

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
Институт водных и экологических проблем
Институт вычислительных технологий

Алтайский государственный университет

**ОБРАБОТКА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ
ДАНЫХ И ДИСТАНЦИОННЫЙ
МОНИТОРИНГ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ И
МАСШТАБНЫХ АНТРОПОГЕННЫХ
ПРОЦЕССОВ
(DPRS'2013)**

30 сентября – 04 октября 2013 г.

Избранные труды конференции

Барнаул 2013

УДК 528.8+528.9
ББК 26.8 в631
О23

023 **Обработка пространственных данных и дистанционный мониторинг природной среды и масштабных антропогенных процессов (DPRS'2013).** Избранные труды конференции. (30 сентября – 04 октября 2013 г. Барнаул). // Рос. акад. наук, Сиб. отделение, Ин-т водных и экологических проблем. – Барнаул: Пять плюс, 2013. – 136 с.

ISBN 978_5_905569_06_7

ISBN 978-5-905569-06-7



Настоящее издание является рецензируемым сборником статей и выпускается по решению оргкомитета конференции «Обработка пространственных данных и дистанционный мониторинг природной среды и масштабных антропогенных процессов» (DPRS'2013), которая проходила в г. Барнауле 30 сентября-4 октября и объединила в себе два научных мероприятия, связанных с задачами изучения состояния и динамики природной среды и развитием технологий обработки пространственных данных, а именно, Всероссийскую конференцию «Проблемы мониторинга окружающей среды (ЕМ)» и Международную конференцию «Геоинформатика: технологии и научные проекты». В сборнике представлены статьи, посвящённые развитию современной информационно-вычислительной инфраструктуры дистанционного мониторинга; развитию алгоритмов обработки, анализа и представления пространственных данных; применению методов дистанционного мониторинга для решения прикладных задач.

Для научных работников, специалистов по дистанционному зондированию и информационным технологиям, в том числе, по геоинформационным, а также по математическому моделированию и комплексным исследованиям, связанным с рациональным использованием природных ресурсов, глобальными изменениями природных условий, с поиском методов эффективного управления территориальным развитием

Редакционная коллегия: Добрецов Н.Н., Юрченко А.В., Зиновьев А.Т., Мамаш Е.А.

Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект N – 13-07-06041Г

ISBN

© Институт вычислительных технологий СО РАН, 2013
© Институт водных и экологических проблем СО РАН, 2013
© Алтайский государственный университет, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел 1. ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ И МАСШТАБНЫХ АНТРОПОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ	4
<i>Массель Л.В., Копайгородский А.Н.</i> Методический подход к интеграции данных дистанционного зондирования земли на основе методов интеграции данных и знаний в системных исследованиях энергетики	4
<i>Казakov Э.Э., Капралов Е.Г., Паниди Е.А., Терехов А.В.</i> Геосервисы как функциональная основа геопортала: опыт и перспективы.....	14
<i>Скачков Д.М., Жижимов О.Л.</i> Реализация географического поиска информации в гетерогенных источниках данных на примере платформы ZOOSPACE	24
<i>Пчельников Д.В., Добрецов Н.Н.</i> Системы мониторинга на основе моделей наблюдения за пространственно-недоопределенными объектами	35
<i>Курепина Н.Ю., Рыбкина И.Д., Стоящева Н.В.</i> Картографическое моделирование территориальных систем водопользования	42
<i>Ротанова И.Н., Кошкарев А.В., Медведев А.А.</i> Использование спутниковой информации в формировании региональной инфраструктуры пространственных данных (на примере ЦМР)	49
<i>Зиновьев А.Т., Ловцкая О.В., Балдаков Н.А., Дьяченко А.В.</i> Геоинформационное обеспечение гидрологических прогнозов	58
Раздел 2. НОВЫЕ МОДЕЛИ, МЕТОДЫ, АЛГОРИТМЫ, ТЕХНОЛОГИИ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ	74
<i>Климова Е.Г., Платов Г.А., Киланова Н.В.</i> Современные методы усвоения данных об окружающей среде, основанные на ансамблевом фильтре Калмана	74
<i>Тарасенков М.В., Белов В.В.</i> Алгоритм решения задачи восстановления коэффициентов отражения неоднородной земной поверхности по спутниковым данным в видимом и УФ- диапазонах.....	90
<i>Симонов К.В., Кадена Л.</i> Алгоритм обработки пространственных данных на основе шпиралет-преобразования.....	100
<i>Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Кирбижекова И.И., Дагуров П.Н., Базаров А.В., Гармаев А.М., Емельянов К.С., Гусев М.А.</i> Технология создания и применения базовых продуктов спутниковой радиолокации	114
<i>Жумагулов Б.Т., Данаев Н.Т., Мухамбетжанов С.Т., Ахмед-Заки Д.Ж., Иманкулов Т., Турар О., Маткерим Б.</i> Распределенная информационная система анализа разработки нефтегазовых месторождений - ИСАР-II. Полимерное заводнение	126
Авторский указатель.....	135

Раздел 1

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ И МАСШТАБНЫХ АНТРОПОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИНТЕГРАЦИИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ИНТЕГРАЦИИ ДАННЫХ И ЗНАНИЙ В СИСТЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ЭНЕРГЕТИКИ

Массель Л.В., Копайгородский А.Н.

*Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Иркутск, massel@isem.sei.irk.ru*

Введение

Системные исследования энергетики по сути являются междисциплинарными, поскольку интегрируют исследования в области энергетики, экономики, экологии и прогнозирования изменений климата. В настоящее время в мировой энергетике активно развивается направление, получившее название Smart Grid (интеллектуальные энергетические системы) – электроэнергетические системы с использованием новых технологий, как в электроэнергетическом оборудовании, так и в области информационного обеспечения, направленных на качественное улучшение технико-экономических показателей. Применение геоинформационных технологии в совокупности с традиционными инструментальными средствами, применяемыми для проведения научных исследований в области энергетики, позволяют получать качественно новые научные результаты, а также сократить время поиска приемлемых решений для поставленных задач. Данные дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) и мониторинга окружающей среды могут быть применены для более эффективного решения задач обеспечения развития и функционирования сегментов сетей Smart Grid, а также проблемы обеспечения

кибербезопасности. Поскольку при ДЗЗ приходится иметь дело с разнородными данными больших объемов, при решении задач интеграции и информационного моделирования этих данных может быть использован опыт интеграции данных и знаний в междисциплинарных исследованиях.

Проблема интеграции данных в междисциплинарных исследованиях

Успешное осуществление междисциплинарных исследований [1] предполагает одновременное решение:

1) методологической проблемы (формирование предмета исследований, в котором объект был бы отражен таким образом, чтобы его можно было изучать средствами всех участвующих дисциплин, а полученные результаты могли уточняться и совершенствоваться);

2) организационной проблемы (создание сети коммуникаций и взаимодействия исследователей, с тем чтобы они могли профессионально участвовать в получении и обсуждении информации, а также привлекать к нему своих коллег из соответствующих дисциплин);

3) информационной проблемы (обеспечение передачи научных результатов, полученных между участниками).

Проводимые в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН исследования требуют привлечения данных и знаний из различных научных направлений. Под *гибридными данными* понимаются как структурированные, так и слабоструктурированные данные, представленные с помощью различных форматов и моделей представления данных. *Структурированные данные* – это данные, имеющие регулярную, фиксированную структуру, которая выявляется на этапе проектирования и представленная в виде известной заранее и неизменной (статичной) схемы данных. *Слабоструктурированные данные* – это нерегулярные, несогласованные данные с явно выраженными структурными алогизмами, которые не имеют постоянной, четко определенной структуры, т.е. их структура, тип и состав могут динамически изменяться.

Для традиционных моделей представления структурированных данных (реляционная, объектная, иерархические, объектно-реляционная модели представления данных) разработаны эффективные способы физического хранения и методы эффективного доступа к данным. В свою очередь модели представления слабоструктурированных данных (RDF/XML и JSON) позволяют описать динамические структуры; основное назначение таких моделей – нахождение общей схемы при интеграции данных из различных гетерогенных источников, извлечение схемы из слабоструктурированных данных. При этом данный класс моделей имеет возможность описывать семантическую информацию (RDF/RDFS/OWL) о моделируемых объектах. Для этого класса моделей разработаны методы и инструментальные механизмы эффективного хранения и доступа к данным.

Кроме того, для информационной поддержки научных исследований, помимо хранения фактографических данных, требуется хранить и обрабатывать декларативные знания (т.е. описания данных и другие сведения), а также онтологии, описывающие предмет исследования, научные знания и методики.

Теоретическая модель гибридных данных

Авторами предложена разработка *теоретической модели гибридных данных* на основе фрактальной стратифицированной модели (ФС-модели) информационного пространства [2]. Графически эту модель можно представить в виде совокупности вложенных сферических оболочек – слоев, или страт. Каждый слой объединяет совокупность однотипных информационных объектов, описываемых множеством свойств (показателей, получаемых в результате дистанционного зондирования). Каждый слой, в свою очередь, может быть расслоен, так же, как и свойство любого объекта. Это позволяет получить требуемый уровень детализации для любого информационного объекта и любого слоя. При работе с отдельными предметными областями используется «вырезка» из информационного пространства (например, в виде конуса) (рис. 1). Вводятся отображения из любого слоя в каждый, что позволяет связывать данные разных

слоев. При этом необходимо обеспечить сохранение инвариантов слоев – совокупности существенных и неизменяемых свойств информационных объектов каждого слоя.

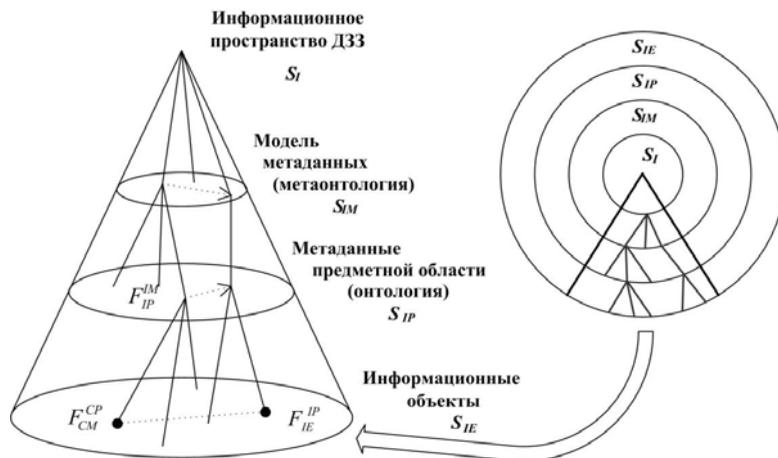


Рис. 1 – Фрагмент фрактальной стратифицированной модели информационного пространства ДЗЗ

Первым этапом построения гибридной модели данных является разработка системы онтологий информационного пространства ДЗЗ, включающая метаонтологию, описывающую слои ФС-модели, и онтологии отдельных слоев (предметных областей) (рис. 2). В качестве предметных областей могут выступать, например: 1) контроль состояния снежного покрова, предпаводкового и паводкового состояния водоемов; 2) обнаружение тепловых аномалий, в том числе пожаров; 3) контроль состояния и рациональное использование лесных ресурсов; 4) оценка последствий чрезвычайных ситуаций: стихийных бедствий, техногенных катастроф и др.

На рис. 3 представлен фрагмент системы онтологий информационного пространства ДЗЗ, которая определяет базовые понятия, используемые в проведении исследований: данные, предоставляющие их сервисы, исследователи, результаты исследований, научные направления и др. Метаонтология предметной области, связанной с ДЗЗ (на рисунке сокращенно

В результате онтологического моделирования создается онтологическое пространство, включающее совокупность онтологий, которое должно позволять работу не только с данными, но и знаниями, в том числе описаниями сценариев различных ситуаций, моделей и программных комплексов и интегрировать их в ИТ-инфраструктуру междисциплинарных исследований. Вопросы построения и применения онтологий в исследованиях энергетики подробно рассмотрены в работах Л.В. Массель, Т.Н. Ворожцовой, Н.Н. Макагоновой и С.К. Скрипкина [3-5].

Архитектура и компоненты информационной системы поддержки исследований

В концепции ФС-модели разрабатываются инструментальные средства [6] двух типов: *инструментальные средства для описания данных* (слоев) и *инструментальные средства манипулирования данными* (поддержка отображений или преобразований данных). Архитектура инструментальных средств приведена на рис. 4.

К инструментальным средствам поддержки описания данных относятся Репозитарий, хранилище данных и знаний, хранилище онтологий, хранилище слабоструктурированных данных (ССД) и источники данных. Средствами поддержки отображений являются сервисы виртуальной интеграции данных, отображения физических объектов, а также шлюзы доступа к источникам.

Источниками данных являются предметно-ориентированные базы данных различных научных областей, а для хранения слабоструктурированных данных предлагается использовать специализированное хранилище, в качестве которого можно использовать семантическое хранилище на основе Sesame или Jena. В семантическом хранилище данные представлены в виде триплетов с привязкой к онтологии. Каждый триплет описывается в виде тройки «субъект–предикат–объект».

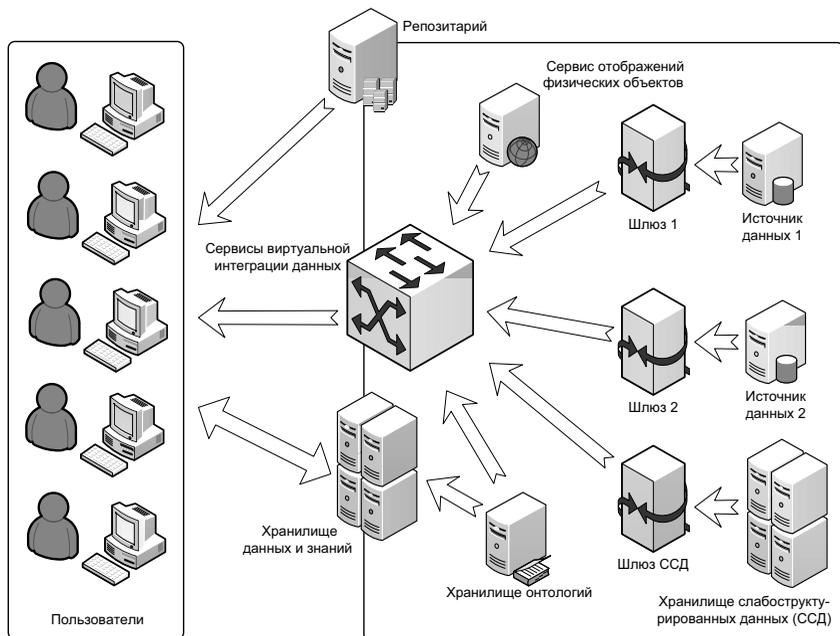


Рис. 4. – Архитектура информационной системы поддержки междисциплинарных исследований

Сервисы виртуальной интеграции данных оперируют только понятиями, определенными через систему онтологий, и осуществляют доступ к физическим источникам данных через специализированные шлюзы, согласующие интерфейс взаимодействия. Основная идея виртуальной интеграции данных состоит в отказе от физического слияния отдельных баз данных и переходе к виртуальной интеграции. Владельцы данных (администраторы отдельных источников, представленных в виде сетевых СУБД) самостоятельно определяют уровень доступа. При этом не подвергается модификации модель данных, лежащая в основе БД.

Проведение междисциплинарных исследований осложняется представлением информации об объектах в различных масштабах. Вследствие этого возникает необходимость решать задачу определения «эквивалентности» и «вложенности» объектов в различных предметных областях. Физический

объект, например, крупный объект энергетики, имеет географические координаты, располагается в определенной местности, которая относится к определенному району, включенному в область или край и в федеральный округ. Данные ДЗЗ могут быть привязаны к географическим координатам, однако статистическая информация, как правило, представлена по административно-территориальному делению.

Применение такого подхода к организации доступа к данным имеет свои преимущества: исключается прямое дублирование; данные, находящиеся в различных источниках, не требуют модификации для получения интегрированного описания объектов или процессов.

Репозиторий является одним из основных компонентов инфраструктуры междисциплинарных исследований и содержит информацию обо всех других компонентах, их местоположении и о способах доступа к ним [7]. В нем описываются хранилища данных и знаний, например, отдельных систем энергетики, указывается их расположение (адреса серверов) и интерфейсы взаимодействия (описания Web-сервисов). В Репозитории также описаны оперативные базы данных, используемые в исследованиях, программные комплексы и др.

Хранилище онтологий предназначено для сбора и хранения системы онтологий, описывающих конфигурацию информационной системы в целом, а также обеспечивает совместную разработку новых онтологических моделей.

Для накопления и обработки данных и знаний предлагается использовать концепцию хранилища данных и знаний [8], реализованную в ИСЭМ СО РАН для исследований энергетики (рис. 5). Внесение информации выполняется с привязкой к словарю предметной области: исследователь должен выполнить сопоставление определенных отчетных или статистических данных с классификационными характеристиками. В хранилище данных и хранилище знаний отдельной области исследований словарь предметной области является общим (одним) и содержит свойственные именно ей классификаторы,

построенные на основе онтологий. Метаданные также являются общими и описывают как структуру данных, так и документы, помещаемые в хранилище.

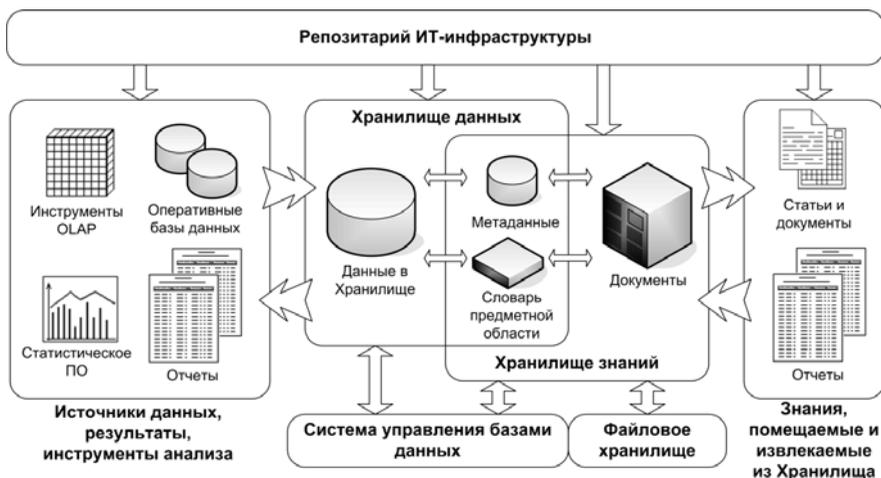


Рис. 5. – Архитектура Хранилища данных и знаний для интеграции междисциплинарных данных и их описаний (декларативных знаний)

Заключение

Для решения задачи интеграции и информационного моделирования данных ДЗЗ предлагается использовать подход, примененный авторами для интеграции данных и знаний междисциплинарных исследований. Методический подход рассматривается на примере системных исследований в энергетике и опирается на результаты, полученные при выполнении гранта РФФИ № 10-07-00264 «Создание и интеграция интеллектуальных информационных технологий и ресурсов для междисциплинарных исследований в области энергетики, экономики, экологии и прогнозирования изменений климата». Предложенный подход основывается на использовании авторских фрактальной стратифицированной модели и системы онтологий.

Разработанный методический подход применяется в работах, выполняемых в рамках интеграционного проекта СО РАН № 131, а также в работах по грантам РФФИ №11-07-00192, №12-07-00359, №13-07-00140, №13-07-00422 и гранту программы Президиума РАН №229.

Авторы выражают благодарность этим организациям за частичную финансовую поддержку исследований, результаты которых представлены в статье.

Список литературы

1. *Мирский Э.М.* Междисциплинарные исследования // Новая философская энциклопедия: в 4 т. / Ин-т философии РАН; Предс. научно-ред. совета В.С. Степин.– М.: Мысль, 2010. – ISBN 978-5-244-01115-9 – <http://iph.ras.ru/enc.htm>
2. *Массель Л.В.* Фрактальный подход к построению информационных технологий / Л.Д. Криворучкий, Л.В. Массель // Информационные технологии исследований развития энергетики. – Новосибирск: Наука, 1995. – С. 40–67.
3. *Макагонова Н.Н.* Методический подход к построению онтологического пространства, основанный на использовании фрактальной стратифицированной модели / Информационные и математические технологии в науке и управлении // Труды XVII Байкальской Всероссийской конференции, т. III. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2012. – С. 81–86.
4. *Massel L.V.* Integration of distributed information resources for the power engineering research based on the ontology's application / Proceedings of the International Conference “Mathematical and Information Technologies” (Zbornik radjva konferencie MIT-2009). – Serbia, Beograd, 2010. – P. 220–223.
5. *Ворожцова Т.Н., Макагонова Н.Н., Скрипкин С.К., Костюченко А.П.* Применение онтологий для моделирования ИТ-инфраструктуры и описания систем энергетики // Вычислительные технологии. – Том 13, Специальный выпуск 1. – 2008. – С. 4–10.
6. *Копайгородский А.Н., Массель Л.В.* Фрактальный подход к проектированию архитектуры информационных систем // Вестник ИрГТУ. – 2010. – № 6 (46). – С. 8–12.
7. *Копайгородский А.Н., Массель Л.В.* Разработка и интеграция основных компонентов информационной инфраструктуры научных исследований // Вестник ИрГТУ. – 2006. – № 2 (26). – С. 20–24.
8. *Массель Л.В., Осама Ель Сайед Шета, Копайгородский А.Н.* Разработка хранилища данных и знаний для поддержки исследований энергетики // Вестник ИрГТУ. – 2010. – № 5 (45). – С. 11–16.

ГЕОСЕРВИСЫ КАК ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОСНОВА ГЕОПОРТАЛА: ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Казаков Э.Э., Капралов Е.Г., Паниди Е.А., Терехов А.В.

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург,
panidi@yandex.ru*

На текущем этапе развития геоинформационных технологий веб-геотехнологии прочно занимают среди них свою нишу. В глобальной сети существует большое количество ресурсов, ориентированных на представление и использование картографической информации, материалов дистанционного зондирования, а также других видов пространственных данных, и количество их увеличивается возрастающими темпами. Целый ряд организаций занимается разработкой международных стандартов в области представления и использования пространственных данных в веб-среде, среди них Комитет ISO по геоинформации и геоматике (ISO/TC211), Открытый консорциум геопространственных данных (OGC), Еврокомиссия в рамках развития Инфраструктуры пространственной информации Евросоюза - INSPIRE.

С появлением концепций WEB 2.0 (интерактивная веб-среда) и SaaS (программное обеспечение как услуга) в информационных технологиях в целом происходит переход от простого представления данных в сети к внедрению и расширению возможностей манипулирования данными непосредственно в веб-среде. То есть, на смену представлению статичных данных приходит представление данных совместно со средствами их обработки – веб-сервисами и веб-приложениями, частным случаем которых являются, в том числе, и веб-ГИС.

Указанную тенденцию хорошо иллюстрирует хронология расширения списка стандартов OGC:

- 2000 год – WMS (сервис растровых карт);
- 2002 год – WFS (сервис векторных объектов);
- 2003 год – WCS (сервис растровых покрытий);

- 2005 год – LS (сервисы местоположения, навигационные сервисы);
- 2007 год – WPS (сервисы геообработки);
- 2009 год – WCPS (сервисы геообработки покрытий).

Так, если ранние стандарты описывали, прежде всего, способы представления и передачи данных: WMS – в виде заранее подготовленных растровых изображений, пригодных только для визуального восприятия, но не для анализа, WFS – в векторном представлении, WCS – в форме растровых покрытий, пригодных для анализа; то позднее появившиеся описывают уже порядок использования данных: LS – порядок предоставления данных на основе определения местоположения, WPS – порядок взаимодействия с серверными инструментами геообработки, а WCPS представляет собой расширение сервиса покрытий, за счет дополнения инструментами их геообработки. Обобщая, можно обозначить первые три как сервисы данных, а три последних как сервисы обработки, или геообработки в широком смысле.

Являясь единицами модульности при создании веб-приложений, использующих пространственные данные, веб-геосервисы служат, в том числе, конструктивными элементами при создании геопорталов, как отраслевых и тематических, так и разрабатываемых в рамках национальных инфраструктур пространственных данных. В частности, в одной из директив INSPIRE [3], являющихся руководящими документами для общеевропейской ИПД, оговорено, что на геопортале, составляющем основу ИПД, должны быть представлены такие сервисы как: поиск, отображение, скачивание, преобразование данных и сервисы вызова удалённых сервисов пространственных данных. При этом, на геопортале INSPIRE, запущенном в 2011 году (<http://inspire-geoportal.ec.europa.eu>), как и на российском федеральном геопортале (<http://nsdi.ru>) действующем с 2012 года, до последнего времени доступны только сервисы поиска и просмотра данных.

Таким образом, в целом, не смотря на наличие международных стандартов, определяющих порядок предоставления, как сервисов пространственных

данных, так и сервисов геообработки в веб-среде, фактически широко используются только стандарты представления данных, и соответствующие сервисы данных. Другими словами, наиболее развитыми являются веб-картографические технологии, ориентированные на представление данных, в то время как веб-ГИС технологии, ориентированные на анализ данных, в своём развитии отстают. В качестве характерного примера, иллюстрирующего указанную ситуацию, можно привести и национальный геопортал Испании, где по состоянию на июль 2013 года опубликовано 1959 WMS, 282 WFS, 29 WCS и всего 7 WPS (<http://www.idee.es>).

Вместе с тем, упомянутые стандарты (WMS, WFS, WCS, WPS и др.) описывают лишь способ запроса соответствующего сервиса (сервиса данных или сервиса обработки) и передачи данных по сети. Внутренняя архитектура сервисов при этом задаётся прикладными программными средствами, применяемыми при их разработке. Для реализации WMS, WFS, WCS, WPS используются различного рода библиотеки и фреймворки, входящие в состав веб-картографических серверов, либо представляющие собой самостоятельный программный продукт. При этом существенной проблемой для развития веб-картографических и веб-ГИС технологий является необходимость дальнейшего развития методического аппарата и стандартов по созданию и использованию средств для работы с распределёнными пространственными данными в веб-среде и, прежде всего, средств обработки данных.

Особенно сильно проблема недостаточного методического обеспечения проявляется при создании отраслевых и тематических геопорталов, которые, в отличие от инфраструктурных (являющихся основой ИПД), в большей степени ориентированы на предоставление различных сервисов обработки данных. Примером, иллюстрирующим разработку и внедрение такого рода сервисноориентированного геопортала является Геопортал «Невский край» (<http://www.geoportал-nevsky.spbu.ru>), разработка которого была в 2012-2013

годах поддержана Русским Географическим Обществом, и в создании которого авторы принимают непосредственное участие [1].

Говоря о структуре Геопортала «Невский край», необходимо упомянуть, что проект изначально задумывался и развивался как ресурс тематический, но при этом соответствующий словарному пониманию термина «геопортал», то есть как средство доступа к распределённым пространственным данным и связанным геосервисам [2]. То есть, «Невский край» являет собой не замкнутый на себе энциклопедический ресурс, разносторонне освещающий приневский регион, но инструмент, шлюз, позволяющий, параллельно с предоставлением тематических блоков научно-справочных пространственных данных и инструментов для работы с ними, осуществлять внешние переходы к пространственно привязанной и иной описательной информации, затрагивающей различные вопросы истории, состояния и развития приневских территорий. Данное замечание является существенным, так как термин «геопортал» на текущем этапе развития веб-геотехнологий применяется при обозначении тематических и отраслевых ресурсов весьма широко и зачастую не обоснованно, не в соответствии со своим исконным значением.

Развитие Геопортала «Невский край» началось с построения веб-ГИС оболочки, на базе веб-картографического сервера Geoserver (<http://geoserver.org>) в связке с фреймворком OpenLayers (<http://www.openlayers.org>), позволяющей просматривать картографические материалы на территорию региона, сравнивать их и визуально анализировать. Основным картографическим наполнением (сервисами данных) для веб-ГИС стали архивные и вновь составленные тематические карты региона, а также ряд внешних веб-картографических сервисов общего характера (общегеографические, дорожные, спутниковые карты) и тематических (погодные, кадастровые карты, карты административных границ). Именно подключение внешних сервисов стало первым шагом от веб-ГИС к геопорталу, в направлении построения системы с большим количеством

внешних связей. В основе и внешних, и собственных сервисов данных, представленных на портале, лежат стандарты WMS и WFS.

По мере появления значительного количества сервисов данных на портале, проявилась необходимость в развитии вспомогательных ГИС-сервисов, выполняющих базовые операции манипулирования данными, таких как инструменты для проведения измерений по картам, инструменты управления оверлеем картографических слоёв, инструменты для работы с атрибутивной информацией слоев. Указанные инструменты, не попадая под определение веб-сервисов геообработки (так как являются интерактивными визуальными инструментами, составляющими функциональность веб-ГИС оболочки), тем не менее находятся в соответствии с сервисной концепцией построения Геопортала и, с точки зрения структуры, являются вполне обособленными веб-геосервисами.

На текущем этапе развития веб-ГИС оболочка является основным функциональным элементом Геопортала «Невский край». Однако, по мере развития на портале появляются и другие функциональные элементы — геосервисы, работающие во взаимодействии с веб-ГИС. Такими элементами являются, например, сервисы по сбору от пользователей информации о местоположении неблагоприятных объектов или происшествий (сервис «Сообщения пользователей»), сервис, отображающий различную статистическую информацию по региону в форме интерактивных схем и графиков (сервис «Инфографика»), сервис перехода на внешние веб-картографические ресурсы (сервис «Внешние карты»). Ведется и разработка более узкоспециализированных сервисов, например, совместно с ресурсным центром космических и геоинформационных технологий СПбГУ разрабатывается погодный сервис, который должен будет в режиме реального времени отображать информацию о погоде, предоставляемую сетью автоматических метеостанций, находящихся под управлением ресурсного центра.

Следующим этапом разработки является этап публикации сервисов, то есть создания сервисов, которые опубликованы на Геопортале, и доступны извне. В рамках данного этапа будет обеспечен внешний доступ к уже существующим сервисам данных, возможность их отображения на внешних ресурсах. Также производится проектирование новых сервисов, в частности, сервиса виджетов, который позволит внедрять на внешних ресурсах интерфейсные элементы Геопортала, например, внешний интерфейс сервисов «Сообщения пользователей» или «Инфографика».

