнинного снеготаяния и снеготаяния в горной части реки. Кроме того, метод позволяет делать оценки вклада объема талых вод в общий объем стока за весенне-летний период наблюдения.

Выводы

Анализ корреляционных связей величин снегозапасов и соответствующих объемов стока в период снеготаяния на крупных притоках верхней Оби (реки Чумыш, Чарыш) позволил установить, что коэффициент корреляции зависит от интервала времени наблюдения. Проведен статистический анализ, подтверждающий достоверность полученных расчетов. Для рассмотренных водных объектов указанная зависимость имеет два характерных пика, первый из которых (более ранний) соответствует окончанию процесса снеготаяния на равнинной части водосборов, второй определяет окончание процесса снеготаяния в горной части, в верховье бассейна. Последнее обусловлено особенностями рельефа водосборов. Установлено, что коэффициент корреляции зависит от местоположения гидропоста по отношению к метеостанции и от его удаленности от истока. Исходя из полученных результатов, определены оптимальные сочетания гидропост – метеостанция для наиболее точного прогнозирования объема талых вод в период снеготаяния как для периода равнинного снеготаяния (первая волна паводка), так и для снеготаяния в горной части водосборов (вторая волна паводка). Проведен сравнительный анализ изменения коэффициента корреляции. Установлено, что для реки Чумыш основная доля объема стока за весеннее – летний период определяется талыми водами, для реки Чарыш значи-

тельная доля в общем объеме стока, определяется дополнительными (не снеговыми) источниками.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Волков И. А. И.А. О колебаниях климата во внеледниковой полосе (Западная Сибирь, Туран, Прикаспий) // В сб. Кайнозой Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 1968.– С. 48 – 58.

2. Вершинина И.П., Игловская Н.В. Оценка снегозапасов в горах юго-востока Западной Сибири // Вестник Том. гос. ун-та. – 2010. – №336. – С.184-186.

3. Харшан А.А. Долгосрочные прогнозы стока горных рек Сибири. Труды Гидрометеоцентра СССР. – Л.: Гидрометеоиздат. – 1970. – 211 с.

4. Галахов В.П. Оценка объема стока периода половодья в бассейне Томи по ежегодным снегозапасам // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).– 2009. – Т.17. – №12.– С.292–295.

5. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики. Том 15. Алтай и Западная Сибирь. – Л.: Гидрометеоиздат. – 1962. – 462 с.

6. Ресурсы поверхностных вод районов освоения целинных и залежных земель. Выпуск VI. Равнинные районы Алтайского края и южная часть Новосибирской области. Под общей редакцией В.А. Урываева – Монография. – Гидрометеоиздат. – 1962. – 977 с.

7. Научно-популярная энциклопедия «Вода России» //http://water-rf.ru //Чумыш. С.Н. Рулёва

8. Научно-популярная энциклопедия «Вода России» //http://water-rf.ru //Чарыш. С.Н. Рулёва

9. Розенберг Г.С., Шитиков В.К., Брусиловский П.М. Экологическое прогнозирование (Функциональные предикторы временных рядов). – Тольятти. – 1994. – 182 с.]

10. А.И. Чеботарев Гидрологический словарь. – Л., Гидрометеоиздат. – 1978. – 308 с.

© В. Ю. Филимонов, Н. А. Балдаков, А. В. Кудишин, О. В. Ловцкая, 2018

УДК 621.396

ИК-РАДИОМЕТР МСУ-ИК-СРМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА ТЕХНОГЕННЫХ И ПРИРОДНЫХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Андрей Юрьевич Ряднов
АО «Российские космические системы», 11250, Россия, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53, инженер-исследователь 2-й категории, тел. (495)673-94-01, e-mail: Ryadnov_ay@spacecorp.ru

Роман Викторович Андреев
АО «Российские космические системы», 11250, Россия, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53, инженер-исследователь 2-й категории, тел. (495)673-95-03, e-mail: Andreev-k@list.ru

Юрий Михайлович Гектин
АО «Российские космические системы», 11250, Россия, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53, кандидат технических наук, доцент, главный конструктор, тел. (495)673-95-03, e-mail: Gektin_ym@spacecorp.ru

Николай Петрович Акимов
АО «Российские космические системы», 11250, Россия, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53, главный специалист, тел. (495)673-95-03, e-mail: Petrov_sv@spacecorp.ru

Александр Георгиевич Фролов
АО «Российские космические системы», 11250, Россия, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53, кандидат технических наук, доцент, начальник сектора разработки многоканальных сканирующих устройств ИК-диапазона, тел. (495)673-94-01, e-mail: Frolov_ag@spacecorp.ru

Юрий Юрьевич Гулин
АО «Российские космические системы», 11250, Россия, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53, кандидат технических наук, главный специалист, тел. (495)673-94-01, e-mail: gulin@front.ru

ИК радиометр МСУ-ИК-СРМ осуществляет сеансную трассовую съемку в инфракрасном диапазоне спектра с пространственным разрешением 200 м в надире при полосе обзора 2000 км. Аппаратура предназначена для мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций, обнаружения пожаров, тематического картографирования земной поверхности. В работе кратко рассмотрена конструкция ИК-радиометра. Приведено сравнение аппаратуры МСУ-ИК-СРМ с зарубежными и отечественными аналогами. Представлены первые результаты работы радиометра на орбите в составе КА «Канопус-В-ИК».

Ключевые слова: ИК радиометр, дистанционное зондирование Земли, сканирующее устройство, космический мониторинг пожаров, мониторинг высокотемпературных объектов, обнаружение пожаров.

