

Тема «Мониторинг»

Разработка методов и технологий спутникового мониторинга для научных исследований глобальных изменений и обеспечения безопасности.

Гос. Регистрация № 01.20.0.2.00164

Тема выполняется в следующих приоритетных направлениях

5.27, 5.28, 6.17, 6.20, 6.21, 6.23, 6.24, 6.26

Научные руководители:

д.т.н. Е.А. Лупян

Научные руководители направлений:

«Мониторинг-технологии»	д.т.н. Лупян Е.А.
«Мониторинг-биосфера»	д.т.н. Барталев С.А.
«Мониторинг-климат»	д.ф.-м.н. Шарков Е.А.
«Мониторинг-океан»	д.ф.-м.н. Шарков Е.А.
«Мониторинг-Атмосфера»	д.ф.-м.н. Ерохин Н.С.
«Мониторинг-Эффект»	к.ф.-м.н. Форш А.А.

Основные результаты

Настоящая тема посвящена разработке научных основ, методов и технологий спутникового мониторинга для планеты Земля, а также исследования различных процессов происходящих на нашей планете с помощью современных методов дистанционного зондирования. В рамках темы проводятся исследования в следующих основных направлениях:

- **«Мониторинг-технологии»** - Разработка научных основ, методов и алгоритмов для автоматизированного анализа долговременных рядов спутниковых наблюдений, создание и ведение долговременных архивов данных спутниковых наблюдений, разработка методов и технологий дистанционного мониторинга различных природных и антропогенных процессов и явления.
- **«Мониторинг-биосфера»** Разработка научных основ, методов и алгоритмов использования технологий спутникового мониторинга для исследования состояния биосферы. Изучение процессов, происходящих в биосфере планеты с использованием современных возможностей дистанционного мониторинга. Мониторинг состояния растительного покрова на территории Северной Евразии.
- **«Мониторинг-климат»** Разработка научных основ, методов и алгоритмов использования технологий спутникового мониторинга для исследования глобальных изменений. Мониторинг и изучение глобального тропического циклогенеза как одного из климатообразующих факторов.
- **«Мониторинг-океан»** Разработка научных основ, методов и алгоритмов использования технологий спутникового мониторинга для исследования различных процессов, происходящих в Мировом Океане. Теоретическое и экспериментальное исследование динамических и волновых процессов в верхнем слое океана и в приподной атмосфере на основе данных спутникового дистанционного зондирования. Мониторинг и изучение природных и антропогенных процессов в пограничных морях России.
- **«Мониторинг-Атмосфера»** Разработка научных основ, методов и алгоритмов использования технологий спутникового мониторинга для исследования различных

процессов, происходящих в атмосфере Земли. Теоретическое и экспериментальное исследование динамических и волновых процессов в атмосфере Земли, в том числе с использованием современных возможностей спутниковых наблюдений.

- **«Мониторинг-Эффект»** Разработка методов и технологий построения современных систем дистанционных наблюдений и методов обработки поступающих от них данных.

В 2013 году в соответствии с планом научных работ Института космических исследований в рамках темы «Мониторинг» проводились работы по перечисленным Выше направлениям. Основные результаты работ приведены в настоящей главе отчета в соответствующих разделах.

Раздел 4.1. Мониторинг-технологии

Отв. исп. д.т.н. Лупян Е.А.

4.1.1. Развитие методов и технологий автоматической обработки спутниковых данных, поступающих от российских (в том числе, Метеор М, Канопус В, Электро Л) и перспективных зарубежных (в том числе, LANDSAT 8, NPP) спутниковых систем для решения задач контроля состояния и исследования окружающей среды.

На основе технологий автоматизированной обработки данных, созданных в ИКИ РАН, были разработаны методы, алгоритмы и программное обеспечение для автоматизированной обработки данных спутников Метеор М, Канопус В, Электро Л и NPP, получаемых в центрах Единой территориально распределенной системы работы с данными ДЗЗ. Были также разработаны методы, алгоритмы и программное обеспечение для автоматизированной обработки данных спутника LANDSAT 8, получаемых из Европейского центра архивации данных и архивов геологической службы США (USGS).

Разработанные методы и алгоритмы ориентированы на получение базовых информационных продуктов, необходимых для дальнейшей тематической обработки. Одной из особенностей созданных методов является то, что они позволяют организовывать архивы базовых информационных продуктов в таком виде, чтобы возможно было оперативно получить доступ к хранимой в них информации, в том числе для организации работы с ней в картографических WEB-интерфейсах. При этом формирование и хранение базовых информационных продуктов осуществляется таким образом, чтобы пользователи имели возможность получать доступ к полному набору спектральных каналов в полном пространственном разрешении.

На основе созданных методов, алгоритмов и программного обеспечения созданы автоматизированные блоки обработки спутниковых данных в центрах приема Научно-исследовательского центра космической гидрометеорологии НИЦ "Планета" и ИКИ РАН. Созданные блоки позволили организовать оперативное поступление базовых информационных продуктов в различные системы, поддерживаемые НИЦ "Планета" и ИКИ РАН для решений научных и прикладных задач. Примеры создаваемых базовых продуктов используемых в различных информационных системах приведены на рис. 4.1.1.1 - 4.1.1.3

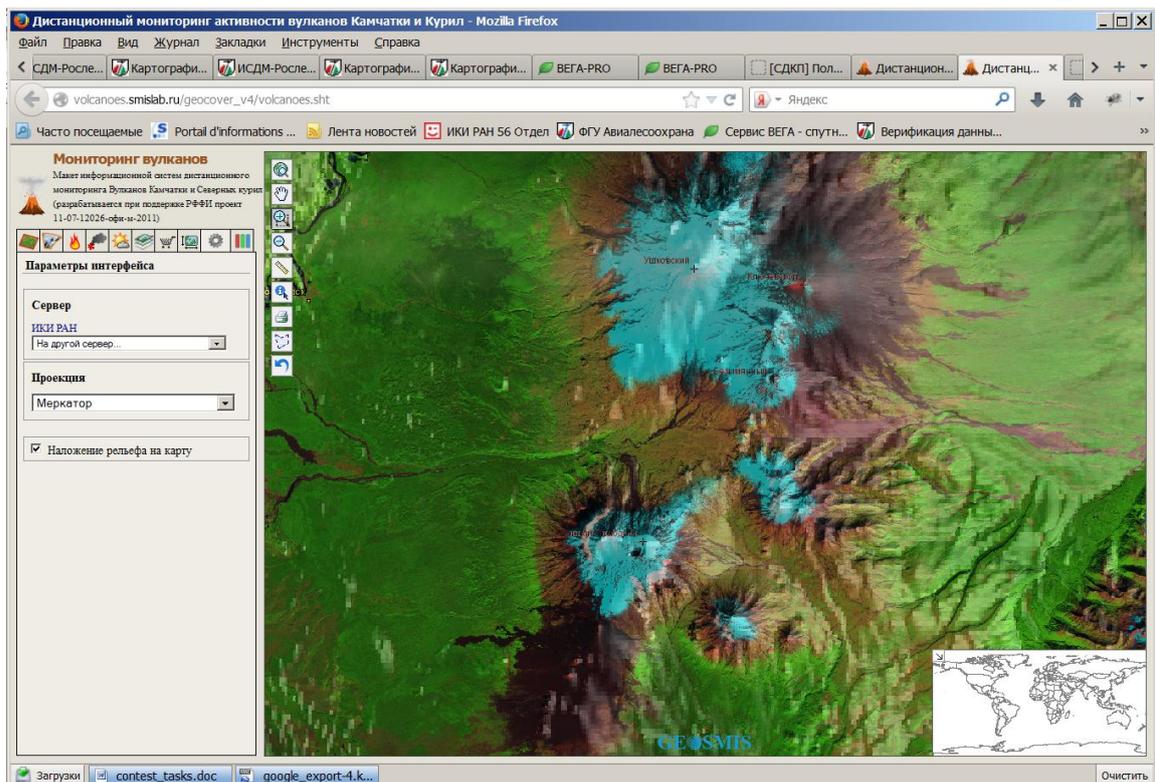


Рис 4.1.1.1

Базовый информационный продукт, полученный на основе данных спутника Landsat 8. Пример использования в системе мониторинга вулканической активности VolSatView для анализа лавовых потоков вулканов Ключевской и Плоский Толбачик

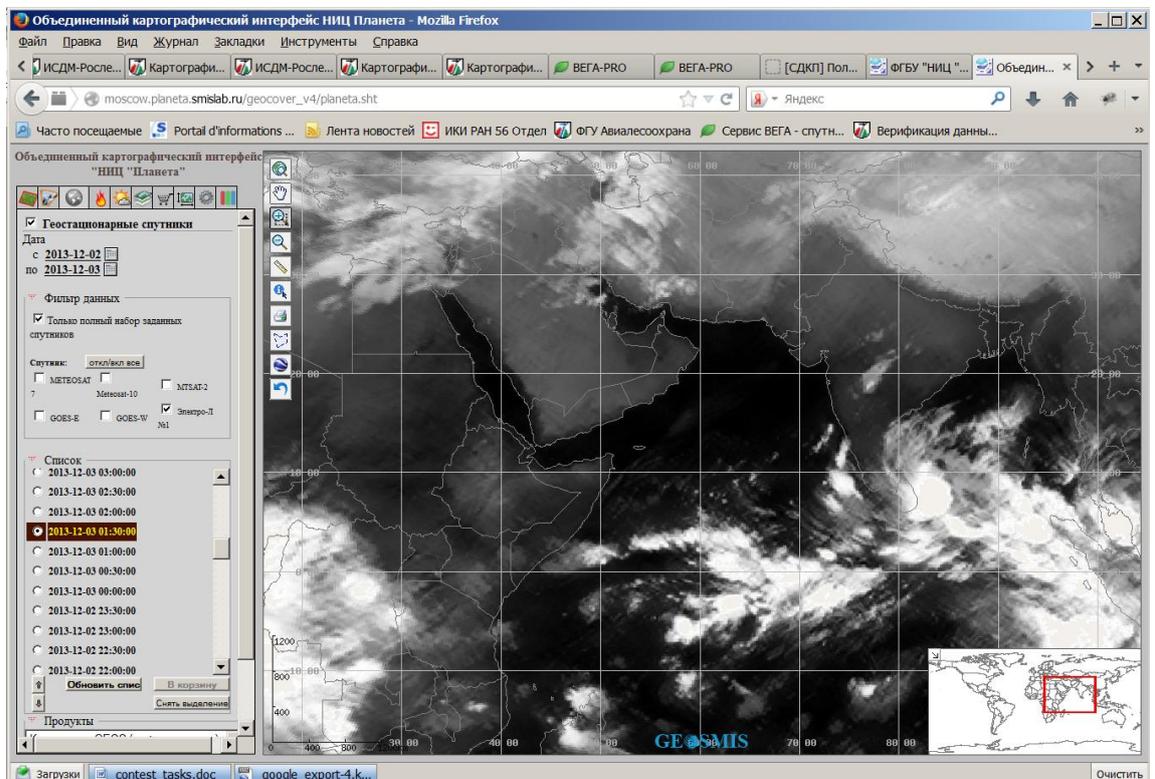


Рис 4.1.1.2

Базовый информационный продукт, полученный на основе данных спутника Электро Л. Пример использования в объединенной системе работы с данными НИЦ Планета.

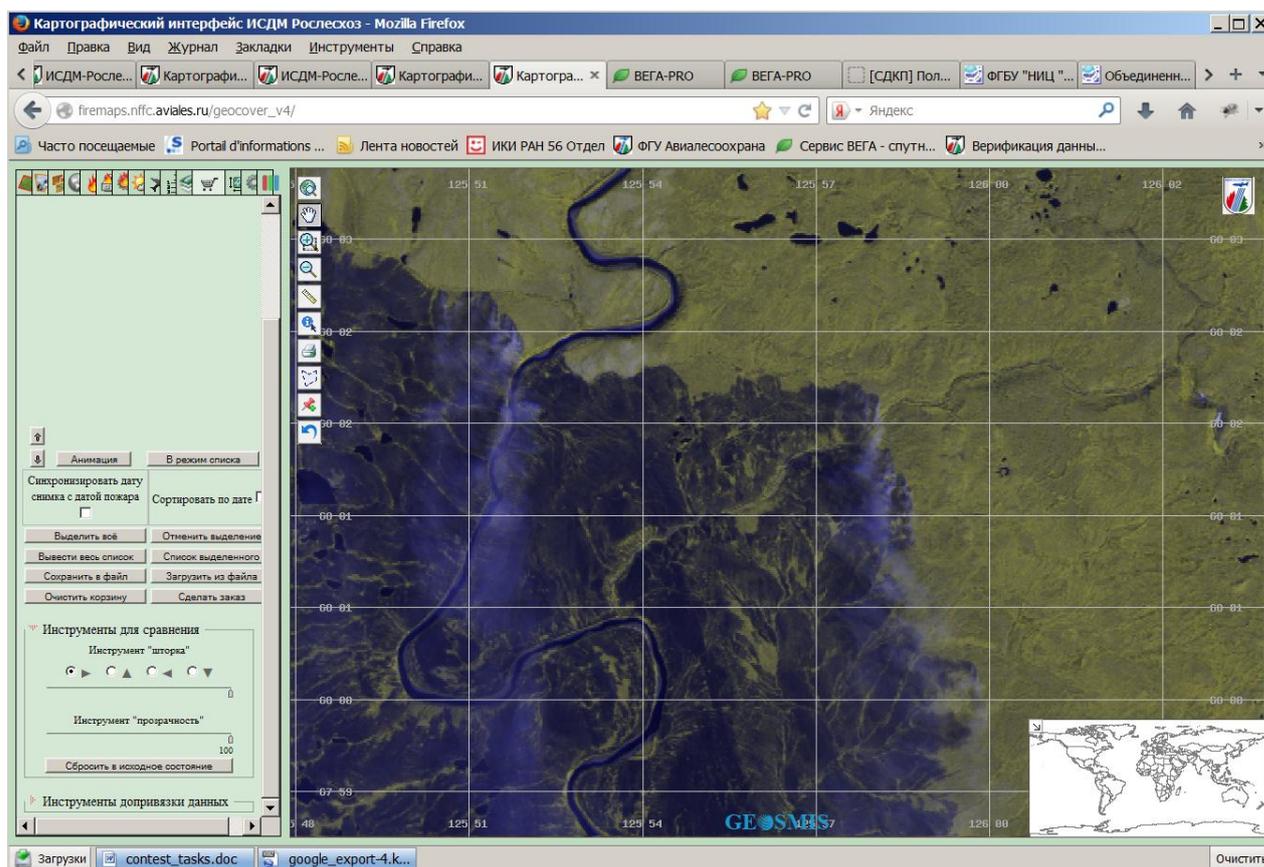


Рис 4.1.1.3

Базовый информационный продукт, полученный на основе данных спутника Канопус В. Пример использования в Информационной системе дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ Рослесхоз).

4.1.2 Развитие методов и технологий архивации спутниковых данных для обеспечения мониторинга и анализа состояния окружающей среды, природных и антропогенных объектов (в том числе, методов ведения сверхбольших архивов данных).

Отв. исп. с.н.с. к.т.н. Прошин А.А., м.н.с. Балашов И.В. отд.56

В 2013 году была разработана новая схема ведения долговременных архивов данных, ориентированная на то, чтобы обеспечить непосредственный доступ пользователей к полной спутниковой информации в исходном разрешении. Эта схема позволяет вести сверхбольшие архивы, организация которых обеспечивает быстрый выбор необходимой информации. Данные в исходном разрешении хранятся в архиве в виде TIFF файлов, содержащих все спектральные каналы, имеющиеся у соответствующего прибора в проекциях, близких к проекции, в которой осуществляется съемка. Дополнительно для каждого файла хранится "обзорный" (прореженный) файл. Хранение обзорного файла осуществляется также в формате TIFF с пирамидой разрешений. Такая схема хранения позволяет, с одной стороны быстро строить покрытия достаточно больших территорий, а с другой стороны организовывать достаточно быстрый доступ к данным полного пространственного разрешения. Особо следует отметить, что при хранении многоканальных данных исходного разрешения в одном TIFF файле обычно удается подобрать метод сжатия информации без потери качества. Этот метод работает достаточно эффективно на конкретном типе данных. Таким образом удается компенсировать

избыточность объемов хранения, связанных с дополнительным хранением обзорных изображений.