Таким образом, рассматривая Геопортал с точки зрения сервисного подхода, то есть как открытую, масштабируемую за счёт интеграции сервисов систему, можно выделить три уровня составляющих его сервисов:

- внутренние, являющиеся неотъемлемой частью интерфейса Геопортала и составляющие его базовую функциональность (поиск, отображение и визуальное манипулирование, загрузка и выгрузка данных);
- связанные, вполне самостоятельные с точки зрения функциональности, но привязанные к совокупности внутренних сервисов интерфейсно и с точки зрения потоков данных, то есть доступные для использования только на самом Геопортале;
- внешние, самостоятельные сервисы, являющиеся частью Геопортала либо доступные из других сетевых ресурсов, ключевой особенностью которых является возможность их вызова вне визуального интерфейса Геопортала.

Являясь научно-справочным ресурсом для широкого круга пользователей, Геопортал «Невский край» не предполагает внедрения узкоспециализированных сервисов геообработки, ориентированных на научный анализ. В связи с чем его разработка производится преимущественно на основе стандартов сервисов данных (WMS, WFS), а требуемая аналитическая функциональность реализуется интерфейсно путём создания прикладных программных средств.

Вместе с тем, разработка данного сервисно-ориентированного геопортала позволила авторам сформировать параллельное направление исследований, посвящённое созданию геопорталов для научных исследований, и, в частности, для представления материалов дистанционного зондирования и аналитических веб-геосервисов их обработки. В 2013 году данный научный проект был поддержан Российским Фондом Фундаментальных Исследований.

В указанном направлении исследований можно выделить две основные проблемы. Первая — это уже упомянутая непроработанность методического аппарата и средств разработки, прежде всего в области создания сервисов геообработки. Так, если сервисы данных поддерживаются в большинстве программных средств ГИС, не только ориентированных на работу в веб-среде, но и настольных, то стандарты сервисов геообработки внедрены лишь в единичных случаях. Например, в Geoserver WPS внедрён, но по состоянию на 2013 год не сертифицирован как полностью соответствующий стандарту. Платформы для разработки и публикации веб-геосервисов с открытым кодом Degree (www.deegree.org) и 52north (<http://52north.org>) поддерживают WPS, но предполагают, что программирование происходит, прежде всего, на основе средств самих оболочек, а не с использованием внешних средств разработки, что уменьшает гибкость при создании программного кода. Высокой гибкостью в разработке WPS обладает платформа с открытым кодом Zoo-project (www.zoo-project.org), которая допускает создание программного кода внешними средствами сразу на нескольких языках программирования. Вторая проблема заключается в том, что подход, на котором основаны стандарты OGC, состоит в обработке данных исключительно на стороне сервера. Такой подход становится не эффективным при обработке данных, характеризующихся значительными объёмами и хранимых на стороне пользователя, например, материалов дистанционного зондирования.

Особенность веб-сервисов геообработки, стандартизированных OGC, состоит в том, что с точки зрения результата запроса к ним они не отличаются от

сервисов данных, выдавая в качестве результата также данные, пусть и генерируемые динамически. То есть, основываясь на вычислениях на серверной стороне, сервисы геообработки предлагают пользователю не вычислительные средства, а результаты их применения. При этом исходные данные для обработки либо хранятся непосредственно на сервере, либо поступают на сервер в форме сервисов данных из третьих источников, либо приходят от пользователя вместе с самим запросом на обработку. Очевидно, что обработка исключительно на стороне сервера удобна при использовании тонких клиентов, но при наличии клиента с полноценными вычислительными ресурсами и данных, хранящихся на клиентской стороне, желательно применять обработку на стороне клиента, которую современные стандарты веб-сервисов геообработки не подразумевают.

Возможности совмещения существующих стандартов и геообработки на клиентской стороне кроются в дополнении геосервисов, созданных и опубликованных в соответствии со стандартами, например, стандартом WPS модулями, допускающими загрузку исполняемого кода на клиентский компьютер и запуск на нём. При этом необходимо, чтобы создание сервиса изначально происходило с учётом возможности двухрежимного использования. В частности, в рамках своего проекта авторы предлагают следующее решение: создание для каждого из сервисов, первоначально разворачиваемых на серверной стороне как WPS, дополнительного модуля установки, позволяющего скачать и установить его как модуль настольной свободно распространяемой ГИС QGIS (<http://www.qgis.org>). Пример подготовленных таким образом веб-сервисов геообработки опубликован авторами на геопортале (прототипе геопортала на момент написания данного текста), доступном в глобальной сети по адресу <http://195.70.211.131>.

Средством разработки таких сервисов авторами выбран язык программирования Python (<http://www.python.org>). Python лицензируется как открытое программное обеспечение. Приложения, созданные на Python, могут запускаться как обычные программы для настольного компьютера и за счет

использования его как встроенного языка разработки в ведущих универсальных настольных ГИС ArcGIS (<http://www.esri.com>) и QGIS, как модули соответствующей ГИС, если такая возможность предусмотрена кодом приложения.

Python может быть использован и для разработки WPS на платформе Zoo (<http://zoo-project.org>) либо PyWPS (<http://pywps.wald.intevation.org>). В обоих случаях предусматривается возможность организации запуска приложений Python как веб-сервисов на стороне сервера в соответствии со стандартом WPS. Для этого используется транслятор клиентских запросов и ответов сервиса.

Таким образом, использование Python при разработке веб-сервисов геообработки позволяет создавать сервисы геообработки, допускающие запуск и как серверных приложений, и как исполняемых на клиентской стороне, в виде самостоятельных приложений либо модулей настольной ГИС. Такой подход можно назвать гибридным (рис. 1).

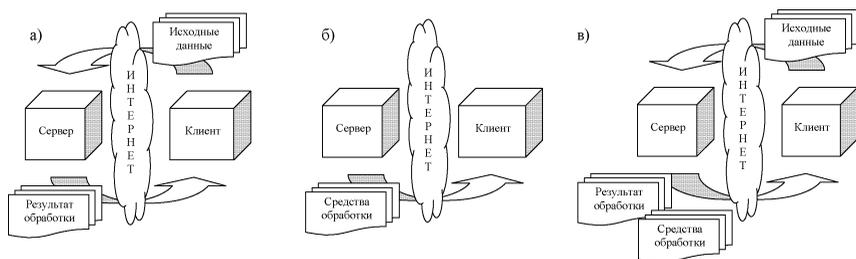


Рис.1. – Поток данных при использовании веб-сервисов геообработки:
а) с обработкой на стороне сервера, б) с обработкой на стороне клиента, в) с гибридной архитектурой

Основные требования к архитектуре такого гибридного сервиса следующие:

- обеспечение возможности запуска и параметризации приложения в серверостороннем и клиентостороннем режимах на этапе создания программного кода;
- создание сервиса скачивания и установки приложения на клиенте;
- дополнение приложения функцией отслеживания версий и обновления.

Приведённый подход позволяет повысить гибкость веб-сервисов геообработки при обработке распределённых данных, обеспечив единство исполняемого кода и идентичность результатов обработки, не зависимо от способа запуска сервисов.

Исследование выполняется при финансовой поддержке гранта РГО ИД-53/СПб-41 и финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-05-12079 офи_м.

Список литературы

1. Амосов М.И., Андреева Т.А., Казаков Э.Э., Капралов Е.Г., Лазебник О.А., Чистяков К.В. Создание геопортала «Невский край». // Материалы V международной конференции «Геоинформационные технологии и космический мониторинг». Ростов-на-Дону: Издательство ЮФУ, 2012. С. 253-257.
2. Капралов Е.Г., Кошкарев А.В., Тикунов В.С. и др. Геоинформатика. М.: Академия, 2010. 416 + 432 с.
3. INSPIRE NS DT INSPIRE Network Service Architecture Version 3.0, 2008. P. 30

РЕАЛИЗАЦИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ПОИСКА ИНФОРМАЦИИ В ГЕТЕРОГЕННЫХ ИСТОЧНИКАХ ДАННЫХ НА ПРИМЕРЕ ПЛАТФОРМЫ ZOOSPACE

Скачков Д.М., Жижимов О.Л.

*Институт вычислительных технологий СО РАН,
Новосибирск,
dani.skachkov@gmail.com, zhizhim@sbras.ru*

Несколько месяцев назад завершился проект «Разработка принципов и программных средств виртуальной интеграции распределённых источников данных на основе международных стандартов для создания масштабных информационных инфраструктур» (шифр «2012-1.4-07-514-0022-004»), в рамках которого была разработана платформа ZooSPACE [1]. Проект выполнялся при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Платформа ZooSPACE позволяет объединять различные информационные системы в единое виртуальное информационное пространство¹.

Глобальной целью работы над ZooSPACE является разработка инструментальной платформы (платформы массовой интеграции), поддерживающей создание и функционирование широкомасштабных информационных инфраструктур на основе подхода виртуальной интеграции баз данных. Более узкой целью работы является разработка принципов и программных средств виртуальной интеграции распределённых источников данных на основе международных стандартов и рекомендаций для создания масштабных информационных инфраструктур, предназначенных для виртуализации доступа к данным различных СУБД с использованием единых

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (грант № 07.514.11.4130) «Разработка принципов и программных средств виртуальной интеграции распределённых источников данных на основе международных стандартов для создания масштабных информационных инфраструктур» шифр «2012-1.4-07-514-0022-004» а также при частичной поддержке интеграционных проектов СО РАН (ИП-17 и СИП-73) и Президентской программы поддержки ведущих научных школ РФ (Проект НШ-6293.2012.9)

правил и политик. Под интеграцией информационных ресурсов понимается их объединение с целью использования разнородной информации с сохранением ее свойств, особенностей представления и пользовательских возможностей манипулирования с ней. При этом объединение ресурсов не обязательно должно осуществляться физически, оно может быть виртуальным, главное – оно должно обеспечивать пользователю восприятие доступной информации как единого информационного пространства. В частности, такие системы обеспечивают работу с гетерогенными наборами и базами данных или системами баз данных, обеспечивая пользователю эффективность информационных поисков независимо от особенностей конкретных систем хранения ресурсов, к которым осуществляется доступ.

Инфраструктура ZooSPACE реализуется на произвольном количестве слабосвязанных самодостаточных узлов, функционирующих в соответствии с единой политикой. Взаимодействие узлов между собой осуществляется посредством сетевых протоколов прикладного уровня на основе транспортного протокола TCP/IP. Количество узлов в ZooSPACE не нормируется и может быть любым. Система ZooSPACE может состоять из одного единственного узла.

Такой выбор инфраструктуры узлов позволяет обеспечить достаточно гибкую распределенную информационную систему и реализовать всю необходимую функциональность, которая обеспечивается подсистемами ZooSPACE.[1]

Одной из важнейших задач, для которых служит ZooSPACE, является задача поиска информации. А одним из видов поиска информации, который будет полезен пользователям ZooSPACE, является географический поиск информации. Под географическим поиском информации понимается поиск информации, связанной с определенным географическим регионом. Это может быть упоминание названия географического объекта (официальное или неофициальное, например «Москва», «Питер», «река Волга», «Сибирь»), могут быть координаты некоторой точки или региона на земной поверхности.

Большая часть информационных систем, входящих в информационное пространство ZooSPACE, являются хранилищами текстовой информации и не были предназначены для географического поиска. Будем называть такие системы «негеографическими». Но, тем не менее, они содержат географическую информацию в виде названий географических объектов (таблица 1). Поэтому была необходима разработка модуля для ZooSPACE, который позволил бы производить географический поиск в информационных системах, изначально для этого не предназначенных. В данной статье описывается разработанный модуль географического поиска.

Таблица 1 – Примеры записей, содержащих географическую информацию

Заголовок
В Иркутске состоялась международная конференция "Управление земельными ресурсами с особым акцентом на защиту окружающей среды в районе озера Байкал "
Международная конференция "Ультрамафит-мафитовые комплексы складчатых областей докембрия" на Байкале п. Энхалук , 6-9 сент., 2006
Тенденции изменений климата в г. Улан-Удэ
Микробиологическая оценка состояния бассейна рек Тугнуй-Сухара
О состоянии изученности разнообразия папоротников Байкальской Сибири (на примере Республики Бурятия)

Существует ряд работ и проектов, посвященных проблеме интеграции географических данных и географического поиска в информационных системах общего назначения:

1. GeoNetwork [2].
2. Среда интеграции пространственных данных «GeoMeta» [3].
3. MultiMeta – система интеграции пространственных данных и ресурсов электронных библиотек [4].

Все перечисленные проекты рассчитаны на то, что записи информационной системы содержат географическую информацию в специально

выделенных полях, т.е. изначально привязаны к географическим координатам. Но в большинстве существующих «негеографических» информационных систем такой информации не содержится. И при разработке технологии географического поиска следует учитывать, что изменения в логике работы и структуре данных существующих систем крайне нежелательны и должны быть минимизированы.

Подходы к географическому поиску в информационных системах можно разделить следующим образом:

1. Поиск с помощью атрибутивного и текстового поиска по географическому названию.
2. Поиск с помощью непосредственной индексации записей информационных систем географическими координатами.
3. Поиск с помощью метапоисковой машины, использующей:
 - а) специализированный справочник (тезаурус) географических названий (рис. 1);
 - б) тезаурус географических названий и поисковый географический индекс, организованный с использованием ссылок на записи тезауруса географических названий.

Метапоисковая машина – поисковая система, не имеющая собственной базы данных и поискового индекса, и формирующая поисковую выдачу из результатов поиска других поисковых систем.

При реализации модуля географического поиска для ZooSPACE должны учитываться следующие особенности:

1. Вариант с текстовым поиском сложен для пользователя, поскольку предполагает составление списка названий географических объектов, причем с учетом изменения названий географических объектов, с учетом их вложенности друг в друга.
2. Не все хранилища данных, на которых построены существующие информационные системы, содержат функциональность по обработке и

использованию географических координат.

3. Непосредственное задание координат в метаданных объектов означает, что необходимая поисковая логика должна быть реализована во всех целевых информационных системах по отдельности. Реализация такой логики потребует существенных изменений в структуре целевой информационной системы.

4. При подключении информационной системы к платформе ZooSPACE не хотелось бы каким-либо образом изменять структуру существующей системы, так как предполагается подключение большого количества информационных систем к ZooSPACE и изменять каждую из них будет слишком трудозатратно.

Поэтому целесообразным является вариант организации географического поиска через метапоисковую машину, в качестве которой и будет выступать модуль ZooSPACE с использованием тезауруса географических названий (третий вариант).

Для организации географического поиска с помощью метапоисковой машины информационная система должна удовлетворять определённым требованиям. Для двух способов организации поиска требования различны.

Для организации поиска способом 3.а информационная система должна удовлетворять следующим требованиям:

1) должна поддерживать поиск данных по протоколу Z39.50 (обязательный синтаксис запросов RPN-1);

2) атрибуты, в которых может содержаться географическая информация, должны быть доступны для поиска.



Рис.1 – Поиск с использованием тезауруса географических названий

Данные требования очень просто выполняются, так как для подключения к ZooSPACE информационная система должна поддерживать доступ по Z39.50 в любом случае и предоставлять возможность поиска по некоторому набору атрибутов. В большинстве случаев информационная система предоставляет возможность поиска по всем значимым атрибутам. Таким образом получаем, что указанные требования в системах, подключенных к ZooSPACE, уже выполнены, и в любой системе, подключаемой к ZooSPACE, такой географический поиск поддерживается автоматически.

Для организации поиска способом 3.b информационная система должна удовлетворять следующим требованиям:

- должна поддерживать поиск данных по протоколу Z39.50 (обязательный синтаксис запросов RPN-1);
- атрибуты, в которых может содержаться географическая информация, должны быть доступны для поиска;
- идентификаторы записей информационной системы должны быть

доступны для поиска;

– если информационная система содержит внутренний географический индекс, то он также должен быть доступен для поиска.

Требования отличаются двумя пунктами, последний из которых означает, что если записи информационной системы содержат сведения о географических координатах, то их можно параллельно использовать в процессе поиска. Предпоследний пункт говорит о том, что должна быть возможность получать уникальные идентификаторы записей информационной системы; ведь именно к уникальным идентификаторам записей будут привязаны идентификаторы географических объектов в промежуточной (технологической) базе данных.

Как уже было сказано, для реализации поиска с использованием метапоисковой машины необходим тезаурус географических названий. Такой тезаурус был описан в [5] как тезаурус ретроспективного геокодирования. Тезаурус предоставляет доступ к данным по стандартному протоколу Z39.50. При этом дополнительно поддерживаются протоколы HTTP/XML/SOAP/SRW и HTTP/SRU за счет возможностей Z39.50 сервера ZooPARK [6].

Основная идея использования метапоисковой машины в преобразовании запроса, содержащего географическую компоненту, в запрос, не содержащий географическую компоненту, чтобы он мог быть обработан целевой информационной системой. Два способа построения метапоисковой машины определяют, каким образом будет изменён оригинальный поисковый запрос.

Метапоисковая машина для географического поиска должна отвечать следующим требованиям:

1) должна передавать поисковые запросы без географической компоненты в целевую информационную систему без изменений;

2) должна предоставлять возможность пометки части поискового запроса как географического с возможностью указания, по каким поисковым атрибутам будет производиться поиск;

3) должна уметь обработать географическую часть запроса (согласно способам географического поиска)

4) должна объединять результаты выполнения географической части запроса с частью оригинального запроса, не относящейся к географии, и строить на основе полученного результата новый запрос, который может быть обработан целевой информационной системой.

В модуле географического поиска ZooSPACE описанная технология реализована следующим образом:

1. Единичный структурный блок запроса представляет собой объединение двух операндов (АРТ в терминах RPN) при помощи оператора OR (ИЛИ).

2. Первый операнд содержит геометрическую часть со всеми поисковыми атрибутами, например, `@attr 1=2060 @attr 2=7 @attr 4=202 {{{(52.2, 80.3), (53.8, 81.0)}}` – найти все прямоугольные объекты, попадающие в область, ограниченную указанным термом.

3. Второй операнд, например, `@attr 1=4 @attr 6=10 {geo_module.py}` - указывает на необходимость исполнения инструкции с именем `{geo_module.py}`, которая должна сформировать список географических объектов в соответствии с первым операндом, и на целевой поисковый атрибут `@attr 1=4 (Title)`. Конструкция `@attr 6=10` маркирует часть запроса как географическую.

4. Операнды объединяются оператором `@or (OR)`. Запрос в поисковую машину должен приходиться в следующем виде:

`@or`

`@attr 1=2060 @attr 2=7 @attr 4=202 {{{(52.2, 80.3), (53.8, 81.0)}}`

`@attr 1=4 @attr 6=10 {geo_module.py}`

Поисковая логика выделяет географическую часть запроса и передаёт его в качестве параметра в модуль, указанный в качестве термина второго операнда

(**geo_module.py**). Модуль производит обращение к тезаурусу и возвращает список географических названий.

На основе списка географических названий формируется запрос к целевой базе данных. Первая часть географического запроса отбрасывается, а вместо названия модуля вставляются географические названия. Части запроса соединяются логической операцией AND:

@and @and @and @and ...

@attr 1=4 { *Новосибирск* }

@attr 1=4 { *Новосибирска* }

@attr 1=4 { *Новосибирску* }

...

При этом результирующий запрос имеет стандартную форму и может быть исполнен любым сервером Z39.50 или SRW/SRU. Для формирования запросов в ZooSPACE предусмотрены графические WEB-интерфейсы, изображенные на рисунке 2.

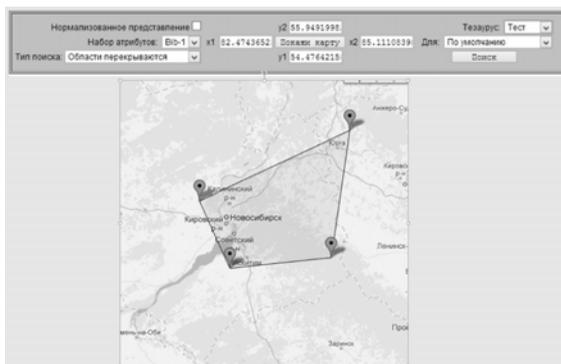


Рис.2 – Интерфейс построения географического запроса в ZooSPACE

Описанный и реализованный в модулях платформы ZooSPACE подход в настоящее время проходит тестирование. На рисунке 3 представлены общие результаты поиска. В таблице 2 представлен фрагмент результатов поиска.

Результат поиска по запросу:
 @or @attr 1=2060 @attr 2=7 @attr 4=202 ((54.47642158429295,82.474365234375),(55.94919982336746,85.111083984375)) @attr 6=10 (thes1.php)

Электронная библиотека ИВТ СО РАН	dspace	282	<input type="button" value="Просмотр"/>	<input type="button" value="Все"/>
ИВТ СО РАН: Тестовая БД для ВИНТИ МЕКОФ	t_mkvfn	45	<input type="button" value="Просмотр"/>	<input type="button" value="Все"/>
Конференции СО РАН	konf	0	<input type="button" value="Просмотр"/>	<input type="button" value="Все"/>
Материалы конференций СО РАН	konfep	3	<input type="button" value="Просмотр"/>	<input type="button" value="Все"/>
ИВТ СО РАН: Труды сотрудников	trnct	3	<input type="button" value="Просмотр"/>	<input type="button" value="Все"/>

Всего по запросу найдено: 333 записи

Рис.3. – Фрагмент результатов поиска

Таблица 2 – Фрагмент результатов поиска

Новосибирскому заводу "Труд" - 100 лет
Новосибирский мегаполис
Влияние концентрации аэрозолей на качество атмосферы в г. Новосибирске
Новосибирский ученый удостоен «Глобальной энергии»
....

Описанные выше подходы к решению проблемы географического поиска в "негеографических" информационных системах лишь приближают нас к намеченной цели. Они не в состоянии решить проблему в целом, но, тем не менее, позволяют существенно расширить функциональность поисковых сервисов информационных систем и платформы ZooSPACE, в частности, и тем самым предоставить пользователю новые возможности по поиску информации.

Список литературы

1. Жижимов О.Л., Федотов А.М., Шокин Ю.И. Технологическая платформа массовой интеграции гетерогенных данных // Вестник НГУ. Сер.: Информационные технологии. - 2013. - Т.11. - № 1. - С.24-41. - ISSN 1818-7900.
2. GeoNetwork [Электронный ресурс] URL: <http://geonetwork-opensource.org/>
3. Атаева О.М., Кузнецов К.А., Серебряков В.А., Филиппов В.И. Портал интеграции пространственных данных "ГеоМета" // Труды XXII Всероссийской научной конференции «Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции» – RCDL'2010. Казань. 2010. С. 219-224.
4. Атаева О.М., Каленкова А.А., Серебряков В.А. MultiMeta - Система интеграции пространственных данных и ресурсов электронных библиотек // Труды XXIII Всероссийской научной конференции «Электронные библиотеки:

перспективные методы и технологии, электронные коллекции» - RCDL'2011. Воронеж. 2011. С. 26-29.

5. Скачков Д.М., Жижимов О.Л. Об интеграции географических метаданных посредством ретроспективного тезауруса // Информатика и ее применения. - 2012. - Т.6. - № 3. - С.43-51. - ISSN 1992-2264.
6. Жижимов О.Л., Мазов Н.А. Сервер ZooPARK: вчера, сегодня, завтра // Библиотеки и информационные ресурсы в современном мире науки, культуры, образования и бизнеса: 14-я междунар. конф. «Крым 2007». Судак, Украина. 2007. С. 168-171.

СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕДООПРЕДЕЛЕННЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Пчельников Д.В., Добрецов Н.Н.

*ФГБУН "Институт геологии и минералогии В.С. Соболева" СО РАН
denvpc@gmail.com*

Предложенный нами подход к построению автоматизированных систем мониторинга позволяет использовать инструменты современных ГИС для анализа и визуализации результатов наблюдений, допуская неполное пространственное описание непосредственно самих наблюдаемых объектов. Это позволяет начать мониторинг и проверить гипотезы об объектах и методике наблюдения за более короткое время. Затем принять решение о дальнейшей целесообразности самого наблюдения или корректировки используемой методики мониторинга.

Введение

Под системой мониторинга будет подразумеваться информационная система, предназначенная для наблюдения за любыми объектами геопространства, анализа их состояния и предоставления результатов конечным пользователям или другим информационным системам.

В настоящее время большинство систем мониторинга пространственных объектов строится вокруг картографического представления данных, традиционно используемого в геоинформационных системах (ГИС). Атрибутивная и пространственная информация в картографическом представлении разделена, при этом пространственная информация об объектах является обязательной. Такой подход перешел в ГИС из бумажной картографии [1].

Предложенный нами подход к построению автоматизированных систем мониторинга позволяет использовать инструменты современных ГИС для анализа и визуализации результатов наблюдений, допуская неполное

пространственное описание непосредственно самих наблюдаемых объектов. Это удобно в ситуациях, когда указать собственную геопривязку и/или форму объектов наблюдения затруднительно (например, объекты наблюдения изменяют свои пространственные характеристики в ходе наблюдения или объектов много). Идентификация таких объектов возможна по совокупности известных параметров. Информационная модель наблюдения за объектом с недоопределенными пространственными характеристиками, помимо идентификатора, требует локализации (геопривязки) методов наблюдения за ним. Использование собственной геопривязки наблюдаемого объекта – это частный случай локализации методов наблюдения. Для тех же целей могут быть использованы: местоположение постов наземного наблюдения, область покрытия космоснимка, местоположение других пространственных объектов, позволяющих обнаружить и провести наблюдения за интересующим объектом и др. варианты.

Создание системы мониторинга

Создание системы мониторинга состоит из трех основных этапов: *проектирование, подготовка исходных данных, создание сценариев мониторинга.*

На этапе проектирования производится анализ целей и задач системы мониторинга, определение формы представления результатов измерения, необходимая точность. Далее определяются возможные пути достижения цели мониторинга и выбор оптимального пути. Формируется техническое задание, готовится информация об объектах мониторинга и определяются необходимые источники данных наблюдений.

Подготовка исходных данных

Наполнение системы мониторинга исходными данными выполняется в соответствии с техническим заданием на сбор данных, которое было сформировано на этапе проектирования.

Когда дело касается достаточно обширных территорий с большим количеством наблюдаемых объектов, то подробное описание (в т.ч. и картографическое) этих объектов занимает много времени. Например, создание карты сельскохозяйственных земель с точностью до отдельного поля сибирского региона является трудозатратной задачей. Однако, актуальность мониторинга земель сельскохозяйственного назначения высока, о чем свидетельствует распоряжение правительства от 30 июля 2010 году [2]. Следует определить необходимость такого описания для запуска системы мониторинга. В предложенном случае при использовании данных дистанционного зондирования можно задать автоматизированные методы наблюдения, например, метод тестовых полигонов (при этом, для разных агроклиматических зон картируется лишь малая часть объектов, которые служат материалом для автоматизированного поиска и классификации других полей на снимке). Для ускорения обработки данных можно сузить область поиска за счет создания масок заведомо неиспользуемых земель (не обязательно особо точных, достаточно провести автоматическую классификацию и получить грубые контуры, которые помогут снизить количество обрабатываемых данных в несколько раз). Баланс между тотальным описанием объектов наблюдения и построением системы мониторинга с очень гибкой логикой, основанной на цепочках предположений о состояниях объекта, определяется выбранным путем наблюдения, обеспечивающим наименьшие затраты и необходимую точность. Большое количество предположений приводит к значительным погрешностям в измерениях и увеличению возможности ошибки в самих сценариях, тогда как тотальное описание (особенно картографическое) является весьма трудоемким.

Создание сценария наблюдения.

Сценарий создается на основании выбранного пути мониторинга. Он представляет собой последовательность методов наблюдения, выполнение ветвлений которых зависит от предполагаемых состояний объекта. Чем точнее описаны объекты наблюдения, тем, как правило, проще сценарий мониторинга.

Напротив, чем больше недоопределенность описания объектов, тем больше остается предположений, которые следует проверять в процессе мониторинга и тем сложнее сценарий.

Условия выбора в сценарии наблюдений за пространственно-недоопределенным объектом задаются: принадлежностью объекта к определенному классу на момент измерения (например, суша или вода, лес или вырубка); собственными пространственными характеристиками объекта; фактом самого существования объекта на момент времени измерения (например, пересыхающее озеро или пожар). В зависимости от состояния объекта наблюдения могут подключаться дополнительные источники данных, требующие финансовых ресурсов (заказ космоснимков высокого разрешения, полевые исследования) или технические (повышается нагрузка на оборудование, требуется подключение дополнительного).

Функционирование системы мониторинга пространственно-недоопределенных объектов

Для систем мониторинга важна геопривязка методов наблюдения, а не собственно наблюдаемого объекта. Геопривязка может быть представлена в структурированном или неструктурированном виде. Для структурированного пространственного описания допустимы: точная геопривязка, область локализации или относительная (относительно известных системе объектов). Форма наблюдаемого объекта необязательна для наблюдения за ним, если эта информация не нужна или необязательна для методов наблюдения. Из этого допустимы следующие варианты определения формы объекта наблюдения: точная, предполагаемая на время проведения измерения, не задана.

Как следствие, возможно наблюдение за пространственно-недоопределенными объектами. Информационная модель процесса наблюдения за ними представлена на рис. 1. Часть необходимой информации об объектах может быть получена в ходе наблюдений.



Рис. 1. – Информационная модель наблюдения за пространственно-недоопределенным объектом

Параметры наблюдаемого объекта включают в себя все атрибутивные и пространственные характеристики объекта наблюдения, его представление не является картографическим, обязательным является только уникальный идентификатор объекта, назначаемый самой системой. Параметры объекта содержат структуры хранения как исходных данных для мониторинга, так результатов мониторинга. Результаты измерений, полученные одними методами, могут быть входными данными для других методов. Необходимая геопривязка для функционирования модели наблюдения, как уже говорилось ранее, задана непосредственно для методов наблюдения, а не для объектов наблюдения.

Модели наблюдения за пространственно-недоопределенными объектами и блоки ввода-вывода для работы с источниками и потребителями данных составляют систему мониторинга. Между моделями объектов возможны внутренние связи для взаимного использования их параметров (рис. 2, внизу). С одним блоком ввода-вывода могут взаимодействовать несколько моделей наблюдения, и, наоборот, один блок ввода-вывода может взаимодействовать с несколькими моделями (рис. 2).