IR RADIOMETER MSD-IR-MRM FOR OPERATIVE MONITORING OF TECHNOGENIC AND NATURAL DISASTER

Andrey Yu. Ryadnov
JSC «Russian Space Systems», 53, Aviamotornaya St., Moscow, 111250, Russia, Research Engineer Category 2, phone: (495)673-94-01, e-mail: Ryadnov_ay@spacecorp.ru

Roman V. Andreev
JSC «Russian Space Systems», 53, Aviamotornaya St., Moscow, 111250, Russia, Research Engineer Category 2, phone: (495)673-95-03, e-mail: Andreev-k@list.ru

Yuriy M. Gektin
JSC «Russian Space Systems», 53, Aviamotornaya St., Moscow, 111250, Russia, Ph. D., Associate Professor, Chief Designer, phone: (495)673-95-03, e-mail: Gektin_ym@spacecorp.ru

Nikolai P. Akimov
JSC «Russian Space Systems», 53, Aviamotornaya St., Moscow, 111250, Russia, Chief Specialist, phone: (495)673-95-03, e-mail: Petrov_sv@spacecorp.ru

Alexander G. Frolov
JSC «Russian Space Systems», 53, Aviamotornaya St., Moscow, 111250, Russia, Ph. D., Associate Professor, Head of Sector of IR Multichannel Scanning Devices Development, phone: (495)673-94-01, e-mail: Frolov_ag@spacecorp.ru

Yuriy Yu. Gulin
JSC «Russian Space Systems», 53, Aviamotornaya St., Moscow, 111250, Russia, Ph. D., Chief Specialist, phone: (495)673-94-01, e-mail: gulin@front.ru

IR radiometer MSD-IR-MRM (multichannel scanning IR-radiometer of medium resolution) provides a session tracing infrared survey with a spatial resolution 200 m at nadir and a 2000 km viewing range. It designed for monitoring of technogenic and natural emergencies, fire detection, thematic mapping of the Earth's surface. The design of IR radiometer is briefly considered. The comparison of MSD-IR-MRM with foreign and native counterparts is presented. The first results of the radiometer operating in orbit on board of satellite «Kanopus-V-IR» are presented.

Key words: IR radiometer, remote sensing of the Earth, scanner, space fire monitoring, monitoring of high-temperature objects, fire detection.

Введение

В Российской Федерации актуальной является задача по оперативному обнаружению пожаров, техногенных и природных катастроф. Ранее эта задача решалась при помощи зарубежной аппаратуры дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ): радиометров AVHRR, установленных на спутниках серии NOAA, спектрометра MODIS на спутниках TERRA и AQUA.

Создание в 2009 году в России полноценной отечественной метеорологической системы, включающей среднеорбитальный спутник «Метеор-М» с широкозахватной многозональной аппаратурой МСУ-МР [1], позволило использовать отечественные данные ДЗЗ.

Однако, все перечисленные космические аппараты в совокупности не позволяли получить полную и оперативную информацию о пожарной обстановке лесных массивов на территории России. В связи с этим в АО «Российские космические системы» было разработано многоканальное сканирующее устройство среднего и дальнего ИК диапазонов, среднего разрешения (МСУ-ИК-СРМ)

[2] для КА «Канопус-В-ИК» (разработчик АО «Корпорация «ВНИИЭМ»). Аппарат был успешно выведен на орбиту 14 июля 2017 года.

Помимо основной задачи многоканальный радиометр может быть использован для мониторинга гидрометеорологических явлений, различных видов тематического картографирования земной поверхности, исследования динамических процессов на акваториях, вулканической деятельности и решения других задач, в основе которых лежит выявление областей с повышенной температурой или аномальными тепловыми контрастами.

Характеристики аппаратуры МСУ-ИК-СРМ и принцип ее построения

Радиометр МСУ-ИК-СРМ состоит из четырех независимых оптико-электронных блоков. В процессе съемки задействована одна пара оптико-электронных блоков, другая пара является холодным резервом. Для обеспечения радиометрической точности измерений аппаратуры в ее состав введены бортовые эталонные излучатели, используемые для калибровки фотоприемных устройств. На рис. 1 представлена модель радиометра МСУ-ИК-СРМ.

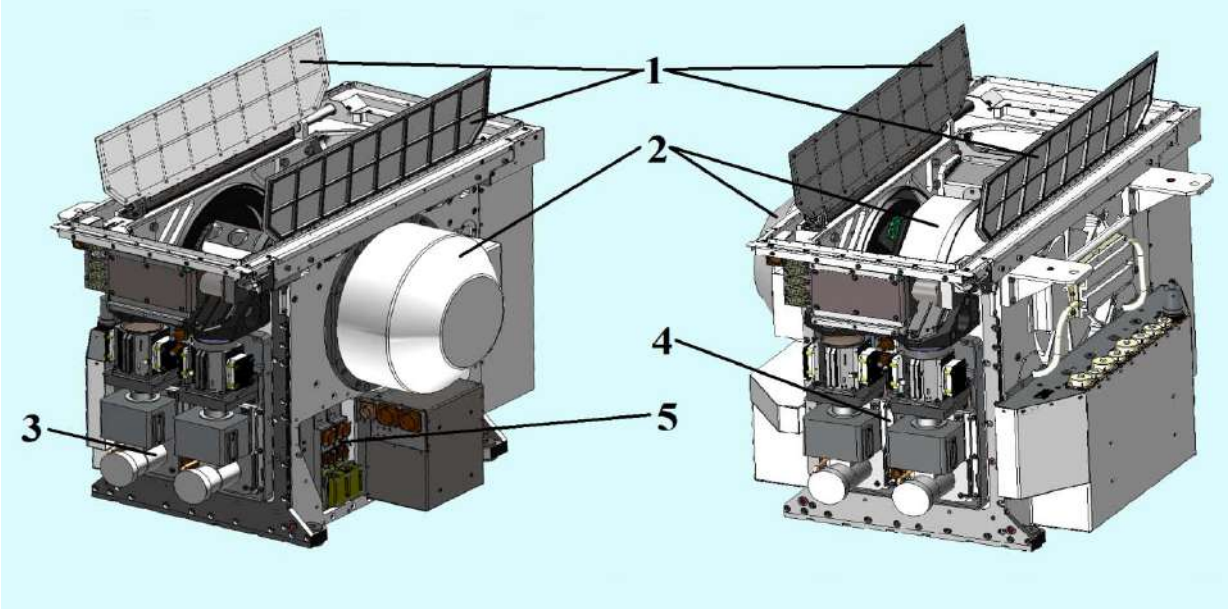


Рис. 1. 3D-модель радиометра МСУ-ИК-СРМ:

1 - защитные крышки; 2 - сканирующее зеркало с приводом; 3 - оптико-электронные блоки основного комплекта; 4 - оптико-электронные блоки резервного комплекта; 5 - блоки обработки сигналов

Использование отечественных матричных фотоприемников [3], формата 288x4, охлаждаемых микрокриогенной системой Стирлинга, в сочетании с механическим сканированием (используется двухстороннее плоское зеркало, совершающее круговое движение с помощью низкооборотного прецизионного

привода) позволило реализовать радиометр с широкой полосой обзора (2000 км) и высоким пространственным разрешением (200 м).

При формировании видеосигнала в МСУ-ИК-СРМ применен метод двухточечной коррекции выполнения нормализации изображения. Также с целью повышения отношения сигнал/шум реализован режим временной задержки и накопления (по 4 элементам).

В табл. 1 представлены характеристики радиометра МСУ-ИК-СРМ.

Таблица 1

Тактико-технические характеристики ИК радиометра МСУ-ИК-СРМ

Количество спектральных каналов	2
Границы спектральных зон	1) 3,5 – 4,1 мкм 2) 8,4 – 9,4 мкм
Полоса обзора (при высоте орбиты КА 510 км)	2000 км
Пространственное разрешение в надире	200 м
Диапазон измеряемых температур	230 – 500 К
Эквивалентная шуму разность измеряемых температур (на уровне 300 К)	<0,30К (для канала 3,5 – 4,1 мкм) <0,15К (для канала 8,4 – 9,4 мкм)
Разрядность выходного сигнала	16 бит
Режим работы	Посеансно 23 мин
Масса	≈ 82 кг

Сравнение радиометра МСУ-ИК-СРМ с отечественными и зарубежными аналогами

Система мониторинга пожарной обстановки должна обладать как высоким пространственным разрешением, так как для очага зарождающегося пожара характерны малые размеры, так и широкой полосой обзора для повышения оперативности системы наблюдения.

В табл. 2 перечислены основные приборы, используемые для мониторинга пожаров. Также, приведены характеристики аппаратуры HRSR (КА BIRD, Германия), работавшей до 2003 года. Упомянутая аппаратура была первой, специально предназначенной для мониторинга пожаров.

Используемую для мониторинга пожаров аппаратуру можно условно разделить на два типа. Первый – приборы с широкой полосой обзора и низким пространственным разрешением (AVHRR, MODIS, МСУ-МР). Второй – приборы с высоким пространственным разрешением, но с узкой полосой обзора (ASTER, IRMSS, система FireBIRD). Приборы первого типа позволяют осуществлять ежедневный мониторинг любой местности, но при этом обладают слабой обнаружительной способностью. Приборы второго типа способны обнаруживать малые очаги горения, но интервал между съемками одного и того же участка местности составляет несколько десятков дней.

Таблица 2

Аппаратура, используемая в различных космических программах по мониторингу пожаров и других высокотемпературных объектов

Прибор	Страна	Спектральный диапазон, мкм (№ канала)	Разрешение (№ канала)	Полоса обзора	КА, год запуска	Высота орбиты	Функционирование в настоящее время
AVHRR	США	0,58-0,68 (1) 0,72-1,10 (2) 1,58-1,64 (3) 3,55-3,93 (4) 10,3-11,3 (5) 11,3-12,5 (6)	1,1 км	2800 км	NOAA-6 – NOAA-19 (1979-2009) MetOp-A, MetOp-B (2006, 2012)	800-850 км	да (NOAA-15, NOAA-18, NOAA-19, MetOp-A, MetOp-B)
MODIS	США	0,4-1,0 (1-20) 3,6-14,4 (21-36)	250м – 1 км (1-20) 1 км (20-36)	2330 км	Terra (1999) Aqua (2002)	705 км	да
IRMSS	Бразилия / Китай	0,5-1,1 (1) 1,55-1,75 (2) 2,08-2,35 (3) 10,4-12,5 (4)	40 м (1-3) 80 м (4)	120 км	CBERS-1 – CBERS-4 (1999-2014)	780 км	да (CBERS-4)
HRSR	Германия	3,4-4,2 (1) 8,5-9,5 (2)	370 м	190 км	BIRD (2001)	566 км	нет (с 2003)
ASTER	Япония	0,20-0,86 (1-4) 1,6-2,4 (5-10) 8,1-11,7 (11-15)	15 м (1-4) 30 м (5-10) 90 м (11-15)	60 км	Terra (1999)	705 км	да (с января 2009 года каналы 5-10 не работают
FireBIRD	Германия	3,4-4,2 (1) 8,5-9,3 (2)	356x178 м	178 км	TET-1 sat. (2012) BIROS sat. (2016)	510 км	да
OLI/TIRS	США	0,50-0,68 (1) 0,43-2,30 (2-9) 10,3-12,5 (10-11)	15 м (1) 30 м (2-9) 100 м (10-11)	185 км	Landsat-8 (2013)	705 км	да
МСУ-МР	Россия	0,5-0,7 (1) 0,7-1,1 (2) 1,6-1,8 (3) 3,5-4,1 (4) 10,5-11,5 (5) 11,5-12,5 (6)	1 км	2800 км	Метеор-М №2 (2014)	835 км	да
МСУ-ИК-СРМ	Россия	3,5-4,1 (1) 8,4-9,4 (2)	200 м	2000 км	Канопус-В-ИК (2017)	510 км	да

Аппаратура МСУ-ИК-СРМ сочетает в себе преимущества приборов обоих типов. При пространственном разрешении 200 м в надире она позволяет обнаруживать малые очаги горения размером 5х5 м, обладая широкой полосой обзора. Данные характеристики аппаратуры позволяют осуществлять ежедневный мониторинг пожаров на всей территории Российской Федерации.