Разработанная схема была использована в ИКИ РАН для организации ведения данных различных спутниковых систем, в том числе данных, получаемых со спутников серии LANDSAT. Схема позволила организовать эффективное ведение сверхбольших постоянно пополняющихся архивов данных этих спутников. На начало декабря 2013 года архивы ИКИ РАН содержали более 500 000 сцен спутников LANDSAT. Архив покрывает территорию Северной Евразии и содержит данные за период с 1989 года по настоящее время. Архив доступен пользователям информационных систем, ведущихся в ИКИ РАН для решения различных научных задач. В том числе полномасштабный доступ к этому архиву имеют пользователи сервиса ВЕГА-Science (<http://sci-vega.ru/>).

4.1.3 Разработка методов и технологий автоматизированного получения данных дистанционного зондирования, в том числе:

4.1.3.1 Разработка технологий автоматизированного поступления спутниковых данных и результатов их обработки в научные архивы.

Отв. исп. с.н.с. к.т.н. Прошин А.А., м.н.с. Балашов И.В. отд.56

Была разработана технология организации автоматического получения наборов различных информационных продуктов из центров архивации и распространения различной информации о состоянии окружающей среды. Технология предназначена для потокового получения данных и построения систем автоматической актуализации наборов данных по мере их обновления в центрах распространения. Технология ориентирована на использование в различных системах мониторинга состояния окружающей среды, природных и антропогенных объектов. Технология позволяет реализовывать максимально стандартизированные схемы получения данных из различных источников.

При проектировании технологии были приняты во внимание как особенности известных источников спутниковых и метеорологических данных, так и потребности автоматических систем пополнения архивов и обработки данных, существующих в ИКИ РАН. Ключевой особенностью технологии является поддержка сложной системы заказа данных, находящихся в неоперативном доступе.

Для реализации технологии была создана программная инфраструктура, состоящая из:

- программного ядра, обеспечивающего общие для всех источников функции и задачи, такие как обновления очереди, выборки данных для скачивания, заказ данных и само скачивание. Кроме этого, ядро системы поддерживает механизм «плагинов» для единообразного подключения новых источников данных и решает общие для них задачи в соответствии с общей логикой работы;
- исполняемые сценарии, регулярно вызывающие функции ядра для выполнения необходимых действий;
- системы ведения очередей, включающей в себя базу данных очередей и сопутствующий программный интерфейс для работы с ними.

Работа системы происходит по следующему сценарию:

1. При запуске блок обновления каталога доступных данных проверяет наличие в каталоге источника отсутствующих в каталогах ИКИ РАН данных, доступных для непосредственного скачивания, и данных, доступных под заказ. Эта

информация заносится в специализированную БД управления получением данных.

2. По результатам работы блока обновления каталога запускается блок построения очереди на скачивание данных. Данные, находящиеся в непосредственном доступе, ставятся в очередь на скачивание, отсортированные по дате и времени съёмки сцены от наиболее оперативных данных к наиболее устаревшим. Каждый раз очередь создаётся заново, так как данные в каталоге источника могут мигрировать из режима непосредственного доступа и обратно. Информация об очереди хранится в специализированной БД управления получением данных.
3. Информация о данных, доступных под заказ, передается на вход блока заказа данных. За один раз заказывается набор данных фиксированного размера для обеспечения оперативности выполнения заказа. Данные из выполненных заказов переводятся в режим непосредственного доступа, и для их последующего скачивания никаких специальных действий не требуется (см. п.1-2).
4. Получение данных, находящихся в непосредственном доступе, обеспечивает блок скачивания данных, который представляет собой утилиту, запрашивающую из БД следующую ожидающую скачивания сцену согласно ее приоритету, скачивающую её, помещающую в заданное место на сервере скачивания и оставляющую в БД отчёт о скачивании. В силу особенностей реализации несколько утилит скачивания могут работать параллельно с одной БД.
5. Скаченные данные помещаются в выходную директорию, после чего передаются в систему ведения архива исходных данных.
6. Для постоянного контроля состояния архивов и процессов скачивания данных используется блок формирования статистики и отчётов, который обеспечивает регулярное получение подробной информации о данных, накопленных и поступивших за заданный период в архивы исходных данных.

Описанный сценарий позволил реализовать полностью автоматизированный процесс получения архивов из различных центров распространения данных. Общая блок-схема работы системы по описанному сценарию приведена на рисунке 4.1.3.1.

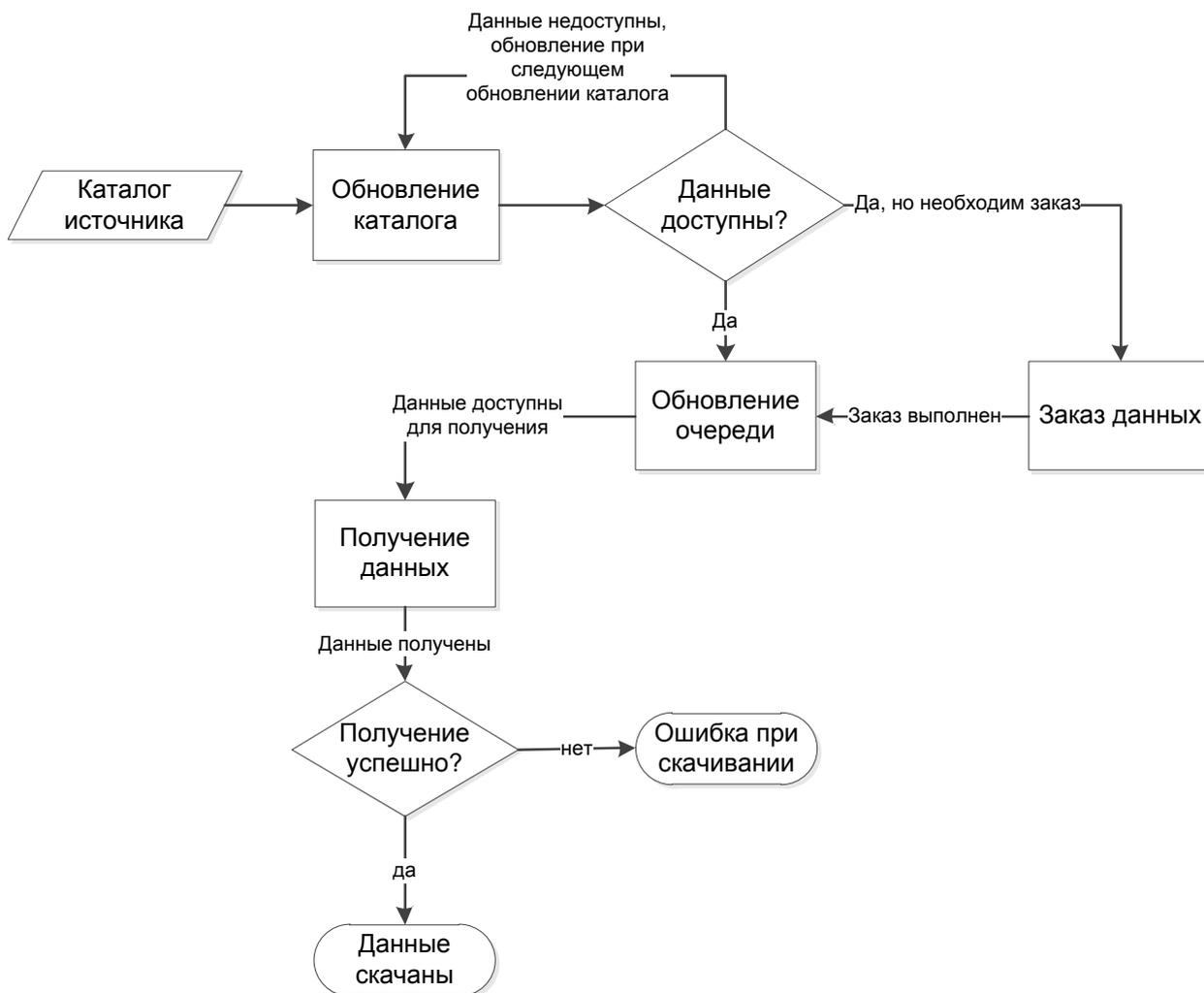


Рис. 4.1.3.1 . Общая блок-схема работы системы

Гибкое конфигурирование системы позволяет через механизмы сортировки и приоритетов поставлять в архивы для каждого из источников наиболее востребованную в настоящий момент информацию.

Созданная система позволила однотипным образом организовать оперативное получение данных из целого набора различных источников. Данные, получаемые из созданной системы, поступают в системы формирования производных тематических продуктов, архивы исходных данных, а так же различные базы данных.

4.1.3.2 Разработка каскадных схем коррекции ошибок в символьных кодах при пороговых элементах.

отв. исполнитель - в.н.с. отд. 71 В.В. Золотарёв

В процессе исследования поведения декодера, реализующего алгоритмы многопорогового декодирования (МПД) для символьных кодов, были рассмотрены различные варианты схем символьных пороговых элементов (СПЭ). Их функционирование существенно отличается от работы обычного порогового элемента для двоичных кодов. В результате анализа возможных схем реализации СПЭ оказалось, что такие устройства могут быть построены на различных вычислительных принципах. Наиболее важно для быстрой и правильной работы всего декодера, особенно при большом уровне шума, чтобы при программной реализации СПЭ выполнял свою функцию с минимальным числом операций, которые при этом должны быть достаточно простыми. Поиск различных наиболее быстрых вариантов СПЭ показал, что относительно числа входов n такого СПЭ устройство может выполнять свою функцию с линейной сложностью и с квадратичной. Однако постоянные коэффициенты C в этих зависимостях $C_1 \cdot n$ и $C_2 \cdot n^2$ при различных вариантах реализации также могут быть весьма различными. По текущему состоянию разработки СПЭ оказалось, что даже при относительно небольшом значении n , порядка 20-30, что достаточно реально при использовании символьных кодов, СПЭ с линейной от числа входов сложностью может быть в 3-5 раз более быстрым, чем наилучший из СПЭ с квадратичной зависимостью сложности реализации. Применение быстрого СПЭ в каскадных схемах ещё более выгодно, так как ускоряется работа всего декодера МПД и на первом, и на втором этапе (каскаде) декодирования. Подчеркнём, что ускорение работы СПЭ не требует перехода к более быстрой элементной базе, а достигается только за счёт более быстрой работы программных средств.

Применение быстрого СПЭ позволяет в ряде случаев увеличить их число в программной версии декодера, что примерно на 0,3 – 0,5 дБ повышает уровень допустимого шума при котором символьный декодер сохраняет свою работоспособность. Поскольку исходные характеристики декодирования МПД уже и так достаточно высоки, указанный дополнительный рост возможного уровня шума является весьма значительным.

4.1.4 Разработка технологий, обеспечивающих работу с долговременными распределенными архивами спутниковых данных и результатами их обработки для решения научных задач.

4.1.4.1 Разработка методов оптимизации интерфейсов, обеспечивающих возможность работы с распределенными архивами спутниковых данных и результатов их обработки для решения различных научных задач.

Отв. исп. н.с. Толпин А.А., м.н.с. Ефремов В.Ю., м.н.с. Балашев И.В. отд.56

Одними из наиболее удобных инструментов работы со спутниковыми данными являются различные картографические интерфейсы. Для создания таких интерфейсов, позволяющих специалистам, выполняющим различные научные проекты, работать с долговременными распределенными архивами данных, в ИКИ РАН разработана специальная технология GEOSMIS, которая позволяет создавать в интересах конкретных проектов инструменты, обеспечивающие не только поиск и выбор данных из распределенных долговременных архивов, но и проводить анализ и обработку данных. При этом одним из важных требований, предъявляемым к таким интерфейсам, является высокая скорость предоставления информации по запросам пользователей. Поэтому в ИКИ РАН постоянно ведутся работы, направленные на оптимизацию работы систем предоставления данных и создания новых методов и алгоритмов, обеспечивающих эффективный выбор информации из долговременных, сверхбольших распределенных архивов и преобразования ее в вид, удобный для дальнейшего анализа. В 2013 году, в частности были проведены работы по оптимизации сервисов, обеспечивающих формирование различных растровых карт.

Скорость формирования растровых карт является одной из значимых характеристик интерфейсов для работы со спутниковыми данными. Общая целевая функция оптимальности формирования информационного продукта состоит из вкладов функций оптимальности каждого параметра карты. Таким образом, общая задача поиска оптимальных векторов решения многомерной целевой функции оптимальности F_i для каждого продукта P_i :

$$F_i = k_{i0} \cdot f_{i0}(x_{i0}) + k_{i1} \cdot f_{i1}(x_{i1}) + \dots + k_{iM} \cdot f_{iM}(x_{iM}) = \sum_{j=0}^M k_{ij} \cdot f_{ij}(x_{ij}),$$

где $f_{ij}(x_{ij})$ - оптимальности отдельного параметра x_{ij} , является сложной, затратной и практически нереализуемой задачей.

В частном случае востребованной является задача оптимизации по времени с рациональной фиксацией значений критериев. Оптимизация по времени формирования карты, в свою очередь, может проводиться по различным параметрам, таким как разрешение карты, размеры карты, количество одновременных запросов (нагрузка) и т.д. Для практической оценки оптимальности времени формирования информационных продуктов по отдельным критериям была разработана **специальная итеративная статистическая методика оценки**. В данной методике для каждого информационного продукта P_i функция оптимальности каждого отдельного параметра $f_{ij}(x_{ij}) = S_{ij}(x_{ij})$, где ряд S_{ij} задается дискретной оценкой времени формирования карты информационного продукта P_i по параметру x_{ij} . Каждое значение ряда замеряется статистически значимое количество раз с учетом влияющих на оценку факторов, таких как кеширование на различных уровнях и загрузка вычислительных ресурсов на всем протяжении времени оценки. В свою очередь, каждое значение ряда S_{ij} формируется суммой временных затрат s_{ij}^k на отдельных этапах алгоритмов:

$$S_{ij} = s_{ij}^0(x_{ij}) + \dots + s_{ij}^N(x_{ij}) = \sum_{k=0}^N s_{ij}^k(x_{ij}), \text{ где } k - \text{ количество этапов профилируемого алгоритма.}$$

Для проведения оценки рядов значений по различным операциям анализа и обработки данных необходимо сформировать референсный ряд значений времени для базовой операции информационного продукта P_1 , относительно которого принимается экспертное заключение о необходимости оптимизации. Оценка требуемой операции осуществляется в несколько итераций после каждого изменения алгоритмов и архитектуры, направленных на улучшение целевых показателей функции. На рисунке 1 приведен референсный ряд оценки времени формирования карты по данным архива Landsat. Оценка времени приведена для параметра разрешения карты с фиксированным пиксельным размером.

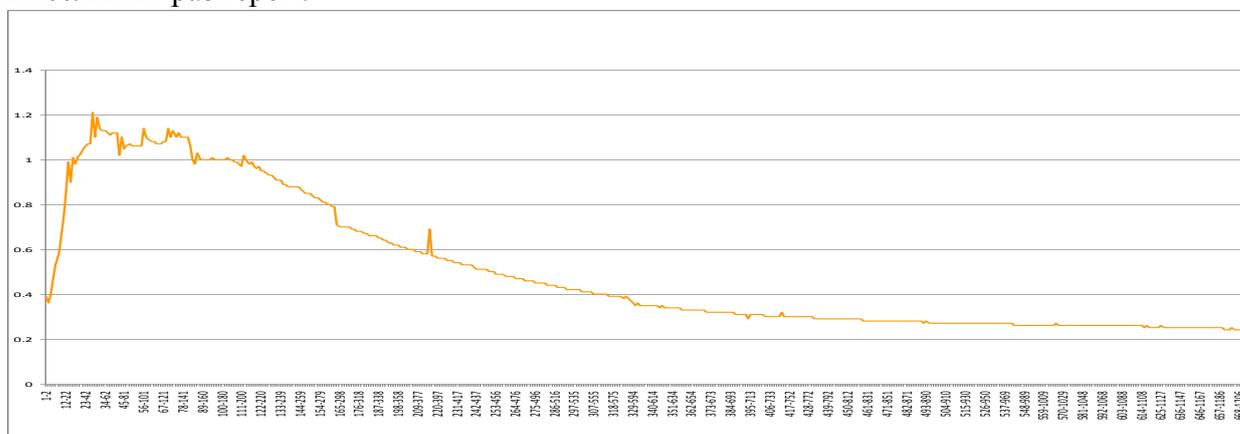


Рисунок 1. Референсный ряд значений оценки

На приведенном графике по оси X - диапазоны масштабов формируемых карт (метры на пиксель). По оси Y - время формирования соответствующей карты, сек. На рисунке 2 приведен пример оценки операции изменения проекции для тех же данных.