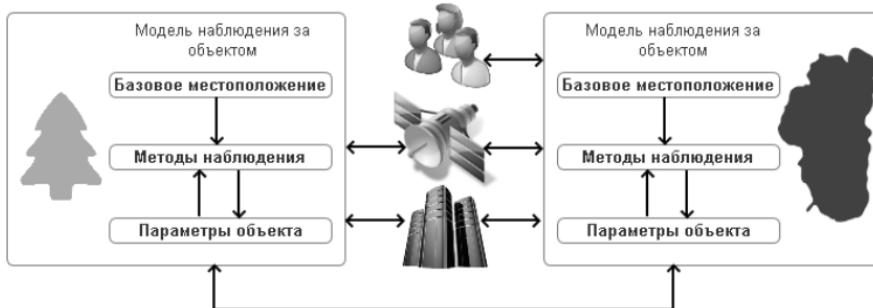


Рис. 2. – Взаимодействие частей системы мониторинга

Цепочка наблюдения может заканчиваться либо выводом данных об объекте наблюдения в другую информационную систему (обмен “машина-машина”), для этого требуется блок вывода стандартизированной информации [3]; либо предоставлением данных конечному пользователю – это требует наличия блока вывода информации в соответствии с целями пользователя. Формы представления результатов измерений в соответствии с требованиями пользователей могут быть любыми, согласованными в процессе проектирования системы мониторинга. В том числе, объекты могут быть отображены на карте.

Заключение

Собственная геопривязка и/или форма пространственного объекта необходимы только в том случае, когда этого требуют методы наблюдения за объектом. В ином случае эти параметры могут совсем не фигурировать в наблюдениях, либо определяться в ходе самих измерений (в задачах мониторинга). Картографическое представление в системе мониторинга необходимо только для визуализации результатов измерений по требованию конечных пользователей. Автоматизированной системе для внутреннего представления оно не требуется.

Для исследователя это означает уменьшение стартового барьера и создание работоспособной системы мониторинга за более короткое время. Быстрая проверка рабочих гипотез дает возможность модификации системы в

соответствии с уже полученными результатами. Когда дело касается научно-исследовательских задач, речь может идти о полном пересмотре целей и задач мониторинга на основе первой полученной информации. Дальнейшая разработка системы уже продолжается не с гипотез, а с реальной оценки ситуации.

Предложенный в статье подход применен авторами при создании системы оценки состояния сельскохозяйственных посевов по данным дистанционного зондирования MODIS, развернутой и функционирующей в НИЦ “Планета” (с 2010 г) [4,5].

Список литературы

1. Берлянт А. М. Картография: Учебник для вузов. — М.: Аспект Пресс, 2002. — 336 с.
2. Концепция развития государственного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения и земель, используемых или предоставленных для ведения сельского хозяйства в составе земель иных категорий, и формирования государственных информационных ресурсов об этих землях на период до 2020 года (одобрена Распоряжением Правительства РФ от 30 июля 2010 г. № 1292-р)
3. Медведев А.А., Атаева О.М., Кошкарев А.В., Серебряков В.А., Теймуразов К.Б., Инфраструктура пространственных данных для научных исследований - Интернет и современное общество. // Сборник научных статей. Материалы XIV всероссийской объединенной конференции «Интернет и современное общество», Санкт-Петербург, 2011 г.
4. Пчельников Д.В., Добрецов Н.Н., Сладких Л.А. Построение системы прогнозирования урожайности зерновых культур для территории Новосибирской области на основе архитектуры объектно-ориентированных систем мониторинга // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). – 2009. Т. 18. № 12. С. 234-238.
5. Сапрыкин Е.И., Сладких Л.А., Пчельников Д.В. Оценка состояния посевов зерновых культур по данным дистанционного зондирования земли // V Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии, системы и приборы в АПК - АГРОИНФО-2012». п.Краснообск, 10-11 октября 2012 года. Материалы межд. Конф. 2012. Том 1, С. 387-390.

КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ СИСТЕМ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

Курепина Н.Ю., Рыбкина И.Д., Стоящева Н.В.

*Институт водных и экологических проблем СО РАН,
Барнаул,
kurepina@iwep.ru, irina@iwep.ru*

Вопросы использования водных ресурсов являются одними из важнейших в современном мире. Для их изучения применяются различные научные методы и подходы, программные средства и технологии, способствующие решению водохозяйственных и водно-экологических проблем социально-экономического развития территорий.

Возможность наглядного отображения пространственно-временных взаимосвязей между элементами системы «водные ресурсы – население – экономика – состояние водных объектов» предоставляет картографический метод исследований, при этом ГИС позволяют выполнить процесс моделирования на высоком технологическом уровне. Наиболее перспективно применение компьютерных технологий в сочетании с системным и комплексным подходами.

Объектами картографирования являются территориальные системы водопользования (СВП) как исторически сложившиеся формы использования водных ресурсов. Формирование СВП имеет природообусловленный характер, существенно детерминированный действием антропогенных факторов. Управление СВП осуществляется как в пределах административно-территориальных образований, так и в границах водохозяйственного районирования России.

Для объективного картографического отображения СВП был всесторонне изучен мировой опыт в области управления водными ресурсами [1-2], проведен

анализ методических приемов составления карт [3-5], выбран основной методологический подход к выделению и описанию территориальных СВП.

Анализ мирового опыта управления водными ресурсами и картографирования СВП показал следующее:

1. Наиболее совершенным, на наш взгляд, является подход интегрированного управления водными ресурсами, представляющий возможность сочетанного решения вопросов экологии и охраны водных объектов, с одной стороны, и комплекса водохозяйственных проблем: вододефицита и нехватки вод питьевого качества, – с другой.

2. Картографический метод исследований активно используется при изучении вопросов, связанных с водопользованием. Однако не определена единая методика составления карт; не установлена оптимальная ячейка картографирования (операционная территориальная единица аналитических процедур и картографирования – административная, ландшафтная или водохозяйственная); нет перечня основных показателей, характеризующих СВП; отсутствуют стандарты по отображению на картах комплекса исходной информации.

На картах водопользования визуализация информации, как правило, упрощенная, показываются либо количественные, либо качественные характеристики водопользования (например, забор воды из подземных и поверхностных водных объектов, объемы сброса сточных вод и их категории, количество загрязняющих веществ). Между тем, показатели разрознены и не дают целостной картины отображаемой информации.

Учитывая собственный опыт картографирования антропогенной нагрузки на водосборную территорию и водные объекты Обь-Иртышского бассейна [6-7], было решено для изучения территориальных СВП и их визуализации применить подход интегрированного управления водными ресурсами в рамках бассейново-ландшафтной методологии. Данная методология позволяет не только выделить региональные СВП, но и провести дифференциацию водохозяйственных и

водно-экологических проблем, а также служит вспомогательным инструментом их решения, предоставляя информацию в зависимости от природно-экологических, бассейново-ландшафтных и социально-экономических характеристик региона, и выполнить комплексное картографическое моделирование СВП в речном бассейне.

В такой постановке методология была апробирована нами на примере бассейна р. Алей, одной из наиболее антропогенно преобразованной территории юга Западной Сибири, с интенсивным агропромышленным освоением природных ресурсов, с целью оптимизации территориальной структуры водохозяйственной отрасли и решения проблем водообеспечения населения и экономики.

Основные этапы картографирования осуществлялись в программной среде ArcGIS 10.0, в частности, в ней был создан ГИС-проект «Водопользование в речном бассейне р. Алей».

Для данного бассейна нами были установлены основные концептуальные составляющие СВП и их характеристики, требующие картографического моделирования:

- категории СВП (крупноочаговые, очаговые, дисперсные, линейные и линейно-площадные);
- водоресурсный потенциал территорий и водообеспеченность населения (расчёты проводились в границах ландшафтных провинций);
- виды и объем использования водных ресурсов с привязкой к муниципальным образованиям бассейна;
- объемы сброса сточных вод по категориям качества;
- степень загрязнения водного объекта.

Источниками информации для базы данных ГИС послужили следующие картографические материалы:

- отвекторизованные топографические карты (масштаб 1:200 000, оригиналы карт ГУГК при СМ СССР, 1981-1985 гг.);

- векторная карта «Физико-географическое районирование Алтайского края» (масштаб 1:200 000, фонд ИВЭП СО РАН);
- электронные данные по водохозяйственным участкам (ФГУП «Центр Регистра и Кадастра», www.waterinfo.ru);
- отвекторизованные данные административно-территориального деления Алтайского края [8].

Структура ГИС «Водопользование в бассейне р. Алей» представлена на рисунке 1. Она состоит из нескольких тематических блоков «Базовая географическая основа», «Ландшафтно-бассейновая структура» и «Водопользование».

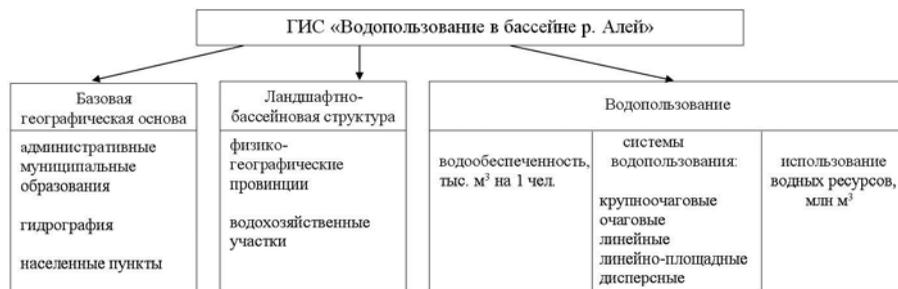


Рис. 1. – Структура ГИС «Водопользование в бассейне р. Алей»

В качестве основы для выделения СВП: крупноочаговых, очаговых, линейных, линейно-площадных и дисперсных, послужила методика Т.Г. Руновой с соавторами [9], разработанная для выделения систем природопользования, но адаптированная нами к особенностям водопользования в конкретном речном бассейне. Для картографического представления СВП использовались классические приемы отображения площадных, линейных и точечных объектов посредством условных знаков (рис. 2). С целью отображения крупноочаговых и очаговых СВП была разработана нестандартная картодиаграмма, позволявшая отобразить несколько показателей одновременно: общий водозабор, забор воды из поверхностных водных объектов, забор воды из

подземных источников, использование водных ресурсов на хозяйственно-питьевые нужды, использование водных ресурсов на производственные цели, использование водных ресурсов на цели орошения и с/х водоснабжения, общий сброс сточных вод, сброс загрязненных стоков и другие показатели, которые были предоставлены Верхне-Обским БВУ и предприятиями-водопользователями, расположенными в речном бассейне. Кроме этого, на карте отображены величины удельных показателей, полученные расчётным путём: водоемкость валового регионального продукта, удельные показатели водопотребления и водообеспечения.

Для отображения на карте линейных и линейно-площадных СВП были использованы показатели протяженности водопроводных и канализационных сетей муниципальных образований бассейна, пропускной способности оросительных систем, площади орошаемых земельных угодий. Небольшие по протяженности линейные объекты (водопроводные и канализационные сети) вошли в состав крупноочаговых и очаговых систем, без выделения их в качестве самостоятельных СВП. А такие крупные линейные сооружения, как Чарышский групповой водопровод и Алейская оросительная система с Рубцовским магистральным каналом представлены на карте внемасштабно на врезке, поскольку отнесены к структурам регионального уровня.

Выделение дисперсных систем основывалось на учете общих объемов водопотребления на хозяйственно-питьевые нужды в сельских населенных пунктах бассейна, а также результатов экспертных оценок состояния объектов водохозяйственной инфраструктуры, полученных авторами в ходе выполнения экспедиционных работ.

Итогом комплексной научно-исследовательской работы стала карта «Территориальная организация водопользования в речном бассейне (на примере р. Алей)» (рис. 2), представляющая собой информационно-аналитический комплекс, который можно рассматривать в качестве инструмента последующих научно-прикладных исследований.

Следует констатировать, что использованные авторами бассейново-ландшафтная методология в сочетании с подходом интегрированного управления водными ресурсами и оригинальной методикой выделения региональных СВП, а также полученные расчетные и картографические материалы, интерпретированные в среде ГИС, способствуют научному пониманию территориальной организации водопользования в речном бассейне, позволяя провести ранжирование водохозяйственных проблем муниципальных образований и наметить основные направления их урегулирования.

Список литературы

1. Доклад ООН о состоянии водных ресурсов мира. Вода для людей, вода для жизни. – М.: Весь мир, 2003. – 36 с.
2. The United Nations World Water Development Report 4 (WWDR 4). Managing Water under Uncertainty and Risk. 2012. // World Water Assessment Programme (WWAP). [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/>.
3. Жуков В.Т., Новаковский Б.А., Чумаченко А.Н. Компьютерное геоэкологическое картографирование. – М.: Научный Мир, 1999. – 128 с.
4. Дышлок, С.С. Методика картографирования устойчивости речных систем / С.С. Дышлок // Автореф. дис. ... кандид. техн. наук. – Новосибирск, 2008. – 24 с.
5. Кравец Е.А. Картографическая логика (анализ состояния и охраны окружающей среды). – М.: Изд-во МИИГАиК, 2010. – 160 с.
6. Курепина Н.Ю. Опыт картографирования антропогенной нагрузки на водосборную территорию и водные объекты / ГЕО-Сибирь-2011. Т. 1. Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия. Ч. 1: сб. матер. VII Междунар. научн. Конгресса «Гео-Сибирь-2011», 19-29 апреля 2011 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2011. – С. 216-220.
7. Рыбкина И.Д., Стоянцева Н.В., Курепина Н.Ю. Опыт оценки антропогенной нагрузки в схемах комплексного использования и охраны водных объектов (на примере Обь-Иртышского бассейна) / Водное хозяйство России, №4. – 2011. – С. 42-52.
8. Карта «Алтайский край. Административная карта», масштаб 1:600 000. – Новосибирск, ФГУП «Новосибирская картографическая фабрика», 2010 г.
9. Рунова Т.Г., Волкова И.Н., Нефедова Т.Г. Территориальная организация природопользования. – М.: Наука, 1993. – 208 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ В ФОРМИРОВАНИИ РЕГИОНАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ

Ротанова И.Н.¹, Кошкарев А.В.², Медведев А.А.²,

¹*Алтайский государственный университет, Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, rotanova07@inbox.ru*

²*Институт географии РАН, Москва, akoshkarev@yandex.ru*

Ведущая роль данных ДЗЗ из космоса в формировании региональной ИПД определяется следующим:

- космические снимки поставляют базовую информацию для создания картографических материалов;
- на основе метаданных осуществляется каталогизация космических снимков, что существенно упрощает их поиск и отбор для конкретных задач;
- метаданные позволяют идентифицировать каждое спутниковое изображение и отраженные на нем объекты в пространственно-временной системе координат;
- развитие технологий ДЗЗ делает материалы съемки из космоса все более доступными, повышаются качественные характеристики снимков и продуктов на их основе;
- существующие методы обработки позволяют проводить ортотрансформирование снимков, обеспечивающее высокое качество привязки к местности.

Существующие ограничения в предоставлении информации ДЗЗ, электронных услуг и сервисов при формировании ИПД связаны с рядом проблем, таких как: отсутствие единого каталога данных ДЗЗ и продуктов их обработки; недостаточная оперативность доступа потребителей к каталогам данных различной принадлежности и выполнения заявок на поставку данных; использование несогласованных форматов представления данных и

классификаторов.

Одно из перспективных направлений использования данных ДЗЗ – цифровое моделирование рельефа земной поверхности (как, впрочем, и других небесных тел) и дна океанов, морей и внутренних водоемов. В начале нового века дистанционные методы получения ЦМР пришли на смену традиционным, когда основным источником данных для них служила топографическая карта или план, а также морские навигационные и батиметрические карты. Сегодня ситуация коренным образом изменилась: модели рельефа стали массовым продуктом ДЗЗ, востребованным потребителем, для их создания используются высокотехнологические средства. Рисунок 1 отражает потоки данных и работ, обслуживающих современные процессы моделирования рельефа.

Цифровое моделирование рельефа, объединяющее методики и технологии создания и использования цифровых моделей рельефа (ЦМР), включая пространственный анализ и интерпретацию результатов их обработки, было и остается наиболее многообещающим направлением использования ГИС для его изучения. Разносторонняя обработка ЦМР средствами ГИС позволяет получать результаты, недостижимые традиционными методами. Это не только набор «традиционных» производных расчетных морфометрических показателей, таких как углы наклона, экспозиции, показатели расчлененности рельефа, но и более глубокий их анализ. Для этого разработаны и используются, например, алгоритмы расчета кривизны земной поверхности фрактального и двухмерного спектрального анализа рельефа. Итогом обработки ЦМР становятся производные данные, новые знания, карты. Методы трехмерного моделирования позволяют строить объемные изображения, в том числе виртуально-реальностные. Разработаны новые мультимасштабные модели для ЦМР.

Для обработки ЦМР давно и успешно используются соответствующие модули полнофункциональных программных средств ГИС. Это коммерческое программное обеспечение (ПО) или ПО с открытым исходным кодом. Для малобюджетных проектов можно порекомендовать, например, MicroDEM (Peter

Guth, Oceanography Department, U.S. Naval Academy), SAGA (Institute of Geography, University of Hamburg, Germany,) и QuantumGIS, а также некоторые другие в числе проектов Open Source Geospatial Foundation.

Данные о рельефе территории России в виде национальной ЦМР, как это практикуется в США или странах Европейского союза, где разрешение (шаг сетки матрицы высот) достигло 5 м, не существует. Более того остаются секретными бумажные и цифровые топографические карты масштаба 1:100 000 и крупнее и эквивалентные им ЦМР с шагом сети 100 м и менее. В этих условиях для научно-исследовательских целей в региональных проектах разнообразной тематики широко используется ЦМР SRTM. В целом, оценивая ресурсы открытых данных о рельефе, включая общедоступные глобальные и семиглобальные ЦМР, нужно назвать (в порядке убывания пространственного разрешения, измеряемого шагом сетки высотных отметок: глобальная ЦМР ASTGTM (ASTER GDEM), созданная в результате стереофотограмметрической обработки снимков космического аппарата ASTER (США) (шаг сетки ок. 30 м), семиглобальная ЦМР SRTM, полученная в результате съемки земной поверхности многоцветным транспортным космическим кораблем NASA «Индевор» (Endeavour) в феврале 2000 г. (3 угловые секунды или ок. 100 м в низких широтах, в пределах области от 60° с.ш. до 60° ю.ш.), глобальная ЦМР GTOPO30, созданная Геологической съемкой США USGS (30 угловых секунд или около 1 км в низких широтах), подобные ей GTOPO5, GTOPO2 и GTOPO1, а также ETOPO5 (5 угловых минут или ок. 10 км).

Широкое использование российскими исследователями открытых, но достаточно грубых ЦМР, включая ETOPO5, GTOPO30, ETOPO2, ETOPO1, ASTER GDEM и др., связано с сохранившимися до сих пор режимными ограничениями на детальные ЦМР (с детальностью показа элементов рельефа на топографических картах масштабов крупнее 1:100 000).

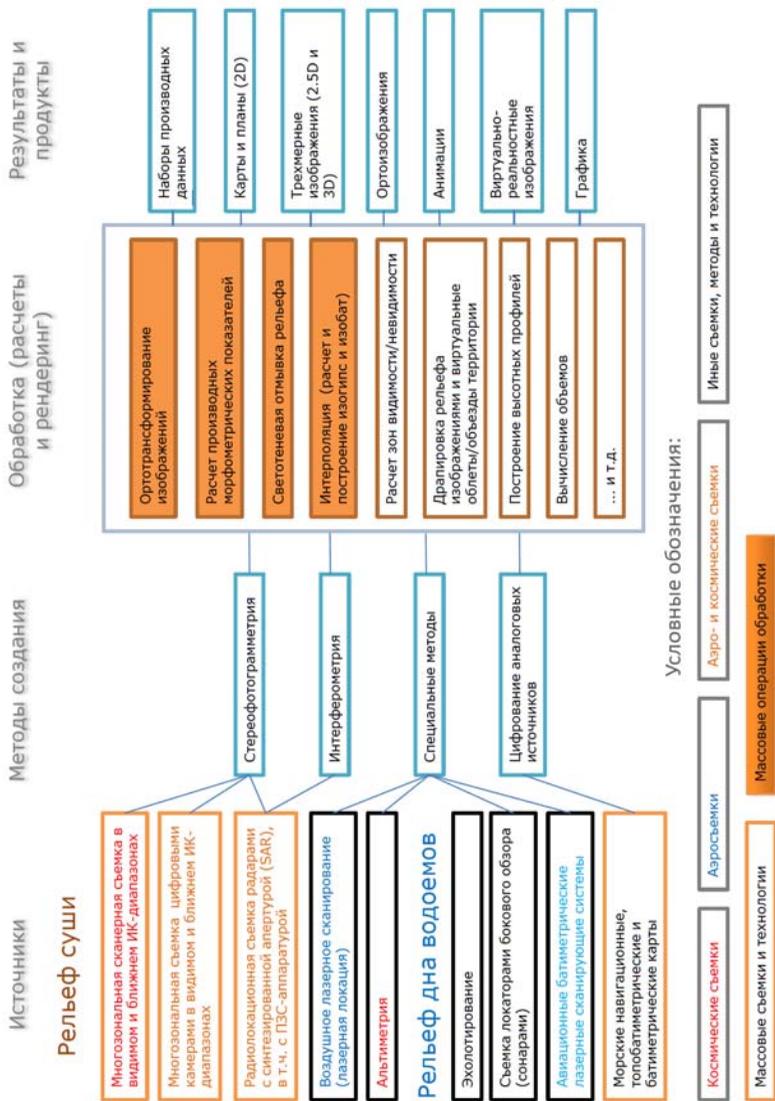


Рис. 1. – Методы и технологии создания и обработки ЦМР по данным дистанционного зондирования

Интерес к ЦМР высокого разрешения связан, прежде всего, с задачами

практики. Рельеф – безусловно, необходимый набор базовых пространственных данных национальных ИПД, шаг сетки которых достигает значений 5 x 5 м (бесшовные наборы на территорию США и стран Европейского союза) и лучше, вплоть до субметрового разрешения. Часто они доступны на геопорталах ИПД как коммерческий продукт или в визуализированных формах (рис. 2), включая картографические и виртуально-реальностные. Для них разработаны стандартные спецификации национального и международного уровня. Это, в частности, документация программы INSPIRE Европейского союза, где в Приложении II Директивы INSPIRE под рельефом понимаются «Цифровые модели рельефа суши, ледниковых покровов и дна океанов и морей, включая отметки высот земной поверхности, батиметрические данные и положение береговых линий» [1].



Рис. 2. – Геопортал ИПД Словении: метаданные о ЦМР с разрешением 5 м (<http://prostor.gov.si>)

Одной из площадок, обеспечивающих функции обработки ЦМР, причем в сетевой облачной среде, стала виртуальная «ГИС-лаборатория», созданная на базе «Университетского кластера» (<http://www.unihub.ru>), нацеленная на интеграцию данных дистанционного зондирования в интересах наук о Земле [2]. Следуя тенденции использования открытых (свободно распространяемых)

геоинформационных ресурсов и «открытых ГИС», в том числе программных продуктов с открытым исходным кодом, предполагается использование уже существующих ЦМР (например, SRTM и ASTER GDEM) и программных средств их обработки, включая ГИС QuantumGIS, GRASS, а также некоторых других в числе проектов Open Source Geospatial Foundation. В хранилище ГИС-лаборатории доступны также данные космической и аэрофотосъемки, включая космические снимки Ландсата глобального охвата с разрешением 150 м, синтезированные космические снимки Ландсата за 1990 и 2000 гг. с разрешением 30 м и каталог аэрофотоснимков (метаданные) Института географии РАН.

В результате работы на кроссплатформенных геоинформационных системах участниками «ГИС-лаборатории» созданы серии карт морфометрических показателей на территорию Курильских островов (рис. 3).

В лаборатории были также обработаны космические снимки с различных съемочных платформ, в результате чего были получены данные и произведена интегральная оценка современного использования земель и процессов на данной территории. Стоит отметить, что все данные и процесс их обработки проходят в «облачной» (виртуальной) среде, которая дает возможность распределенно и с высокой долей оперативности работать с большими массивами данных (клиент-серверные технологии).

В результате экспериментов по геомоделированию рельефа, то есть обработке ЦМР, и других данных спутникового ДЗЗ на тестовых участках (Курильские острова, Северный Кавказ, Республика Крым и др.) сотрудниками виртуальной ГИС-лаборатории в его составе показано, что одной из современных тенденций развития геоинформатики является миграция пространственных данных и функций их обработки, включая картографическую визуализацию данных, в сетевую облачную среду с использованием свободно распространяемых информационных ресурсов и программных средств ГИС с открытым исходным кодом, что существенно повышает эффективность научных географических исследований в условиях дефицита финансовых средств на

реализацию научных проектов [3 – 5].

Разработка технологии создания ЦМР по материалам ДЗЗ получает развитие в Алтайском государственном университете. Космические снимки высокого разрешения, полученные со спутников QuickBird и Ikonos с разрешением 0,6 и 1 м соответственно применены для создания ЦМР 27 сел Республики Алтай [6]. Для построения изолиний рельефа использовалась матрица SRTM, а для интерполяции и сглаживания высот – разработанная программа создания сплайновых поверхностей.

Апробированная геоинформационная технология создания цифровых карт передана в ряд организаций г. Барнаула, занимающихся выполнением картографических работ и созданием региональной ИПД [7, 8].

Кроме рельефа суши, предметом геомоделирования рельефа становится дно океанов, морей и внутренних водоемов, поверхность и ложе ледников и др.

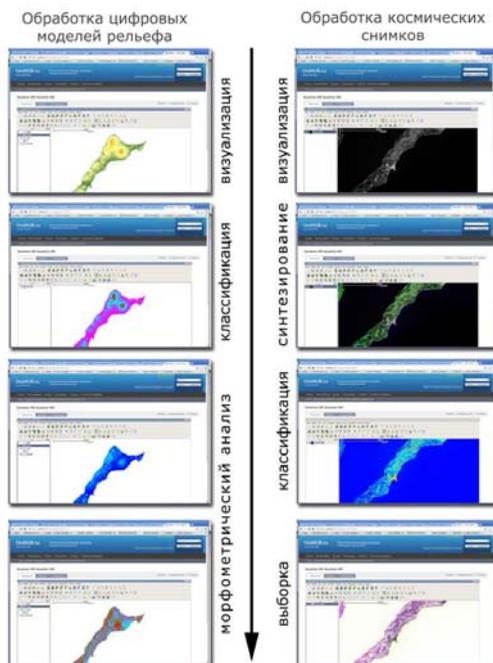


Рис. 3. – Процессы и результаты обработки данных

В существенной степени это связано с новыми источниками и технологиями получения данных о рельефе, с данными ДЗЗ, включая, прежде всего, многозональную космическую съемку в видимом и ближнем ИК-диапазонах, радиолокационную съемку радарными с синтезированной апертурой (SAR) и воздушным лазерным сканированием (лазерной локацией).

В проекте «Основ государственной политики в области использования результатов космической деятельности в интересах модернизации экономики РФ и развития её регионов на период до 2030 года» обоснована необходимость обеспечения максимальной эффективности использования результатов космической деятельности в интересах модернизации экономики РФ и развития её регионов на основе формирования и функционирования информационно-телекоммуникационных полей, использование которых способно придать процессу управления регионами, территориями, объектами такие свойства как системность, оперативность, непрерывность и глобальность [9].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 13-05-00462 А, 13-05-12047 офи_м, 12-07-98012-р_сибирь_а).

Список литературы

1. Кошкарёв А.В. Инфраструктуры пространственных данных: текущее состояние и проблемы. Российский и зарубежный опыт. – Охрана окружающей среды и природопользование, 2011, № 3. – С. 37-47.
2. Кошкарёв А.В., Медведев А.А., Вишняков Ю. С., Поликарпов С.А., Сотников А. Н. Виртуальная ГИС-лаборатория как инструмент анализа пространственных данных // Труды Института системного программирования РАН. – 2012. – Том 23. – С. 245-255.
Копия: http://www.ispras.ru/ru/proceedings/docs/2012/23/isp_23_2012_245.pdf.
3. Кошкарёв А.В., Медведев А.А. Сетевые геосервисы Академической ИПД. – Географические исследования молодых ученых в регионах Азии: материалы молодежной конференции с международным участием (Барнаул - Белокуриха, Барнаул, 20–24 ноября 2012 г.) / Ред. О.В. Останин, Н.Ф. Харламова. – Барнаул: ООО «Алтай-Циклон», 2012. – С. 15-18.
Копия: <http://www.asu.ru/files/documents/00006764.pdf>.
4. Лихачева Э.А., Палиенко В.П., Палиенко Э.Т., Кошкарёв А.В., Стица Р.А. Новые подходы к оценке и картографированию антропогенно-преобразованных территорий / Антропогенная геоморфология / Отв. ред. Э.А. Лихачева, В.П. Палиенко, И.И. Спасская. – М.: Медиа-ПРЕСС, 2013. – С. 348-373.

5. *Лихачева Э.А., Кошкарев А.В., Медведев А.А.* Геоинформационное картографирование для эколого-геоморфологических приложений // Проблемы окружающей среды и выделение групп риска среди населения: Сборник статей / НАН РА Центр эколого-ноосферных исследований; – Ер.: Гигутион, 2013. – С. 108-117.
6. *Оскорбин Н.М., Суханов С.И.* Создание цифровой модели местности на основе космических снимков высокого разрешения // Известия Алтайского государственного университета. № 1/2 (77). – 2013. – С. 87-91.
7. *Оскорбин Н.М., Суханов С.И., Федин Л.Ю.* Сглаживание массива данных рельефа с использованием сплайновых поверхностей // Известия Алтайского государственного университета. № 1-1 (65). – 2010. – С. 112-115.
8. *Ротанова И.Н., Воробьев К.В., Оскорбин Н.М.* Принципы построения, технологии и программное обеспечение региональной модели инфраструктуры пространственных данных Алтайского края // Известия Алтайского государственного университета. № 1/1 (77). – 2013. – С. 143-147.
9. Основы государственной политики в области использования результатов космической деятельности в интересах модернизации экономики РФ и развития её регионов на период до 2030 года. утв. Президентом РФ от 19.04.2013 N Пр-906) Электронный ресурс: <http://base.garant.ru/70375384/>

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ

Зиновьев А.Т., Ловцкая О.В., Балдаков Н.А. , Дьяченко А.В.

*Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул,
nikita-baldakov@yandex.ru*

Введение

При решении практически важных задач по оценке последствий опасных гидрологических явлений, таких как затопление пойменных территорий при половодьях и паводках, требуется привлечение достаточно сложных математических моделей. Разработанные на их основе компьютерные модели для водотоков сложной конфигурации используют большие объемы 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. В связи с этим актуальным является разработка и создание информационно-моделирующих систем (ИМС), объединяющих вычислительные модули, базы данных и ГИС.