Первые результаты работы радиометра МСУ-ИК-СРМ на орбите

С момента запуска КА «Канопус-В-ИК» (июль 2017 года) по март 2018 года проводились летно-конструкторские испытания аппаратуры МСУ-ИК-СРМ [4, 5]. В ходе этих испытаний измерялись тактико-технические характеристики радиометра (такие как пространственное разрешение, полоса обзора и т.д.) и оценивались информационные возможности аппаратуры.

1. Полоса обзора.

Минимально-допустимая полоса обзора аппаратуры МСУ-ИК-СРМ составляет 2000 км. В ходе испытаний измерялась полоса обзора для каждого отдельного канала. Результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

Ширина полосы обзора аппаратуры МСУ-ИК-СРМ

Комплект	Канал	Требование, км	Полоса обзора, км
Основной	3,5 – 4,1 мкм	≥2000	2095
	8,4 – 9,4 мкм		2102
Резервный	3,5 – 4,1 мкм		2091
	8,4 – 9,4 мкм		2103

Реализованная в радиометре МСУ-ИК-СРМ полоса обзора >2000 км позволяет обеспечить за 5-6 последовательных витков (при длительности сеанса 15-20 минут) съемку всей территории России.

2. Пространственное разрешение.

Разрешающую способность аппаратуры можно характеризовать двумя параметрами: размером проекции пикселя и коэффициентом передачи модуляции. Результаты измерения этих параметров приведены в табл. 4.

Таблица 4

Размер проекции пикселя и коэффициент передачи модуляции аппаратуры МСУ-ИК-СРМ

Комплект	Канал	Размер проекции пикселя, м		Коэффициент модуляции, %	
		Требование	Измеренное значение	Требование	Измеренное значение
Основной	3,5 – 4,1 мкм	≤ 200	199,7	≥ 30	35
	8,4 – 9,4 мкм		197,7		30
Резервный	3,5 – 4,1 мкм		195,5		32
	8,4 – 9,4 мкм		199,6		35

При таком пространственном разрешении, аппаратура МСУ-ИК-СРМ не уступает по возможностям обнаружения малоразмерных очагов пожара зарубежной системе FireBIRD, несмотря на значительно более широкую полосу обзора [6].

На рис. 2 приведены фрагменты изображений очагов горения остаточных газов на нефтяных вышках, полученных аппаратурой МСУ-ИК-СРМ.

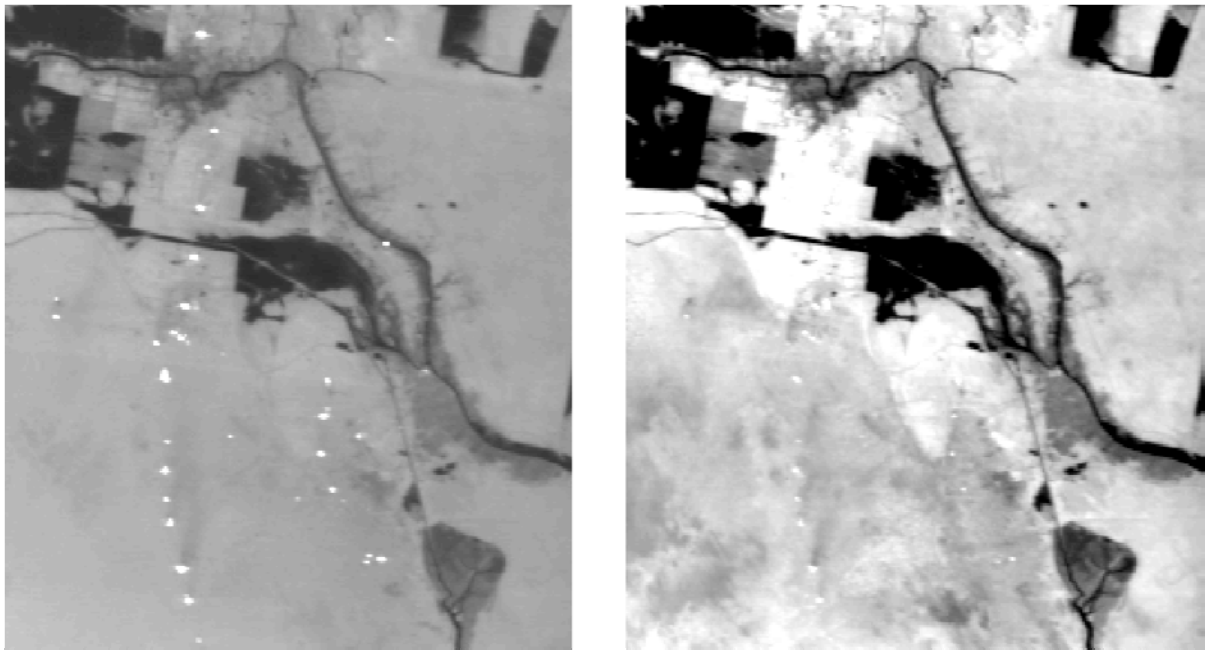


Рис. 2. Фрагменты изображений МСУ-ИК-СРМ газовых факелов на нефтяных месторождениях в Ираке в двух спектральных каналах: 3,5–4,1 мкм (слева) и 8,4–9,4 мкм (справа)

3. Динамический диапазон измеряемых температур.

Результаты оценки динамического диапазона радиометра МСУ-ИК-СРМ в уровнях квантования (ур.кв.) 16-разрядного выходного сигнала при различных измеряемых температурах приведены в табл. 5.

По результатам испытаний можно сделать вывод, что на верхней своей границе диапазон измеряемых температур отвечает предъявляемым требованием. На нижней границе наблюдается отклонение от требований для канала 8,4 – 9,4 мкм. Данное отклонение связано с отличием температуры холодного эталонного источника излучения на борту от расчетного. Несмотря на указанное отклонение от требований, аппаратура способна регистрировать заявленные температуры в области низких значений порядка 230 К.