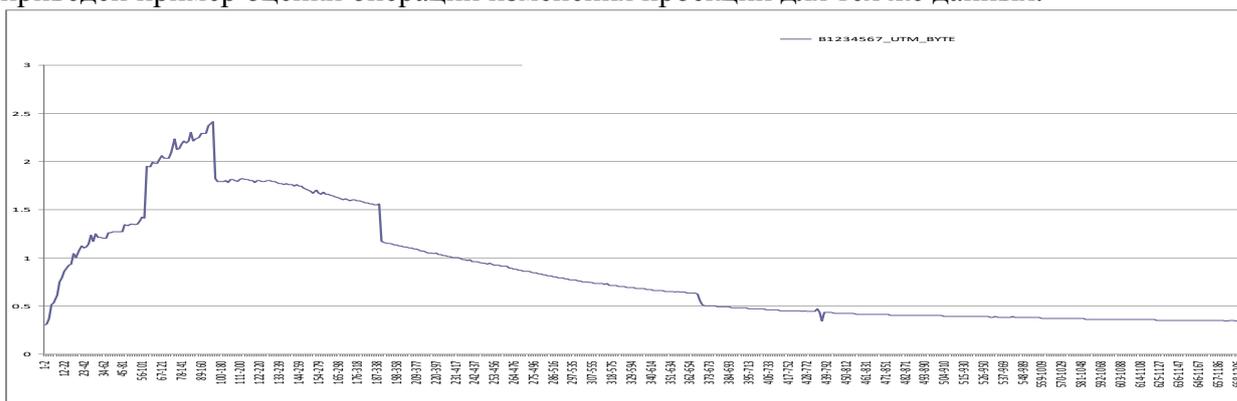


Рисунок 2. Ряд оценок операции изменения проекции

Для данного примера экспертная оценка показала на необходимость введения некратных обзорных масштабов в дополнение к базовой пирамиде разрешений для более эффективного формирования карт в ряде необходимых проекций.

4.1.4.2 Разработка технологий, обеспечивающих работу с долговременными архивами информации о выловах морских биологических ресурсов с использованием данных о спутниковом позиционировании судов.

Информация о пространственном распределении выловов морских биологических ресурсов (далее выловы) важна для исследования различных биоресурсов, построения и проверки моделей динамики. Наличие таких карт, в частности, позволяет осуществлять комплексный пространственный анализ состояния морских биоресурсов, совместно с информацией о состоянии окружающей среды, получаемой в том числе и с использованием данных дистанционного зондирования.

Действующая с 2001 года Отраслевая система мониторинга Федерального агентства по рыболовству (ОСМ Росрыболовства) позволила накопить уникальные ряды данных о выловах и сопряженные с ними ряды автоматического спутникового позиционирования судов.

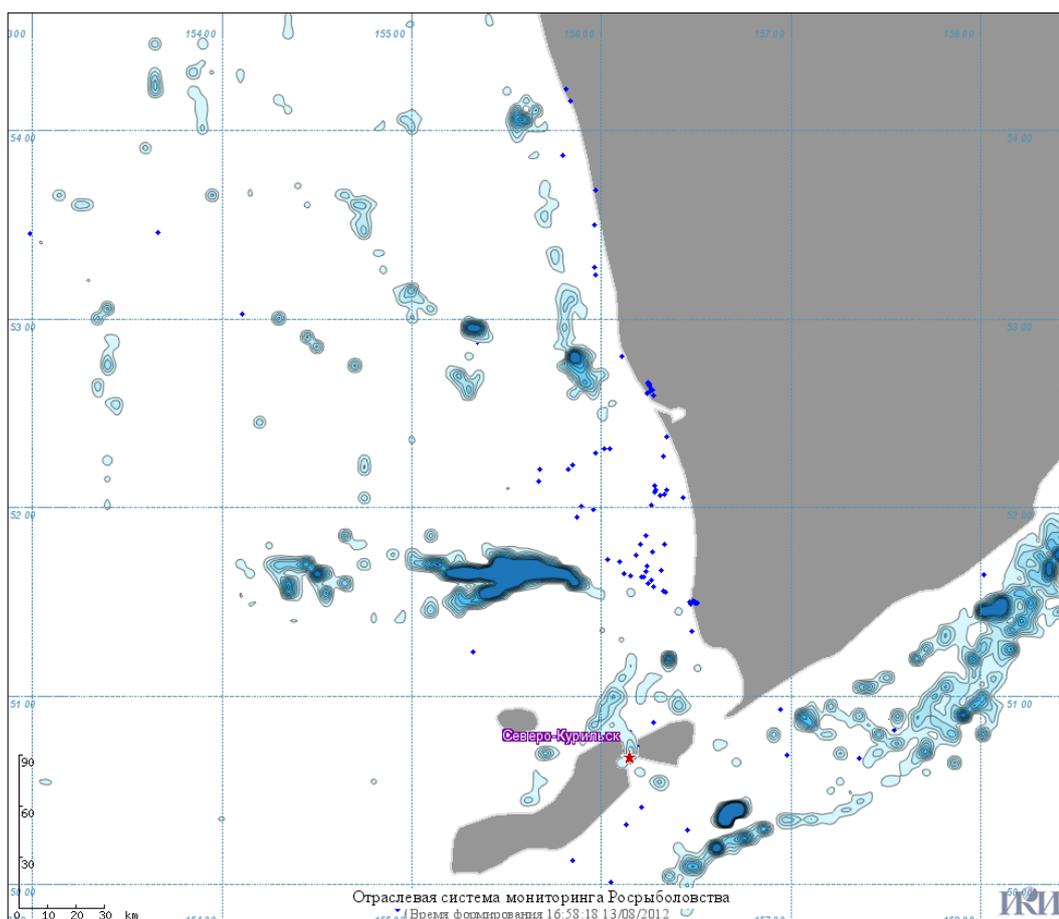
Следует отметить, что традиционно поля вылова строились исключительно на основе судовых суточных донесений. Весь вылов за сутки относился к позиции судна, которую капитан указал на 12:00 по Гринвичу. Это существенно искажает реальную картину распределений добываемых биологических ресурсов.

В то же время накопленные данные автоматического спутникового позиционирования могут позволить существенно улучшить пространственные характеристики и точности построения карт выловов. Работы по построению таких методик были выполнены в ИКИ РАН. В частности, была предложена методика распределения вылова судна по его треку, основанная на выборе на треке участков, на которых происходит траление. Выбор таких участков основывался на том, что различные операции, производимые судном ведутся в ограниченных интервалах скоростей. Таким образом, можно выделить участки трека, где проводились операции по тралению, поиску, установке и проверке орудий промысла или осуществлялся переход. Задача точного выделения таких участков приводит к необходимости как можно точнее восстановить маневры судна по имеющемуся дискретному набору точек трека. Анализ показал, что в соответствии с теоремой отсчетов Котельникова (для восстановления маневров судна), можно восстановить трек судна, когда спутниковые позиционные данные поступают в

ОСМ с достаточной частотой. В реальных условиях работы судна обычно требуется знать позицию судна не реже, чем раз в 15 мин. При таких условиях можно определить достоверность используемого судового времени и пооперационной отчетности.

На практике у большинства судов спутниковые позиции определяются не чаще, чем один раз в час. Для таких ситуаций была разработана специальная методика определения судового времени, которая основывалась на том, что статистический анализ распределения скоростей в треке судна за достаточно большой период времени (не менее двух недель), позволил выявить различия в данных распределениях, полученных для судов, использующих разные орудия лова и получить более четкое представление об интервалах скоростей, в которых ведутся промысловые действия. Это позволило по треку построить гипотезу о характере допустимых промысловых операций, которыми занято судно в тот или иной момент времени. Выбрав в качестве критерия наибольшую корреляцию данных полученных из анализа скоростей судна, и данных суточных судовых донесений о моменте проведения той или иной промысловой операции, удалось построить достаточно надежную методику оценки судового времени и вместе с этим уточнить, какие фрагменты трека отнести к суточному вылову судна.

На основе разработанной методики была создана технология построения карт выловов, которая в настоящий момент проходит апробацию и тестирование в ОСМ Росрыболовства. Пример, карты вылова, которая строится на основе разработанных методов приведен на рис. 4.1.4.2.1



4.1.4.2 Пример карта вылова (минтай, ноябрь 2012, южная часть Камчатки)

4.1.5 Поддержка и развитие Центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа данных спутниковых наблюдений Института космических исследований Российской академии наук для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды» (ЦКП «ИКИ-Мониторинг»). В том числе:

4.1.5.1 ведение и поддержка архивов спутниковых данных и результатов их обработки для научных исследований глобальных изменений, контроля и анализа состояния природных и антропогенных объектов;

Отв. исп. зав. лаб. к.ф.-м.н Мазуров А.А., м.н.с. Бурцев М.А. отд.56

- Продолжалось накопление архивов данных, поступающих со спутников серии NOAA по европейской территории России и Западной Сибири (http://smisdata.iki.rssi.ru/noaa-cgi/cat_reg.pl?db=noaa&lang=russian);
- Осуществлялось ведение архивов данных прибора MODIS (спутники TERRA и AQUA) по различным регионам России (http://smis.iki.rssi.ru/dataserv/rus_ms/modis_tlm.htm);
- Продолжалось накопление информации о состоянии облачности, температуры морской поверхности и ледовой обстановки в районах Баренцева, Белого, Балтийского, Черного, Каспийского, Японского, Охотского и Берингова морей, полученной по данным приборов AVHRR и MODIS (http://x4n9.iki.rssi.ru/noaa-cgi/cat_all_prod.pl?db=center_noaa_products);
- Продолжилось ведение многолетнего архива спутниковых данных, получаемых прибором SPOT-Vegetation на всю территорию бореального пояса Земли (включая Северную Евразию и Северную Америку), в виде стандартных продуктов данных S10, представляющих собой синтез наблюдений, выбранных за десятидневный период по критерию максимума NDVI;
- Совместно с ФГУ «Авиалесоохрана», ЦЭПЛ РАН и различными центрами приема и обработки спутниковых данных накоплен архив информационных продуктов спутникового мониторинга лесных пожаров на территории России в 2013 году;
- В рамках проектов по эксплуатации и развитию системы мониторинга лесных пожаров совместно с ООО НТЦ «Инфокомплекс» осуществлялось ведение архива данных системы грозопеленгации, покрывающей практически всю территорию России.
- Продолжалось ведение однородных архивов данных о природных пожарах и их последствиях, полученных на основе информации дистанционного зондирования на территории Северной Евразии. В систему добавлена информация, полученная в 2013 году.
- Продолжалось формирование архива данных спутников LANDSAT по территории северной Евразии. На начало декабря 2013 года архив содержал более 500 000 сцен. В 2013 году в архив были добавлены данные спутников LANDSAT 4,7, 8. Архив был переобработан и преобразован в вид, позволяющий пользователям получать доступ к информации полного пространственного и спектрального разрешения
- Продолжено ведение и развитие архивов метеоанализов по территории России (<http://meteo.infospace.ru/wcarch/html/index.sht>);
- Для анализа состояния растительности на территории Северной Евразии продолжено накопление архивов продуктов обработки данных MODIS. В 2013 году архив был дополнен очищенными от облаков и шумов композитными спутниковыми изображениями.

- Обеспечено развитие спутникового сервиса «Вега», ориентированного на мониторинг различных растительных экосистем на территории Северной Евразии.
- В 2013 году начато формирование архива гиперспектральных данных, получаемых от различных российских и зарубежных спутниковых систем.
- В рамках различных проектов осуществлялась поддержка систем сбора, обработки, архивации и представления данных в следующих центрах приема: Европейского, Сибирского и Дальневосточного центров приема спутниковых данных ГУ НИЦ «Планета» (г. Москва, г. Новосибирск, г. Хабаровск), СФУ (г. Красноярск), ФГУ «Авиалесоохрана» (г. Пушкино, г. Иркутск), НЦ ОМЗ (г. Москва), СФУ (г. Красноярск);

4.1.5.2 поддержка и развитие специализированных спутниковых сервисов, ориентированных на решение различных научных задач (в том числе спутниковый сервис Вега, спутниковый сервис See The Sea, спутниковый сервис "Вулкан")

В рамках центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа данных спутниковых наблюдений Института космических исследований Российской академии наук для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») продолжалось развитие и эксплуатация различных специализированных спутниковых систем, ориентированных на решение различных научных задач.

В 2013 году ИКИ РАН совместно с партнерами поддерживали и развивали следующие основные системы коллективного пользования, ориентированные на решение различных научных задач

Проект	Описание
Сервис «ВЕГА» http://vega.smislab.ru/	Базовый спутниковый сервис анализа вегетации, анализ состояния растительного покрова на территории Северной Евразии. Создан в 2011 году. Развивается и поддерживается совместно с ООО ИКИЗ (Резидент фонда Сколково)
VolSatView http://volcanoes.smislab.ru	Создан для исследования и дистанционного мониторинга вулканической активности Камчатки и Курил. Создан в 2012 году. Развивается и поддерживается совместно с: ИВС ДВО РАН, ВЦ ДВО РАН, НИЦ "Планета" при поддержке РФФИ.
See The Sea http://ocean.smislab.ru /	Ориентирован на исследование и дистанционный мониторинг различных процессов, происходящих на поверхности

	<p>пограничных морей России</p> <p>Создан в 2011 году</p> <p>Развивается ИКИ РАН при поддержке РФФИ.</p>
<p>Сервис «ВЕГА ДВ» http://vega-dv.geosmis.ru/</p>	<p>Региональный узел (сервис) создан для обеспечения доступа к данным распределенной информационной системы коллективного использования данных космического дистанционного зондирования Земли (ИСКИ ДЗЗ) для проведения научной, образовательной и инновационной деятельности в области исследования и контроля состояния окружающей среды в регионах Дальнего Востока России.</p> <p>Создан в 2012 году.</p> <p>Развивается и поддерживается совместно ВЦ ДВО РАН, НИЦ "Планета" при поддержке РФФИ.</p>
<p>Вега-Эпидемиолог http://vega-epidem.geosmis.ru/</p>	<p>Ориентирован на исследование и дистанционный мониторинг эколого-климатических условий, способствующих ухудшению эпидемиологической ситуации по природно-очаговым трансмиссивным инфекциям и анализа распределения статистических характеристик заболеваемости природно-очаговыми инфекциями.</p> <p>Создан в 2013 году.</p> <p>Развивается и поддерживается совместно с Центральным научно-исследовательским институтом эпидемиологии при поддержке Минобрнауки.</p>
<p>Вега-Пиролог http://vega-pr.geosmis.ru/</p>	<p>Предназначен для информационной поддержки исследований, развития методов дистанционного мониторинга и прогнозирования развития лесных пожаров и разработки научно-методических основ районирования территории России по уровню природной пожарной опасности на основе данных спутникового мониторинга для оптимизации мероприятий по охране</p>

	<p>наземных экосистем.</p> <p>Создан в 2013 году.</p> <p>Развивается и поддерживается совместно с ЦЭПЛ РАН при поддержке Минобрнауки.</p>
--	---

В 2013 году системы, развивающиеся в рамках ЦКП «ИКИ-Мониторинг», использовались несколькими сотнями специалистов, работающих в более чем 20 организациях.

РАЗДЕЛ 4.2. МОНИТОРИНГ-БИОСФЕРА

Отв. исп. д.т.н. Барталев С.А.

4.2.1. Развитие методов предварительной обработки временных рядов спутниковых данных для картографирования и исследования динамики наземных экосистем;

В рамках направления по развитию методов предварительной обработки временных рядов спутниковых данных в задачах картографирования наземных экосистем разработана автоматизированная технология детектирования облаков и связанных с ними теней на изображениях Landsat-TM/ETM+, а также фильтрации сбойных данных в изображениях, получаемых радиометром ETM+. Метод детектирования эффектов влияния облачности основан на использовании модифицированного алгоритма Fmask, дополнительно выявляющего и учитывающего устойчиво светлые объекты (вечные снега, солончаки, пески и др.), часто ошибочно детектируемые, как облака. В алгоритме в качестве входных данных используются данные спутника Landsat, включая измерения спектральной яркости в видимой, ближней и средней ИК, а также в тепловой областях спектра. Модификация алгоритма Fmask включала разработку нового метода детектирования теней от облаков, основанного на анализе разностных гистограмм распределения спектральной яркости земной поверхности внутри и вне зон потенциального расположения теней, формируемых на основе геометрического моделирования по данным о положении облака, Солнца и сенсора. Технология фильтрации сбойных данных в изображениях, получаемых радиометром ETM+, основана на поиске для рассматриваемой сцены ближайшей по дате и свободной от влияния облачности сцены спутника Landsat-5, в качестве опорного изображения, и на анализе гистограммы яркости восстанавливаемого пикселя в его ближайшей окрестности на исходном и опорном изображениях.