Таким образом, базы данных для решения конкретных задач имеют определенную специфику, обусловленную самим предметом исследования. Основной особенностью используемой в этих задачах информации является наличие в ней временной составляющей, что оказывает существенное влияние на структуру данных в моделирующих комплексах. Значительный объем в составе данных занимают временные ряды измеряемых и расчетных величин (таких как расходы, уровни, метеопараметры и т.п.), относимые к определенным пространственным точкам (створам, метеостанциям и т.п.). Необходимое взаимодействие информационно-моделирующих систем с ГИС обеспечивается

общей базой данных, которая также содержит информацию для создания геометрических форм при визуализации в ГИС-системах [1].

Базы гидрологических и геоданных должны, в общем случае, включать:

- все виды данных гидрометеорологических наблюдений,
- все необходимые виды данных специальных наблюдений за параметрами природной среды (характеристики почвы, показатели качества воды, данные о подземном и поверхностном стоке и т.д.),
- все виды геоданных по водосборным бассейнам.

С этой целью необходимо:

- определить состав, структуру и содержание базы данных с учетом информационных потребностей для решения задач гидрологического прогнозирования,
- разработать инструменты для выборки и обобщения необходимой информации,
- создать инструменты получения информации по запросам пользователей.

Таким образом, в рамках разработки и функционирования системы прогнозирования половодий и паводков в бассейне Верхней Оби необходимо решение двух задач:

1. Создание интегрированной базы данных, объединяющей разнородную картографическую информацию, данные наблюдений за природными процессами, расчетные данные и данные моделирования;
2. Развитие геоинформационной системы, обеспечивающей универсальный подход к отображению пространственно-распределенной информации [2].

Создание интегрированной базы данных для решения гидрологических задач

В гидрологических расчетах используются разномасштабные картографические данные в зависимости от решаемых задач (таблица 1) [3].

Таблица 1 – Масштабы топографических данных, используемых при решении гидрологических задач

Масштаб	Решаемые задачи
1:5000, 1:10000	оценка затопления территории паводками и при разрушении ГТС, расчет водосборного деления с $F < 10 \text{ км}^2$ для равнинных территорий, оценка русловых деформаций
1:25000	оценка затопления территории паводками и при разрушении ГТС, составление реестра водных объектов, расчет водосборного деления с $F < 10 \text{ км}^2$ для горных и $F = 10..50 \text{ км}^2$ для равнинных территорий, расчет параметров водосборов (для оценки максимального стока) площадью $F < 2-5 \text{ км}^2$, оценка антропогенного изменения территории, калибровка ДДЗ, GPS привязка результатов полевых исследований, оценка русловых деформаций и антропогенных изменений гидрографической сети
1:50000, 1:100000	первичная оценка затопления территории крупными паводками, составление реестра главных водных объектов, расчет водосборного деления с $F > 10 \text{ км}^2$ для горных и $F > 50 \text{ км}^2$ для равнинных территорий, расчет параметров водосборов площадью $F > 5 \text{ км}^2$, оценка антропогенных изменений гидрографической сети, GPS привязка результатов полевых исследований.
1:200000	расчет бассейново - административной структуры территории, расчет водохозяйственной структуры территории и водохозяйственных балансов, подбор бассейнов – аналогов для решения задач русловой трансформации, обзорные карты, поиск объектов на карте.
1:500000, 1:1000000	обзорные карты, поиск объектов на карте.

В соответствии с таблицей 1 для быстрого поиска объектов используются цифровые карты мелкого (1:500000, 1:1000000) или среднего масштаба (1:200000, 1:100000). Наличие такого покрытия позволяет провести практически все подготовительные работы, предшествующие прогнозу территории затопления.

Предлагаемая нами структура картографической базы данных выглядит следующим образом:

1. Мелкомасштабная топографическая основа (вектор), включающая гипсометрию и гидрографию (1:500000, 1:200000).

2. Набор геопривязанных растровых покрытий масштабов 1:100000, 1:50000, 1:25000 и крупнее на исследуемую территорию, покрывающий её, по возможности, полностью.
3. Векторные слои гидрографии, гипсометрии масштаба 1:25000 и крупнее на отдельные участки исследуемой территории.

Сложность и разнородность решаемых задач обуславливают нетривиальные подходы к проектированию структуры базы некартографических данных. Универсальная схема такой базы с единой расширяемой системой справочников позволяет собрать и объединить наиболее важные данные по предметной области исследования и использовать их для последующего анализа, расчетов, отображения результатов.

При разработке модели данных в качестве прототипа использовался единый международный формат данных CUAHSI [4]. Консорциум университетов CUAHSI (Consortium of Universities for the Advancement of Hydrologic Science, Inc.) сформирован в 2001 году для развития инфраструктуры и сервисов гидрологических исследований. Гидрологическая информационная система CUAHSI HIS представляет собой географически распределенную сеть источников данных, объединенных через web-ориентированную архитектуру. Проект CUAHSI HIS предназначен для предоставления интегрированной информации о водных ресурсах для анализа гидрологических процессов.

Стандартизованная схема хранения данных облегчает анализ информации из различных источников как для одного объекта исследования, так и при сопоставительном анализе различных гидрологических объектов.

В полном объеме система управления данными CUAHSI HIS ODM использована при построении информационной системы Приморского УГМС [5].

Данные наблюдений, необходимые для гидрологических расчетов, обладают следующими основными характеристиками (рис. 1):

- место, в котором производились наблюдения (пространство),
-

- дата и время, когда велись наблюдения (время),
- тип и значение наблюдаемой переменной (идентификатор и значение).



Рис. 1 – Схема описания данных наблюдений

Помимо этих основных характеристик существует много других отличительных признаков, сопровождающих данные наблюдений. Многие из этих дополнительных атрибутов уточняют основные характеристики. Например, место наблюдения, кроме указания географических широты и долготы, может определяться в местной системе координат, а также сопровождаться текстовым обозначением. Другие атрибуты могут обеспечить необходимые условия для правильной интерпретации данных, сохраняя информацию об условиях отбора, методиках их обработки, а также о владельцах и источниках данных.

В таблице 2 представлены общие атрибуты, связанные с точечными наблюдениями.

Таблица 2 – Атрибуты, характеризующие наблюдение

Атрибут	Определение
Значение	Значение наблюдаемого параметра
Точность	Количественная оценка точности измерений
Дата и время	Дата и время наблюдения
Название параметра	Название физической, химической или биологической величины, значение которой оценивается (например, сток, осадки, температура)
Местоположение	Расположение точки (объекта), в которой проводилось измерение (например, широта, долгота)
Единицы измерения	Единица измерения (например, м или м ³ /с) и ее тип (например, длина, объем, время)

Атрибут	Определение
Интервал	Временной интервал, за который выполнялось (усреднялось) наблюдение
Смещение	Расстояние от опорной точки до места, в котором наблюдение было сделано (например, 5 метров ниже поверхности воды)
Тип смещения/опорная точка	Точка отсчета, от которой вычисляется смещение в месте измерения (например, средний многолетний уровень воды)
Тип данных	Вид измеряемой величины (например, непрерывное, минимальное, максимальное, среднее или кумулятивное измерение)
Чувствительность	Индикатор чувствительности отбора данных (например, ниже предела чувствительности, или $<0,01$)
Комментарии	Комментарии, касающиеся качества данных и влияющие на их использование или интерпретацию
Метод анализа	Используемый метод анализа
Среда	Среда, в которой отбиралась проба (вода, воздух, почва и т.д.)
Категория значения	Характеристика представленного значения (непосредственные измерения, вычисленное значение, результат моделирования)
Организация	Организация, проводившая измерение

Концептуальная модель создаваемой БД (рис.2) позволяет оценить состав и количество таблиц БД, а также их взаимосвязи.



Рис.2 – Концептуальная модель базы данных

В терминах проектирования реляционных баз данных такой подход к структурированию данных называется схема "звезда" (star schema). Модель данных состоит из двух типов таблиц: одной таблицы фактов (fact table) — центр "звезды" — и нескольких таблиц измерений (dimension table) по числу измерений в модели данных — лучи "звезды" [6].

Основным элементом такой схемы является таблица фактов и множество таблиц измерений. Таблица фактов, как правило, содержит сведения об объектах или событиях, совокупность которых будет в дальнейшем анализироваться. Таблицы измерений содержат неизменяемые либо редко изменяемые данные. Таблицы измерений также содержат как минимум одно описательное поле (обычно наименование параметра) и, как правило, целочисленное ключевое поле для однозначной идентификации этого параметра. Если измерение, соответствующее таблице, содержит иерархию, то такая таблица также может содержать поля, указывающие на "родителя" данного параметра в этой иерархии. Каждая таблица измерений должна находиться в отношении "один-ко-многим" с таблицей фактов.

В терминах нашей базы данных в качестве "таблицы фактов" выступает таблица "Значения данных". Остальные таблицы, представленные на схеме рис. 2, играют роль "таблиц измерений" или справочников.

Наличие вспомогательных справочников позволяет хранить в БД данные разного качества ("сырые", прошедшие контроль качества, обработанные и т.д.), регулярные данные мониторинга и данные разовых наблюдений, данные разных периодов наблюдения (от мгновенных данных до среднесезонных), данные, относящиеся к любым компонентам природной среды.

Реляционная база данных со строками (записями), характеризующими наблюдение в точке, обеспечивает максимальную гибкость при анализе данных за счет возможности их выбора и группировки по многоаспектным критериям.

Рис. 3 иллюстрирует возможности использования разработанной модели данных для создания базы данных по Новосибирскому водохранилищу.

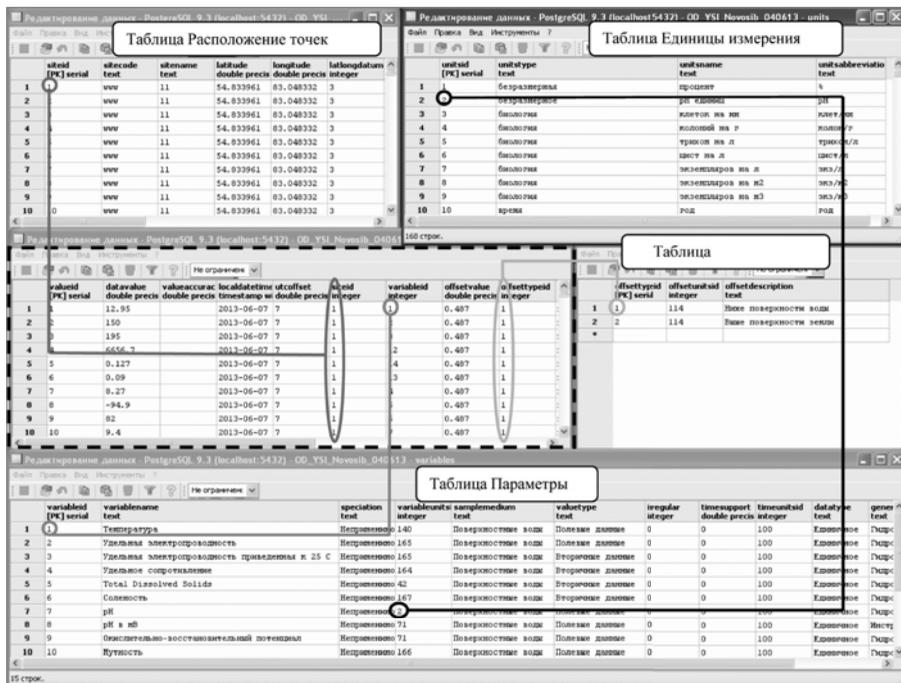


Рис.3 – Фрагмент базы данных измерений параметров качества воды на Новосибирском водохранилище

Модель данных наблюдений является независимой от географического представления точек наблюдений. Их географическое расположение хранится в полях Latitude, Longitude и Elevation таблицы Расположение Точек. Координаты задаются в географической или проекционной системе координат, либо другим способом, специально определенным для решаемой задачи. Каждая точка наблюдения имеет уникальный идентификатор, который может быть логически связан с одним или многими объектами в модели данных ГИС. В качестве примера такой взаимосвязи на рис. 4 изображено отношение один-к-одному между точками наблюдений из модели данных наблюдений и точками метеопостов на векторном слое. Подобное отношение между точками наблюдений и объектами ГИС имеет общий характер и не несет никакой информации о структуре и значении данных, хранящихся в ГИС. Такая

архитектура позволяет модели данных наблюдений взаимодействовать с любой географической моделью данных, содержащей сведения о расположении точек наблюдений.

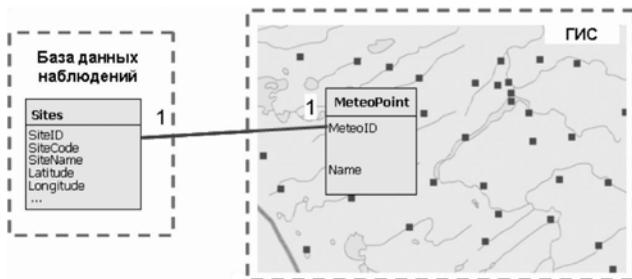


Рис. 4 – Схема связи базы данных наблюдений и геопространственных данных

Развитие геоинформационной системы для решения гидрологических задач

В последние годы наблюдается тенденция использования свободно распространяемых базовых программных продуктов с открытым кодом, существенно снижающих стоимость разработки собственных программных средств и позволяющих отказаться от функционально избыточных коммерческих систем [7].

В качестве физической модели данных для ИМС, разрабатываемых в ИВЭП СО РАН, используется объектно-реляционная СУБД PostgreSQL [8]. PostgreSQL – свободно распространяемая СУБД с открытым кодом, поддерживающая большую часть стандарта SQL и предлагающая множество дополнительных сервисов. Так, приложение PostGIS [9] добавляет PostgreSQL поддержку пространственных объектов. Фактически, PostGIS представляет собой пространственное расширение PostgreSQL-сервера, что позволяет использовать его как пространственную базу данных для ГИС. Среди некоммерческих продуктов, предоставляющих возможность хранения пространственной информации, связка PostgreSQL/PostGIS обладает наиболее широкой функциональностью.

Для визуализации предобработанной пространственной информации разработана структура проблемно-ориентированной ГИС для системы оперативных прогнозов половодий и паводков в бассейне Верхней Оби с использованием кроссплатформенного картографического сервера Geoserver с открытым кодом [10].

Типичное ГИС-приложение включает в себя три функциональных составляющих: презентационный сервис (клиентский интерфейс), сервис прикладной логики (серверное приложение) и сервис данных [11].

Презентационный сервис отвечает за взаимодействие приложения с пользователем. Сервис прикладной логики выполняет основные функции приложения. Сервис данных, реализованный через систему управления базами данных, обеспечивает взаимодействие приложения с данными.

Архитектура распределенного ГИС-приложения выглядит следующим образом: клиент – Web-сервер – сервер приложений ГИС – сервер пространственных данных. Сервер приложений ГИС реализует базовый набор функций ГИС, которые объединяются в программные компоненты, предоставляющие для использования свои методы и свойства. Этот подход позволяет использовать на клиентских компьютерах достаточно простые приложения, в том числе и стандартные Интернет-браузеры, сосредоточив основную массу вычислений на сервере. За счет того, что вычисления выполняются на сервере, значительно уменьшается объем передаваемых данных, так как пользователю передается только конечный результат обработки его запроса, а не все данные, необходимые для его исполнения.

Архитектура ГИС на основе кроссплатформенного картографического сервера Geoserver представлена на рис. 5.

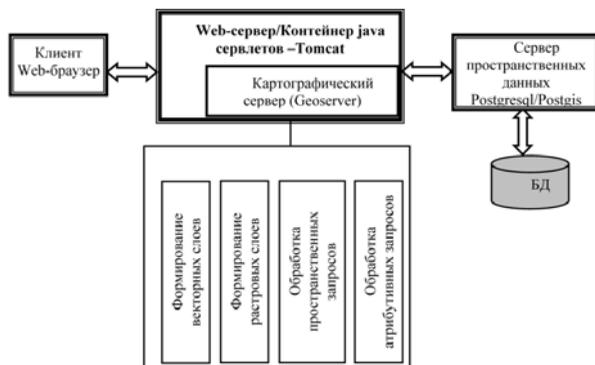


Рис. 5 – Архитектура ГИС на основе кроссплатформенного картографического сервера Geoserver

При работе с пространственными данными Geoserver оперирует четырьмя основными абстракциями: "Источник данных", "Слой", "Стиль слоя" и "Рабочее пространство".

Управление стилем векторного слоя осуществляется путем передачи серверу файла в формате SLD (Style Layer Descriptor). В Geoserver логической единицей, соответствующей отдельному ГИС-проекту, является "Рабочее пространство" (workspace). Оно содержит источники данных, набор слоев и набор стилей – XML файлов, описывающих визуальное представление и символику слоя.

Абстракция Geoserver "Слой" объединяет в себе непосредственно географические данные, один или более присоединенных к слою стилей и, опционально, ссылку на метаданные. Стиль слоя в Geoserver создается на XML-подобном языке разметки «Style Layer Descriptor» (SLD). Стиль задает цвета геометрических объектов, тип и толщину линий, символику для точечных слоев, текстовые подписи. В стандарт SLD включена возможность представлять тот или иной объект в зависимости от приданной ему атрибутивной информации и текущего для пользователя масштаба карты, что позволяет выполнять генерализацию и решать другие геоинформационные задачи. Однако непосредственно описание стиля слоя на языке SLD является весьма

нетривиальной задачей, что затрудняет возможность формирования и настройки ГИС-проектов клиентами – экспертами в конкретной предметной области. Для визуального определения стиля слоя нами разработан генератор SLD-файлов (SldGenerator), предоставляющий пользователю возможность стилизации и публикации пространственных данных с использованием простого и интуитивно понятного интерфейса.

SldGenerator создан на базе фреймворка Eclipse RCP [12], обеспечивающего возможность быстрой разработки приложений с графическим интерфейсом. В качестве инструмента обработки и визуализации пространственных данных использована библиотека GeoTools, включающая набор средств для манипулирования картографическими данными и их отображением [13]. На рис. 6 представлена архитектура разработанного приложения, на рис. 7 – схема задания стиля в спецификации SLD.

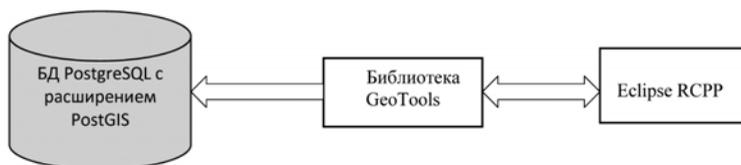


Рис. 6 – Архитектура приложения SldGenerator SLD

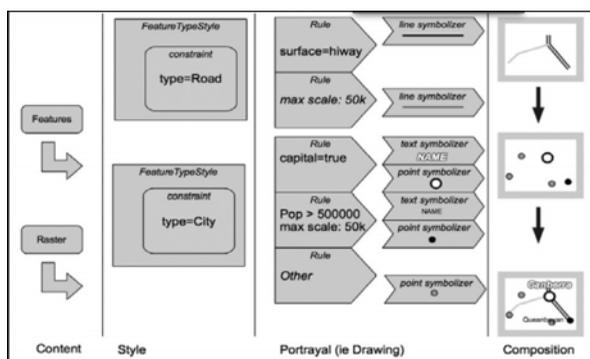


Рис. 7 – Схема задания стиля в спецификации SLD

Формирование стиля согласно схеме на рис. 7 выполняется в следующей последовательности:

- задается тип (content) слоя - векторные объекты или растр;
- в зависимости от типа примитива и значений некоторого атрибута пространственных данных выполняется разбиение объектов на группу категорий;
- к объектам каждой категории применяется ограничивающее правило (например, максимальный и минимальный масштабы видимости);
- для полученной в результате выборки определяется стиль отображения. Стилем можно задать толщину линии, ее цвет, прозрачность, цвет заливки (при использовании полигонов), прозрачность заливки, также для точечных примитивов можно указать символ. Для всех типов пространственных объектов можно указать атрибут, который будет отображаться в виде надписи.

Наличие функций фильтрации и поиска объектов по пространственным отношениям между ними фактически является стандартом для настольных ГИС как проприетарных, так и открытых [14]. Однако в Web-ГИС стандартная возможность поиска и фильтрации по пространственным отношениям ограничена, как правило, объектами одного слоя. Помимо этого, не хватает возможности временного хранения результатов поисковых запросов в отдельных слоях.

Нами разработаны функции пространственного поиска на языке plpgsql для базы данных под управлением PostgreSQL. GeoServer использует эти функции в параметрических SQL-запросах, заменяя параметры на значения, предоставленные клиентом.

Создание временных слоев, хранящих результаты поиска, требует реализации протокола с сопровождением состояния. Включение в WEB-ГИС возможностей анализа пространственных данных требует выбора протокола взаимодействия между клиентом и сервером. В ходе пользовательской сессии

клиент может сохранять промежуточные результаты. Протоколы WMS и WFS нельзя использовать для этой цели, прежде всего потому, что они являются протоколами без сопровождения состояния и по самому своему назначению ограничены в форматах ввода-вывода. Однако спецификации OGC (Open Spatial Consortium) содержат протокол WPS (Web Processing Service), лишенный ограничений, присущих протоколам WMS и WFS [15, 16].

WPS определяет механизм, посредством которого клиент посылает на сервер запрос на обработку пространственных данных (например сложение двух растров или нахождение выпуклой оболочки набора точек) и получает от сервера результат обработки. Конкретный экземпляр сервера WPS предоставляет собственный расширяемый набор задач обработки данных, называемых WPS Processes, возвращая клиенту список доступных процессов и их сигнатуры по соответствующим запросам.

Выводы

- Разработана структура проблемно-ориентированной ГИС для системы прогнозирования половодий и паводков в бассейне Верхней Оби.
- Определена структура базы данных, содержащей оперативные и архивные данные, характеризующие гидрологическую обстановку; разработана система справочников, позволяющая хранить в БД данные разного качества ("сырые", прошедшие контроль качества, обработанные и т.д.), регулярные данные мониторинга и данные разовых наблюдений, данные разных периодов наблюдения (от мгновенных данных до среднесезонных), данные, относящиеся к любым характеристикам изучаемых процессов.
- Созданы инструменты для интегрированной обработки разнородных картографических данных, данных наблюдений, расчетов и моделирования, которые предоставляют возможности решения практически важных задач по оценке последствий опасных гидрологических явлений

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 42 «Природные и техногенные риски критически важных гидротехнических объектов, водохранилищ и водных систем Сибири».

Список литературы

1. *Зиновьев А.Т., Кошелев К.Б., Марусин К.В., Шибких А.А.* Информационно-моделирующая система на основе компьютерной модели руслового потока: структура, определяющие уравнения, результаты расчетов // Геоинформационные технологии и математические модели для мониторинга и управления экологическими и социально-экономическими системами / под ред. И.Н. Ротановой: монография. ИВЭП СО РАН. Барнаул: Пять плюс, 2011. С.~55-62.
2. *Васильев О.Ф., Зиновьев А.Т., Кошелев К.Б. Кудишин А.В., Ловцкая О.В., Овчинникова Т.Э., Семчуков А.Н.* Разработка информационно-моделирующих систем для оперативного прогнозирования опасных гидрологических ситуаций для крупных речных систем Сибири (на примере Верхней Оби) // Водная стихия: опасности, возможности прогнозирования, управления и предотвращения угроз: Мат. всерос. науч. конф., г. Краснодар, 7-12 октября 2013 г. – Новочеркасск: ЛИК, 2013. С. 41-47.
3. *Ловцкая О.В., Яковченко С.Г., Жерелина И.В., Жоров В.А., Постнова И.С.* Геоинформационное обеспечение водохозяйственных и гидрологических расчетов. // Сибирский экологический журнал. – 2005. – Т. 6. – С. 1013–1023.
4. *David G. Tarboton, Jeffery S. Horsburgh, David R. Maidment.* CUAHSI Community Observations Data Model (ODM). Version 1.1 Design Specifications, May 2008 [электронный ресурс] – Режим доступа: <http://his.cuahsi.org/documents/odm1.1designspecifications.pdf>
5. *А. Н. Бугаец, Б. И. Гарцман, С. А. Краснопеев, Н. Д. Бугаец* Опыт обработки информации модернизированной гидрологической сети с использованием системы управления данными CUAHSI HIS ODM // Метеорология и гидрология. 2013 - 5. С. 91-101.
6. *Барсегян А. А., Курьянов М. С, Степаненко В. В., Холод И. И.* Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining. — СПб.: БХВ-Петербург, 2004. - 336 с.
7. *Markus Neteler, Helena Mitasova* Open Source GIS: A Grass GIS Approach. — Springer, New York , 2008. - 420 с.
8. *В.Вислобоков* Краткий обзор возможностей PostgreSQL [электронный ресурс] – Режим доступа: <http://postgresql.ru.net/>
9. What is PostGIS [электронный ресурс] – Режим доступа: <http://postgis.refrains.net/>
10. What is GeoServer [электронный ресурс] – Режим доступа: <http://geoserver.org/display/GEOS/What+is+GeoServer>

11. *А.М. Чандра, С.К. Гош.* Дистанционное зондирование и географические информационные системы. Москва: Техносфера, 2008. – 312 с.
12. *Джеф Гюнтер.* Eclipse's Rich Client Platform, Часть 1: Начало [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <http://www.ibm.com/developerworks/ru/edu/os-rcp1/section3.html>
13. Architecture – GeoTools 8.0-RC1 User Guide [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <http://docs.geotools.org/latest/userguide/welcome/architecture.html>
14. *E.Clementini, J.Sharma, and M.Egenhofer.* «Modeling Topological Spatial Relations: Strategies for Query Processing» // Computers and Graphics. 18 (6): 815-822, 1994.
15. OGC (2005). Web Processing Service. OGC Discussion Paper, Document Reference Number 05-007r4, Version 0.4.0. [электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.opengeospatial.org/standards/requests/28>
16. *Christopher Michael, Daniel P. Ames* Evaluation of the OGC Web Processing Service for Use in a Client-Side GIS // The Journal of the Open Source Geospatial Foundation Volume 1 / May 2007 [электронный ресурс] – Режим доступа: <http://osgeo.org/journal>

Раздел 2

НОВЫЕ МОДЕЛИ, МЕТОДЫ, АЛГОРИТМЫ, ТЕХНОЛОГИИ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УСВОЕНИЯ ДАННЫХ ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ, ОСНОВАННЫЕ НА АНСАМБЛЕВОМ ФИЛЬТРЕ КАЛМАНА

Климова Е.Г., Платов Г.А., Киранова Н.В.

*ИБТ СО РАН, г. Новосибирск, klimova@ict.nsc.ru
ИБМуМГ СО РАН, Новосибирск, klimova@ict.nsc.ru*

Введение

Современное исследование окружающей среды включает в себя моделирование процессов с привлечением математических моделей, описывающих процессы в атмосфере и океане, а также моделей распространения в атмосфере пассивных газовых составляющих, химически активных веществ и аэрозолей. Для проведения математического моделирования состояния окружающей среды необходимо знание измеренных величин не только в точках наблюдений, но и в узлах некоторой регулярной сети. Оценка состояния окружающей среды по данным наблюдений является одной из наиболее актуальных задач в настоящее время. Такая оценка производится с привлечением математических моделей на основе систем усвоения данных. Один из самых популярных подходов к решению задачи усвоения данных наблюдений основан на алгоритме фильтра Калмана.

Лидирующим направлением в работах, посвященных применению фильтра Калмана при усвоении данных, является ансамблевый подход. В ансамблевом подходе матрицы ковариаций ошибок оценивания вычисляются для нелинейных прогностических моделей. Ансамблевый фильтр Калмана представляет собой вариант обобщенного фильтра Калмана, в котором ковариации ошибок прогноза оцениваются с помощью ансамбля прогнозов. В

статье излагаются принятые в настоящее время подходы к решению проблемы усвоения данных об окружающей среде. Основной упор делается на подход, связанный с теорией оптимальной фильтрации Калмана. Рассматриваются примеры использования варианта ансамблевого фильтра Калмана для задачи распространения пассивной примеси в атмосфере, а также при моделировании процессов в океане. Наряду с приближенным описанием ковариаций ошибок оценивания с помощью ансамбля прогнозов, в отечественной литературе предлагается использовать субоптимальные алгоритмы, в которых теоретико-вероятностное осреднение заменяется на осреднение по времени. В приводимых в данной статье примерах рассматривается алгоритм, основанный на этом подходе, для задачи усвоения данных о пассивных газовых составляющих в атмосфере и задачи моделирования процессов в океане.

Ансамблевый фильтр Калмана

Один из самых популярных подходов к решению задачи усвоения данных наблюдений [22] основан на теории оптимальной фильтрации Калмана [21]. Лидирующим направлением в работах, посвященных применению фильтра Калмана при усвоении данных, является ансамблевый подход, впервые предложенный в работе [13] и получивший дальнейшее развитие в [14,18,20]. Ансамблевый подход позволяет вычислять матрицы ковариаций ошибок оценивания для нелинейных прогностических моделей. В этом случае рассматривается вариант обобщенного фильтра Калмана, в котором ковариации ошибок прогноза оцениваются с помощью ансамбля прогнозов.

В ансамблевом фильтре Калмана ковариации ошибок прогноза вычисляются приближенно по формуле

$$P^f \cong \frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K (x_k^f - \bar{x}^f)(x_k^f - \bar{x}^f)^T,$$

где $\{x_k^f, k=1, \dots, K\}$ - ансамбль прогнозов по K начальным полям, \bar{x}^f - среднее по ансамблю значение.

При реализации ансамблевого алгоритма возникает множество проблем, связанных с ограниченным числом элементов ансамбля, а также с необходимостью получения ансамбля с матрицей ковариаций, соответствующей ковариациям ошибок анализа. Для этого необходимо рассматривать алгоритмы ансамблевого фильтра Калмана с генерированием случайных ошибок наблюдений. Варианты ансамблевого фильтра Калмана с генерированием случайных ошибок наблюдений рассматривались в работах [13,14,18]. Однако в работе [25] было отмечено, что при таком подходе велико влияние ошибки, связанной с ограниченным количеством элементов ансамбля. Чтобы этого избежать, авторы предложили применять метод квадратного корня (Ensemble Square Root Kalman Filter), позволяющий реализовать ансамблевый фильтр Калмана без использования возмущенных наблюдений. Такой подход к определению ансамбля ошибок анализа принято называть «детерминированным». Таким образом, в ансамблевом фильтре Калмана можно выделить два подхода – «стохастический фильтр» и «детерминированный фильтр».