Высокая информативность (16 бит на пиксел) и специальная настройка фотоприемника позволяют измерять температуры объектов от 230 до 500 К. Это позволяет не только детектировать высокотемпературные объекты, но и оценивать площадь и температуру горения. Широкий диапазон измеряемых температур позволяет решать задачи по исследованию активности вулканов и прогнозированию сейсмической активности.

Таблица 5

Динамический диапазон измеряемых температур
аппаратуры МСУ-ИК-СРМ

Комплект	Канал	Температура, К	Требование, ур.кв.	Измеренное значение, ур. кв.
Основной	3,5 – 4,1 мкм	250	60±30	30
		330	700±50	688
		500	32000±8000	33416
	8,4 – 9,4 мкм	220	60±30	4
		330	900±50	856
Резервный	3,5 – 4,1 мкм	250	60±30	30
		330	700±50	697
		500	32000±8000	34123
	8,4 – 9,4 мкм	220	60±30	3
		330	900±50	850

На рис. 3 приведен снимок действующего вулкана на острове Гавайи.

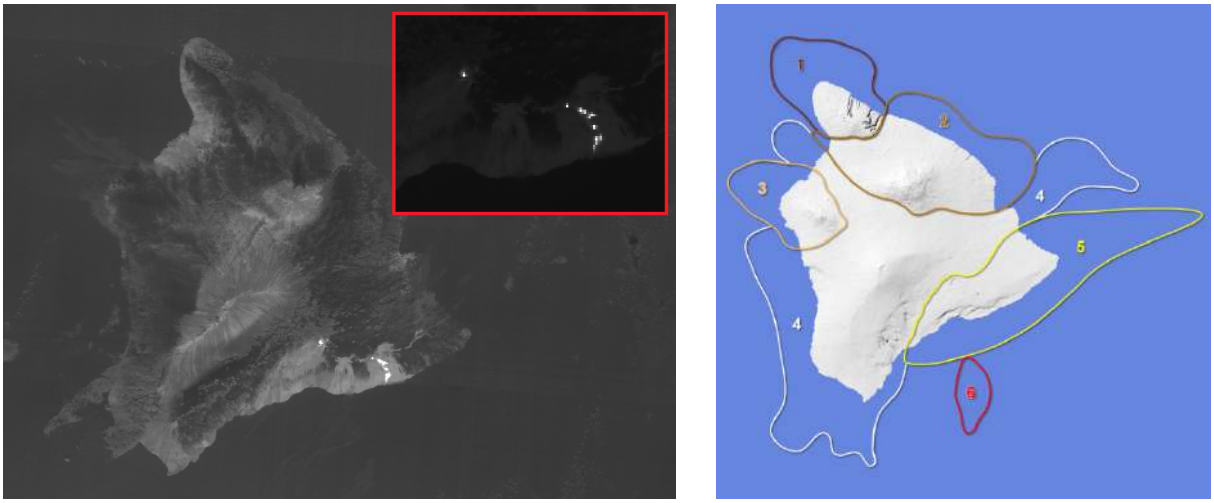


Рис. 3. Слева – снимок канала 3.5-4.1 мкм сканера МСУ-ИК-СРМ, остров Гавайи, 12 октября 2017 года.

Справа – карта границ вулканов острова Гавайи: 1. Кохала (1670 м) – потухший; 2. Мауна-Кеа (4205 м) – дремлющий; 3. Хуалалай (2521 м) – дремлющий; 4. Мауна-Лоа (4169 м) – активный; 5. Килауэа (1247 м) – активный; 6. Лоихи (975 м) – подводный активный

4. Радиометрическое разрешение.

Результаты оценки радиометрического разрешения радиометра МСУ-ИК-СРМ приведены в табл. 6.

Таблица 6

Радиометрическое разрешение аппаратуры МСУ-ИК-СРМ

Комплект	Канал	Требование, К (на уровне 300 К)	Эквивалентная шуму разность измеряемых температур, К
Основной	3,5 – 4,1 мкм	≤ 0,5	0,18
	8,4 – 9,4 мкм	≤ 0,2	0,2
Резервный	3,5 – 4,1 мкм	≤ 0,5	0,19
	8,4 – 9,4 мкм	≤ 0,2	0,05

Высокое радиометрическое разрешение сканера МСУ-ИК-СРМ позволяет регистрировать локальные разности температуры до 0,2 К. Такая радиометрическая точность позволит успешно решать прикладные задачи, такие как: исследование динамических процессов на акваториях, различные виды тематического картографирования земной поверхности, мониторинг вырубки лесов и т.д. (рис. 4).