Для решения задач спутникового картографирования наземных экосистем разработана автоматизированная технология построения безоблачных композитных изображений по данным спутников Landsat-5, 7 и 8. В качестве входных использовались отфильтрованные от влияния облачности и аппаратных сбоев данные. Разработанная технология позволила построить ежегодные свободные от влияния мешающих факторов композитные изображения на территорию Северной Евразии за 2009-2013 годы. Пример композитного изображения, полученного по данным Landsat за 2011 год, приведено на рисунке 1.

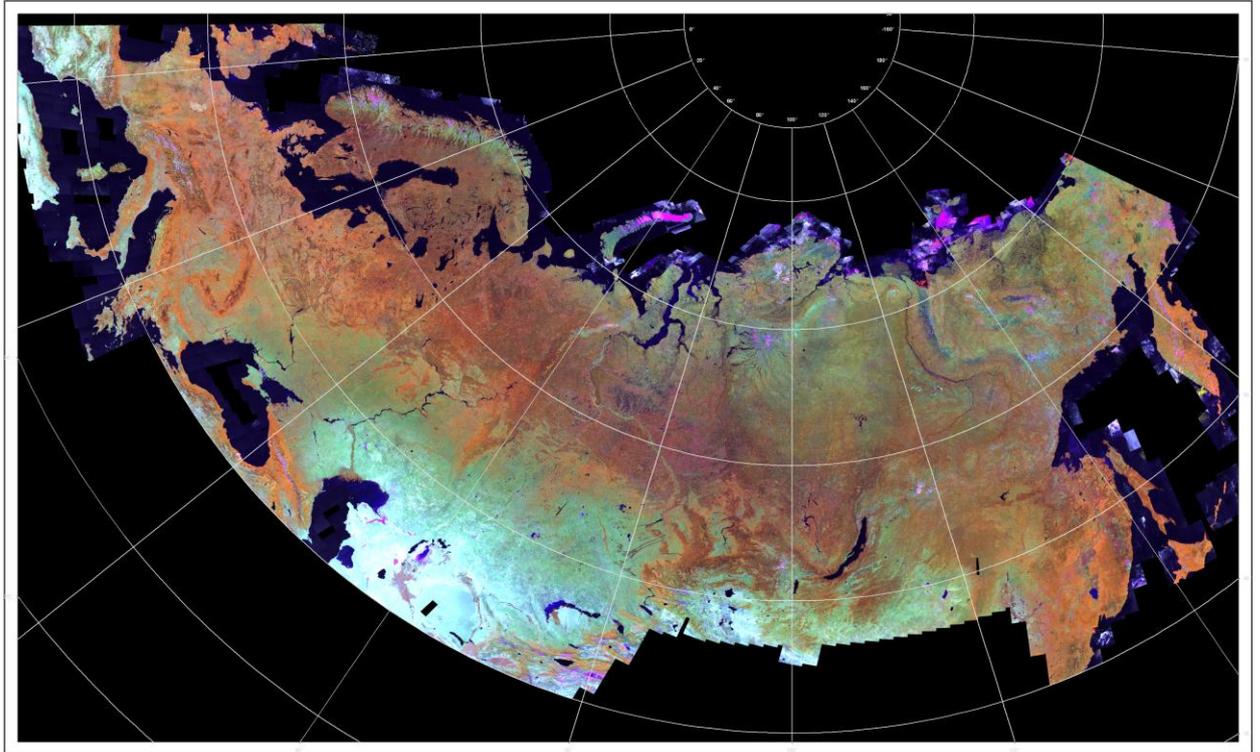


Рис. 1. Очищенное от влияния облаков и других мешающих факторов композитное изображение Северной Евразии по данным Landsat за 2011 год

4.2.2. Развитие методов и программного комплекса локально-адаптивной классификации спутниковых изображений для решения задач глобального картографирования и мониторинга наземных экосистем;

Разработанный в ИКИ РАН метод локально-адаптивной классификации LAGMA предполагает разделение области классификации на клетки с последующим построением в каждой из них обучающей выборки, включая опорные элементы, расположенные внутри клетки и в клетках ее окружения. В результате такой агрегации данных в каждой клетке получается своя обучающая выборка, ограниченная в пространстве и достаточная по мощности для построения качественного классификатора. Данный метод был ранее реализован в виде одноименного программного обеспечения LAGMA. Это программное обеспечение было многократно успешно применено в решении задач картографирования типов наземных экосистем России, озимых культур, породного состава лесов.

Реализация метода LAGMA представляет собой программу для командной строки для операционных систем Windows XP и старше, написанную на языке C++. Выполненное за отчетный период развитие LAGMA позволило формализовать обучающую выборку и классификатор (в виде отдельных классов C++), ранее существовавшие в нем неформально. Такие изменения позволяют легко добавлять в программу новые методы классификации, а также вносить такие понятия, как контрольная и обучающая выборка, boosting, bagging и т.п. Эти изменения существенно облегчают дальнейшую модификацию ПО LAGMA.

В ПО LAGMA был также добавлен непараметрический метод классификации, основанный на методе случайного леса (random forest). Метод случайных лесов был успешно применен для решения задачи картографирования озимых посевов.

Кроме того, ПО LAGMA было доработано для обеспечения возможности построения регрессионных зависимостей между различными параметрами для разных

классов, что, в частности, было использовано для уточнения биомассы лесов по их спектрально-отражательным характеристикам. Также как и при решении задачи картографирования, LAGMA осуществляет сбор выборки, локальной для каждой клетки. По этой выборке могут быть построены регрессии между значениями различных характеристик, поданных на вход LAGMA. На выходе программа формирует изображения со значениями коэффициентов регрессии и зависимого признака.

Было осуществлено сравнение метода LAGMA с традиционно используемыми подходами, основанными на «глобальной» (т.е. не локализованной) классификации. Для этого на основе данных спутникового инструмента SPOT-Vegetation и с использованием карты GLC2000 в качестве опорной выборки была осуществлена классификация типов земных покровов России двумя методами. По результатам анализа результатов классификации можно сказать, что метод LAGMA продемонстрировал более высокую точность по сравнению с традиционным методом классификации (точность 97% и 82% соответственно). Пример сравнения результатов картографирования растительного покрова с использованием различных методов классификации представлен на рис. 2.

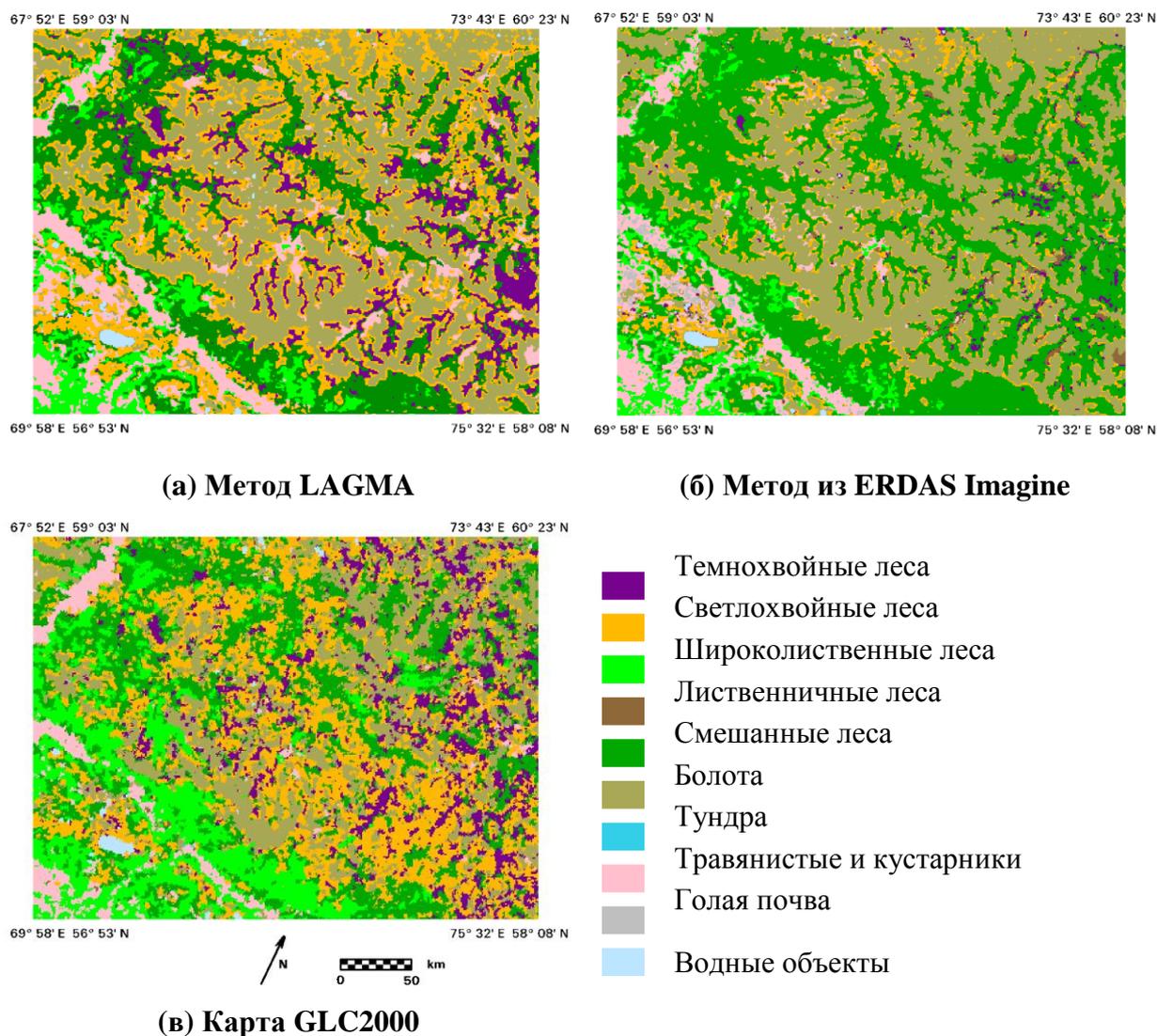


Рис. 2. Карты растительного покрова по данным SPOT-Vegetation с использованием метода LAGMA (а) и глобального классификатора (б) в сравнении с картой GLC2000 (в)

4.2.3. Разработка методов спутникового динамического картографирования наземных экосистем и создание временной серии карт растительного покрова России;

В рамках разработки методов спутникового динамического картографирования наземных экосистем России была выполнена работа по созданию однородного ежегодного ряда карт за период 2000-2012 годов (рис. 3 и 4). В основе этих продуктов лежат ежедневные данные спутниковых наблюдений MODIS в видимом и ближнем ИК диапазоне с пространственным разрешением 250 и 500 метров. Специально разработанная технология фильтрации облачных и зашумленных областей позволила создать временной ряд сезонных очищенных композитных изображений за весь период работы MODIS. Классификация изображений проводилась локально адаптивным методом контролируемой классификации (LAGMA).

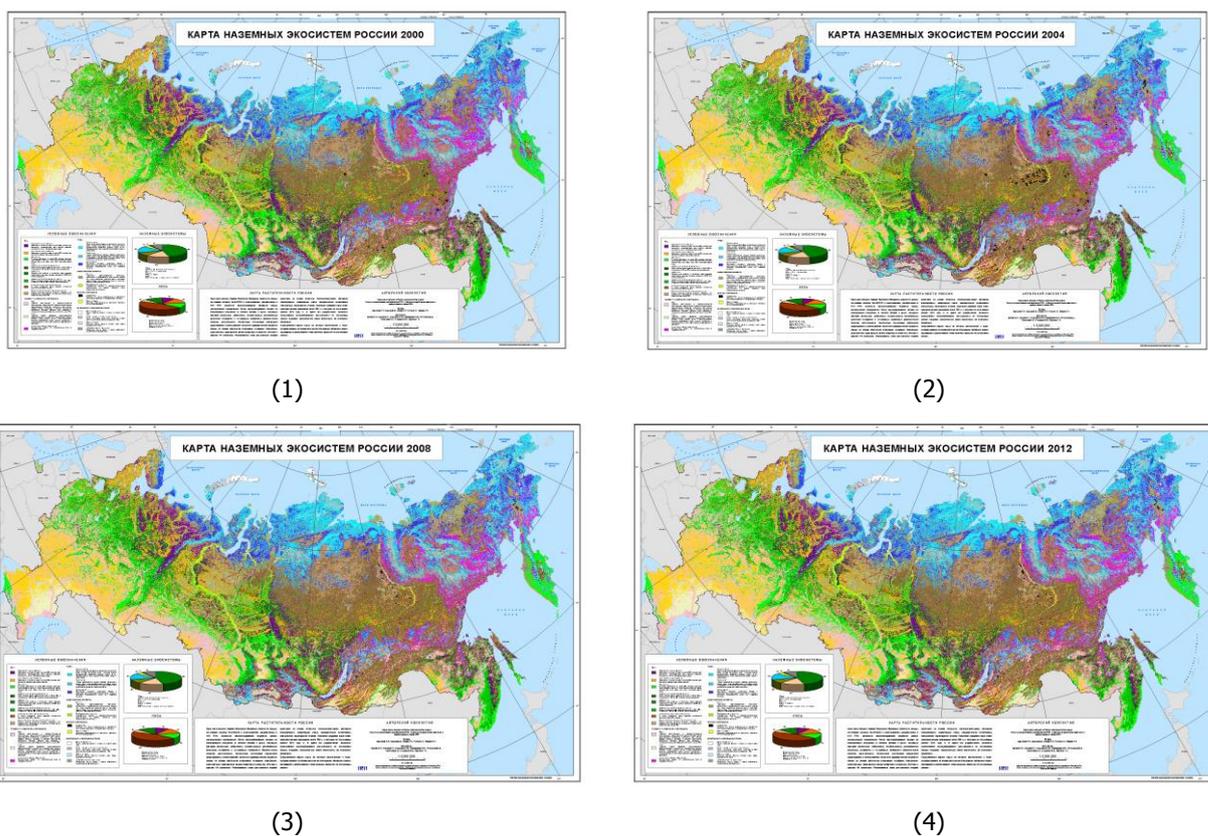


Рис. 3. Карты наземных экосистем России 2000 (1), 2004 (2), 2008 (3) и 2012 (4) годов.

В качестве источника обучающих данных для 2000 года послужила карта наземных экосистем Северной Евразии, разработанная в рамках проекта GLC2000. Для уточнения информации о лесах России была использована карта породного состава лесов СССР. Многократный итерационный процесс фильтрации опорной выборки и ее перенос, с учетом спектральных изменений поверхности, на весь многолетний ряд наблюдений позволил создать карту стабильных, не изменившихся за время наблюдения участков экосистем, вошедших в унифицированную опорную выборку. Внесение ряда классов, таких как, существенные повреждения экосистем пожарами, пахотные земли, урбанизированные территории, вечных снега и льды во временной ряд карт было произведено с использованием специально разработанных методов обработки спутниковых данных. Легенда карт растительного покрова содержит 23 тематических класса, включая 7 классов лесных экосистем.

Динамическая информация о типах земного покрова открывает возможности выявления изменений в наземных экосистемах (рис.4), а также создания баз данных для оптимального управления территориями, рационального природопользования и охраны

окружающей среды, проведения фундаментальных исследований по ряду научных направлений наук о Земле.