Одна из проблем ансамблевого фильтра Калмана связана со слишком малым количеством элементов ансамбля по сравнению с размерностью оцениваемого вектора. Как отмечается в [20], если число собственных векторов оператора динамической системы больше количества элементов ансамбля, то коррекция ошибок прогноза не будет оптимальной. Второй проблемой, связанной с малым числом элементов ансамбля, является появление “ложных ковариаций” на больших расстояниях [20]. Для того чтобы избежать проблем, связанных с ограниченным количеством членов ансамбля, ансамблевый фильтр Калмана может быть применен локально. Вариант локализации, состоящий в ограничении радиуса корреляции, предложен в [18]. Эти идеи получили дальнейшее развитие в работах [14,20].

Также как классический обобщенный фильтр Калмана, ансамблевый фильтр Калмана технически сложно реализуем из-за необходимости

осуществлять операции с матрицами высокого порядка. В работах [5,24] был предложен экономичный алгоритм усвоения данных наблюдений для нелинейных моделей, основанный на применении ансамбля прогнозов для оценки ковариаций ошибок оценивания (ансамблевый π -алгоритм). Основная идея заимствована из работ по теории автоматического управления [7]. Ансамблевый π -алгоритм использует идею трансформации ковариационных матриц с целью уменьшения размерности массивов при реализации стохастического фильтра Калмана.

По количеству машинных операций ансамблевый π -алгоритм близок к Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF) [20], при этом в ансамблевом π -алгоритме не требуется специально вычислять ансамбль, соответствующий ковариациям ошибок анализа, это происходит автоматически. Как и в LETKF, все операции в ансамблевом π -алгоритме проводятся с матрицами размерности порядка размера ансамбля.

Особо выделим вопросы, связанные с усвоением спутниковой информации.

Спутниковые данные имеют ряд отличительных особенностей по сравнению с наземными и аэрологическими наблюдениями. К этим особенностям относятся следующие:

- спутник измеряет информацию об уходящем излучении, поэтому необходимо осуществлять преобразование переменных модели в наблюдаемые переменные с помощью уравнения переноса излучения. Таким образом, оператор наблюдений нелинейный;
- данные поступают непрерывно по времени;
- ошибки наблюдений коррелируют, матрица ошибок наблюдений большой размерности и недиагональная;
- наличие систематической ошибки в наблюдениях (bias). Это усложняет использование формул вышеприведенных алгоритмов.

Спутниковые данные могут использоваться двумя путями: напрямую, в виде данных об уходящем излучении, либо требуется предварительно восстанавливать по спутниковым данным значения метеорологических величин, а затем использовать их в процедуре усвоения данных. Первый вариант является более предпочтительным по целому ряду причин:

- при преобразовании данных о радиации используется информация о прогнозе, поэтому ошибки восстановленных данных и прогноза будут коррелировать;
- проблема оценки матрицы ковариаций ошибок наблюдений;
- матрица ковариаций ошибок наблюдений становится существенно недиагональной.

Усвоение спутниковых данных осложняется тем, что для применения традиционных методов необходимо выполнение следующих условий:

- а) ошибки наблюдений «несмещенные»;
- б) случайные поля ошибок наблюдений нормально распределены.

Эти условия для спутниковых данных не выполняются. Для реализации алгоритма усвоения необходимо также осуществление контроля качества и задание ковариационной матрицы ошибок наблюдений.

Спутниковые данные - это огромный массив информации. Однако, как отмечается в ряде работ, большое количество наблюдений не всегда дает наилучший результат, поскольку эти данные представляют собой массив коррелирующих между собой случайных величин и потому они мало информативны.

Система усвоения данных о пассивных газовых составляющих в атмосфере

Для восстановления пространственно-временного распределения загрязняющих веществ в атмосфере в настоящее время используются системы усвоения данных наблюдений [10,17]. Информация о содержании всех этих веществ измеряется с помощью как наземных измерительных приборов, так и

спутников. Важной задачей в мониторинге состояния окружающей среды является оценка потоков газовых составляющих с поверхности Земли на основе полей, полученных с помощью системы усвоения данных [12,15].

В ИВТ СО РАН разрабатывается система усвоения данных о пассивных газовых составляющих в атмосфере для Сибирского региона [3-4]. Система включает в себя полулагранжеву модель переноса и диффузии пассивной примеси [3, 4, 11], метеорологические поля рассчитываются с помощью мезомасштабной модели WRF (Weather Research and Forecast; <http://www.mmm.ucar.edu/>). Разрабатываемая система усвоения основана на динамико-стохастическом подходе с использованием субоптимального алгоритма, основанного на фильтре Калмана. Кроме того, как уже отмечалось выше, спутниковые данные обладают рядом особенностей. Поэтому разрабатываемая система усвоения данных должна быть адаптирована, в частности, к пространственно-временному распределению спутниковых данных.

При реализации алгоритма фильтра Калмана возникает ряд сложностей. Одна из них заключается в большом порядке матриц ковариаций ошибок прогноза. Возможным решением этой вычислительной проблемы является применение субоптимального алгоритма, основыванного на предположении об эргодичности по времени полей ошибок прогноза.

В случае, когда случайные поля обладают свойством эргодичности по времени, их ковариации могут быть оценены путем замены осреднения по выборке на осреднение по времени [7, 9]. Пусть в начальный момент времени задано значение случайного поля ошибок:

$$x_0^f = x_0^t + \Delta x_0.$$

Будем считать, что изменение по времени ошибки описывается с помощью линеаризованного уравнения. Обозначим через Δx_t прогноз ошибок на момент времени t_t . Тогда ковариационную матрицу ошибок прогноза в

момент времени $t_N = N \times \Delta t$ можно оценить по формуле «скользящего среднего» [7]:

$$P_N^f = \overline{\Delta x_N (\Delta x_N)^T} \cong \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \Delta x_i (\Delta x_i)^T.$$

В работе рассматривался вариант субоптимального алгоритма усвоения данных в применении к задаче оценки полей концентрации и эмиссии углекислого газа.

С разработанной системой усвоения были проведены численные эксперименты с модельными данными. В экспериментах с модельными данными задается «истинное» состояние оцениваемых полей, вычисляемое по той же модели, что и прогноз, но по начальным данным со случайной ошибкой. Данные наблюдений моделируются с помощью наложения случайной ошибки на «истинное» значение.

Проведены численные эксперименты по совместной оценке концентрации и эмиссии углекислого газа для региона (48.9° с.ш., 85.9° в.д.; 75.3° с.ш., 130° в.д.). Расчеты осуществлялись на сетке 100×174 узла по горизонтали (направления x и y соответственно в декартовой системе координат), 15 уровней по вертикали. Шаг сетки по горизонтали при этом составил 18 км, шаг по времени 15 мин. Начальное распределение CO₂ было взято с сайта Европейской программы GMES (<http://gems.ecmwf.int/data/>) для 00 часов 01 июня 2006 года. Для проведения численных экспериментов производилась интерполяция данных на расчетную сетку. Считалось, что каждые 6 часов имеются данные наблюдений (в проведенных численных экспериментах они моделировались). Получены поля концентрации и величина среднеквадратической ошибки оценки концентрации на 24 часа. Также проведен ряд предварительных численных экспериментов по оценке эмиссии углекислого газа. Для оценки эмиссии был использован аналогичный субоптимальный алгоритм, основанный на фильтре Калмана, при этом рассматривался «расширенный» вектор оцениваемых переменных,

включающий концентрации и эмиссию пассивной примеси. При этом модель оценки эмиссии была взята из работы [17].

На рис.1–3 приведены результаты проведенных численных экспериментов. На рис. 1 приведена оценка концентрации углекислого газа на сутки для исследуемого региона (48.9° с.ш., 85.9° в.д.; 75.3° с.ш., 130° в.д.). Здесь на оси абсцисс отложены долготы региона, на оси ординат – широты. На рис.2 пунктирной линией отображен график изменения среднеквадратической ошибки оценки концентрации без применения процедуры усвоения данных, сплошной линией – график данной величины, полученной с применением процедуры усвоения данных наблюдений. На рис. 3 приведен график изменения среднеквадратической ошибки оценки поправочного множителя в модели оценки эмиссии. Рост среднеквадратической ошибки в данной оценке обусловлен свойством задаваемой модели изменения эмиссии.

По результатам проведенных численных экспериментов можно сделать вывод о возможности осуществления оценки параметров модели, например таких, как эмиссия, в процедуре усвоения данных.

С разрабатываемой системой усвоения были также проведены численные эксперименты с модельными данными с учетом реального пространственно-временного распределения спутниковой информации. Полученные предварительные результаты численных экспериментов с модельными данными позволили сделать вывод о возможности качественной оценки распределения парниковых газов в заданном регионе.

Система усвоения данных для моделирования процессов в океане

До недавнего времени наблюдения за состоянием Мирового океана носили эпизодический характер. В настоящее время существует большое количество регулярных спутниковых наблюдений (температура поверхности океана) а также данные, получаемые в оперативном режиме системой автономных буев Арго. Наличие большого количества регулярно поступающей информации позволяет рассматривать задачу оценки состояния океана по данным

наблюдений и математической модели, описывающей динамику океана (задачу усвоения данных).

Ансамблевый фильтр Калмана является одним из наиболее популярных подходов к задаче усвоения данных в океане [26]. Разрабатываются также гибридные версии, объединяющие практику моделирования ансамблей с методом многоэлементной оптимальной интерполяции. В России созданием систем усвоения данных в океане также занимается ряд научных коллективов. Сотрудниками Гидрометцентра России разработана система усвоения данных в океане, в которой используется вариационный подход (3DVAR) [8]. Система усвоения данных в океане, основанная на вариационном подходе (4DVAR), разрабатывается также коллективом авторов из ИВМ РАН [1].

Наряду с приближенным описанием ковариаций ошибок оценивания с помощью ансамбля прогнозов, в отечественной литературе [7] предлагалось использовать субоптимальные алгоритмы, в которых теоретико-вероятностное осреднение заменяется на осреднение по времени. В данной статье предлагается алгоритм, основанный на этом подходе, для задачи усвоения данных океанических наблюдений. Так же, как в экспериментах, описываемых в п.3, ковариационная матрица ошибок прогноза оценивается по формуле «скользящего среднего».

Поскольку вычисление ковариаций по этой формуле является приближенной оценкой, возникает проблема, свойственная всем ансамблевым алгоритмам – неоправданно большие значения ковариаций на больших расстояниях. По этой причине, как это принято в ансамблевом фильтре Калмана, нами применялась так называемая процедура локализации, состоящая в поэлементном умножении матрицы ковариаций на функцию, убывающую с расстоянием [18].

Оценка свойств разрабатываемого алгоритма проводилась с помощью численных экспериментов с модельными данными, кроме того, проводились численные эксперименты по усвоению данных с «реальным» пространственно-

временным распределением данных, при этом за основу брались данные ААНИИ Росгидромета и спутниковые данные системы Pathfinder.

Для решения задачи усвоения данных прямых и спутниковых измерений на этапе прогноза использовалась система вложенных моделей, описанная в работе [6]. Система включает в себя совместную крупномасштабную модель Северного Ледовитого океана и северной Атлантики [2, 16] и ледово-снежного покрова [19] и региональную модель, адаптированную к бассейну моря Лаптевых с концентрированным горизонтальным разрешением в окрестностях дельты реки Лена. Область моделирования и топография дна представлены на рис. 4. В качестве атмосферного форсинга используются данные реанализа NCEP о состоянии нижней атмосферы [23]. Распределение спутниковых данных по региону в период международного полярного года – 2008 за сентябрь представлено на рис. 5. Сентябрь выбран в связи с тем, что в этот месяц имеется наибольшее количество инструментальных данных, необходимых для калибровки спутниковых измерений. Районы А и Б, выделенные на рис. 4, имеют наибольшее покрытие спутниковой информацией.

Как это принято в численных экспериментах с модельными данными, "истинное" значение моделировалось с помощью расчета по той же модели в отсутствие возмущения внешних параметров. Результаты этого расчета были искусственно локализованы с помощью процедуры интерполяции в точки наблюдений, имеющие реальное пространственно-временное распределение.

В качестве возмущающего внешнего параметра использовался нулевой расход реки Лена. В этом случае модель систематически завышает соленость вод, расположенных вблизи дельты реки. Рис. 6а) показывает, что в районе А в отсутствие усвоения ошибка в определении солености на поверхности со временем вырастает до 3 промилле, в то время как с учетом данных ошибка остается в пределах 1-1.5 промилле. Район А расположен по направлению распространения речных вод, поэтому в случае их отсутствия ошибка возрастает. Район Б, наоборот, расположен вдалеке от дельты реки и поэтому

ошибка в определении солености незначительна (рис 6б)). Использование же усвоения приводит к возмущениям поля солености и формирует ошибку того же, что в районе А, порядка – около 1 промилле.

Заключение

В статье рассматривается проблема оценки состояния окружающей среды а также моделирования различных процессов в атмосфере и океане с помощью системы усвоения данных. Рассматривается один из наиболее популярных подходов к задаче усвоения данных – ансамблевый фильтр Калмана. Приводятся два примера: моделирование распространения загрязняющих веществ в атмосфере и моделирования процессов в океане с применением усвоения данных наблюдений.

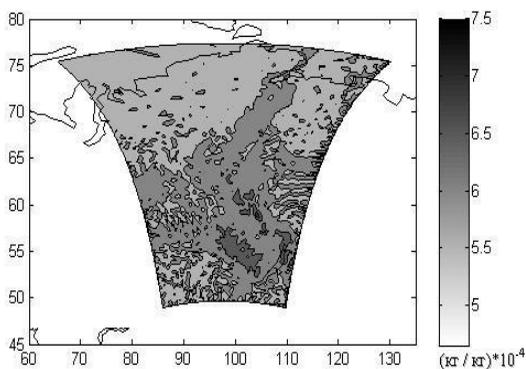


Рис. 1. – Оценка концентрации углекислого газа ($(\text{кг} / \text{кг}) * 10^{-4}$) на 24 часа, полученная с применением процедуры усвоения данных наблюдений.

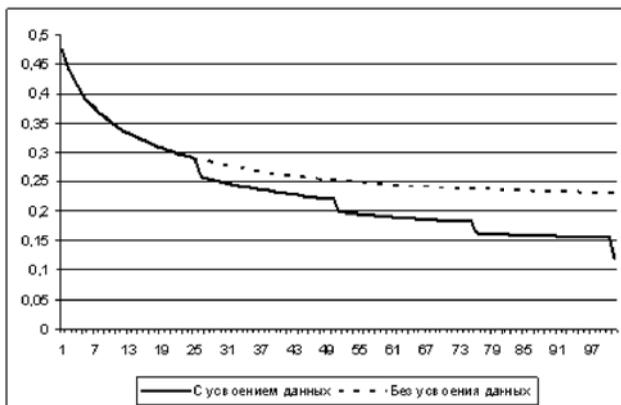


Рис. 2. – Среднеквадратическая ошибка оценки концентрации $((\text{кг}/\text{кг}) \cdot 10^{-4})$. На оси абсцисс отложен номер шага по времени.

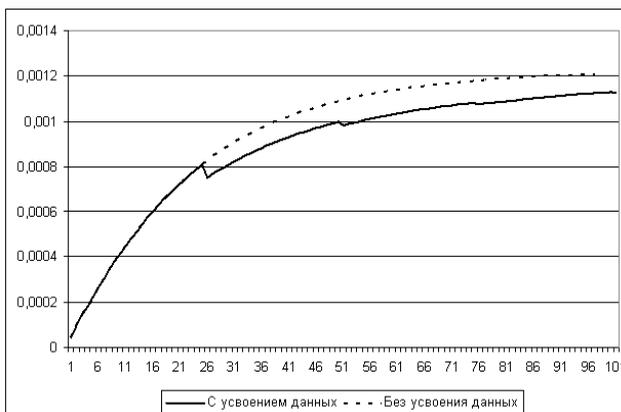


Рис. 3. – Среднеквадратическая ошибка оценки поправочного множителя в модели эмиссии. На оси абсцисс отложен номер шага по времени.

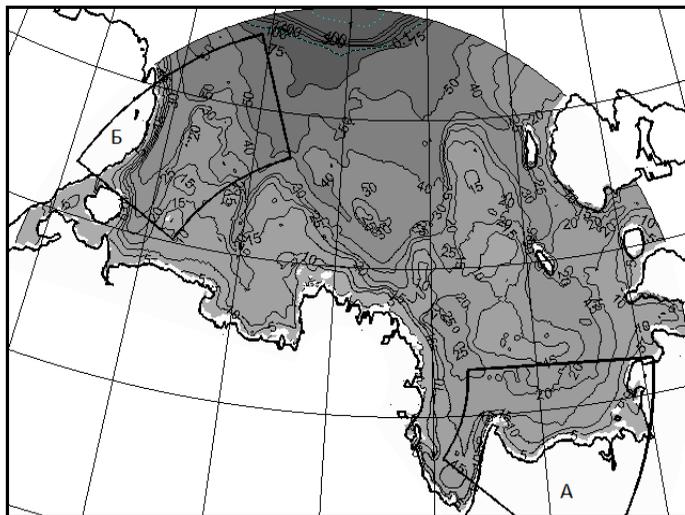


Рис. 4. – Область моделирования: море Лаптевых. Изолинии соответствуют глубине бассейна в метрах. Выделенные области А и Б соответствуют районам с наибольшим покрытием спутниковыми данными в сентябре 2008 г.

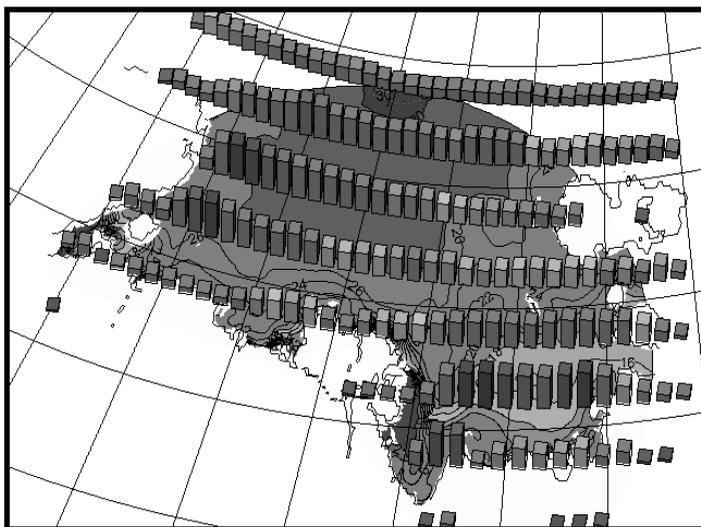
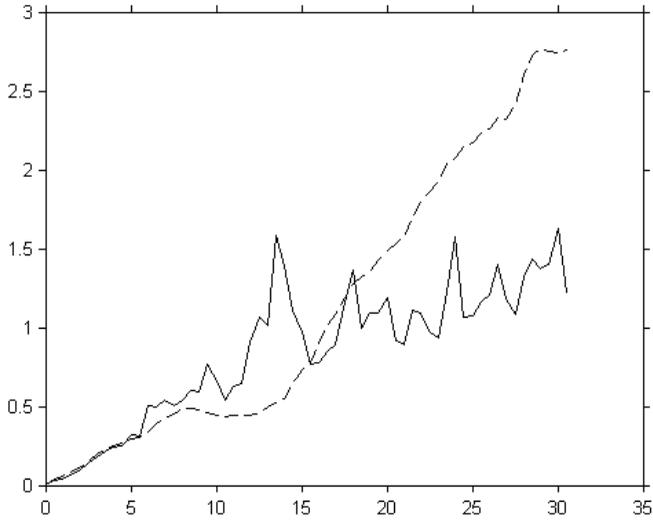
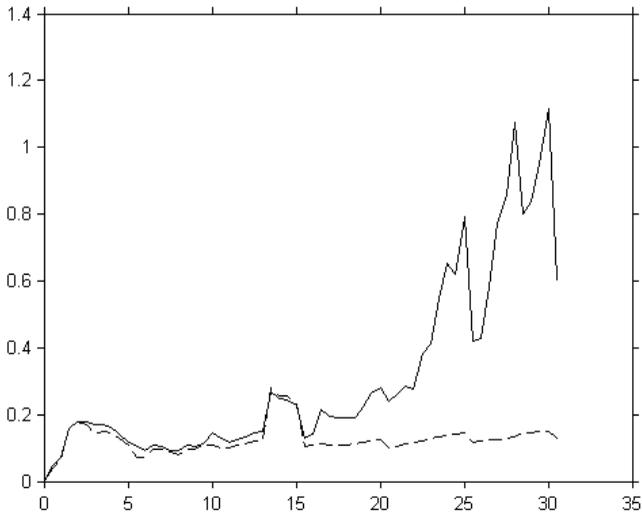


Рис. 5. – Гистограмма количества спутниковых данных по регионам. Наиболее освещены районы А и Б, выделенные на рис. 1. Изолинии соответствуют полу солености на поверхности, полученному по результатам моделирования для 30 сентября 2008 г.



а)



б)

Рис. 6. – Временной ход ошибки прогноза по областям: а) А и б) Б для солёности поверхности по результатам моделирования с 1 по 31 сентября 2008 г. Пунктирная линия соответствует эксперименту без усвоения, сплошная с усвоением данных наблюдений

Работа поддержана Проектом № 109 программы междисциплинарных интеграционных исследований СО РАН на 2012 - 2014 гг.

Список литературы

1. Агошков В.И., Ипатов В.М., Залесный В.Б., Пармузин Е.И., Шутяев В.П. Задачи вариационной ассимиляции данных наблюдений для моделей общей циркуляции океана и методы их решения // Известия РАН. ФАО. 2010. т.46. №6. с.734-770.
2. Голубева Е. Н., Платов Г. А. Исследование изменчивости системы океан-лед Северного Ледовитого океана // География и природные ресурсы. 2004. №3. с. 283 – 287.
3. Климова Е.Г., Киранова Н.В. Численные эксперименты по оценке эмиссии метана на основе системы усвоения данных о пассивной примеси в атмосфере Северного полушария // Оптика атмосферы и океана. 2006. №11. С. 961-964.
4. Киранова Н.В., Климова Е.Г. Численные эксперименты по оценке систематической ошибки модели в задаче усвоения данных о концентрации пассивной примеси // Вычислительные технологии. 2006. №5. С. 32-40.
5. Климова Е.Г. Метод усвоения данных наблюдений, основанный на ансамблевом π - алгоритме // Метеорология и гидрология, 2008. № 9. С.45-53.
6. Платов Г. А. Численное моделирование формирования глубинных вод Северного Ледовитого океана. Часть II: Результаты региональных и глобальных расчетов // Известия РАН. ФАО. 2011. т.47. №3. с.409 – 425.
7. Справочник по теории автоматического управления под ред. А.А. Красовского. Москва. «Наука». 1987. 711 с.
8. Реснянский Ю.Д., Зеленко А.А. Развитие моделей и методов анализа данных наблюдений для мониторинга и прогнозирования крупномасштабных процессов в океане // Сборник трудов «80 лет Гидрометцентру России». Москва. Триада ЛТД. 2010. с.350-375.
9. Яглом А.М. Корреляционная теория стационарных случайных функций. Ленинград. Гидрометеиздат. 1981. 279 с.
10. Baker D.F. et al. Variational data assimilation for atmospheric CO2 // Tellus. 2006. 58B. P.359-365.
11. R.Bermejo, A.Staniforth The conversion of semi-Lagrangian advection scheme to quasi-monotone scheme // Monthly Weather Review. 1992. Vol.120. P.2622-2632.
12. Chevallier F. et al. AIRS-based versus flask-based estimation of Carbon surface fluxes // Journal of Geophysical Research. Vol.114. D20303. 2009. P.1-9.
13. Evensen G. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics // Journal Geophysical Research. 1994. 99. 10143-10162.
14. Evensen G. Data assimilation. The ensemble Kalman filter. 2009. Spriger-Verlag: Berlin Heideberg 307 p.

-
-
15. *Fung L. et al.* Estimating surface CO₂ fluxes from space-borne CO₂ dry air mole fraction observations using an ensemble Kalman filter // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. №9. P.2619-2633.
 16. *Golubeva, E. N., G. A. Platov,* On improving the simulation of Atlantic water circulation in the Arctic Ocean // *J. Geophys. Res.*, 112, doi: 10.1029/2006JC003734, 2007.
 17. *Heemink A.W., Segers A.J.* Modeling and prediction of environmental data in space and time using Kalman filterig // *Stochastic Environmental Research and Risk assessment.* 16. 2002. 225-240.
 18. *Houtekamer P.L., Mitchell H.L.* Ensemble Kalman Filtering // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.* 2005. 131: 1-23.
 19. *Hunke E. C., Dukowicz J. K.* An elastic-viscous-plastic model for ice dynamics // *J. Phys. Oceanogr.* 1997. V.27. №9. P. 1849—1867.
 20. *Hunt B.R., Kostelich E.J., Szunyogh I.* Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter // *Physica D.* 2007. 230: 112-126.
 21. *Jazwinski A.H.* Stochastic processes and filtering theory. Academic Press: New York. 1970.
 22. *Kalnay E.* Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability. Cambridge Univ. Press. 2002.
 23. *Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al.,* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 1996, No 77, p. 437 – 471.
 24. *Klimova E.* A suboptimal data assimilation algorithm based on the ensemble Kalman filter // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.* 2012. 138: 2079-2085. DOI:10.1002/qj.1941.
 25. *Whitaker J.S., Hamill T.M.* Ensemble data assimilation without perturbed observations. // *Monthly Weather Review.* 2002. 130:1913-1924.
 26. *Yin Y., Alves O., Oke P.R.* An ensemble ocean data assimilation system for seasonal prediction // *Monthly Weather Review.* 2011. v.139. p.786-808.
-
-

**АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ
КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ НЕОДНОРОДНОЙ ЗЕМНОЙ
ПОВЕРХНОСТИ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ
В ВИДИМОМ И УФ- ДИАПАЗОНАХ**

Тарасенков М.В.¹, Белов В.В.^{1,2}

¹*Институт оптики атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН, Томск, TMV@iao.ru*

²*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск*

Введение

Данные пассивного спутникового мониторинга об отражательных свойствах земной поверхности имеют повсеместное применение в самых разнообразных областях экологии, природопользования и др. Основным преимуществом спутниковых данных является их всеохватность и оперативность. Однако использование спутниковых данных имеет свою специфику. Важным вопросом при их использовании является вопрос о достоверности полученных решений конкретных задач. Одним из факторов, который необходимо учитывать при восстановлении отражательных свойств земной поверхности, является процесс взаимодействия оптического излучения с атмосферой как мутной средой, который приводит к изменению восходящих от поверхности световых потоков. Для устранения этого влияния осуществляют атмосферную коррекцию изображений. В настоящий момент существует несколько подходов к решению этой задачи. Однако каждый из существующих подходов имеет свои ограничения. Такие методы как [1] требуют наличия априорной информации об участках земной поверхности с резким перепадом отражательных свойств, кроме того вызывает вопросы их достоверность при высокой мутности атмосферы. Методы, подобные описанному в [2], могут давать результаты с высокими погрешностями в видимом и УФ- диапазонах в условиях высокой мутности атмосферы и при резких перепадах значений коэффициента отражения. Метод, описанный в [3], и ему подобные

характеризуется наиболее точными результатами, но требуют существенных временных затрат, что приводит к необходимости поиска средств их уменьшения. На основе ранее полученных результатов [4-6], нами получен один из способов решения задачи создания точного и одновременно достаточно быстрого метода атмосферной коррекции.

Алгоритм расчета

Задача решается в следующей постановке (рис. 1). На высоте h_d от сферической земной поверхности располагается пассивная спутниковая система, ориентированная в направлении ω_d и ведущая наблюдение за участком земной поверхности. Земная поверхность ламбертовская с неизвестным распределением коэффициента отражения. Пространственное разрешение оптического приемника считается постоянным в пределах наблюдаемой области. На верхнюю границу атмосферы падает поток солнечного излучения в направлении ω_{sun} . Требуется, зная оптические параметры атмосферы и значения интенсивности, измеренные спутниковой системой, восстановить коэффициент отражения r_{surf} .

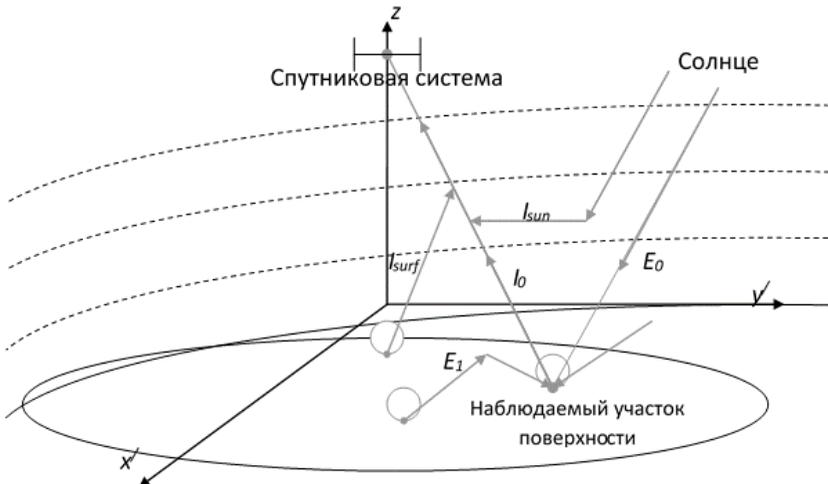


Рис. 1. – Геометрическая схема постановки задачи

Решение задачи строится следующим образом [7]. Интенсивность принимаемого спутниковой системой излучения I_{sum} состоит из солнечной

дымки I_{sun} – излучения Солнца, рассеянного в атмосфере и неотраженного земной поверхностью, нерассеянного излучения, отраженного наблюдаемым участком земной поверхности, I_0 , а также поверхностной дымки I_{surf} – рассеянного излучения, отраженного от земной поверхности. Если считать, что в пределах пикселя поверхность однородна, компоненты излучения меняются незначительно и учитывать только дополнительную освещенность земной поверхности 1-й кратности, то для поиска r_{surf} необходимо решить нелинейную систему уравнений [7]. Решение системы распадается на 2 этапа. На первом этапе определяется величина $Q = r_{surf} E_{sum}$ из системы уравнений вида:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{sum}(x_{w,1}, y_{w,1}) - I_{sun}(x_{w,1}, y_{w,1}) = \frac{Q_1 \mu_1}{\pi} \exp(-\tau_1) + \sum_{k=1}^N Q_k H_{k,1} \\ \dots \\ I_{sum}(x_{w,N}, y_{w,N}) - I_{sun}(x_{w,N}, y_{w,N}) = \frac{Q_N \mu_N}{\pi} \exp(-\tau_N) + \sum_{k=1}^N Q_k H_{k,N} \end{array} \right. , \quad (1)$$

$$H_{k,i} = \iint_{S_k} h_i(x'_w - x_{w,i}, y'_w - y_{w,i}) dx'_w dy'_w , \quad (2)$$

где μ – косинус угла между направлением на приемную систему и вертикалью в наблюдаемой точке поверхности, τ – оптическая длина трассы, h_i – ФРТ канала формирования бокового подсвета при наблюдении i -й точки, $H_{k,i}$ - интеграл по поверхности k -го пикселя от ФРТ канала формирования бокового подсвета при наблюдении i -го пикселя.