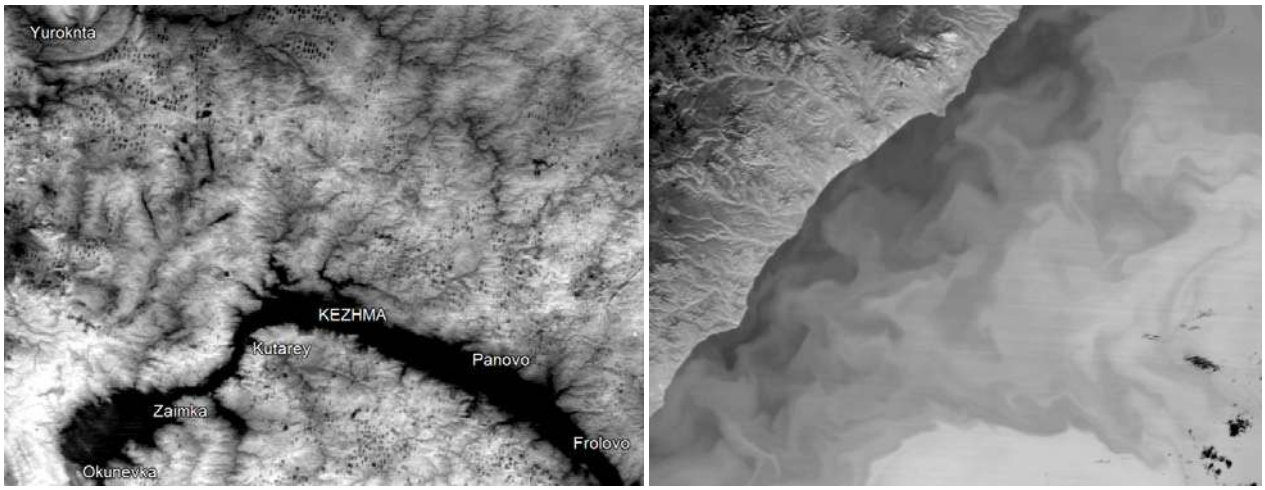


Рис. 4. Слева – вырубка леса, Красноярский край, 28 февраля 2018 года, аппаратура МСУ-СК-СРМ, 8.4-9.4 мкм; справа – Японское море, 11 октября 2017 года, аппаратура МСУ-СК-СРМ, 8.4-9.4 мкм

Заключение

Радиометр МСУ-ИК-СРМ, входящий в состав КА «Канопус-В-ИК», позволяет получить принципиально новую информацию о высокотемпературных объектах за счет сочетания высокого пространственного разрешения с широкой полосой обзора. При решении задач мониторинга пожаров радиометр МСУ-ИК-СРМ будет иметь преимущества не только над существующими приборами (AVHRR, MODIS, МСУ-МР), но и над перспективными (VIIRS и МСУ-МР-МП) с разрешением 0,5 км.

Результаты летных испытаний радиометра показали, что требования, предъявляемые к аппаратуре, реализованы полностью, а радиометр в дальнейшем может быть использован при создании российской специализированной космической системы наблюдения за пожарной обстановкой лесных территорий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Акимов Н. П., Бадаев К. В., Гектин Ю. М., Рыжаков А. В., Смелянский М. Б., Фролов А. Г. Многозональное сканирующее устройство малого разрешения МСУ-МР для космического информационного комплекса «Метеор-М». Принцип работы, эволюция, перспективы» // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2015, Т. 2. – Вып. 4.

2. Патент № 2324151 РФ. G01J 3/06. Многоканальный радиометр с широким углом обзора; патентообладатели Акимов Н.П., Гектин Ю.М., Смелянский М.Б., Фролов А.Г.. Заявлено 11.09.2006. Опубликовано 10.05.2008.

3. Акимов Н.П., Гектин Ю.М., Смелянский М.Б., Фролов А.Г. ИК радиометры нового поколения на основе многоэлементных приемников излучения // Мехатроника, автоматизация, управление, приложение. – №5. – 2007.

4. А.В. Горбунов, И.Ю.Ильина, В.К.Саульский. Состояние и перспективы развития космических комплексов «Канопус-В» и «Метеор-М» // – Москва: «Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы». – 2015. – Т. 2. – Вып. 4.

5. Н.П. Акимов, К. В. Бадаев, Ю. М. Гектин, А. А. Зайцев, М. Б. Смелянский, А. В. Рыжаков, А. Г. Фролов / Перспективный ИК радиометр для оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций на территории России // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: Материалы III Международной научной конференции, (Красноярск, 13–16 сентября 2016 г.).

6. Zhukov, B., Briess, K., Lorenz, E., Oertel, D., Skrbek, W. (2003) BIRD Detection and Analysis of High-temperature Events: First Results. // Proc. SPIE, 4886, 160-171.

© А. Ю. Рядноv, Р. В. Андреев, Ю. М. Гектин, Н. П. Акимов, А. Г. Фролов, Ю. Ю. Гулин, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

1. *Е. Н. Кулик, Е. Ю. Сахарова.* Распознавание пахотных земель на основе сезонной изменчивости характеристик растительного покрова 3

2. *А. П. Гук, М. М. Шляхова.* Особенности современного этапа развития средств дистанционного зондирования..... 7

3. *Л. Г. Евстратова.* О возможной интеграции методов фотограмметрии и BIM-технологии 14

4. *А. С. Скоробогатова, М. С. Епифанова, Е. П. Хлебникова.* Цифровые фотограмметрические системы в топографо-геодезическом производстве Республики Казахстан..... 19

5. *В. В. Дедкова.* Современные программные продукты для обработки материалов аэросъемок с беспилотных авиационных систем..... 25

6. *Т. А. Хлебникова, О. А. Опритова, С. М. Аубакирова.* Экспериментальные исследования точности построения фотограмметрической модели по материалам БПЛА 32

7. *К. И. Калашников, Е. Н. Кулик.* К проблеме совершенствования системы мониторинга земель сельскохозяйственного назначения с использованием данных дистанционного зондирования Земли 38

8. *Аловсат Шура-оглы Гулиев.* Оценка точности определения высот по данным воздушного лазерного сканирования для автоматизации пространственных трансформаций функциональной модели регионов 43

9. *А. Е. Михайлов, Е. В. Клевцов, Э. Ю. Осипов.* Дистанционное зондирование ледников Восточного Саяна по данным Landsat..... 52

10. *Е. С. Черепанова, Л. Н. Ермакова, А. Н. Шихов.* Разработка карт распределения биоклиматических индексов на основе данных Worldclim 2.0 (на примере территории Пермского края)..... 56

11. *П. В. Воронина, Д. Л. Чубаров, Н. Н. Добрецов.* Развитие метода RST (Robust Satellite Technique) для выявления аномалий температуры поверхности на территории Горного Алтая..... 64

12. *А. А. Донцов, И. А. Суторихин.* Геоинформационная система регистрации гидрологических параметров внутриконтинентальных водных объектов..... 74

13. *М. А. Гурьянов, С. М. Борзов.* Классификация гиперспектральных изображений на основе соотношений яркостей различных каналов..... 81