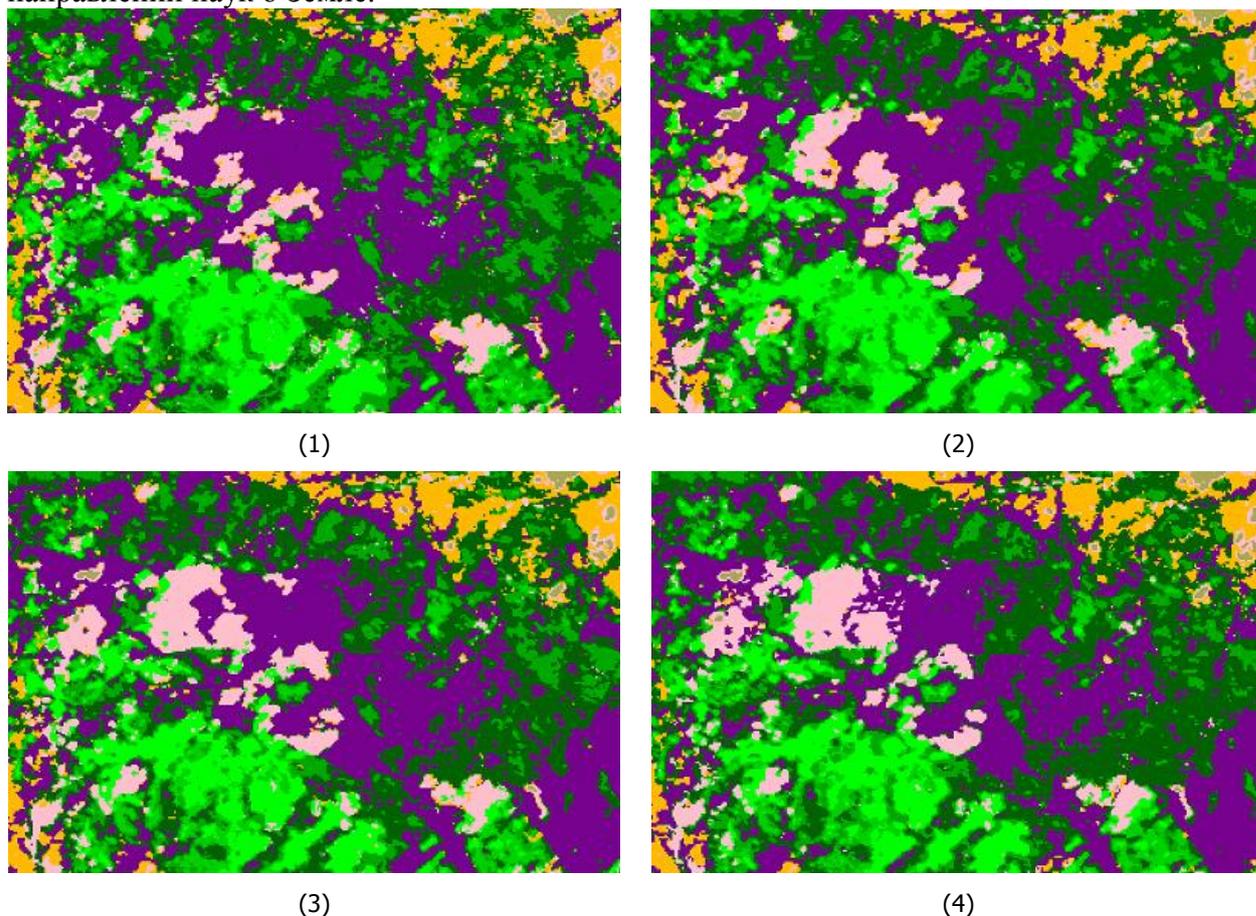


Рис. 4. Динамика растительного покрова 2000 (1), 2002 (2), 2005 (3) и 2008 (4) годами.

4.2.4. Разработка методов оценки деструктивных воздействий на леса на основе спутниковых данных различного пространственного разрешения;

Разработан алгоритм выявления усыхающих лесов на основе многолетних спутниковых данных, получаемых спектрорадиометром MODIS, а именно ежедневных композитных изображений MODIS разрешением 250м и 500м. В основу метода выявления поврежденных участков леса положено использование рядов разностного нормализованного коротковолнового индекса SWVI, отражающего состояние растительности и чувствительного к содержанию в ней влаги. Метод детектирования усыхающих лесов включает оценку отклонений временных рядов SWVI от их среднелетней сезонной динамики («нормы») в предшествующий засухе период. Статистическая норма SWVI формируется на предварительно обработанных данных с целью фильтрации случайных выбросов, заполнения пропусков и сглаживания временных рядов индекса. Полученная статистическая норма содержит информацию о среднелетнем значении и величине стандартного отклонения SWVI, что позволяет использовать стабильные временные отрезки для выявления эффекта деструктивного воздействия на леса в текущем году. В частности, это позволяет устранить влияние межгодовых вариаций растительности, связанных с погодными условиями и другими факторами. Для выявления усыхания лесов разработан нормализованный вегетационный индекс степени усыхания NDSVI (Normalized Dryness Severity Vegetation Index), позволяющий оценить степень отклонения текущих значений SWVI от статистической нормы на временных интервалах относительно стабильного ее поведения в течение вегетационного сезона, выраженную в величинах стандартного отклонения. Индекс NDSVI

характеризует степень усыхания лесов интегрально для текущего года и слабо зависит от типа подстилающей поверхности.

Разработанный метод апробирован для территории Московской области по результатам засухи 2010 года (рис. 5), с целью выявления непосредственной реакции растительности на аномальные температурные условия, а также ее динамику в последующие годы. Для оценки эффективности алгоритма детектирования поврежденных участков леса использовались опорные данные, полученные с использованием материалов наземных обследований и визуального анализа спутниковых изображений высокого пространственного разрешения. В качестве вспомогательных материалов в исследованиях также использовались, созданные в ИКИ РАН на основе данных MODIS, карты растительного покрова.

Разработанный метод обладает высокой степенью универсальности и не зависит от межгодовой и сезонной вариабельности спектрально-отражательных характеристик растительного покрова.

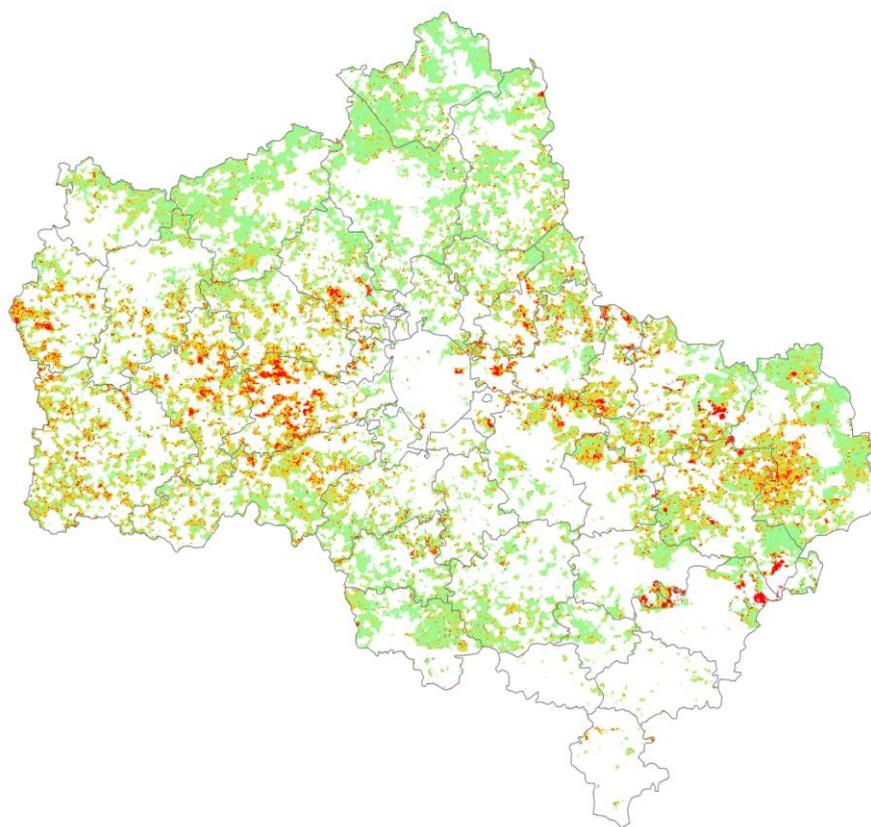


Рис. 5. Карта усыханий лесов Московской области по данным MODIS (зеленый - неповрежденные леса, оранжевый – ослабленные леса, красный – усыхающие леса)

4.2.5. Развитие автоматизированных методов обработки временных серий спутниковых данных для мониторинга сельскохозяйственного землепользования;

Выращивание озимых культур обеспечивает в России производство наиболее качественного зерна в объеме 40-45% от общего урожая зерновых. В ИКИ РАН разработан адаптивный метод распознавания всходов озимых культур в осенне-зимний период вегетации, основанный на временных сериях спутниковых данных прибора MODIS (аппараты Terra\Aqua). Метод основан на характерной особенности динамики развития озимых в осенний период и позволяет распознавать взошедшие озимые культуры, демонстрирующие устойчивый рост зеленой биомассы. Облачность и снежный покров являются мешающими факторами для работы метода, поэтому дистанционно распознать

возможно только достаточно развитые на момент выпадения снега всходы. Таким образом, метод не позволяет распознать слаборазвитые всходы озимых, а также поля, занятые невзошедшими или погибшими посевами. Как правило, это приводит к значительным локальным неоднородностям результатов распознавания в зависимости от климатических факторов осенне-зимнего сезона вегетации. Так, в случае летних засух, приводящих к недостатку почвенной влаги в осенне-зимний период, посевы озимых не получают достаточного развития и их всходы не могут быть дистанционно распознаны.

Таким образом, необходимо уточнение результатов распознавания озимых на основе их дальнейшего развития в весенне-летний период. Поскольку точность весенней окончательной оценки площадей озимых не должна зависеть от климатических факторов сезона посева, то и метод уточнения не должен опираться на эти результаты, обеспечивая независимую оценку.

Для автоматических адаптивных алгоритмов, работающих на больших неоднородных территориях необходимо использовать вегетационные индексы, которые в наименьшей степени зависят от яркостных характеристик почвы. Это имеет большое значение, т.к. на начальных этапах развития возделываемой растительности вклад почвы в интегральную яркость пикселя является доминирующим. Перпендикулярный вегетационный индекс PVI удовлетворяет этим требованиям; в то же время он является адекватным показателем состояния растительного покрова, тесно коррелирующим с объемом зеленой биомассы и концентрацией хлорофилла.

Перпендикулярный вегетационный индекс PVI рассчитывается как евклидово расстояние от данной точки до линии почв в пространстве измерений КСЯ в красном и ближнем ИК спектральных диапазонах. Уравнение $R_2 = 1.1R_1 + 0.05$ для линии почв в этом пространстве получается в ходе линейной аппроксимации экспериментальных данных о значениях КСЯ заведомо открытой почвы в различных регионах России при коэффициенте детерминации $R^2=0.9$. Таким образом, PVI вычисляется по формуле $PVI(R_1, R_2) = -0,74R_1 + 0,67R_2 - 0,034$.

Разработанный метод распознавания озимых в весенне-летний период вегетации обладает следующими свойствами:

- создает репрезентативную обучающую выборку;
- не использует наземной обучающей информации;
- распознавание озимых происходит методом «случайных лесов»;
- метод использует временные серии MODIS;
- является полностью автоматическим.

Особенностью метода является автоматическое создание обучающей выборки на всю зону интереса. Для инициализации выборки алгоритм предусматривает локально-адаптивную кластеризацию на два кластера изображений PVI на Южный федеральный округ. Композитное изображение соответствует периоду ранней весны вскоре после схода снежного покрова, когда высоким значениям PVI соответствуют, как правило, пиксели полей озимых культур. Инициализация выборки позволяет выделить озимые, которые всегда можно найти в ЮФО – так, за более чем 13-летний период наблюдений MODIS в южных регионах страны ни разу не было зарегистрировано полной гибели озимых после перезимовки.

Выделенные на этапе инициализации поля гарантированных озимых используются для создания локального эталона спектрально-динамических характеристик типичных озимых. Локальный эталон представляет собой динамику значений PVI типичных озимых и действует в окрестности полей, на основе которых он был создан. Похожим образом эталон создается и для полей категории «не озимые». На следующем этапе в зоне действия эталона происходит поиск полей, демонстрирующих, на основе критериев близости, динамику развития, похожую на эталон. Критериями близости являются значения корреляции и евклидова расстояния между эталоном и динамикой PVI рассматриваемого

поля. Если поле удовлетворяет условиям близости, то оно попадает в выборку гарантированных озимых, при этом локальные эталоны обновляются, а зона существования эталонов расширяется, включая зону вокруг вновь добавленных в выборку полей (см. рис. 6).



Рис 6. Экспансия обучающей выборки и эволюция эталонов между итерациями. Оттенками синего показана зона действия всех эталонов, внутри зоны показаны поля, создающие эти эталоны и добавляемые в обучающую выборку

Экспансия обучающей выборки происходит на всю зону интереса, при этом обеспечивается её необходимая репрезентативность. Полученная таким образом обучающая выборка используется для распознавания полей озимых культур на основе «случайных лесов», использующих разновременные композитные изображения РVI как независимые признаки.

На основе метода были получены оценки площадей озимых в весенне-летний период вегетации за период с 2003 по 2013 годы. В таблице 1 приведены полученные различными методами площади озимых на уровне субъектов РФ для ряда регионов за несколько последовательных лет. По сумме площадей можно увидеть хорошее совпадение результатов, полученных описанным методом с данными официальной статистики и нерегулярные вариации оценок, полученных методом распознавания всходов в осенне-зимний период.

Таблица 1

Сравнение площадей озимых по данным трёх различных источников

Административная единица	2004			2005			2006		
	Росстат	Осень	Весна	Росстат	Осень	Весна	Росстат	Осень	Весна
Ростовская область	1404,5	1315,8	1472,6	1516,8	958,5	1557,7	1469,0	882,0	1591,5
Ставропольский край	1506,5	1255,4	1155,8	1652,5	728,3	1074,2	1647,9	1206,6	1350,2
Волгоградская область	993,2	1169,7	1170,4	1240,8	662,6	1529,7	1024,7	794,1	1358,0
Краснодарский край	1316,5	710,1	1226,4	1323,4	528,6	1359,7	1324,1	814,3	1318,1
Саратовская область	957,4	893,5	749,2	1085,0	546,9	1345,7	761,7	642,7	736,3
Воронежская область	508,4	546,5	255,8	539,6	191,4	539,3	461,8	437,8	247,5
Республика Татарстан	275,7	281,7	326,7	390,5	409,8	334,8	287,7	362,3	297,5
Тамбовская область	312,0	220,1	177,1	295,3	173,9	248,2	306,6	207,0	205,6
Курская область	294,3	174,7	152,4	326,9	43,2	305,4	217,7	226,9	176,6
Пензенская область	259,7	222,3	288,0	354,7	254,4	397,0	319,7	181,5	215,2
Самарская область	329,7	359,4	175,2	426,6	262,8	482,4	349,7	296,0	258,3
Белгородская область	283,5	237,0	184,0	301,5	55,3	297,8	220,0	288,6	156,6
Липецкая область	200,7	205,6	150,9	274,1	88,6	305,2	254,0	210,2	196,7
Орловская область	272,8	135,0	121,2	314,5	43,4	168,3	199,4	129,3	123,4

Оренбургская область	290,9	352,9	440,9	423,8	241,9	760,1	241,3	325,9	464,0
Рязанская область	178,7	187,0	140,3	231,0	139,5	264,0	180,9	158,6	201,4
Ульяновская область	147,3	161,8	139,7	164,7	155,9	220,0	141,4	127,1	97,5
Республика Башкортостан	122,9	230,0	340,1	292,6	179,0	268,7	110,7	219,7	270,9
Нижегородская область	125,6	101,4	230,0	172,0	154,2	357,4	181,8	131,8	157,6
Общая площадь посевов озимых, тыс. га	9780,3	8759,9	8896,5	11326,2	5818,0	11815,6	9700,1	7642,5	9422,8
Относительное отклонение, %		-10,4	-9,0		-48,6	4,3		-21,2	-2,9

4.2.6. Развитие методов прогнозного моделирования динамики наземных экосистем на основе ассимиляции данных спутниковых наблюдений

Возможность оценки и прогнозирования динамики развития растительности особенно важна для задачи мониторинга состояния сельскохозяйственных культур. На данный момент в ИКИ разработаны методы мониторинга состояния сельскохозяйственных культур с помощью спутниковых данных. Создан и апробирован на территории Тульской области прототип системы мониторинга посевов озимой пшеницы на основе модели динамики развития растений. Для моделирования развития озимой пшеницы использовалась модель WOFOST (WORld FOod STudies), представляющая собой механистическую модель, моделирующую развитие растения через описание основных процессов. Она имитирует фенологию растения, процесс фотосинтеза, дыхания, распределения ассимилированной биомассы по разным частям растения, эвапотранспирацию, водный баланс в почве и реакцию растения на засуху и экстремальную температуру. Модель воспроизводит динамику наиболее важных характеристик растения (биомасса, урожайность, листовой индекс) на протяжении всех этапов его развития от посева и до созревания.

Для работы модели необходимы данные о характеристиках растительности, почвы и метеопараметрах. Метеоданные брались по данным метеостанций Росгидромета, с последующей их интерполяцией на регулярную сетку, покрывающую Тульскую область. Данные о типах почвы брались по карте почвенного покрова Тульской области. Моделирование осуществлялось на уровне отдельных полей. Поля для моделирования выбирались посредством пересечения карты с.х. полей для Тульской области с картой озимых посевов, полученных по спутниковым данным.

Для исследования возможности ассимиляции данных дистанционного зондирования в модель по данным спутникового аппарата MODIS была выполнена оценка значений доли проективного покрытия растительности FCover с временным интервалом в 4 дня.