На втором этапе определяется коэффициент отражения из нелинейной системы вида:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{Q_1}{E_0} = r_{surf,1} \cdot \left(1 + \sum_{k=1}^N r_{surf,k} \cdot H_k^{(1)} \right) \\ \dots \\ \frac{Q_N}{E_0} = r_{surf,N} \cdot \left(1 + \sum_{k=1}^N r_{surf,k} \cdot H_k^{(1)} \right) \end{array} \right. , \quad (3)$$

$$H_i^{(1)} = \iint_{S_i} h_1(x'_w - x_w, y'_w - y_w) dx'_w dy'_w , \quad (4)$$

где $r_{surf,i}$ - искомое значение коэффициента отражения в i -м пикселе изображения, h_l – ФРТ канала формирования дополнительной освещенности, $H_l^{(1)}$ - интеграл по поверхности l -го пикселя от ФРТ канала формирования дополнительной освещенности.

Если требуется учет больших кратностей переотражения, то предлагается выполнять его в однородном приближении. В этом случае коэффициент отражения определится по формуле:

$$r_{surf,i} \approx \frac{\tilde{r}_{surf,i}(1 + \tilde{r}_{surf,i}\gamma_l)}{1 + \tilde{r}_{surf,i}\gamma_l(1 + \tilde{r}_{surf,i}\gamma_l)}, \quad (5)$$

где $r_{surf,i}$ – значение коэффициента отражения, полученное с учетом бесконечного числа кратностей переотражения, $\tilde{r}_{surf,i}$ - результаты решения системы (3), γ_l - доля дополнительной освещенности i -й кратности от дополнительной освещенности $i-1$ -й кратности при $r_{surf}=1$.

Реализация подобного подхода требует существенных затрат машинного времени. Для ускорения расчета предлагается использовать ряд следующих моментов.

1) Критерий изопланарности изображений.

Изображение можно разбить на зоны, в пределах каждой из которых ФРТ можно считать постоянной. Для их определения в [6] предложен критерий выделения изопланарных зон вида:

$$\left\{ \begin{aligned} \theta_{d,i+1} &= \arccos \left(1 - \left(\left(m_{00}(0^0) - \frac{m_{00}(\theta_{d,i})}{1 + \delta} \right) / \exp(A) \right)^{1/N} \right) \\ m_{00}(\theta_{d,i}) &= m_{00}(0^0) - \exp(A) \cdot (1 - \cos \theta_{d,i})^N \end{aligned} \right. \quad (6)$$

$$m_{00}(\theta_{d,i}) = \frac{H_i}{\pi} \exp(-\tau_i) + \iint_S h(x'_w, y'_w; \theta_{d,i}) dx'_w dy'_w,$$

где A, N – аппроксимационные константы, определяемые методом наименьших квадратов по узловым значениям интеграла ФРТ канала формирования бокового подсвета, определяемых с помощью алгоритма, которой описан в [4].

2) Радиус бокового подсвета

Функция h является во многих случаях быстро убывающей функцией, поэтому область интегрирования в (4) имеет смысл ограничить радиусом бокового подсвета R_{surf} (радиус понимается в поверхностных координатах). Для задания R_{surf} предлагается использовать условие вида:

$$k_i(R_{surf,i}) \geq \delta + (\delta - 1) \cdot \frac{\mu_i \exp(-\tau_i) / \pi}{H_i}, \quad (7)$$

где

$$k_i(R_{surf,i}; x_w, y_w) = \frac{\iint_{S(R_{surf})} h_i(x'_w - x_w, y'_w - y_w) dx'_w dy'_w}{H_i(x_w, y_w)}, \quad (8)$$

$$H_i(x_w, y_w) = \iint_S h_i(x'_w - x_w, y'_w - y_w) dx'_w dy'_w, \quad (9)$$

где k_i , $R_{surf,i}$, τ_i , H_i , μ_i соответствуют i -й изозоне; δ – задает точность определения Q (использовалось $\delta=0.99$), $S(R_{surf})$ – область земной поверхности, ограниченная R_{surf} , S – вся земная поверхность.

3) Радиус области формирования переотражения

В силу быстрого убывания функции h_1 можно ограничить область интегрирования в (4) радиусом формирования переотражения R_1 . Для оценки R_1 предлагается использовать условие:

$$k_1(R_1) \geq \frac{\delta_1}{\gamma_1} \cdot \left(\frac{\delta_1}{1 - \gamma_1} - 1 \right), \quad (10)$$

где

$$k_1(R_1) = \frac{\iint_{S(R_1)} h_1(x'_w - x_w, y'_w - y_w) dx'_w dy'_w}{\iint_S h_1(x'_w - x_w, y'_w - y_w) dx'_w dy'_w}, \quad (11)$$

где δ_1 – требуемая точность определения коэффициента отражения.

4) Формула для интенсивности солнечной дымки

В работе [5] для описания зависимости I_{sun} от угла ориентации спутниковой системы предлагается использовать формулу вида:

$$I_{sun}(\theta_d, \varphi_d) = -\frac{B + \sqrt{B^2 - 4AC_{13}}}{2A \cos \theta_d}, \quad (12)$$

$$A = C_{11} \cos^2 \theta_d + C_{11} (\sin \theta_d \cos \varphi_d)^2 + C_{12} \cos \theta_d \sin \theta_d \cos \varphi_d - (\sin \theta_d \sin \varphi_d)^2, \quad (13)$$

$$B = C_{12} \cos \theta_d + C_{13} \sin \theta_d \cos \varphi_d, \quad (14)$$

где θ_d, φ_d – углы ориентации оси оптической системы; $C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{21}, C_{22}, C_{23}, C_{31}, C_{32}, C_{33}$ – константы, получаемые путем аппроксимации узловых расчетов интенсивности солнечной дымки методом Монте-Карло для узловых направлений $\theta_d=0,15,\dots,60^\circ$, $\varphi_d=0,30,\dots,180^\circ$ (35 узлов). Константы C_{21}, C_{22}, C_{23} используются при $0 \leq \varphi_d \leq 90^\circ$, а C_{31}, C_{32}, C_{33} – при $90 \leq \varphi_d \leq 180^\circ$.

Сравнение алгоритмов по эффективности

Чтобы показать эффективность предлагаемого алгоритма, который далее назовем базовым, по сравнению с упрощенными алгоритмами рассмотрим тестовую задачу восстановления коэффициента отражения участка земной поверхности, приведенного на рис. 2. Для расчетов была выбрана длина волны $\lambda=0,469$ мкм, что соответствует центру 3-го спектрального канала прибора MODIS (спутники TERRA и AQUA). Результаты данных расчетов выбраны в качестве иллюстраций потому, что они позволяют наглядно убедиться в необходимости учета влияния процессов бокового подсвета и переотражения при решении задач восстановления отражательной способности наблюдаемой поверхности.

Результаты расчетов коэффициента отражения земной поверхности вдоль линии $\varphi=0.45^\circ$, полученные базовым алгоритмом (символы 1), и производными от него, основанными на учете переотражения в однородном приближении (символы 2) и на приближении однородности поверхности (символы 3) приведены на рис. 3 для различных метеоусловий.

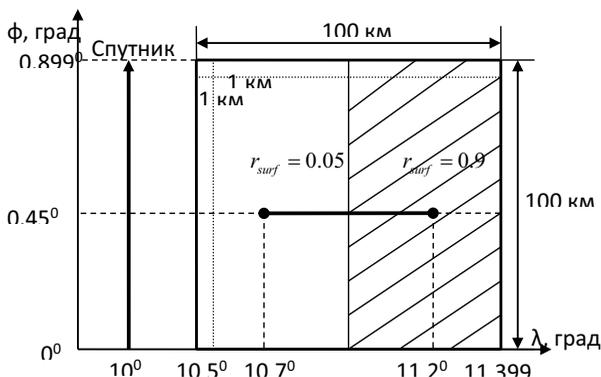


Рис. 2. – Взаимное расположение спутника и наблюдаемой области, а также распределение коэффициента отражения по земной поверхности

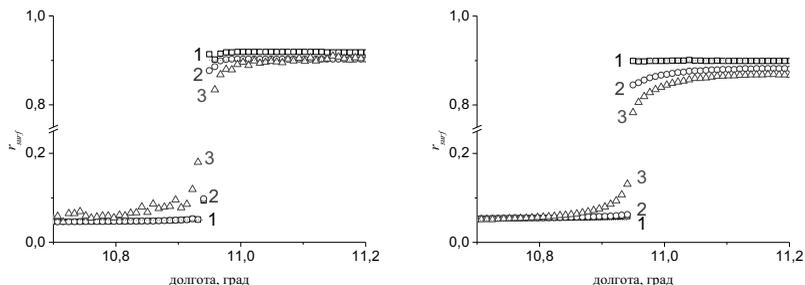


Рис. 3. – Восстановленные различными способами значения коэффициента отражения для тестового примера (рис. 2) вдоль $\phi=0.450$.
 (а) $\lambda=0.469$ мкм, $SM=1$ км, (б) $\lambda=0.469$ мкм $SM=50$ км

Проведенное сравнение показывает, что базовый алгоритм дает результат с абсолютной погрешностью в пределах 0.044, восстановление с учетом переотражения в однородном приближении - 0.077, а атмосферная коррекция в однородном приближении при учете переотражения и бокового подсвета - 0.308. Из этого следует, что в ряде случаев использование базового алгоритма позволяет определить коэффициент отражения с заметно большей точностью, чем алгоритмы, учитывающие приближенно отдельные факторы влияния неоднородности поверхности на принимаемое излучение.

Для получения результатов рис. 3, базовому алгоритму требуется 90-100 мин работы ЭВМ с производительностью 19.5 ГФлопс, в однородном приближении при учете переотражения – 40-60 мин, а алгоритму в однородном приближении порядка 15 мин. Без использования предлагаемых приемов время счета более чем в 6 раз больше.

Сравнение результатов алгоритмов на примере тестового участка земной поверхности

Следующим этапом тестирования алгоритма стало сравнение результатов расчетов базовым алгоритмом с результатами стандартного для данных MODIS алгоритма MOD09 и результатами алгоритма однородной коррекции для тестового участка земной поверхности. В качестве тестового был выбран участок западного побережья Африки с координатами $27.5 - 27.9^0$ с.ш. и $13.4 - 12.9^0$ з.д., время измерений 19 августа 2011 г. в 11 ч 25 мин. Этот участок был выбран потому, что примерно половину участка занимают пустынные территории, а вторую половину – море. В качестве исходных данных для предлагаемого алгоритма и алгоритма однородной коррекции использовались данные MOD02 и MOD04 о распределении интенсивности в 3-м канале прибора MODIS (0.47 мкм) с пространственным разрешением – 500 м и об аэрозольной оптической толщине, которая в данном случае почти не менялась и равна 0.307. Оптическая модель атмосферы для базового алгоритма и алгоритма однородной коррекции выбиралась среди континентальных тропических моделей безоблачного неба, генерируемых генератором LOWTRAN-7 [8]. Наиболее близкой по аэрозольной оптической толщине оказалась модель, соответствующая метеорологической дальности видимости $S_M=24$ км. Полученные результаты приведены на рис. 4. Сравнение показывает, что коэффициент корреляции значений, полученных базовым алгоритмом и алгоритмом MOD09, равен 0.984 (рис. 4d левый график), а коэффициент корреляции значений, полученных базовым алгоритмом, со значениями, полученными алгоритмом однородной коррекции, равен 0.9985 (рис. 4d правый график). На основе сравниваемых значений методом

наименьших квадратов были построены прямые, приведенные на рис. 4д пунктиром. Сравнение показывает, что значения, полученные алгоритмом MOD09, в среднем меньше значений, полученных базовым алгоритмом, на величину равную 0.023. Это может быть связано с тем, что в алгоритме MOD09 и в базовом алгоритме используются различные оптические модели. Что касается сравнения базового и однородного алгоритмов, сравнение показывает, что в данном случае можно использовать алгоритм однородной коррекции.

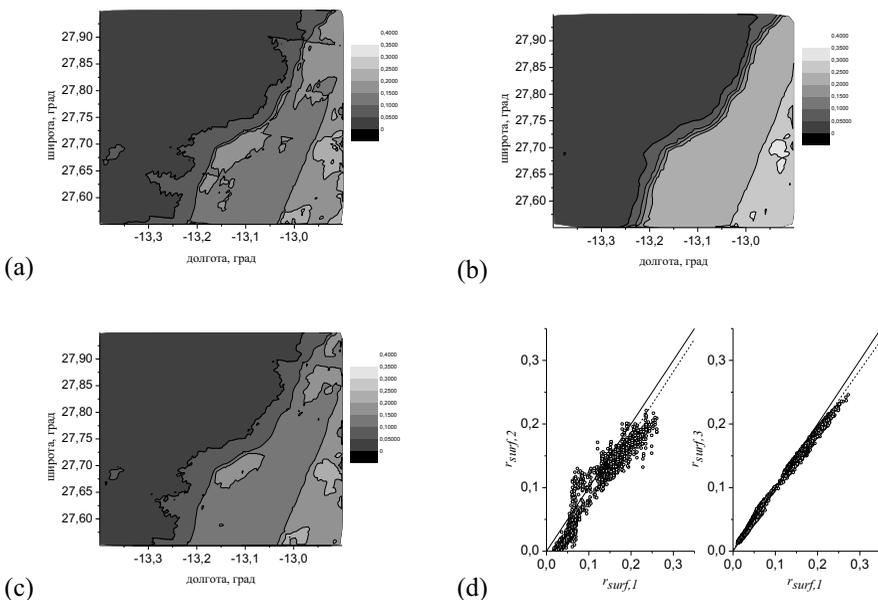


Рис. 4. – (а) Коэффициенты отражения рассматриваемого участка земной поверхности, полученные базовым алгоритмом ($r_{surf,1}$),
 (б) коэффициенты, полученные алгоритмом MOD09 ($r_{surf,2}$),
 (с) коэффициенты, полученные алгоритмом однородной коррекции ($r_{surf,3}$),
 (д) сравнение значений коэффициента отражения, полученного базовым алгоритмом $r_{surf,1}$ со значениями, полученными алгоритмом MOD09 $r_{surf,2}$ и значениями, полученными алгоритмом однородной коррекции $r_{surf,3}$

Заключение

Таким образом, разработан новый алгоритм восстановления коэффициентов отражения земной поверхности. Показано, что существуют ситуации, когда применение данного алгоритма необходимо. Проведенное

сравнение результатов базового алгоритма с результатами расчета алгоритма MOD09 для тестового участка показывает, что результаты заметно отличаются, но коэффициент корреляции равен 0.984, что косвенно указывает на то, что причина различий может быть связана с различиями в оптической модели атмосферы.

Авторы благодарят Н.В. Кабанову и Д.В. Соломатова за предоставленные спутниковые данные для тестового участка на земной поверхности.

Работа выполнена при поддержке и в рамках Государственного контракта 14.515.11.0030, интеграционного проекта СО РАН № 131а, гранта РФФИ №12-05-33068 мол_а_вед.

Список литературы

1. Протасов К.Т., Бусыгин Л.А., Белов В.В. Метод преобразования гистограмм яркостей и вейвлет-коррекция атмосферных искажений спутниковых изображений // Оптика атмосферы и океана. Т.23, №2, 2010. С. 136-142.
2. Vermote E.F., Vermeulen A. Atmospheric correction algorithm: spectral reflectances (MOD09). Algorithm Theoretical Background document, version 4.0. 1999. [электронный ресурс]: http://modis.gsfc.nasa.gov/atbd/atbd_nod08.pdf.
3. Reinersman P.N., Carder K.L. Monte Carlo simulation of the atmospheric point-spread function with an application to correction for the adjacency effect // Applied optics. vol. 34, №21, 1995. pp. 4453-4471.
4. Белов В.В., Тарасенков М.В. Статистическое моделирование интенсивности световых потоков, отраженных сферической земной поверхностью // Оптика атмосферы и океана. Т. 23, №1, 2010. С. 14-20.
5. Белов В.В., Тарасенков М.В., Пискунов К.П. Параметрическая модель солнечной дымки в видимой и УФ-области спектра // Оптика атмосферы и океана. Т. 23, №4, 2010. С. 294-297.
6. Белов В. В., Тарасенков М.В. Статистическое моделирование функции размытия точки в сферической атмосфере и критерий выделения зон изопланарности изображений // Оптика атмосферы и океана. Т.23, №5, 2010. С. 371-377.
7. Белов В. В., Тарасенков М.В. О точности и быстройдействии RTM-алгоритмов атмосферной коррекции спутниковых изображений в видимом и УФ-диапазоне// Оптика атмосферы и океана. Т.26, №7, 2013. С. 564-571.
8. Kneizys F.X., Shettle E.P., Anderson G.P., Abreu L.W., Chetwynd J.H., Selby J.E.A. Clough S.A., Gallery W.O. User guide to LOWTRAN-7. ARGL-TR-86-0177.ERP 2010 / Hansom AFB. MA 01731. 137 p.

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ШИАРЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Симонов К.В.¹, Кадена Л.²

¹*Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск,
simonovkv@icm.krasn.ru*

²*Сибирский федеральный университет, esudorx@gmail.com*

Введение

В последние годы исследователи в области прикладного гармонического анализа предложили несколько новых подходов, предназначенных для эффективного представления пространственных данных наблюдений. Эти предложения и подходы основаны на новых результатах в теоретическом гармоническом анализе [1-5].

Сравнительно недавно появилась новая система представлений, так называемое шиарлет-преобразование данных [6-7]. Шиарлет-преобразование – это преобразование данных, включающее сдвиг и оператор параллельного переноса. Это вейвлет-преобразование, имеющие масштабирование по частоте и параллельный перенос по времени, однако также включающее характеристику направленности, имея дополнительную операцию сдвига.

В работе рассмотрены принципы построения алгоритма дискретного шиарлет-преобразования, в основе реализации которого лежат быстрые алгоритмы Фурье-преобразования [10]. В [10, 5, 11] введено непрерывное шиарлет-преобразование, а затем, посредством дискретизации параметров, дискретное шиарлет-преобразование. Рассмотрены шиарлеты на конусе [5]. Такой подход позволяет получить хорошее разделение горизонтального и вертикального направлений шиарлетов в частотной области.

Непрерывное шварц-преобразование

Рассмотрим непрерывное шварц-преобразование [10, 5, 11]. Пусть $a \in \mathbf{R}^+$ и $s \in \mathbf{R}$. Обозначим за A_a параболическую матрицу масштабирования, а за S_s матрицу сдвига:

$$A_a = \begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & \sqrt{a} \end{pmatrix} \quad \text{и} \quad S_s = \begin{pmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Тогда непрерывная шварц-система, порожденная функцией $\psi \in L_2(\mathbf{R}^2)$ определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} \left\{ \psi_{a,s,t} := a^{-\frac{3}{4}} \psi(A_a^{-1} S_s^{-1}(\cdot - t)) = \right. \\ \left. = a^{-\frac{3}{4}} \psi \left(\begin{pmatrix} 1/a & -s/a \\ 0 & 1/\sqrt{a} \end{pmatrix} (\cdot - t) \right) : a \in \mathbf{R}^+, s \in \mathbf{R} \right\}. \end{aligned}$$

Напомним, формулы прямого и обратного непрерывного преобразования Фурье:

$$Ff(t) = \hat{f}(\omega) = \int_{\mathbf{R}^2} f(t) e^{-2\pi i(\omega, t)} dt,$$

$$F^{-1} \hat{f}(\omega) = f(t) = \int_{\mathbf{R}^2} \hat{f}(\omega) e^{2\pi i(\omega, t)} d\omega.$$

Считаем, что для Фурье-образа $\hat{\psi}$ справедливо следующее соотношение:

$$\hat{\psi}(\omega_1, \omega_2) = \hat{\psi}_1(\omega_1) \hat{\psi}_2(\omega_2 / \omega_1). \quad (1)$$

Следовательно, получаем:

$$\begin{aligned} \hat{\psi}_{a,s,t}(\omega) &= a^{-\frac{3}{4}} \psi \left(\begin{pmatrix} 1/a & -s/a \\ 0 & 1/\sqrt{a} \end{pmatrix} (\cdot - t) \right)^\wedge(\omega) = \\ &= a^{-\frac{3}{4}} e^{-2\pi i(\omega, t)} \psi \left(\begin{pmatrix} 1/a & -s/a \\ 0 & 1/\sqrt{a} \end{pmatrix} \cdot \right)^\wedge(\omega) = \\ &= a^{-\frac{3}{4}} e^{-2\pi i(\omega, t)} a^{\frac{3}{2}} \hat{\psi} \left(\begin{pmatrix} a & 0 \\ s\sqrt{a} & \sqrt{a} \end{pmatrix} \omega \right) = \\ &= a^{\frac{3}{4}} e^{-2\pi i(\omega, t)} \hat{\psi}(a\omega_1, \sqrt{a}(s\omega_1 + \omega_2)) = \\ &= a^{\frac{3}{4}} e^{-2\pi i(\omega, t)} \hat{\psi}_1(a\omega_1) \hat{\psi}_2 \left(a^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} + s \right) \right). \end{aligned}$$

Тогда шварлет-преобразование $SH_\psi(f)$ для функции $f \in L_2(\mathbf{R}^2)$ может быть определено следующим образом:

$$\begin{aligned} SH_\psi(f)(a, s, t) &:= \langle f, \psi_{a, s, t} \rangle = \\ &= \langle \hat{f}, \hat{\psi}_{a, s, t} \rangle = \int_{\mathbf{R}^2} \hat{f}(\omega) \overline{\hat{\psi}_{a, s, t}(\omega)} d\omega = \\ &= a^{\frac{3}{4}} \int_{\mathbf{R}^2} \hat{f}(\omega) \hat{\psi}_1(a\omega_1) \hat{\psi}_2\left(a^{-\frac{1}{2}}\left(\frac{\omega_2}{\omega_1} + s\right)\right) e^{2\pi i(\omega, t)} d\omega = \\ &= a^{\frac{3}{4}} F^{-1}\left(\hat{f}(\omega) \hat{\psi}_1(a\omega_1) \hat{\psi}_2\left(a^{-\frac{1}{2}}\left(\frac{\omega_2}{\omega_1} + s\right)\right)\right)(t). \end{aligned}$$

Функцию ψ называют непрерывным шварлетом, если она удовлетворяет условию допустимости:

$$\int_{\mathbf{R}^2} \frac{|\hat{\psi}(\omega_1, \omega_2)|^2}{\omega_1^2} d\omega_1 d\omega_2 < \infty,$$

Шварлеты на конусе

Шварлеты на конусе введены в [5]. Таким образом, получено хорошее разделение горизонтального и вертикального направлений шварлетов в частотной области. Функция $\hat{\psi}$ имеет компактный носитель. При этом $supp \hat{\psi}_1 = [-4, -1/2] \cup [1/2, 4]$ и $supp \hat{\psi}_2 = [-1, 1]$. Определим горизонтальный и вертикальный конусы:

$$\begin{aligned} C^h &:= \{(\omega_1, \omega_2) \in \mathbf{R}^2 : |\omega_1| \geq 1/2, |\omega_2| < |\omega_1|\}, \\ C^v &:= \{(\omega_1, \omega_2) \in \mathbf{R}^2 : |\omega_1| \geq 1/2, |\omega_2| > |\omega_1|\}, \end{aligned}$$

и два дополнительных множества:

$$\begin{aligned} C^\times &:= \{(\omega_1, \omega_2) \in \mathbf{R}^2 : \\ &|\omega_1| \geq 1/2, |\omega_2| \geq 1/2, |\omega_2| = |\omega_1|\}, \\ C^0 &:= \{(\omega_1, \omega_2) \in \mathbf{R}^2 : |\omega_1| < 1, |\omega_2| < 1\}, \end{aligned}$$

где C^\times определяет «линию шва» горизонтального и вертикального конусов, а C^0 – низкочастотную область. В целом $\mathbf{R}^2 = C^h \cup C^v \cup C^\times \cup C^0$ без пересечения области $C^0 := (-1, 1)^2 \setminus (-1/2, 1/2)^2$.

Шварлеты ψ , определенные ранее, идеально подходят для горизонтального конуса. Для каждого множества C^h , $h \in \{h, v, \times\}$ определим

характеристическую функцию $\chi_{C^h}(\omega)$, которая принимает значение равно единицы для $\omega \in C^h$, и равно нулю для $\omega \notin C^h$. Шиарлеты на конусе определяются следующим образом:

$$\hat{\psi}^h(\omega_1, \omega_2) := \hat{\psi}_1(\omega_1) \hat{\psi}_2(\omega_2/\omega_1) \chi_{C^h},$$

$$\hat{\psi}^v(\omega_1, \omega_2) := \hat{\psi}_1(\omega_2) \hat{\psi}_2(\omega_1/\omega_2) \chi_{C^v}.$$

Рассмотрим носитель функции $\hat{\psi}_{a,s,0}$:

$$\text{supp } \hat{\psi}_{a,s,0} \subseteq \{(\omega_1, \omega_2) : 1/(2a) \leq |\omega_1| \leq 4/a, |s + \omega_2/\omega_1| \leq \sqrt{a}\}.$$

Можно увидеть, что при $|s| \leq 1 - \sqrt{a}$, $\text{supp } \hat{\psi}_{a,s,0} \subseteq C^h$. При $1 - \sqrt{a} < s < 1 + \sqrt{a}$ часть $\text{supp } \hat{\psi}_{a,s,0}$, принадлежащая C^v будет «обрезана». При $|s| > 1 + \sqrt{a}$, шиарлет обращается в нуль характеристической функцией.

Для $(\omega_1, \omega_2) \in C^\times$, определим $\hat{\psi}^\times(\omega_1, \omega_2) := \hat{\psi}_1(\omega_2) \hat{\psi}_2(\omega_1/\omega_2) \chi_{C^\times}$. Для низкочастотной области C^0 определим скейлинг-функцию ϕ :

$$\hat{\phi}(\omega_1, \omega_2) := \begin{cases} \varphi(\omega_1), & |\omega_1| < 1, |\omega_2| \leq |\omega_1|, \\ \varphi(\omega_2), & |\omega_2| < 1, |\omega_1| < |\omega_2|, \end{cases}$$

где
$$\varphi(\omega) := \begin{cases} 1, & |\omega| \leq 1/2, \\ \cos\left(\frac{\pi}{2} \nu(2|\omega| - 1)\right), & 1/2 < |\omega| < 1, \\ 0, & \text{в ост. случаях.} \end{cases}$$

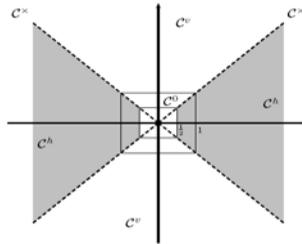


Рис. 1. – Множества C^h , C^v , C^\times и C^0

Дискретное шиарлет-преобразование

Будем рассматривать изображение как функцию на сетке

$$\left\{ \left(\frac{m_1}{M}, \frac{m_2}{N} \right) : (m_1, m_2) \in I \right\},$$

где

$$I = \{ (m_1, m_2) : m_1 = 0, \dots, M-1, m_2 = 0, \dots, N-1 \} \quad [10].$$

Для получения дискретного шиарлет-преобразования, проведем дискретизацию параметров масштабирование, сдвига и переноса:

$$a_j := 2^{-2j} = \frac{1}{4^j}, \quad j = 0, \dots, j_0 - 1, \quad j_0 = \left\lfloor \frac{1}{2} \log_2 N \right\rfloor;$$

$$s_{j,k} := k2^{-j}, \quad -2^j \leq k \leq 2^j; \quad t_m := \left(\frac{m_1}{M}, \frac{m_2}{N} \right), \quad m \in I.$$

В этих обозначениях шиарлеты определяются:

$$\psi_{j,k,m}(x) := \psi_{a_j, s_{j,k}, t_m}(x) = \psi(A_{a_j}^{-1} S_{s_{j,k}}^{-1}(x - t_m)).$$

Заметим, что по сравнению с непрерывным шиарлет-преобразованием здесь опущен коэффициент $a^{-3/4}$. В частотной области получаем:

$$\hat{\psi}_{j,k,m}(\omega) = \hat{\psi}(A_{a_j}^T S_{s_{j,k}}^T \omega) e^{-2\pi i \langle \omega, t_m \rangle} =$$

$$= \hat{\psi}_1(-4^{-j} \omega_1) \hat{\psi}_2\left(2^j \frac{\omega_2}{\omega_1} + k\right) e^{-2\pi i \left(\frac{\omega_1 m_1}{M} + \frac{\omega_2 m_2}{N}\right)},$$

$$\omega \in \Omega,$$

$$\Omega := \left\{ (\omega_1, \omega_2) : \omega_1 = -\left\lfloor \frac{M}{2} \right\rfloor, \dots, \left\lfloor \frac{M}{2} \right\rfloor - 1, \right.$$

$$\left. \omega_2 = -\left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor, \dots, \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor - 1 \right\}.$$

Где

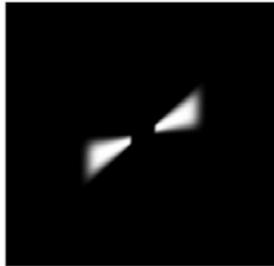


Рис. 2. – Шиарлет в частотной области при $a = 1/4$ и $s = -1/2$

По определению $a \leq 1$ и $|s| \leq 1$; таким образом, имеется разрыв для $|k| = 2^j$, где $|s| = 1$. Для обоих конусов при $|s| = 1$ существуют две половины шиарлетов с

разрывом на «линии шва» C^\times . Не один шиарлет не определен на C^\times . Для получения полного шиарлета на «линии шва», склеим три части вместе. Таким образом, определим шиарлет для $|k|=2^j$ как сумму шиарлетов:

$$\hat{\psi}_{j,k,m}^{h \times v} := \hat{\psi}_{j,k,m}^h + \hat{\psi}_{j,k,m}^v + \hat{\psi}_{j,k,m}^\times.$$

Определим дискретное шиарлет-преобразование:

$$SH(f)(h, j, k, m) := \begin{cases} \langle f, \phi_m \rangle, & h = 0, \\ \langle f, \psi_{j,k,m}^h \rangle, & h \in \{h, v\}, \\ \langle f, \psi_{j,k,m}^{h \times v} \rangle, & h = \times, |k| = 2^j. \end{cases}$$

где $j = 0, \dots, j_0 - 1$, $-2^j + 1 \leq k \leq 2^j - 1$, $m \in I$.