14. *И. Г. Казанцев.* Об одном детекторе угловых точек на изображениях..... 89

15. *С. М. Кононенко, Т. В. Старостина.* Спутниковые данные в прогнозе урожайности пшеницы для административных районов Сибири 94

16. *С. А. Рылов.* Многолетний мониторинг усыхания озера Убинское по спутниковым данным Landsat 4,5,7,8 с помощью специализированных алгоритмов сегментации 102
17. *Ю. Н. Синявский, С. А. Рылов.* Экспериментальное сравнение непараметрических алгоритмов кластеризации для сегментации мультиспектральных изображений 109
18. *А. А. Бучнев, П. А. Ким, В. П. Пяткин, Ф. В. Пяткин.* Распределенная сеть облачных web-сервисов для обработки спутниковых данных 115
19. *П. В. Мельников, И. А. Пестунов.* Экспериментальное исследование качества классификации гиперспектральных изображений с использованием пространственных признаков на основе геометрических моментов 125
20. *В. Ф. Рапута, А. А. Леженин, Т. В. Ярославцева.* Оценка параметров выбросов новосибирских ТЭЦ с использованием спутниковой информации 137
21. *П. А. Ким.* Естественная кластеризация 147
22. *Т. В. Ярославцева, В. Ф. Рапута, И. А. Соловьева.* Наземный и спутниковый мониторинг атмосферного загрязнения в районе Новосибирского электродного завода 152
23. *М. С. Хайретдинов, Б. В. Поллер, А. В. Бритвин, Д. Я. Машников.* Акустооптическое взаимодействие на инфранизких частотах 158
24. *В. И. Доброродный, Г. Ф. Седухина, М. С. Хайретдинов.* Комбинированная сейсмоакустическая локация в проблеме геоэкологического мониторинга природной среды 168
25. *О. Н. Соболева.* Влияние корреляции между диэлектрической проницаемостью и проводимостью на эффективную оценку энергии в скин-слое 177
26. *Б. Х. Имомназаров, Х. Х. Имомназаров, П. В. Коробов.* Об одной некорректной задаче, возникающей в теории пороупругости 183
27. *Г. С. Васильев, Б. Ж. Мамасолиев.* Ядро основных групп Ли преобразований одномерной системы уравнений двухскоростной гидродинамики 188
28. *С. А. Ефимов.* Качественный анализ карьерного взрыва как источника сейсмических волн 195
29. *С. А. Ефимов.* Количественный анализ местоположения землетрясений методами волновой сейсмики 202
30. *А. И. Крылова, Е. А. Антипова.* Гидродинамическое моделирование движения водотоков в дельте реки Лены 211
31. *Э. А. Пьянова, В. В. Пененко, Л. М. Фалейчик.* Рассеивание примесей от высотных источников в устойчиво стратифицированной атмосфере 219
32. *А. В. Пененко.* Итеративная регуляризация при решении обратных задач химии атмосферы с данными типа временных рядов концентраций 226

33. *А. В. Пененко, А. В. Гочаков, Ж. С. Мукатова, П. Н. Антохин.* Численное исследование алгоритма вариационного усвоения данных мониторинга химического состава атмосферы в условиях города Новосибирска 234
34. *В. В. Пененко.* Алгоритмы обратных задач продолжения в приложениях к проблемам окружающей среды 243
35. *С. В. Михайлюта, А. А. Леженин, П. Г. Гудовский.* Концентрации бенз(а)пирена в атмосфере г. Красноярска в летний и зимний периоды 249
36. *Е. А. Цветова.* О межфазном динамическом обмене в гетерогенной природной системе 256
37. *В. В. Малахова.* Оценка состояния многолетнемерзлых пород арктического шельфа 261
38. *Н. А. Балдаков, О. В. Ловцкая.* Способы визуализации результатов расчета зон затопления пойменных территорий средствами ГИС 267
39. *А. Т. Зиновьев, К. Б. Кошелев, К. В. Марусин.* Использование компьютерного моделирования и ГИС-технологий для оценки переформирования ложа крупного долинного водохранилища в зоне переменного подпора 275
40. *В. Ю. Филимонов, Н. А. Балдаков, А. В. Кудишин, О. В. Ловцкая.* Анализ корреляционных связей сезонных объемов стока и величин снегозапасов на крупных притоках верхней Оби 284
41. *А. Ю. Ряднов, Р. В. Андреев, Ю. М. Гектин, Н. П. Акимов, А. Г. Фролов, Ю. Ю. Гулин.* ИК-радиометр МСУ-ИК-СРМ для решения задач оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций 295