Для оценки способности модели оценивать урожайность озимой пшеницы урожайность культуры по результатам моделирования агрегировались со всех полей Тульской области, и средняя урожайность для области по данным модели сравнивалась с официальной статистикой. Результаты сравнения приведены на рис. 7. По приведенным графикам можно сказать, что модель в целом способна адекватно воспроизводить урожайность.

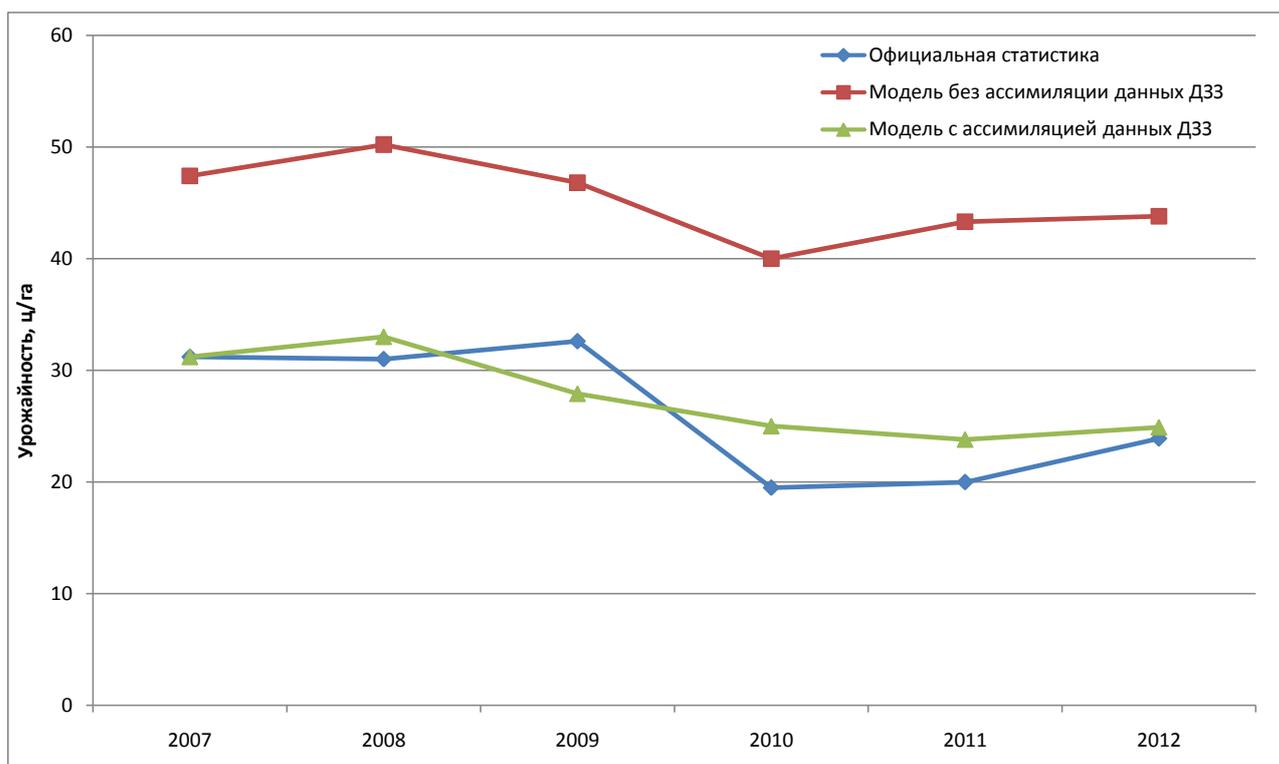


Рис. 7 Сравнение прогнозных значений урожайности, осредненных до уровня Тульской области, с официальной статистикой

Урожайность, полученная по данным модели с ассимиляцией ДЗЗ, почти совпадает по порядку значений урожайности с официальной статистикой (среднее значение за 6 лет - 27,6 и 26,4 ц./га соответственно), в то время как исходная модель дает завышенный прогноз урожайности (45,3 ц./га). Это позволяет нам предположить, что модель с ассимиляцией данных ДЗЗ позволяет более точно учесть неоптимальные условия на отдельных полях (неправильное внесение удобрений, наличие болезней и вредителей).

Этот вывод подтверждает и рис. 8, где показано сравнение результатов работы обеих версий модели в сравнении с данными полевых наблюдений. По этому рисунку видно, что модель без ассимиляции данных ДЗЗ показывает практически одинаковые значения урожайности для всех полей на тестовом участке, в то время как версия модели с ассимиляцией данных ДЗЗ и результаты полевых измерений демонстрируют большую вариацию значений урожайности для разных полей.

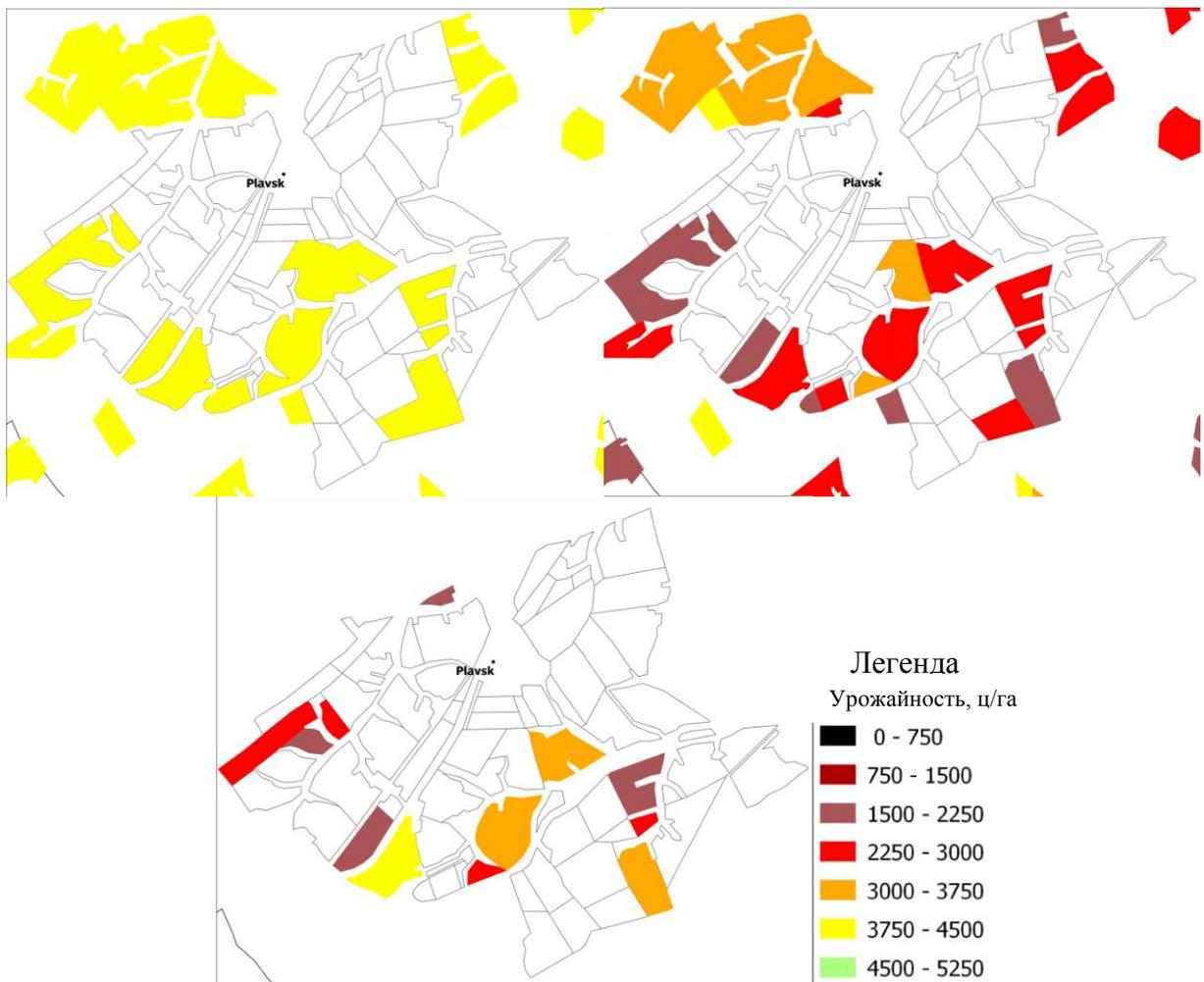


Рис. 8 Сравнение пространственного распределения урожайности озимых на уровне полей по модели без ассимиляции данных (слева вверху) и с ассимиляцией данных ДЗЗ (справа вверху) в сравнении с данными полевых наблюдений (внизу).

РАЗДЕЛ 4.3. МОНИТОРИНГ-КЛИМАТ

Отв. исп. д.ф.-м.н. Шарков Е.А.

4.3.1 Исследование роли глобального тропического циклогенеза как критического элемента в структуре полярного переноса в климатической системе Земли по данным микроволнового спутникового зондирования. В том числе:

- **Формирование научной базы данных за 1983–2013 гг. глобального тропического циклогенеза (включая организацию специализированной предобработки исходных «сырых» спутниковых данных).**

Сформирована научная база данных глобального тропического циклогенеза за 2005–2013 гг. на основе специального препроцессинга (предварительной обработки) исходных «сырых» данных для задач изучения изменчивости климатических параметров планеты.

Блок базы данных за 2005–2011 гг. сформирован на основе ежесуточной информации, полученной из Интернета с сайта Астрономической обсерватории Гавайского университета (<http://www.solar.ifa.hawaii.edu/>), где поступающая первичная информация из JTWC (Флорида) и региональных метеоцентров (Токио, Майами, Нью-Дели, Дарвин, о-в Фиджи, о-в Реюньон и др.) суммировалась и поступала в Интернет в виде ежедневных

пакетов «сырых» данных. Поступающие данные формируются в архив первичных данных с последующим детальным препроцессингом, начиная с первичных форм тропических возмущений и кончая формами конечной диссипацией. Этот блок информации обладает существенно большей полнотой описания событий, происходящих в тропической зоне Мирового океана, чем информация за 1983–1996 гг. Особое внимание уделено изучению временной и траекторной структуры ТЦ Haiyan (рус. Хайян), функционировавшему в акватории Северо-западной части Тихого океана в ноябре 2013 г. и являющимся наиболее интенсивным ТЦ за всю историю спутниковых наблюдений тропических возмущений в циклогенерирующих акваториях Мирового океана. ТЦ Haiyan вызвал катастрофические последствия в административно-хозяйственной структуре на островных территориях Филиппин и сопровождался многочисленными человеческими жертвами. На рисунке представлено видеоизображение ТЦ Haiyan, полученное 8 ноября 2013 г. спетрорадиометром MODIS в момент его максимального развития над островными территориями Филиппин.

Указанная база данных была использована для исследовательских задач по целому ряду направлений, в том числе изучены стохастические режимы генерации и эволюции глобального тропического циклогенеза и выявлены особенности региональных тропических циклогенезов в поле поверхностной температуры Мирового океана; проведена оценка скрытой теплоты экваториальной зоны водяного пара во внутритропической зоне конвергенции атмосферы над Мировым океаном и его региональных составляющих.

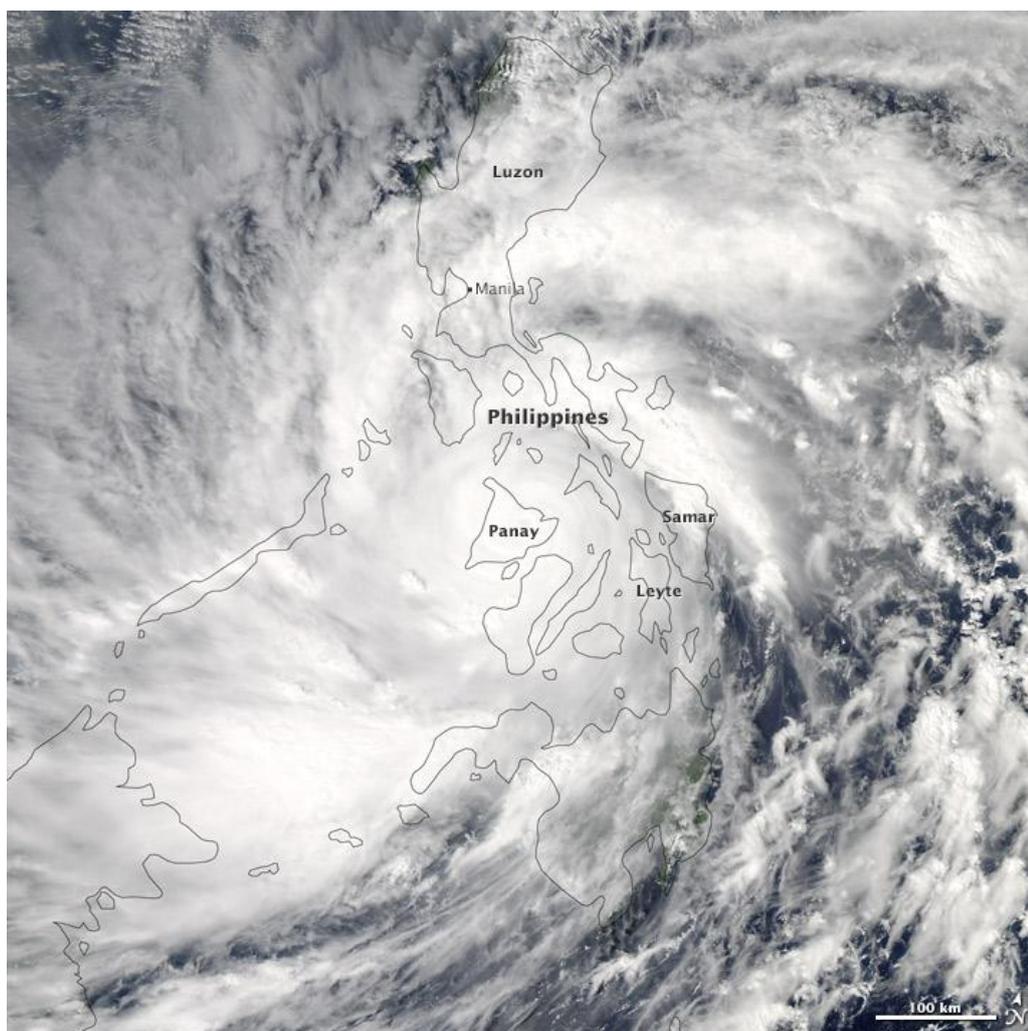


Рис. 1. Видеоизображение ТЦ Haiyan в момент наибольшего развития над Филиппинскими островами

Исполнители

Шарков Е.А. — зав. отделом, д-р физ.-мат. наук, (495) 333-13-66, easharkov@iki.rssi.ru.

Покровская И.В. — гл. спец., (495) 333-53-44, pokr@iki.rssi.ru.

– Разработка программного обеспечения для выявления высокоэнергетических особенностей в глобальном поле водяного пара

Разработка программного обеспечения для выявления высокоэнергетических особенностей в глобальном поле водяного пара шло по двум направлениям. Первое — разработка с помощью программного обеспечения ENVI 4.3 и Microsoft Visual Studio 2008 разработан усовершенствованный вариант базы данных EVA-01 (новое название — хранилище данных EVA-02) с элементами объектно-реляционных технологий, которая включает в себя дистанционную спутниковую информацию о двух стохастических процессах, обладающих принципиально различными пространственно-временными масштабными и структурными характеристиками: первый — тропический циклогенез, который рассматривается как стохастический набор случайных событий (объектов) ТЦ, и второй — как пространственное глобальное поле интегрального водяного пара со значительной пространственно-временной годовой вариабельностью. И второе направление — построение алгоритма формирования глобальных радиотепловых полей системы океан-атмосфера высокой пространственно-временной детальности по спутниковым измерениям. Основное внимание уделено проблеме построения опорных ежесуточных изображений высокого пространственного разрешения. Построение таких опорных карт является важным подготовительным шагом для дальнейшего применения предложенной и реализованной авторами ранее методики пространственно-временной интерполяции. Разработанный программный комплекс, реализующий описанные алгоритмы, позволяет получить глобальные анимированные радиотепловые поля с шагом по времени 1,5 ч и пространственным разрешением 0,2°. Достигнутые параметры принципиально важны для анализа сложных, быстро протекающих и энергоемких процессов в системе океан-атмосфера, связанных, в частности, с формированием и эволюцией тропических циклонов (ТЦ).