Шиарлет-преобразование может быть эффективно реализовано путем применения прямого и обратного дискретного Фурье-преобразования.

$$\hat{f}(\omega) = \sum_{m \in I} f(m) e^{-2\pi i \left(\frac{\omega_1 m_1}{M} + \frac{\omega_2 m_2}{N} \right)}, \quad \omega \in \Omega,$$

$$f(m) = \frac{1}{MN} \sum_{\omega \in \Omega} \hat{f}(\omega) e^{2\pi i \left(\frac{\omega_1 m_1}{M} + \frac{\omega_2 m_2}{N} \right)}, \quad m \in I.$$

Формула Планшереля

$$\langle f, g \rangle = \frac{1}{MN} \langle \hat{f}, \hat{g} \rangle.$$

Дискретное шиарлет-преобразование может быть вычислено для $h=h$ следующим образом (заметим, что $\hat{\psi}$ – вещественна функция):

$$\begin{aligned} SH(f)(h, j, k, m) &= \langle f, \psi_{j,k,m}^h \rangle = \\ &= \frac{1}{MN} \langle \hat{f}, \hat{\psi}_{j,k,m}^h \rangle = \\ &= \frac{1}{MN} \sum_{\omega \in \Omega} \hat{f}(\omega_1, \omega_2) e^{-2\pi i \left(\frac{\omega_1 m_1}{M} + \frac{\omega_2 m_2}{N} \right)} \overline{\hat{\psi}(4^{-j} \omega_1, 4^{-j} k \omega_1 + 2^{-j} \omega_2)} = \\ &= \frac{1}{MN} \sum_{\omega \in \Omega} \hat{f}(\omega_1, \omega_2) \hat{\psi}(4^{-j} \omega_1, 4^{-j} k \omega_1 + 2^{-j} \omega_2) e^{2\pi i \left(\frac{\omega_1 m_1}{M} + \frac{\omega_2 m_2}{N} \right)}. \end{aligned}$$

Если обозначить $\hat{g}_{j,k} := \hat{f}(\omega_1, \omega_2) \hat{\psi}(4^{-j} \omega_1, 4^{-j} k \omega_1 + 2^{-j} \omega_2)$, то шиарлет-преобразование может быть вычислено как обратное Фурье-преобразование (обозначение: `iff2`) от $\hat{g}_{j,k}$.

$$\begin{aligned}
 SH(f)(h, j, k, m) &= \\
 &= \frac{1}{MN} \sum_{\omega \in \Omega} \hat{g}_{j,k}(\omega) e^{2\pi i \left(\frac{\omega_1 m_1 + \omega_2 m_2}{M} \right)} = \text{ifft}2(\hat{g}_{j,k}) = \\
 &= \text{ifft}2(\hat{f}(\omega_1, \omega_2) \hat{\psi}(4^{-j} \omega_1, 4^{-j} k \omega_1 + 2^{-j} \omega_2)).
 \end{aligned}$$

Для других \hat{h} вычисления аналогичные, в итоге получаем:

$$SH(f)(h, j, k, m) = \begin{cases} \text{ifft}2(\hat{f}(\omega_1, \omega_2) \hat{\phi}(\omega_1, \omega_2)), & \hat{h} = 0, \\ \text{ifft}2(\hat{f}(\omega_1, \omega_2) \hat{\psi}(4^{-j} \omega_1, 4^{-j} k \omega_1 + 2^{-j} \omega_2)), & \hat{h} = h, |k| \leq 2^j - 1, \\ \text{ifft}2(\hat{f}(\omega_1, \omega_2) \hat{\psi}(4^{-j} \omega_2, 4^{-j} k \omega_2 + 2^{-j} \omega_1)), & \hat{h} = v, |k| \leq 2^j - 1, \\ \text{ifft}2(\hat{f}(\omega_1, \omega_2) \hat{\psi}^{h \times v}(4^{-j} \omega_1, 4^{-j} k \omega_1 + 2^{-j} \omega_2)), & \hat{h} \neq 0, |k| = 2^j. \end{cases}$$

Отметим, что дискретная шиарлет-система является фреймом Парсеваля в конечном евклидовом пространстве $L_2(I)$. В гильбертовом пространстве H избыточная система $\{u_j : j \in J\}$ является фреймом, если существуют константы $0 < A \leq B < \infty$ такие, что для всех $f \in H$ выполнено условие:

$$A \|f\|^2 \leq \sum_{j \in J} |\langle f, u_j \rangle|^2 \leq B \|f\|^2.$$

Если $A = B$, то фрейм называется жестким, а если $A = B = 1$, то фреймом Парсеваля. Для фрейма Парсеваля справедлива следующая формула:

$$\|f\|^2 = \sum_{j \in J} |\langle f, u_j \rangle|^2, \quad \text{для всех } f \in H,$$

или эквивалентная ей формула для восстановления f :

$$f = \sum_{j \in J} \langle f, u_j \rangle u_j, \quad \text{для всех } f \in H.$$

Дискретная шиарлет-система

$$\begin{aligned}
 &\{\psi_{j,k,m}^h(\omega) : j = 0, \dots, j_0 - 1, \\
 &\quad -2^j + 1 \leq k \leq 2^j - 1, m \in I\} \cup \{\psi_{j,k,m}^v(\omega) : j = 0, \dots, j_0 - 1, \\
 &\quad -2^j + 1 \leq k \leq 2^j - 1, m \in I\} \cup \{\psi_{j,k,m}^{h \times v}(\omega) : j = 0, \dots, j_0 - 1, \\
 &\quad |k| = 2^j, m \in I\} \cup \{\phi_m(\omega) : m \in I\}
 \end{aligned}$$

является фреймом Парсеваля в $L_2(I)$.

Обратное шиарлет-преобразование осуществляется по формуле:

$$\begin{aligned}
 f &= \sum_{h \in \{h, v\}} \sum_{j=0}^{j_0-1} \sum_{k=-2^j+1}^{2^j-1} \sum_{m \in I} \langle f, \psi_{j,k,m}^h \rangle \psi_{j,k,m}^h + \\
 &+ \sum_{j=0}^{j_0-1} \sum_{k=\pm 2^j} \sum_{m \in I} \langle f, \psi_{j,k,m}^{h \times v} \rangle \psi_{j,k,m}^{h \times v} + \\
 &+ \sum_{m \in I} \langle f, \phi_m \rangle \phi_m.
 \end{aligned}$$

Фактически вычисление f по коэффициентам $c(h, j, k, m)$ осуществляются в частотной области. В силу линейности Фурье-преобразования получаем:

$$\begin{aligned}
 \hat{f} &= \sum_{h \in \{h, v\}} \sum_{j=0}^{j_0-1} \sum_{k=-2^j+1}^{2^j-1} \sum_{m \in I} \langle f, \psi_{j,k,m}^h \rangle \hat{\psi}_{j,k,m}^h + \\
 &+ \sum_{j=0}^{j_0-1} \sum_{k=\pm 2^j} \sum_{m \in I} \langle f, \psi_{j,k,m}^{h \times v} \rangle \hat{\psi}_{j,k,m}^{h \times v} + \\
 &+ \sum_{m \in I} \langle f, \phi_m \rangle \hat{\phi}_m.
 \end{aligned}$$

Обозначим Фурье-преобразование как fft2 , тогда:

$$\begin{aligned}
 \hat{f}(\omega_1, \omega_2) &= \text{fft2}(c(0, \cdot)) \hat{\phi}(\omega_1, \omega_2) + \\
 &\sum_{j=0}^{j_0-1} \sum_{k=-2^j+1}^{2^j-1} \text{fft2}(c(h, j, k, \cdot)) \hat{\psi}(4^{-j} \omega_1, 4^{-j} k \omega_1 + 2^{-j} \omega_2) + \\
 &+ \sum_{j=0}^{j_0-1} \sum_{k=-2^j+1}^{2^j-1} \text{fft2}(c(v, j, k, \cdot)) \hat{\psi}(4^{-j} \omega_2, 4^{-j} k \omega_2 + 2^{-j} \omega_1) + \\
 &+ \sum_{j=0}^{j_0-1} \sum_{k=\pm 2^j} \text{fft2}(c(h \times v, j, k, \cdot)) \hat{\psi}(4^{-j} \omega_1, 4^{-j} k \omega_1 + 2^{-j} \omega_2).
 \end{aligned}$$

В итоге получаем, используя обратное Фурье-преобразование $f = \text{ifft2}(\hat{f})$.

Методика обработки изображений

В работе предлагается методика обработки изображений (космоснимков), на основе шиарлет-преобразования – нового направления в обработке и анализе данных геоэкологического мониторинга, который может быть использован при диагностике сложных геоэкологических объектов и систем. Суть вычислительной методики – «геометрический» анализ изображений, где совместно выполняется вейвлет-преобразование данных для «круглых структур» и шиарлет-преобразование для «линейных структур» [5-6].

Отметим, что задаче разделения изображения на морфологически разные составляющие в последнее время уделяют много внимания в связи с её значимостью для различных актуальных приложений [1-4, 6]. Разрабатываемая вычислительная методика для эффективного решения этой задачи также может быть применена к широкому кругу объектов, в том числе для решения задач визуализации данных «диагностики» сложных геоэкологических систем с целью оценки территориальных рисков.

Отметим, что в последние годы проведен ряд исследований по проблеме разделения морфологических отличительных черт в пространственных данных. В [8] положено начало этим исследованиям по разложению изображений, в частности, на основе применения вариационных методов. В работе [9] предложен «морфологический анализ компонентов», в котором предполагается, что задача разложения может быть разрешима, если есть информация о типе особенностей, которые должны быть извлечены, и при условии, что морфологическая разница между ними достаточно сильна.

В этой связи получен следующий результат в [2]: для разделения точки и криволинейной особенности теоретически доказано, что ℓ_1 -минимизация решает эту задачу со сколь угодно высокой точностью, изучая и комбинируя вейвлеты и кёрвлеты. Вейвлет-преобразования данных здесь обеспечивают оптимальное разложение для точечных структур, а кёрвлеты обеспечивают оптимальное разложение для криволинейных структур.

Следовательно, ℓ_1 -минимизация, применяемая к разложению коэффициентов исходного изображения, преобразует точечные структуры в вейвлеты, а криволинейные структуры в кёрвлеты, таким образом автоматически разделяя изучаемое изображение. Соответствующий алгоритмический подход, использующий вейвлеты и кёрвлеты, реализован в MCSALab [4].

В разрабатываемой методике для разложения криволинейных структур используем шиарлет (сдвиговое) преобразование. Операция сдвига, фактически, дает более эффективный подход для изучения направленности, обеспечивая тем

самым единую обработку сложных изображений. Далее показывается возможность использования вейвлетов и шиарлетов для разделения точечных и криволинейных особенностей.

Теоретические результаты из [2] показывают также, что они справедливы и для комбинирования вейвлетов и шиарлетов. Кроме того, численные результаты анализа изображений свидетельствуют в пользу алгоритмов разложения, основанных на шиарлетах [6-10]. Расчеты также свидетельствуют, что представленные алгоритмы быстрее и обеспечивает более точное разделение, если, кривизна криволинейной части велика. Используемый алгоритм включен авторами указанных исследований в доступный инструментарий – в ShearLab.

При обработке и анализе пространственных данных сложных объектов (в многомерных задачах) важные особенности рассматриваемых данных, как правило, сосредоточены в многообразиях малых размерностей. Например, при обработке изображений край – это одномерная кривая, на которой интенсивность изображения резко меняется. Таким образом, разработанная вычислительная методика шиарлет-преобразования пространственных данных [5-6] предоставляет эффективные инструменты для анализа внутренних геометрических черт изображений, использующие анизотропные и направленные оконные функции. При таком подходе учет направленности достигается за счет применения целых степеней матриц сдвига, а эти операции сохраняют структуру целочисленной решетки, что имеет решающее значение для цифровой реализации.

Как уже упоминалось, шиарлет-преобразования порождены параболическим масштабированием, сдвигом и оператором параллельного переноса. В работах [6-7] предоставлена теория шиарлет-преобразований с компактным носителем. Показано, что большой класс шиарлет-преобразований с компактным носителем обеспечивает оптимальное приближение изображений, управляемое криволинейными структурами [1].

В среде Matlab для обработки и анализа изучаемых пространственных данных экологического мониторинга применяется алгоритмическое обеспечение для выполнения непрерывного вейвлет- и шиарлет-преобразований. Рассмотрены ряд примеров, где показаны возможности шиарлет-анализа пространственных данных мониторинга сложных геоэкологических объектов и систем для решения задач анализа рисков ЧС природно-техногенного характера.

В результате проведенных исследований, разработана вычислительная методика, позволяющая решать задачу обработки пространственных данных геоэкологического мониторинга на основе шиарлет-преобразования (рис. 3-4). В настоящее время вычислительная методика тестируется на пространственно-временных рядах данных наблюдений различных сложных явлений и процессов, связанных с ЧС природно-техногенного характера.

Вычислительная методика состоит из несколько этапов (рис. 3):

- *подготовительный*: исходное изображение форматируется под расчетный шаблон и намечается последовательность расчетных процедур для наиболее оптимального решения поставленной задачи;
- *запуск и настройка* алгоритмического обеспечения в shearletlab, выбор конкретного алгоритма для поставленной задачи;
- *загрузка и обработка исходных изображений* для различных расчетных условий в соответствии с поставленной задачей;
- *анализ* получаемых расчетных изображений в результате шиарлет-преобразования, контрастирование изображения, в итоге получаем атлас расчетных изображений с интерпретацией изучаемого явления.

На рисунке 4 представлен пример обработки пространственных данных геоэкологического мониторинга на основе разработанной вычислительной методики.

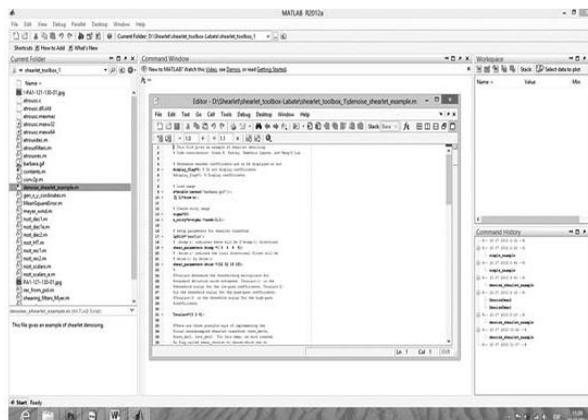
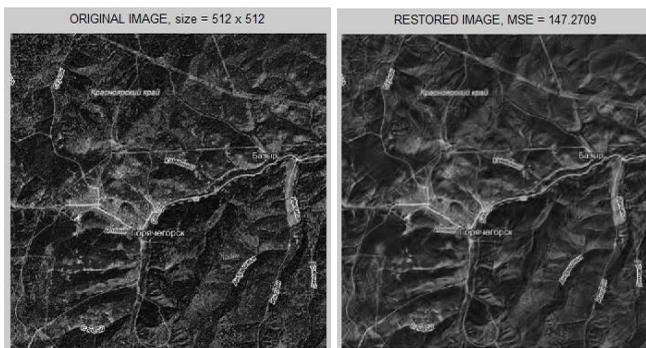


Рис. 3. – Вид соответствующих окон для выполнения расчетов



а) оригинал

б) шиарлет-преобразование

Рис. 4. – Шиарлет-преобразование для изучаемого изображения

В рамках разработанной вычислительной методики представлено новое перспективное направление в обработке сложных пространственных данных и изображений геоэкологического мониторинга – сдвиговое преобразование, а также его взаимосвязь с вейвлет-преобразованием. Данный тип преобразования данных позволяет получить новую геометрическую интерпретацию в процессе обработки пространственно-временных рядов и изображений при диагностике сложных геоэкологических объектов и систем для выявления криволинейных

особенностей (сингулярностей) и оценки территориальных рисков ЧС природно-техногенного характера.

Заключение

Резюмируя вышесказанное, приходим к следующим выводам:

- сдвиговое (шиарлет) преобразование учитывает свойства исследуемой среды, причем математический аппарат, применяемый для анализа сложных пространственных данных тот же для различных физических сред и моделей;
- сдвиговое преобразование позволяет работать с криволинейными особенностями. Шиарлет-преобразование хорошо применимо для фиксации регулярности изображения в сложных средах, учитывает масштаб, пространство и направление;

Шиарлет-преобразование позволяет работать с криволинейными сингулярностями, учитывать анизотропные свойства исследуемой среды, причем математический аппарат, применяемый для анализа сложных сигналов одинаковый для различных физических сред и моделей. Шиарлет-преобразование хорошо применимо для фиксации регулярности изображения в анизотропных средах, учитывает масштаб, пространство и направление. Шиарлет-преобразование – эффективный инструмент для анализа внутренних геометрических черт изображения, использующий анизотропные и направленные оконные функции.

Описанный выше алгоритм дискретного шиарлет-преобразования эффективно реализуется с помощью быстрых алгоритмов Фурье-преобразования. В среде Матлаб, на основе рассмотренного алгоритма, показаны возможности шиарлет-преобразования изображений для анализа сложных явлений в изучаемой предметной области.

Список литературы

1. *Candes E.J., Donoho D.L.* New tight frames of curvelets and optimal representations of objects with piecewise C2 singularities, *Comm. Pure and Appl. Math.* 56 (2004), 216–266.
2. *Donoho D.L., Kutyniok G.* Geometric Separation using a Wavelet-Shearlet Dictionary, *SampTA'09* (Marseille, France, 2009), Proc., 2009.
3. *Donoho D.L., Maleki A., Shahram M., Stodden V., Ur-Rahman I.* Fifteen years of reproducible research in computational harmonic analysis, *Comput. Sci. Engrg.* 11 (2009), 8–18.
4. *Fadilli M.J., Starck J.-L., Elad M., Donoho D.L.* MCALab: Reproducible research in signal and image decomposition and inpainting. *IEEE Comput. Sci. Eng. Mag.* 12 (2010), 44–63.
5. *Guo K., Kutyniok G., Labate D.* Sparse multidimensional representations using anisotropic dilation and shear operators, *Wavelets and Splines* (Athens, GA, 2005), G. Chen und MJ Lai, eds., Nashboro Press, Nashville, TN, pages 189–201, 2006.
6. *Labate D., Lim W.-Q., Kutyniok G., Weiss G.* Sparse multidimensional representation using shearlets, in *Wavelets XI*, edited by M. Papadakis, A.F. Laine, and M.A. Unser, *SPIE Proc.*, 5914, SPIE, Bellingham, WA, 2005, 254–262,
7. *Lim W.-Q.* The discrete shearlet transform: A new directional transform and compactly supported shearlet frames, *IEEE Trans. Image Proc.* 19 (2010), 1166–1180.
8. *Meyer Y.* Oscillating Patterns in Image processing and nonlinear evolution equations, *University Lecture Series*, Amer. Math. Soc. 22 (2002).
9. *Starck J.-L., Elad M., Donoho D.* Image decomposition via the combination of sparse representation and a variational approach, *IEEE Trans. Image Proc.* 14 (2005), 1570–1582.
10. *Hauser S.* Fast finite shearlet transform: a tutorial. Preprint University of Kaiserslautern, 2011.
11. *Laugesen R. S., Weaver N., Weiss G. L., and Wilson E. N.* A characterization of the higher dimensional groups associated with continuous wavelets. *The Journal of Geometrical Analysis*, 12(1): 89–102, 2002.
12. *Mallat S.* *A Wavelet Tour of Signal Processing: The Sparse Way.* Academic Press, San Diego, 2008.

ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ БАЗОВЫХ ПРОДУКТОВ СПУТНИКОВОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

Чимитдоржиев Т.Н.^{1.}, Дмитриев А.В.^{1.}, Кирбижекова И.И.^{1.}, Дагуров П.Н.^{1.},
Базаров А.В.^{1.}, Гармаев А.М.^{2.}, Емельянов К.С.^{3.}, Гусев М.А.^{3.}

¹*Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ,
albaz@ipms.bsnet.ru*

²*Бурятский филиал ФГУП «Рослесинфорг», г. Улан-Удэ,
kingartur@mail.ru*

³*НЦ ОМЗ ОАО «Российские космические системы», Москва,
gusev_ma@ntsomz.ru*

Введение

С развитием информационных технологий в области аэрокосмического зондирования земной поверхности отмечается увеличение количества центров обработки спутниковой информации в академических институтах, университетах, региональных и федеральных ведомствах. При этом в большинстве из них предусмотрена и реализуется собственная номенклатура методов обработки, включая промежуточные так называемые базовые продукты дистанционного зондирования земли (БП ДЗЗ). В частности, под базовыми продуктами радиолокации подразумевается промежуточное звено между первичными «сырыми» радиолокационными спутниковыми данными и тематическими картами. Нередко вследствие элементарной ведомственной разобщенности различные бюджетные организации приобретают одинаковые спутниковые изображения из разных источников, а иногда даже из одного.

В настоящее время назрела необходимость согласования номенклатуры радиолокационных продуктов ДЗ, форматов представления, обозначения и создания программно-аппаратной реализации данной системы для межведомственного использования. Технологии создания, верификации и распространения базовых продуктов ДЗЗ разрабатываются в рамках Федеральной космической программы России Научным центром Оперативного мониторинга Земли «Российские космические системы» совместно с

организациями Роскосмоса, Рослесхоза, РАН и др. К концу 2013 года запланировано создание геоинформационного сервиса по регламентированному созданию, хранению и организации доступа потребителей к БП ДЗЗ. В частности, с 2012 на двухсторонней основе Научным центром ОМЗ ОАО «Российские космические системы» и ИФМ СО РАН выполняется ОКР «Регион Архив», в рамках которой предусмотрено создание автоматизированной системы потоковой обработки радиолокационных данных с перспективных российских и зарубежных радиолокационных систем. На данный момент реализована часть этой системы и в статье сделана попытка довести до потенциальных потребителей назначение и возможности специализированного программного обеспечения по созданию базовых продуктов радиолокации.

Базовые продукты радиолокации (БПР)

Базовый продукт ДЗЗ межведомственного использования (БП) – результат потоковой обработки первичной космической информации, являющийся общей основой для многоцелевой тематической интерпретации в интересах решения задач ведомственных и региональных потребителей. В настоящее время БПР подразделяются на две группы: мультиканальные или мультивременные композитные изображения, прошедшие радиометрическую калибровку и геометрическую коррекцию, и индексные изображения, характеризующие относительное изменение состояния природных объектов подстилающей поверхности в пространстве и времени.

Значительная часть процедуры анализа и дешифрирования аэрокосмических снимков, в том числе и радиолокационных, выполняется пользователями визуально, поэтому основные БПР представляют собой псевдоцветовые композиты, которые формируются по аналогии с общеизвестными программными продуктами ENVI, RAT, PolSARPro и т.п.

Композитные RGB-изображения поляриметрических данных, полученных с применением одного и того же комплекса радиолокационного наблюдения на одной длине волны, но с разной поляризацией, являются базовыми для создания

карт типов подстилающей поверхности. При этом цветовые различия (красный, зеленый и синий слои) псевдоцветных изображений формируются из:

а) красный канал (R) – изображение интенсивности в канале НН-поляризации; зеленый канал (G) – изображение HV-поляризации; синий канал (B) – изображение $\arctg(HV/HH)$;

б) красный канал (R) – изображение $(HH-HV)/(HH+HV)$; зеленый канал (G) – изображение HV-поляризации; синий канал (B) – изображение НН-поляризации;

в) красный канал (R) – изображение НН-поляризации; зеленый канал (G) – изображение HV-поляризации; синий канал (B) – изображение $(HH-HV)$.

Где НН – радиолокационное изображение, полученное на согласованной горизонтальной поляризации, HV – на кросс-поляризации. Первый символ означает поляризацию на излучение, в последнем случае Н – горизонтальная поляризация, второй символ V – вертикальная поляризация при приеме радарного эхо-сигнала.

Карты произошедших изменений подстилающей поверхности формируются в виде эквализованного RGB-композиата из одновременных РСА-изображений, полученных с применением одного и того же комплекса радиолокационного наблюдения на одной длине волны и одной поляризации, в следующем составе: красный канал (R) – изображение за последнюю дату; зеленый канал (G) – квадрат отношения амплитуды изображения за предпоследнюю дату к амплитуде изображения за последнюю дату; синий канал (B) – изображение за предпоследнюю дату.

Карты ледовой обстановки формируются в виде RGB-композиата из одновременных РСА-изображений, полученных с применением одного и того же комплекса радиолокационного наблюдения на одной длине волны и одной поляризации, в следующем составе: красный канал (R) – изображение за первую дату; зеленый канал (G) – изображение за вторую дату; синий канал (B) – изображение за третью дату.

Карты сликов (пленочных загрязнений) на водной поверхности – RGB изображения с выделенными контрастным цветом сликами на водной поверхности в составе или бинарное изображение – маска, в которой сликам соответствуют максимальные, а окружающему фону минимальные значения яркости пикселей.

Карты подтоплений – RGB-композит из одновременных изображений, полученных с применением одного и того же комплекса радиолокационного наблюдения на одной длине волны и одной поляризации; с выделением контуров зон вероятных подтоплений в следующем составе: красный канал (R) – изображение за последнюю дату; зеленый канал (G) – изображение за последнюю дату; синий канал (B) – изображение за предпоследнюю дату.

Карты оценочного распределения биомассы – индексные изображения, получаемые путем расчета поляриметрической когерентности между двумя радиолокационными изображениями, полученными одним и тем же комплексом радиолокационного наблюдения на одной длине волны, но с разной поляризацией регистрируемого излучения.

Карты шероховатости земной поверхности и сомкнутости лесного полога – индексные изображения, получаемые путем расчета энтропии методом Клода-Поттье для двух радиолокационных изображений, полученных одним и тем же комплексом радиолокационного наблюдения на одной длине волны, но с разной поляризацией регистрируемого излучения.

Карты типов поверхности на основе доминирующего механизма рассеяния – индексные изображения, получаемые путем расчета параметра α (альфа) для двух радиолокационных изображений, полученных одним и тем же комплексом радиолокационного наблюдения на одной длине волны, но с разной поляризацией регистрируемого излучения.

Номенклатура радиолокационных БП отвечает следующим направлениям целевого применения: сельское и лесное хозяйство, морская среда, чрезвычайные ситуации, экология. На данном этапе отработка технологий

создания БПР проводится с использованием данных зарубежных систем ДЗЗ, в их числе ENVISAT, RADASAT-1/2, ALOS, COSMO-Skymed.

Описание автоматизированной системы синтеза БПР

В качестве исходной информации для создания БП выступают данные оптического и радиолокационного диапазонов наблюдения. БПР создаются в автоматизированном потоковом режиме с минимальным участием человека. СПО АС БПР представляет собой набор исполняемых программных модулей, каждый из которых выполняет свою конкретную задачу. Модули спроектированы и реализованы как автономные консольные приложения. Однако в целях обеспечения корректного процесса обработки, модули запускаются не самостоятельно, а с помощью диспетчера заданий. Основными этапами, необходимыми для создания БПР являются:

- импорт исходных изображений;
- фильтрация для устранения спекл-шумов;
- создание конкретного продукта;
- геокодирование;
- экспорт в некотором стандартном виде.

АПК написан на языке C++ и к данному моменту содержит более 20 тысяч строк исходного кода. Используются свободно распространяемые библиотеки обработки изображений Orfeo-Toolbox (разрабатываемая под эгидой Французского космического агентства) и набор также свободно распространяемых библиотек обработки геопространственных данных OSGeo4W.

Модуль импорта радиолокационных данных во внутренний формат СПО поддерживает форматы данных следующих радаров с синтезированной апертурой (PCA):

ASAR/Envisat – ASA_IMS_1P (ASAR Image Single-look Complex (high-resolution)), ASA_APS_1P (ASAR Alternating Polarisation Mode complex image); Radarsat-1 – SAR CEOS; Radarsat-2 – SLC (Spotlight, Ultra-Fine, Wide Ultra-Fine,

Multi-Look Fine, Wide Multi-Look Fine, Fine, Wide Fine, Standard, Wide, Extended High, Extended Low, Fine Quad-Pol), SGF, SGX; PALSAR/ALOS – FBS (одна поляризация), FBD (согласованная и кросс-поляризация), PLR (полностью поляриметрический режим); Cosmo-SkyMed уровня обработки SCS (Single-look Complex Slant).

На основе радиолокационных данных были синтезированы следующие виды БП:

- RGB-композицы;
- когерентность интенсивностей на согласованной и поперечной поляризации, характеризующей биомассу лесных массивов;
- параметр α , характеризующий доминирующий тип рассеяния от поверхности, от лесной среды и др.;
- энтропия H , характеризующая «шероховатость» отражающей поверхности, неровности земной поверхности, плотность древостоя и пр.

Проведена оценка точности географической привязки радиолокационных БП, созданных СПО АС БПР. Возможности, преимущества и недостатки созданного программного комплекса по сравнению с известными программными средами для обработки поляриметрических радиолокационных продуктов проиллюстрированы в таблице.

Наиболее богатую палитру инструментов работы со спутниковыми поляриметрическими данными дает PolSARPro, но в этой программной среде совершенно отсутствуют модули по географической привязке. В среде ENVI наиболее полно представлены инструменты по географической привязке, возможности геометрической коррекции, составления мозаик, но отсутствует возможность работы с радиолокационными данными с неполной поляризацией. СПО АС БПР позволяет создавать географически привязанные БПР в автоматизированном режиме, но пока с определённой погрешностью.