CONTENTS

1. *E. N. Kulik, E. Yu. Sakharova.* Arable Lands Recognition on the Basis of Seasonal Variability of Vegetation Cover Characteristics 3
2. *A. P. Guk, M. M. Shlyakhova.* Aspects of the Modern Stage of Development of Remote Sensing Instrument 7
3. *L. G. Evstratova.* On The Possible Integration of Photogrammetric Techniques and Bim Technologies 14
4. *A. S. Skorobogatova, M. S. Epifanova, E. P. Khlebnikova.* Digital Photogrammetric Systems in the Surveying Industry in the Republic of Kazakhstan 19
5. *V. V. Dedkova.* Modern Software for Processing of Uas-Based Imagery Results 25
6. *T. A. Khlebnikova, O. A. Opritova, S. M. Aubakirova.* Experimental Studies of Photogrammetric Model Accuracy by UAV 32
7. *K. I. Kalashnikov, E. N. Kulik.* To the Problem of Improving the Monitoring System of Agricultural Lands Using Remote Sensing 38
8. *Alovsat Shura-oglu Guliyev.* Evaluation of the Height Accuracy of Air Laser Scanning for Automation of Spatial Transformations of the Functional Model for the Regions..... 43
9. *A. E. Mikhaylov, E. V. Klevtsov, E. Yu. Osipov.* Remote Sensing of the Glaciers in the Eastern Sayan Mountains Using Landsat Data 52
10. *E. S. Cherepanova, L. N. Ermakova, A. N. Shikhov.* The Development of the Maps of Bioclimatic Indices Based on Worldclim 2.0 Data (on the Example of the Territory of Perm Krai) 56
11. *P. V. Voronina, D. L. Chubarov, N. N. Dobretsov.* The Development of Rst (Robust Satellite Technique) Method for Detection of Temperature Anomalies on the Territory of Mountain Altai..... 64
12. *A. A. Dontsov, I. A. Sutorikhin.* Geoinformation System of Registration of Hydrological Parameters of Intracontinental Water Objects..... 74
13. *M. A. Guryanov, S. M. Borzov.* Hyperspectral Image Classification Based on the Brightness Ratio of Various Channels 81
14. *I. G. Kazantsev.* About a Corner Detector on Images..... 89
15. *S. M. Kononenko, T. V. Starostina.* Satellite Data in Forecast for Wheat Yield for Administrative Areas of Siberia..... 94
16. *S. A. Rylov.* Long-Term Monitoring of Lake Ubinskoye by Landsat 4,5,7,8 Satellite Data with use of Specialized Segmentation Algorithms 102
17. *Yu. N. Sinyavskiy, S. A. Rylov.* Experimental Evaluation of Nonparametric Clustering Algorithms for Multispectral Images Segmentation 109
18. *A. A. Buchnev, P. A. Kim, V. P. Pyatkin, F. V. Pyatkin.* Distributed Network of Cloud-Based Web-Services for Satellite Data Processing 115

19. *P. V. Melnikov, I. A. Pestunov.* Experimental Study of Quality of Spectral–Spatial Classification of Hyperspectral Imagery Based on Geometric Moments 125
20. *V. F. Raputa, A. A. Lezhenin, T. V. Yaroslavtseva.* Estimating the Emission Parameters of Novosibirsk Thermal Power Stations with the Use of Satellite Information 137
21. *P. A. Kim.* Natural Clusterization 147
22. *T. V. Yaroslavtseva, V. F. Raputa, I. A. Solov′eva.* Ground-Based and Satellite Monitoring of Atmospheric Pollution in Area of Novosibirsk Electrode Plant 152
23. *M. S. Khairetdinov, B. V. Poller, A. V. Britvin, D. Y. Mashnikov.* Acoustooptic Interaction on Low Frequencies 158
24. *V. I. Dobrorodny, G. F. Sedukhina, M. S. Khairetdinov.* Combined Seismoacoustic Location in the Problem of the Geo-Ecological Monitoring of the Natural Medium 168
25. *O. N. Soboleva.* Influence of Correlations Between Permittivity and Conductivity on Effective Estimate of Energy for Skin-Layer 177
26. *B. Kh. Imomnazarov, Kh. Kh. Imomnazarov, P. V. Korobov.* About one Incorrect Problem Arising in the Poroelasticity Theory 183
27. *G. S. Vasiliev, B. J. Mamasoliev.* Main Core of Lie Groups of Transformations for a One-Dimensional System of Two-Velocity Hydrodynamic Equations 188
28. *S. A. Efimov.* Qualitative Analysis of Career Blast as the Source of Seismic Waves 195
29. *S. A. Efimov.* Quantitative Analysis of the Location of the Earthquake Wave Seismic Methods 202
30. *A. I. Krylova, E. A. Antipova.* Hidrodinamic Simulation of the Stream Flow Motion in the Lena River Delta 211
31. *E. A. Pyanova, V. V. Penenko, L. M. Faleychik.* The Dispersion of Impurities from the High-Altitude Sources in the Stably Stratified Atmosphere 219
32. *A. V. Penenko.* Iterative Regularization in Solving Inverse Problems of Atmospheric Chemistry with Time Series-Type Concentrations Data 226
33. *A. V. Penenko, A. V. Gochakov, Zh. S. Mukatova, P. N. Antokhin.* Numerical Study of the Algorithm of Variational Data Assimilation for Monitoring the Chemical Composition Of The Atmosphere in the City of Novosibirsk 234
34. *V. V. Penenko.* Algorithms of Continuation Inverse Problems in Applications to Environmental Problems 243
35. *S. V. Mikhailuta, A. A. Lezhenin, P. G. Gudovsky.* Benzo(a)pyrene Concentrations in an Urban Air of Krasnoyarsk in Summer and Winter 249
36. *E. A. Tsvetova.* On Dynamic Interfacial Exchange in a Heterogeneous Natural System 256

37. *V. V. Malakhova.* Estimation of Subsea Permafrost Layer Thickness on the Arctic Shelf 261
38. *N. A. Baldakov, O. V. Lovtskaya.* Methods for Visualization of Hydrological Study of Flood Zones on Floodplains Using GIS-Techniques 267
39. *A. T. Zinoviev, K. B. Koshelev, K. V. Marusin.* Use of Computer Simulation and GIS-Technologies to Assess the Reformation of the Bed of a Large Lowland Reservoir in Zone of Variable Backwater 275
40. *V. Yu. Filimonov, N. A. Baldakov, A. V. Kudishin, O. V. Lovtskaya.* The Correlation Analysis of Seasonal Runoff and Snow Reserves in Large Tributaries of the Upper Ob 284
41. *A. Yu. Ryadnov, R. V. Andreev, Yu. M. Gektin, N. P. Akimov, A. G. Frolov, Yu. Yu. Gulin.* IR Radiometer MSD-IR-MRM for Operative Monitoring of Technogenic and Natural Disaster 295

Научное издание

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ

XIV Международный научный конгресс

Международная научная конференция

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

Т. 1

Сборник материалов

Материалы публикуются в авторской редакции

Компьютерная верстка *Н. Ю. Леоновой*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.
Подписано в печать 11.09.2018. Формат 60 × 84 1/16.
Усл. печ. л. 18,08. Тираж 100 экз. Заказ 125.
Гигиеническое заключение
№ 54.НК.05.953.П.000147.12.02. от 10.12.2002.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 8.