С помощью принципиально усовершенствованной комплексной хранилища данных EVA-02 (пространственно-временная эволюция тропического циклогенеза и поля водяного пара) с элементами объектно-реляционного типа выполнен детальный анализ поля интегральной концентрации водяного пара (по данным микроволновых спутниковых систем комплекса DMSP) на всех этапах временной эволюции ТЦ Francisco (2001) в акватории Северо-западной части Тихого океана [1]. В работе экспериментально обнаружено, что на фоне среднего значения интенсивности поля водяного пара, превышающего критическое значения интегрального водяного пара (своего рода, это необходимое условие генезиса любого ТЦ, при котором формируется зрелая форма тропического циклона), формируется своего рода «купола» в поле водяного пара. Выявленные связи областей водяного пара повышенной концентрации (купола) и генезиса тропических циклонов стали очевидной только при применении объектно-реляционных компьютерных технологий и библиотек программы MatLab. При использовании технологии сетчатых 3D-поверхностей были получены отдельные детализированные фрагменты поля водяного пара на каждый временной эволюционный этап преобразования ТЦ, начиная с его генезиса до полного распада и поглощения крупномасштабной фронтальной зоной в Тихом океане (рис. 2). Фиксация по дистанционным микроволновым данным этой особенности поля водяного пара соответствует временным срокам более ранним, чем появление зрелой эволюционной формы ТЦ по данным гидрометеорологических наблюдений и наблюдения состояния облачных масс.

Второе направление, связанное с анимационным высокоскоростным подходом (с временным пикселом до 1,5 ч для глобального изображения) при формировании глобальных полей интегрального водяного пара даёт возможность серьёзного прогресса в исследовании эволюции энергоёмких процессов таких, как быстрая (и достаточно неожиданная для наблюдателей со стандартными методиками) интенсификация тропических циклонов. Выявление физической природы таких трансформаций является одной из важнейших задач динамической метеорологии [2–4].

Исследование процессов быстрой интенсификации тропических циклонов — резкого увеличения максимальной скорости ветра на десятки метров в секунду за сутки — сопряжены с существенными трудностями как фундаментального (отсутствие общепринятой модели), так и технического характера. В частности, установлено, что в прогностических целях важно располагать информацией о краткосрочной (порядка 12 ч и, желательно, менее до 3 ч) предыстории эволюции ТЦ. Однако современные средства оперативного дистанционного мониторинга Земли пока не могут обеспечить исследователей необходимым объёмом экспериментальных данных с требуемой пространственно-временной детализацией. В связи с этим при анализе и прогнозе эволюции ТЦ применяются различные ассимиляционные и интерполяционные методики [2–4].

В докладах [1–6] показано, что предложенная авторами ранее методика пространственно-временной интерполяции спутниковых данных на основе анимационного подхода может быть также использована для расчета количественных характеристик, непосредственно связанных с эволюцией ТЦ и его энергетическим балансом. В числе рассмотренных характеристик — потоки скрытого тепла через замкнутые контуры, окружающие ТЦ, а также полное паросодержание атмосферы внутри этих контуров. Та же методика без каких-либо изменений применима и по отношению к полям различных геофизических характеристик океана, в частности, температуры его поверхности (ТПО), часто привлекаемой к анализу и прогнозу эволюции ТЦ.

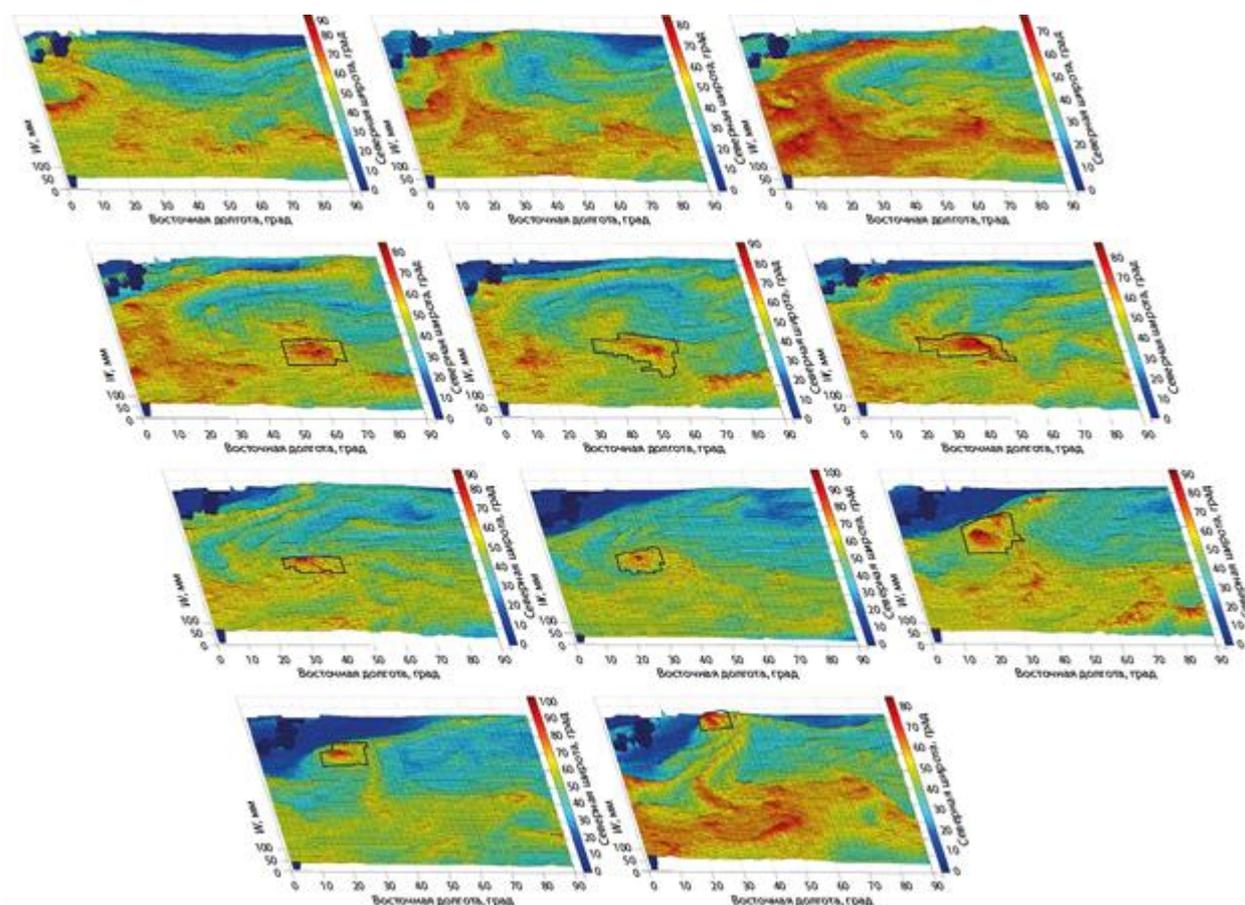


Рис. 2. Временная эволюция поля интегрального водяного пара в северо-западной части Тихого океана в присутствии ТЦ Francisco за 15–25 сентября 2001 г. в режиме рельефного наблюдения по ежесуточным фрагментам

В докладах [1–6] также приведены некоторые результаты обработки непрерывного ряда спутниковых глобальных радиотепловых наблюдений, охватывающих интервал 27 июля – 26 августа 2000 г. В указанном интервале выделены тропические возмущения, достигшие стадии урагана. В ряде случаев выделенные возмущения претерпевали как фазы быстрой интенсификации, так и фазы последующей диссипации над участками открытой воды (в случае ТЦ Alberto и ТЦ Ewiniar — неоднократно). Для этих случаев анимационный анализ был проведен на всем времени эволюции ТЦ. В других случаях эволюцию ТЦ можно было проследить средствами анимационного анализа лишь частично — до достижения стадии урагана. В совокупности исследованы ТЦ: в Северной Атлантике Alberto (04–23 августа), Debby (17–24 августа); на северо-западе Тихого океана Bilis (15–24 августа), Ewiniar (11–18 августа), Jelawat (1–12 августа); на северо-востоке Тихого океана Giema (4–11 августа), Hector (8–20 августа). На рис. 3 представлен один из фрагментов полной анимации поля интегрального водяного пара в Северной Атлантики в момент наибольшей интенсификации ТЦ Alberto 13 августа 2000 г.

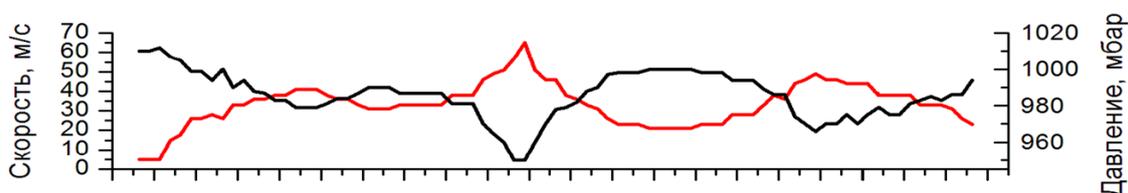
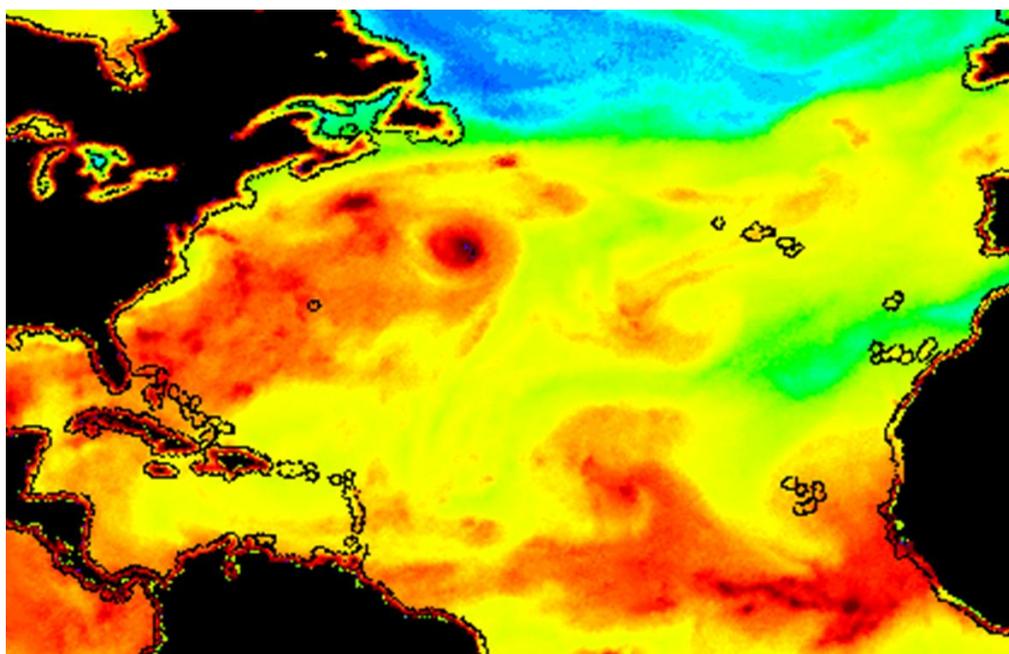


Рис. 3. Фрагмент из полной анимации поля интегрального водяного пара в Северной Атлантике в момент наибольшей интенсификации ТЦ Alberto 13 августа 2000 г.

Для всех рассмотренных случаев построены и сопоставлены между собой синхронные временные ряды полученных в анимационном анализе оценок потоков скрытого тепла, полного паросодержания, ТПО и независимо измеренных стандартных метеорологических характеристик ТЦ (максимальной скорости ветра, минимального давления). В указанных докладах обсуждены результаты выполненных сопоставлений и перспективы применения анимационного подхода для анализа и прогноза эволюции ТЦ.

Исполнители

Шарков Е.А. — зав. отделом, д-р физ.-мат. наук, (495) 333-13-66, easharkov@iki.rssi.ru.

Покровская И.В. — гл. спец., (495) 333-53-44, pokr@iki.rssi.ru.

Ермаков Д.М. — науч. сотр., канд. физ.-мат. наук (495) 333-43-01, pldime@gmail.com.

Раев М.Д. — зав. лаб., канд. физ.-мат. наук (495) 333-43-01, mraev@asp.iki.rssi.ru.

4.3.2 Разработка метода восстановления детального профиля водяного пара по микроволновым измерениям спутниковых систем нового поколения для формирования новых моделей генезиса атмосферных катастроф в насыщенной сжимаемой атмосфере.

Отв. исп. канд. физ.-мат. наук Хапин Ю.Б., канд. физ.-мат. наук Кузьмин А.В.

В проведённой в 2013 г. работе рассматривалась возможность восстановления детальных профилей водяного пара в тропической атмосфере по данным спутниковых измерений радиотеплового микроволнового излучения. В прямой задаче сделана попытка сравнения весовых функций для восходящего излучения атмосферного водяного пара в окрестности линии резонансной линии 183 ГГц для стандартной тропической атмосферы и атмосферы по данным реального радиозондирования в районе циклонов.

При расчётах учитывалось поглощение в молекулярном кислороде, молекулярном водяном паре и облачности. Расчёт весовых функций электромагнитного излучения атмосферы в окрестностях линий резонанса 183,3 ГГц проводился методом численного интегрирования. Атмосфера до высоты 25 км разбивается на слои высотой $\Delta h = 100$ м, где рассчитывается погонное поглощение в середине каждого слоя. Радиояркостная температура i -го атмосферного слоя с учётом ослабления излучения вышележащими слоями может быть представлена в виде:

$$T_{ai} = T(h_i)[1 - \exp(-\gamma(h_i)\Delta h \sec \theta)] \sum_{k=i+1}^n \gamma(h_k)\Delta h \sec \theta,$$

где $T(h_i)$ — температура i -го слоя; $\gamma(h_i)$ — погонное атмосферное поглощение в середине слоя; $n = 250$ — число слоёв. Яркостная температура каждого слоя нормируется к температуре слоя с максимальной радиояркостной температурой. В расчётах угол падения θ составлял 53° (высота орбиты 823 км, надирный угол — 45°), предполагался двухполосный супергетеродинный режим приёма излучения радиометром, входные полосы симметричны относительно центра резонансной линии 183,3 ГГц.

Для расчёта весовых функций были выбраны следующие модели атмосфер, представленные в таблице.

Модели атмосферы, используемые в расчётах

№	Модель атмосферы	Температура воздуха у поверхности, К	Давление, мб	Влажность, г/м ³	Интегральная влажность, кг/м ²
М1	Стандартная тропическая	300	1013	19,0	41,4
М2	Радиозонд ИКИ (Зонд 45)	300,8	1005,5	22,4	61,4
М3	Радиозонд ИКИ (Зонд 46)	302,0	1005,9	22,9	59,8
М4	Радиозонд ИКИ (Зонд 49)	299,8	1007,5	22,7	62,2
М5	Радиозонд США (Зонд 1)	300,2	1009,5	21,8	59,4
М6	Радиозонд США (Зонд 2)	300,7	1006,2	21,9	56,7

Высотные профили метеопараметров для трёх выбранных моделей атмосфер, одна из которых является стандартной тропической атмосферой, т.е. усреднённой, изображены на рис. 1. Две другие модели атмосферы представляют собой реальные профили параметров, измеренных в теле тропических циклонов.