Таблица – Создание БПР и процедур географической привязки в СПО и программных средах ENVI и PolSARPro

Продукты и процедуры	СПО АС БПР	ENVI	PolSARPro
<i>Автоматизация процесса в потоковом режиме</i>	+	–	–
<i>I_{hh}</i>	+	+	+
<i>I_{hv}</i>	+	+	+
<i>H</i>	+	–	+
<i>alpha</i>	+	–	+
<i>coherence</i>	+	+	–
<i>RGB-композит</i>	+	+	+
<i>геопривязка</i>	+	+	–
<i>коррекция геопривязки</i>	–	+	–
<i>коррекция за рельеф</i>	–	+	–
<i>мозаика</i>	–	+	–

Верификация БПР на примере тестовых лесничеств Республики Бурятия

В 2012-2013 гг. для отбора наиболее эффективных БПР лесохозяйственного назначения были проведены работы по созданию методики средств верификации на основе данных наземного наблюдения. В качестве пилотного региона была выбрана Республика Бурятия (РБ). Для трех тестовых лесничеств РБ, Куналейское, Мухоршибирское и Иволгинское, были подобраны следующие спутниковые радиолокационные и мультиспектральные данные среднего и высокого разрешения:

- мультиспектральные оптические данные SPOT5 (545, 645, 835 и 1665 нм) с разрешением 10 м и панхроматическое изображение (595 нм) с разрешением 2,5 м, полученные 2 сентября 2011 года (Мухоршибирь);
- радарные полнополяриметрические (hh, hv, vh, vv) данные ALOS PALSAR в L-диапазоне с разрешением 30 м, полученные 25 мая 2006 года по Мухоршибири;

- радарные данные RADARSAT2 двойной поляризации (hh, hv) в С-диапазоне с разрешением 10 м, полученные в сентябре 2012 года по Мухоршибири;
- радиолокационные данные Radarsat2 двойной поляризации (hh, hv) в С-диапазоне (5,3 см) с разрешением 10 м, полученные 29 августа 2013 года по Иволгинскому району;
- радиолокационные данные Cosmo-SkyMed в канале hv в X-диапазоне.

На основе спутниковой информации создан картографический материал и проведена проверка применимости и эффективности БПР для классификации и картирования лесного массивов по породному составу, плотности древостоя и другим параметрам.

Радиоволны дециметрового диапазона (L) обладают большой проникающей способностью, благодаря которой можно изучать скелетную структуру лесного полога (стволы, крупные ветви и т.п.). Радарный сигнал проникает вплоть до почвенного покрова и вглубь него. С уменьшением длины волны (С и X-диапазоны) проникающая способность радиоволн снижается. При средней сомкнутости 0,6 для лесов РБ (Мухоршибирский, Куналейский р-ны) сигнал может достигать нижней границы лесного полога, но для плотных сомкнутых лесных массивов (Иволгинский р-н) глубина проникновения не превышает 5 м (С-диапазон). Таким образом, радиолокационные изображения сантиметрового диапазона для неплотных лесных массивов могут характеризовать общую биомассу растительности, главным образом мелкие структурные элементы (ветви второго порядка, крону, мелкие ветви, веточки, листву, иглы, шишки и т.п.), но для густых лесных массивов наблюдается эффект «насыщения».

Исследование перспектив использования радарных данных ALOS PALSAR, Radarsat2, COSMO-SkyMed показало, что большое количество поляриметрических и текстурных характеристик могут служить маркерами лесной и безлесной среды, но в L-диапазоне большинство из них сильно

коррелирует с гористым рельефом местности и зависят от геометрии съемки. Благодаря меньшей проникающей способности радиоволн сантиметрового диапазона, отраженный сигнал в меньшей степени зависит от рельефа и в С- и Х-диапазонах корреляция слабее. Наиболее перспективным для оценки распределения биомассы представляется использование отношения интенсивностей на согласованной и кросс поляризации или когерентности кросс и согласованного каналов поляризации и их пространственного распределения (текстуры соответствующих изображений).

На эффективность применения БПР также оказывает большое влияние время проведения съемки. В отличие от оптического диапазона спутниковая радиолокация более эффективна в зимние малоснежные сезоны, поскольку в летнее время пик вегетативной деятельности вызывает высокий фоновый «шум» на радиолокационных изображениях, что затрудняет отождествление и классификацию лесных массивов.

На рис. 1 представлено исходное изображение интенсивности радиолокационного отклика PCA Radarsat-2 с поляризацией НН в сантиметровом диапазоне, полученное 29 августа 2013 года, а также примеры БПР.

Рис. 1а демонстрирует, что лесные массивы обладают более высокой яркостью по сравнению с участками относительно гладкой водной и почвенной поверхности. В то же время на большей части озера Байкал можно наблюдать повышенный радиолокационный отклик на волнах, сравнимых по размерам с длиной радиолокационного сигнала. Также неровность/шероховатость отдельных участков почвы или присутствие плотного травяного покрова и кустарников, свойственных концу августа, вызвали радиолокационный отклик, сравнимый по интенсивности с отражением от лесной среды, и создали повышенный фоновый «шум», затрудняющий идентификацию лесных массивов. RGB-композиции, использующие интенсивность каналов НН, НV, а также их комбинации в виде суммы, разности и отношения, позволяют уверенно

отождествить по цветовым отличиям такие объекты как водная поверхность, с/х поля и уголья, лесные массивы, населенные пункты.

На рис. 1б-г также представлены такие БПР, как α и H , демонстрирующие сезонное отсутствие корреляции с рельефом местности и в некоторой степени представляющие распределение и плотность вегетации по исследуемой территории.

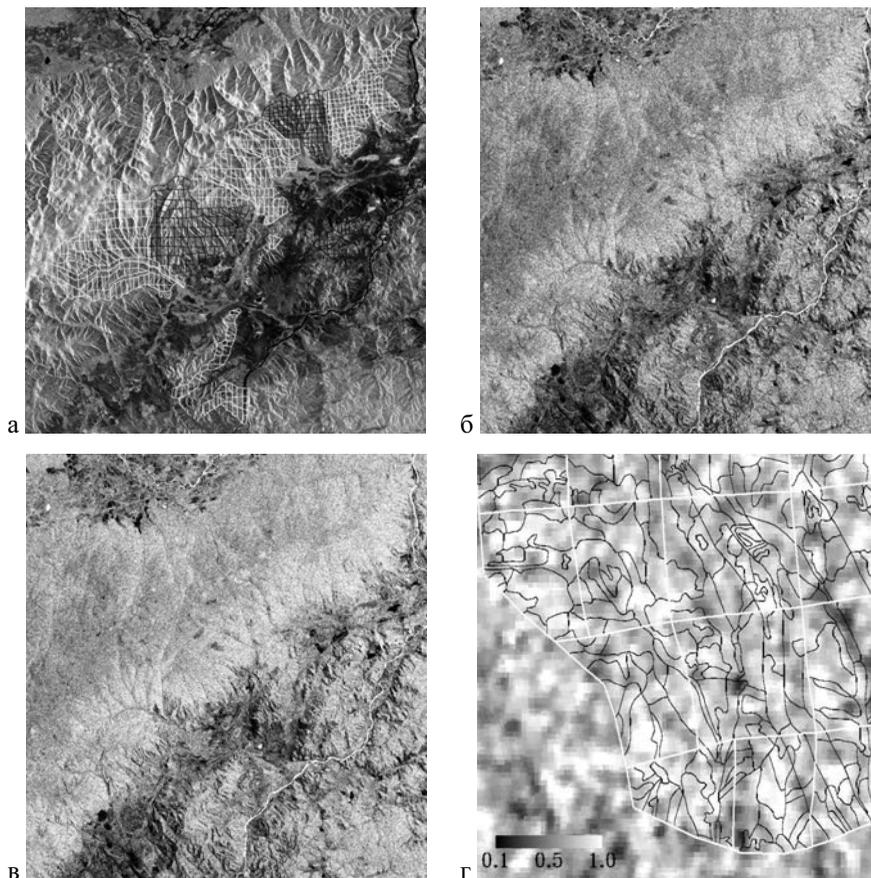


Рис. 1. – Интенсивность в канале hh (а) и примеры БПР по Иволгинскому лесничеству Республики Бурятия: б) параметр α ; в) энтропия H и г) фрагмент изображения энтропии с сеткой лесных кварталов и выделов на основе радиолокационных данных Radarsat2 29 сентября 2013 г.

Закключение

Разрабатываемое специализированное программное обеспечение автоматизированного создания базовых продуктов радиолокации позволяет в автоматическом режиме создавать БПР с целью получения оперативной и достоверной информации о текущем состоянии и динамике лесов и хозяйственной деятельности на любой интересующей территории. СПО АС БПР способствует процессу мониторинга территорий, освобождая оператора от рутинной обработки первичных данных ДЗЗ при формировании тематических продуктов обработки глубокого уровня.

Список литературы

1. *Chimitdorzhiev T.N., Emelyanov K.S., Kirbizhekova I.I., Garmaev A.M., Gusev M.A.* Mapping of forest resources of Republic Buryatia based on radar and multispectral data // Proceeding of the 6th International Workshop on Remote Sensing and Environmental Innovations in Mongolia. Ulaanbaatar. 10-11 June 2013. Pp. 43-46.
2. *Арманд Н.А., Чимитдоржиев Т.Н., Ефременко В.В., Захаров А.И., Семенов А.А., Мошков А.В.* О возможностях совместной обработки радиолокационных изображений L-диапазона и спектрональных снимков оптического диапазона для классификации лесных массивов // Радиотехника и Электроника. – 1998. – Т. 43. – № 9. – С. 1070-1075.
3. *Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н.* Дистанционное зондирование растительности оптико-микроволновыми методами // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008. №6. С.64–73.
4. *Гусев М.А., Денисов П.В., Кирбижекова И.И., Дмитриев А.В.* Базовые продукты ДЗЗ на основе радиолокационных данных // Вестник СибГАУ. - № 5 (51). - 2013. - С.82-85;
5. *Кирбижекова И.И., Батуева Е.В.* Картирование и мониторинг лесных сред на основе поляриметрических радарных данных по Байкальскому региону // Вестник СибГАУ. - № 5 (51). - 2013. - С.73-76;
6. *Кирбижекова И.И., Чимитдоржиев Т.Н., Гармаев А.М., Гусев М.А.* Картография лесных ресурсов республики Бурятия на основе поляриметрических данных ALOS PALSAR и мультиспектральных данных SPOT5 // ИНТЕРЭСКПО ГЕО-Сибирь-2013. Т. 4. №1. С. 129-133.
7. *Кирбижекова И.И., Чимитдоржиев Т.Н., Гармаев А.М., Гусев М.А.* Применение радиолокационных данных для картографии биомассы лесной растительности в условиях сложного рельефа // Известия ВУЗов. Физика. - Т.56, №8/2. - 2013. - С.201-203;

8. *Чимитдоржиев Т.Н., Кирбижекова И.И., Гармаев А.М., Быков М.Е., Гусев М.А.*, Использование БП ДЗЗ для решения задач лесоустройства на примере Республики Бурятия // *Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве: доклады V Всероссийской конференции, посвященной памяти выдающихся ученых-лесоводов В.И.Сухих и Г.Н.Коровина (Москва, 22-24 апр. 2013)*. – М. ЦЭПЛ РАН, 2013 г., С.228-232.
9. *Чимитдоржиев Т.Н., Гармаев А.М., Кирбижекова И.И., Емельянов К.С., Гусев М.А., Базаров А.В.* Комбинирование методов спутниковой радиолокации и спектрального анализа для исследования лесных ресурсов Республики Бурятия // *Вестник СибГАУ*. 2013. № 5(51). С.70-73.

**РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА АНАЛИЗА
РАЗРАБОТКИ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ - ИСАР-II.
ПОЛИМЕРНОЕ ЗАВОДНЕНИЕ**

Жумагулов Б.Т., Данаев Н.Т., Мухамбетжанов С.Т., Ахмед-Заки Д.Ж.,
Иманкулов Т., Турар О., Маткерим Б.

*Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, Алматы,
Darhan_a@mail.ru*

Введение

В настоящее время на нефтегазовых месторождениях часто используется метод заводнения для нефтедобычи и повышения пластового давления. На средних стадиях разработки высоковязких нефтяных месторождений всегда возникает проблема снижения нефтеотдачи пласта, падение пластового давления и повышение обводненности продукции. Метод закачки полимеров в продуктивный пласт в настоящее время широко используется в нефтяной промышленности в качестве загустителей воды и рассматривается как один из эффективных третичных методов повышения нефтеотдачи пластов с высокой обводненностью и низким пластовым давлением. При таком методе вытеснения получаем увеличение вязкости и уменьшение проницаемости по водной фазе, что приводит к повышению эффективности заводнения и увеличению коэффициента нефтеотдачи [1-3].

В статье рассматривается случай полимерного заводнения, когда в качестве вытесняющего агента используется гелеполимер, растворенный в воде – геллан [1]. По химическому строению геллан является полимером из группы полисахаридов, которая состоит из повторяющихся звеньев остатков 4 полисахаридов: двух β -D-глюкоз, β -D-глюкуроновой кислоты и α -L-рамнозы [1]. Лабораторные эксперименты показывают относительную эффективность применения геллана, который значительно влияет на характер распределения

нефтенасыщенности. Результаты экспериментов в зависимости от концентрации представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Результаты экспериментов на образцах керна [1]

Absolute gas permeability, Darcy	Concentration of polymer Solution (gellan), %	Oil displacement coefficient, %
0.041	0.5	26
0.051	0.1	46
0.295	0.25	53
0.322	0.1	62
0.324	0.35	54

Физическая модель. Рассмотрим задачу, когда через нагнетательную скважину, начиная с некоторого момента, закачивается вода заданной температуры с растворенным в ней полимером. На нагнетательной и добывающей скважинах задано либо давления P_{inj} и P_{prod} ($P_{inj} > P_{prod}$), либо объемы закачиваемой воды или дебиты скважин. Нагнетаемая вода вытесняет оставшуюся в пласте нефть, которая поступает в добывающую скважину. Требуется исследовать данную проблему и разработать компьютерную модель анализа массообменных процессов при вытеснении нефти водой (с содержанием полимера) в пласте.

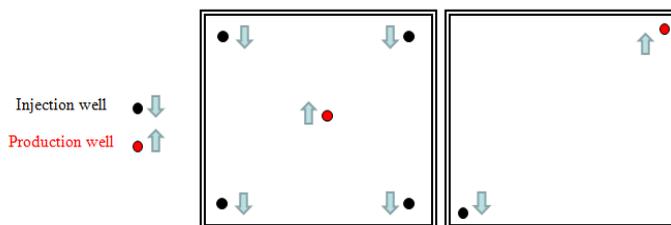


Рис. 1. – Схемы расположения нагнетательных и добывающих скважин

Математическая модель и постановка задачи

Массоперенос полимера в пласте при вытеснении нефти протекает по сложному механизму, поскольку полимер участвуют в нескольких параллельно идущих процессах: распределение между нефтью и водой, адсорбция из обеих фаз на поверхности породы из воды и нефти [3].

Математическая модель двухфазной фильтрации состоит из уравнений баланса воды и нефти в потоке, обобщенного закона движения Дарси и уравнения для концентрации полимера со следующими допущениями:

- течение двумерное;
- жидкости несжимаемые;
- пренебрегаем капиллярными эффектами;
- не учитываются гравитационные силы;
- поток подчиняется закону Дарси.

Система уравнений для области Ω с границей $\partial\Omega$ может быть записана в следующем виде:

$$m \frac{\partial s}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{v}_1 = q_1 \quad (1)$$

$$-m \frac{\partial s}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{v}_2 = q_2 \quad (2)$$

$$\vec{v}_i = -K_0 \frac{f_i(s)}{\mu_i} \nabla P \quad (3)$$

где K_0 – тензор проницаемости, s - насыщенность воды, q_i – источник или сток.

Уравнение для концентрации с учетом диффузии и адсорбции:

$$m \frac{\partial}{\partial t} (c_1 s + (1-s)c_2) + \frac{\partial a}{\partial t} + \operatorname{div}(v_1 c_1) + \operatorname{div}(v_2 c_2) = \operatorname{div}(D_1 s_1 \nabla c_1 + D_2 s_2 \nabla c_2) + q_1 c_1 + q_2 c_2 \quad (4)$$

с уравнением кинетики массообмена в пористой среде:

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \frac{1}{\tau} \cdot (G(c) - a); \quad G(c) = \begin{cases} 1, & c > c^* \\ [0,1], & c = c^* \\ 0, & c < c^* \end{cases}$$

при $c_1 = c$ и $c_2 = \varphi(c)$, где c_1 и c_2 – концентрация полимера в водной и нефтяной фазе соответственно, a – функция адсорбции, D_1 и D_2 – коэффициенты

диффузии, c^* – известное значение критической концентрации мицеллообразования примеси и $0 < c^* < 1$.

Таким образом, мы рассматриваем математическую модель, описывающую процесс вытеснение нефти методом полимерного заводнения с начальными и граничными условиями:

$$s|_{t=0} = s_0(x), \quad c|_{t=0} = c_0(x), \quad a|_{t=0} = a_0(x), \quad T|_{t=0} = T_0(x) \quad (5)$$

$$\left. \frac{\partial s}{\partial n} \right|_{\partial\Omega} = 0; \quad -D \left. \frac{\partial c}{\partial n} \right|_{\partial\Omega} = \gamma_c \cdot V_c; \quad \left. \frac{\partial p}{\partial n} \right|_{\partial\Omega} = \gamma_p \cdot V_p; \quad \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\partial\Omega} = \gamma_T \cdot V_T; \quad (6)$$

где $\partial\Omega$ – граница области.

Вычислительный метод

Используется алгоритм раздельного определения полей давления и насыщенности (концентрации). По заданному распределению насыщенности и концентрации на n -ом временном слое определяется давление на этом же слое, с использованием которого находятся насыщенность и концентрация на $n+1$ -ом временном слое. Затем вычисления повторяются в той же последовательности. Для проверки точности результатов контролируется совпадение дебитов добывающей и нагнетательной скважин, сравниваются количество закаченного полимера и количество добытого и находящегося в пласте полимера. Задается начальная нефтенасыщенность пласта, начальное распределение давления, технологические и физические параметры пласта и обеих фаз. С целью получения согласованности единиц измерений и порядка искомых переменных уравнение приводится к безразмерному виду.

В таблице 2 представлены параметры пласта, которые использовались для расчета данной задачи. Результаты расчетов получены в случае, когда относительные фазовые проницаемости и функция адсорбции имеют следующий вид:

$$f_1(s) = s^{3.5}; \quad f_1(s) = (1 - s)^{3.5};$$

$$\varphi(c) = 0,3 * c.$$

Таблица 2 – Параметры пласта

Параметр	Значение	Размерность	Описание
m	0,2	–	Пористость среды
μ_{oil}	0,3	сПз	Вязкость нефти
μ_{wat}	0,1	сПз	Вязкость воды
k_abs	0,15	Дарси	Абсолютная проницаемость
P_inj	60	атм.	Давление нагнетания
P_prod	10	атм.	Давление добывания
D_wat	0,3	см ² /сут	Коэффициент диффузии полимера в воде
D_oil	0,1	см ² /сут	Коэффициент диффузии полимера в нефти

Решая задачу по явной схеме, мы столкнулись с проблемой ограничения на шаг по времени, которое связано с устойчивостью схемы. Поэтому эта схема приводит к большим затратам времени на решение задачи, что неудобно. Для обеспечения устойчивости схемы необходимо выполнение следующего условия:

$$\tau < \frac{m\Delta x\Delta y}{2}.$$

От этих ограничений избавились путем перехода от явной схемы к неявной. Но при этом усложнился процесс решения системы алгебраических уравнений, так как увеличивается количество выполняемых операций.

Устойчивость и сходимость разностной схемы проверялись путем сравнения с тестовыми данными решений при заданной суммарной скорости. При разработке программы использована гибридная технология организации параллельных вычислений OpenMP и MPI [8], а также применена CUDA–технология для визуализации и обработки данных.

Результаты вычислительных экспериментов

Результаты численных расчетов, в частности распределения давления, температуры и концентрации полимера, полученные в случае, когда $\varphi(c) = \lambda c$ ($\lambda = 0,3$), показаны на рисунке 2.

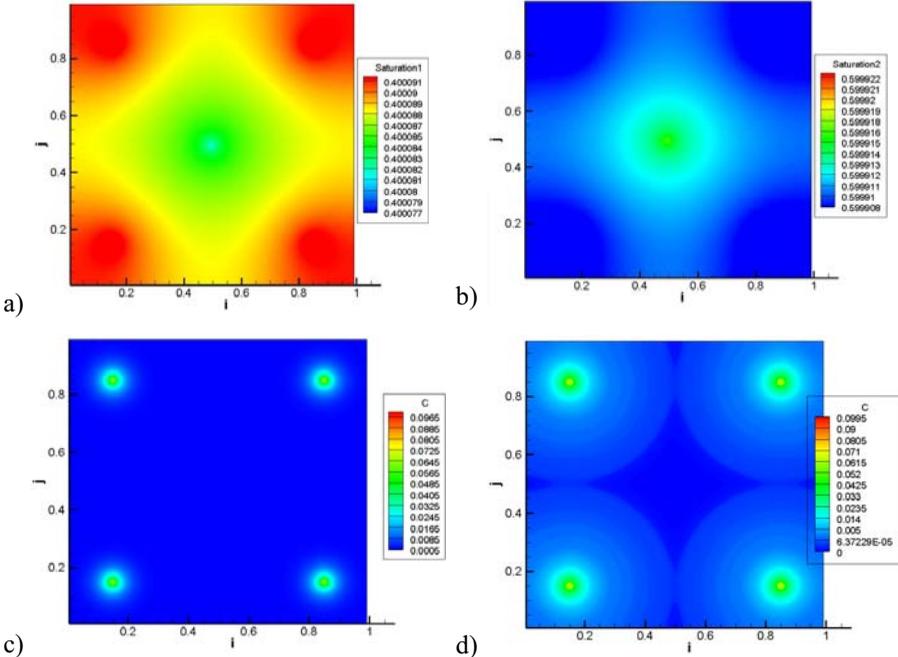


Рис.2. – Графики распределения а) насыщенности воды;
 б) насыщенности нефти; в) концентрации полимера через 3 месяца;
 г) концентрации полимера через 10 месяцев

Определены основные технологические показатели, такие как средняя нефтенасыщенность, текущая нефтеотдача, доля нефти в добываемой продукции, количество отобранного полимера на добывающей скважине, общее количество нефти и воды, добытой за время T_{end} .

Ниже представлены графики распределения давления, насыщенности и концентрации в трехмерном виде.

Разработка гидродинамического симулятора

Для проектирования численной программы-анализатора и распределенной системы решения технологической задачи закачки полимера с различными температурными режимами в продуктивный пласт использована единая методология на основе технологий Model Driven architecture (MDA) [9]. Далее реализуется детализация свойств и специфики задачи и учет характеристик высокопроизводительного кластера URSA-II [10]. В завершении формируется «полуавтоматическая» генерация программного кода, реализующего параллельный численный алгоритм.

На базе построенной математической и компьютерной модели движения жидкости в пористой среде с учетом процессов тепло и массопереноса предлагается прототип – Web гидродинамический симулятор – распределенная вычислительная система для анализа и разработки нефтегазовых месторождений – ИСАР II. Особенности данной системы является то, что все расчеты численных моделей ведутся на распределенных высокопроизводительных вычислительных ресурсах, организуется распределенная обработка и хранение данных, а пользователь в промышленных условиях через Интернет (включая мобильные платформы) получает доступ к автоматизированному рабочему месту технолога-аналитика. Ввод-вывод данных, расчет и анализ результатов по выбранной модели решения технологической задачи можно осуществлять параллельно и оперативно из любой точки с доступом в Интернет. Таким образом, система дополняема новыми решениями моделей технологических задач нефтедобычи, оперативно обновляема и пользователь через авторизацию в системе имеет доступ к данным и результатам расчетов гидродинамического симулятора.

Система представляет собой интерактивный пакет для анализа и оценки технологической задачи гидродинамического моделирования нефтегазового пласта при закачке полимера с различными температурными режимами в продуктивный пласт и использованием многопроцессорной техники. Модуль

визуализации представлен в виде Web-модуля, исполняющегося на сервере (кластере) и использующего аппаратные средства графической подсистемы (GPU) со стороны клиента (рис. 3,4).

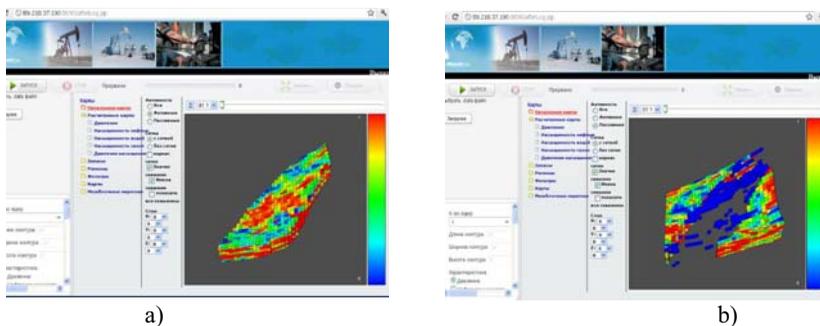


Рис. 3. – Web симулятор нефтяного пласта -3D модель: а) активные, б) неактивные блоки

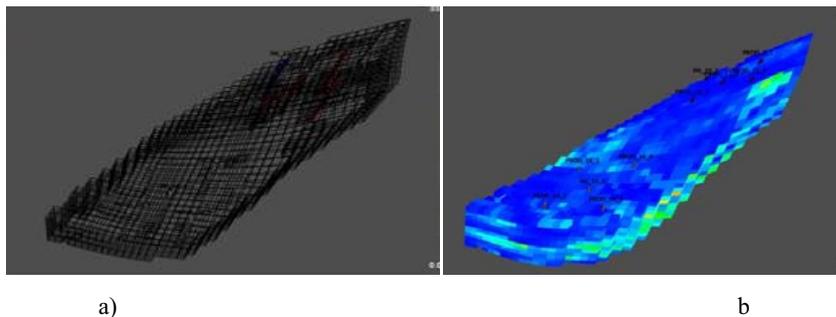


Рис. 4. – Визуализация нефтяного пласта -3D модель: а) скелет пласта, б) пласт без сетки

Заключение

В работе исследованы вопросы математического и численного моделирования процесса вытеснения нефти с использованием технологии закачки полимера (геллана) в нефтяной пласт. Были проведены численные эксперименты и определены основные технологические показатели: среднее значение насыщенности нефти, текущая нефтеотдача, текущий дебит нефти и

воды, количество отобранной нефти на данный момент времени, количество отобранного полимера. Построены последовательный и параллельный вычислительный алгоритмы решения задачи. Представлена разработанная Web-распределенная вычислительная система расчетов параметров рассматриваемой задачи в режиме реального времени с разными уровнями детализации гидродинамического моделирования, проведения вычислений и их анализа через удаленный доступ и Интернет с использованием высокопроизводительного кластера. Полученные результаты могут быть использованы для анализа данных и прогноза условий эксплуатации месторождений при работе в системе нагнетательных и эксплуатационных скважин.

Список литературы

1. *R.Ibragimov, I.Gusenov, G.Tatykhanova, Zh.Adilov, N.Nuraje, S.Kudaibergenov.* Study of Gellan for Polymer Flooding // Journal of Dispersion Science and Technology. – London, England. - 2013.
2. *Ларпу Лейк.* Основы методов увеличения нефтеотдачи. – Остин, 2005. – 449 с.
3. *Tor Austad, Steinar Ekkrann, Ingebret Fjelde, Knut Taugbol.* Chemical flooding of oil reservoirs Part 9. Dynamic adsorption of surfactant onto sandstone cores from injection water with and without polymer present // Colloids and Surfaces, A: Physicochemical and Engineering Aspects (127) - 1997. – С.69-82
4. *Zhu Wei-Yao, Sun Peng-Xiao, Ju Yan.* A new thermal gel-polymer/polymer flooding compositional simulator // The seventh Asian congress of fluid mechanics. (Dec 8-12). - 1997.
5. *Mukhambetzhano S.T., Akhmed-Zaki D.Zh.* Modeling of a problem of phase transitions at not isothermal filtration and qualitative properties of the decision // Wiertnictwo Nafta gaz – Zakopane, Poland, 2008. - Vol. 25/2. - P. 541-550.
6. *Х. Азиз, Э. Сеттари.* Математическое моделирование пластовых систем. London: Applied science publishers ltd. – 476 с.
7. *А.А.Самарский, А.В.Гулин.* Численные методы. - Москва: Наука, 1989. - 432 с.
8. *Бахтин В.А.* Гибридная модель параллельного программирования DVM/OpenMP // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. – Москва, 2008. – 122 с.
9. *Frankel D.* Model Driven Architecture. Applying MDA to Enterprise Computing. – Indiana: Wiley Publishing, 2003. – 567 p.
10. *ursa.kaznu.kz.*

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Ахмед-Заки Д.Ж.	126	Климова Е.Г.	74
Базаров А.В.	114	Копайгородский А.Н.	4
Балдаков Н.А.	58	Кошкарев А.В.	49
Белов В.В.	90	Курепина Н.Ю.	42
Гармаев А.М.	114	Ловцкая О.В.	58
Гусев М.А.	114	Массель Л.В.	4
Дагуров П.Н.	114	Маткерим Б.	126
Данаев Н.Т.	126	Медведев А.А.	49
Дмитриев А.В.	114	Мухамбетжанов С.Т.	126
Добрецов Н.Н.	35	Паниди Е.А.	14
Дьяченко А.В.	58	Платов Г.А.	74
Емельянов К.С.	114	Пчельников Д.В.	35
Жижимов О.Л.	24	Ротанова И.Н.	49
Жумагулов Б.Т.	126	Рыбкина И.Д.	42
Зиновьев А.Т.	58	Симонов К.В.	100
Иманкулов Т.	126	Скачков Д.М.	24
Кадена Л.	100	Стойцева Н.В.	42
Казakov Э.Э.	14	Тарасенков М.В.	90
Капралов Е.Г.	14	Терехов А.В.	14
Киланова Н.В.	74	Турар О.	126
Кирбижекова И.И.	114	Чимитдоржиев Т.Н.	114

Научное издание

**ОБРАБОТКА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ И
ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ И
МАСШТАБНЫХ АНТРОПОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ
(DPRS'2013)**

30 сентября –04 октября 2013 г.

Избранные труды конференции

Подготовка оригинал-макета: О.В. Ловцкая

Подписано в печать 01.12.2013. Формат 60x84/16.

Бумага офсетная. Усл.п.л. 4,85

Тираж 100 экз. Заказ 34.

Институт водных и экологических проблем СО РАН
656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1

Отпечатано в типографии ООО «Пять плюс»
656049, г. Барнаул, пр. Красноармейский, 73
тел. (385-2) 62-85-57, e-mail: fiveplus07@mail.ru
www.five-plus.ru