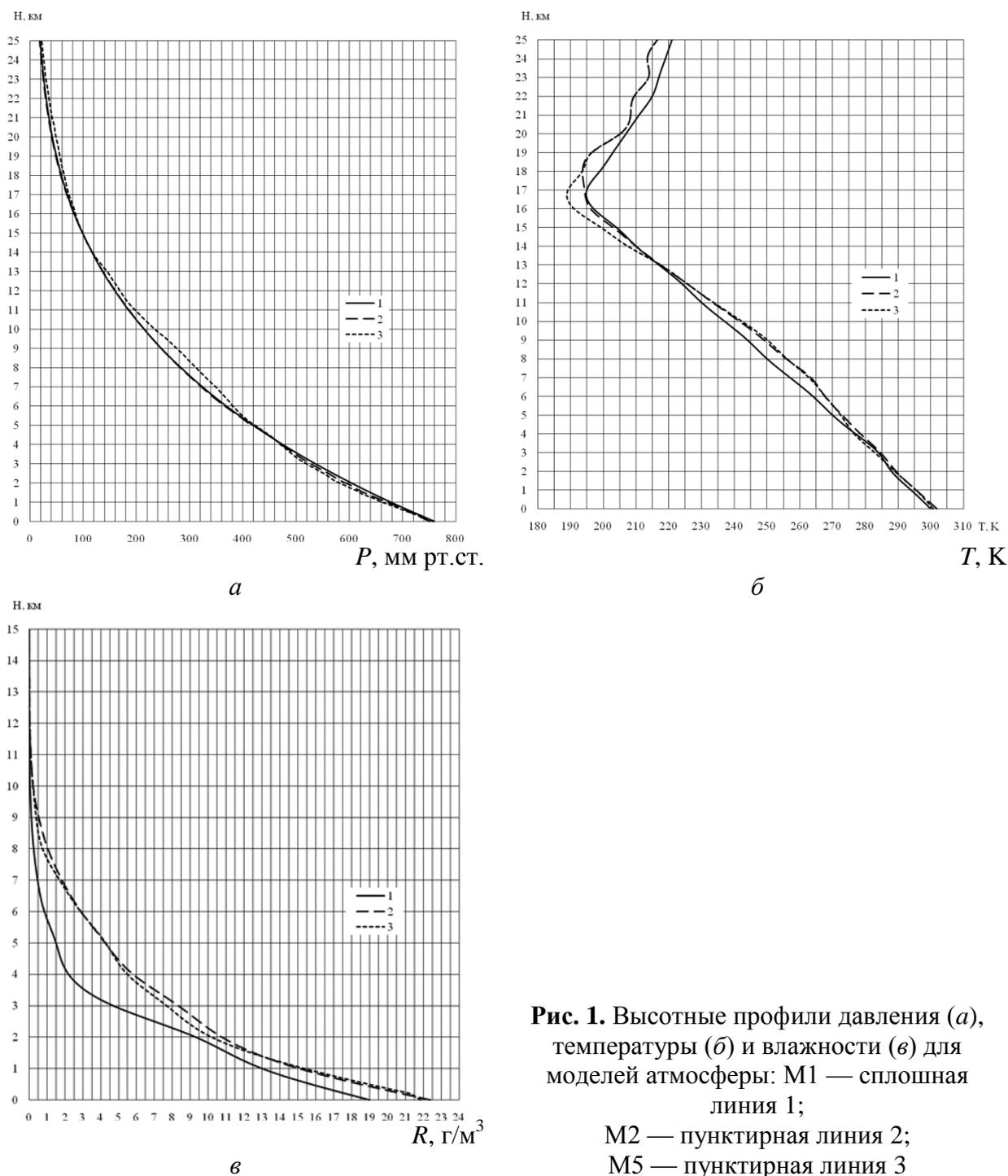


Рис. 1. Высотные профили давления (*а*), температуры (*б*) и влажности (*в*) для моделей атмосферы: М1 — сплошная линия 1; М2 — пунктирная линия 2; М5 — пунктирная линия 3

Результаты расчёта весовых функций восходящего излучения атмосферы в линии 183,3 ГГц, а также на частоте 154 ГГц приведены на рис. 2. Центры полос приёма выбирались таким образом, чтобы максимумы весовых функций достаточно равномерно располагались по высоте и охватывали максимальный диапазон высот. Здесь также учитывалась возможная ширина входной полосы приёмного устройства. Расчёты показывают, что максимумы функций для стандартной тропической атмосферы и для радиозонда ИКИ РАН по высоте расположены достаточно равномерно от 2,5 км до 10...11 км, число уровней может составлять 7–8. Снизить высоту максимума весовой функции ниже 2,5 км не позволяет ограничение на ширину входной полосы приёмника. Высота максимумов функции превышает 10 км и ограничивается возможностью приближения частоты полосы приёма к центру резонансной линии.

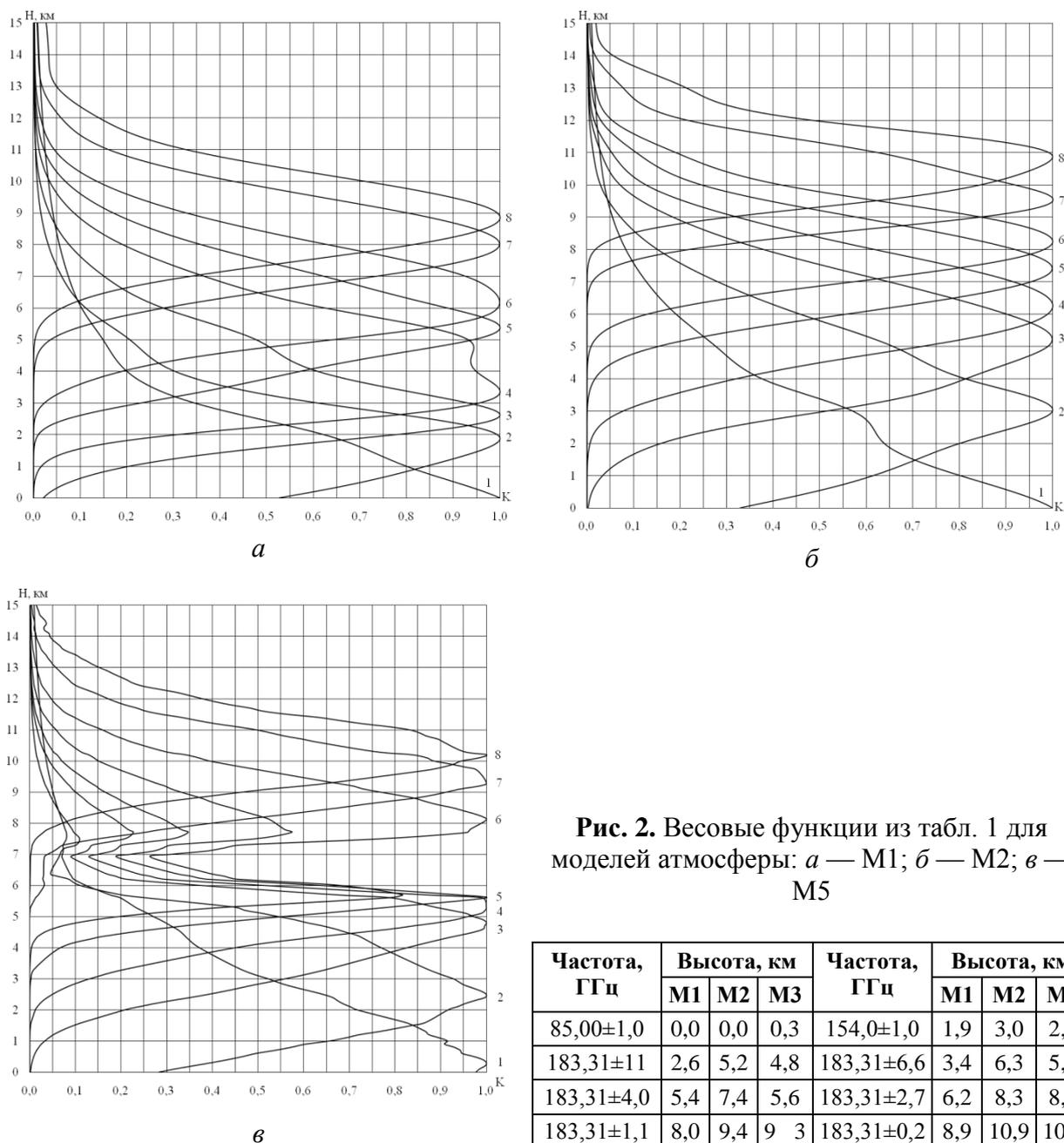


Рис. 2. Весовые функции из табл. 1 для моделей атмосферы: *а* — М1; *б* — М2; *в* — М5

Частота, ГГц	Высота, км			Частота, ГГц	Высота, км		
	М1	М2	М3		М1	М2	М3
85,00±1,0	0,0	0,0	0,3	154,0±1,0	1,9	3,0	2,5
183,31±11	2,6	5,2	4,8	183,31±6,6	3,4	6,3	5,3
183,31±4,0	5,4	7,4	5,6	183,31±2,7	6,2	8,3	8,1
183,31±1,1	8,0	9,4	9,3	183,31±0,2	8,9	10,9	10,2

Следует отметить существенное отличие этих двух высотных профилей от профилей, полученных радиозондом США. Если стандартная тропическая атмосфера является некой идеальной несуществующей атмосферой, то профили двух других видов являются реальными экспериментальными данными. Однако если для радиозондов ИКИ РАН разрешение по высоте составляло порядка 200 м, то для радиозонда США разрешение было 10 м. Результаты расчётов для радиозонда США с разрешением 10 м показали полную хаотичность весовых функций, видимо связанную с процессами турбулентности в атмосфере. Усреднение данных до 100 м позволило весовым функциям приобрести некий осмысленный вид. Весовые функции, рассчитанные по данным радиозонда США, приобретают «двугорбый» вид, тем самым показывают существенное отличие от весовых функций радиозонда ИКИ и, тем более, от стандартной тропической атмосферы.

Таким образом, расчёты показывают, что весовые функции восходящего излучения атмосферного водяного пара существенно изменяются для атмосферы периферии тропического циклона от весовых функций стандартной тропической атмосферы.

Изменяются высоты максимумов этих функций, а также их форма. Это потребует разработку дополнительных мер для разработки методов восстановления детальных высотных профилей влажности по 8–10 уровням до высот 10 км в тропической атмосфере средствами пассивной радиометрии с орбиты искусственного спутника Земли.

Исполнители

Репина И.А. — д-р физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., repina@ifaran.ru.

Родионов С.Н. — канд. физ.-мат. наук, вед. инж.

Пашинов Е.В. — мл. науч. сотр.

Селунский А.Б. — вед. матем., alexendersel@mail.ru.

4.3.3 Разработка эскизного проекта космического эксперимента «Конвергенция» ориентированного на определение детальных профилей температуры и влажности атмосферы при исследовании генезиса атмосферных катастроф.

Отв. исп., канд. физ.-мат. наук Кузьмин А.В.

Создана заявка и разработано техническое задание на космический эксперимент (КЭ) «Определение детальных профилей температуры и влажности атмосферы при исследовании генезиса атмосферных катастроф» (шифр «Конвергенция») на российском сегменте МКС.

Целью космического эксперимента является исследование основ зарождения и эволюции крупномасштабных кризисных атмосферных процессов типа тайфунов и тропических циклонов как одних из основных элементов в формировании глобального массо- и влагообмена в системе океан-атмосфера, измерение абсолютных радиоярких температур системы атмосфера-океан тропиков в диапазоне 6...220 ГГц, определение детальных профилей температуры и влажности атмосферы, проведение исследований по круглосуточному обнаружению вспышек молний, определение энергетических, пространственных и временных характеристик вспышек молний, определение зон грозовой деятельности.

Для проведения КЭ «Конвергенция» устанавливаются сканирующий микроволновый радиометр-спектрометр (МРС) и детектор молний (ДМ). Аппаратура МРС предназначена для измерения радиотеплового излучения атмосферы Земли и её поверхности в микроволновом диапазоне и представляет собой многоканальный радиометр панорамного типа обзора со сканированием пространства лучами, вращающимися вокруг направления в нади́р под постоянным углом $45 \pm 0,1^\circ$ (коническое сканирование) с периодом 1,29 с. При таком способе обзора поверхности Земли для высоты орбиты космического аппарата 450 км полоса обзора составит 810 км. Детектор молний предназначен для обнаружения вспышек молний в полосе захвата 680 км (формат кадра 680×550 км). Наблюдение вспышек молний ведётся в нади́р.

К основным научно-техническим задачам КЭ «Конвергенция» можно отнести:

- высокоточные измерения абсолютных радиоярких температур в диапазоне 6...220 ГГц с точностью не хуже 1 К;
- измерение интегрального содержания атмосферного водяного пара от 10 до 80 кг/м² с относительной погрешностью не более 10 %;
- восстановление профилей влажности и температуры тропосферы на 8–10 уровнях с относительной погрешностью не более 15 %;
- измерение интегрального содержания капельной влаги атмосферы от 0...2 кг/м² с относительной погрешностью не более 10 %;
- измерение интенсивности осадков в пределах 0...20 мм/ч с относительной погрешностью не более 10 %;

- измерение температуры поверхности океана (ТПО) с точностью не хуже 1 К и относительной погрешностью не более 0,1 К;
- измерение скорости ветра над морской поверхностью с точностью 1...2 м/с по величине и 10...20° по направлению;
- регистрация вспышек молний с интегральной по времени яркостью 6 мкДж/(м²*ср);
- определение координат вспышек молний с погрешностью не более 10 км.

Организация-постановщик Институт космических исследований РАН, научный руководитель д-р физ.-мат. наук Шарков Е.А., ответственный исполнитель канд. физ.-мат. наук Кузьмин А.В.

Участники КЭ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук и филиал ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» НПП «ОПТЭКС».

В качестве обоснования КЭ «К2конвергенция» отметим, что тропический циклон представляет собой явление природы планетарного масштаба. С одной стороны, тропические циклоны приносят большие материальные убытки и людские потери, с другой — это механизм выноса скрытой энергии и влаги из экваториального пояса в средние широты. Одним из основных факторов, определяющих происходящие в системе атмосфера-океан, и в особенности в тропических циклонах, процессы является атмосферный водяной пар. Получение оперативной информации о детальных трёхмерных полях влажности методами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса позволит решить ряд актуальных научных и практических задач. В частности, даст возможность изучения физических условий генезиса и эволюции тропических циклонов, предсказания возникновения катастрофических крупномасштабных кризисных процессов в атмосфере тропиков. Важным информативным признаком циклона является грозовая активность. Исследования грозовой активности циклонов позволяют уточнить характеристики вспышек молний, а также реализовать совместную обработку данных МРС и детектора молний. Эти данные должны использоваться при разработке детектора молний, предназначенного для установки на геостационарный КА «Электро-М», данные с которого будут непосредственно использоваться для организации воздушного движения, выдачи оперативных предупреждений об опасных метеоявлениях и тому подобных задач.

Для проведения КЭ необходимо выполнить следующие работы:

- разработать ТЗ на аппаратуру и её установку на борт КА;
- согласовать ТЗ с ОАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева»;
- разработать аппаратуру микроволнового сканирующего радиометра-спектрометра МРС;
- разработать детектор молний ДМ;
- разработать алгоритмы определения параметров системы океан-атмосфера;
- разработать программное обеспечения (ПО) для определения параметров системы океан-атмосфера;
- разработать ПО для доведения параметров системы океан-атмосфера до конечного пользователя;
- разработать методику и программы определения характеристик вспышек молний и карт грозовой активности;
- провести КЭ на борту РС МКС;
- выполнить анализ результатов КЭ и разработку программы второго этапа.

Основным ожидаемым результатом с широким диапазоном практического применения в науке и социально-экономической сфере станут уникальные данные и измерения:

- данные по глобальному мониторингу основных параметров атмосферы и океана: ТПО, скорость и направление приповерхностного ветра, интегральное содержание

атмосферного водяного пара и содержание капельной влаги атмосферы, интенсивности осадков;

- данные 3-D-полей температуры и влажности атмосферы;
- разработка методики организации и проведения комплексных измерений во время генезиса и эволюции кризисных атмосферных процессов типа тайфунов, фронтальных зон и циклонов средних широт;
- выявление роли и взаимодействия циклогенеза и фронтогенеза в полярном переносе массы скрытого тепла при формировании парникового эффекта;
- проведение натурального эксперимента по круглосуточному обнаружению вспышек молний;
- определение энергетических, пространственных и временных характеристик вспышек молний;
- определение зон грозовой деятельности;
- обеспечение свободного доступа через Интернет к восстановленным по результатам измерений аппаратурой МРС и ДМ данным полей температур относительной влажности и пространственно-временных характеристик вспышек молний в режиме времени, близком к реальному, с географической привязкой к местности.

Исполнители

Хапин Ю.Б. — канд. физ.-мат. наук, гл. констр. пр.,

Родионов С.Н. — канд. физ.-мат. наук, вед. инж.

Утеев А.В. — ст. лаб.

4.3.4 Изучение проявления климатических тенденций в структуре радиотеплового поля Земли с использованием данных микроволнового спутникового мониторинга.

Отв. исп. д-р физ.-мат. наук Астафьева Н.М.

Общая циркуляция атмосферы — один из важнейших процессов в климатической системе Земли. Именно изменения циркуляции атмосферы определяют изменения климатических полей, влияют на динамику таких важнейших процессов системы океан-атмосфера, как Эль-Ниньо – Ла-Нинья и тропический циклогенез. Траектории тропических циклонов (ТЦ) находятся в прямой зависимости от циркуляционных особенностей атмосферы. Например, годы абсолютных экстремумов количества ТЦ на планете (103 ТЦ в 1971 г. и 61 ТЦ в 1999 г., на 23 % больше и на 27 % меньше нормы, соответственно) и в Северном полушарии (75 ТЦ в 1971 г. и 41 ТЦ в 1999 г., на 31 % больше и на 28 % меньше нормы, соответственно), характеризуются разными типами атмосферной циркуляции: в течение всего 1971 г. преобладали меридиональные процессы, а резкое ослабление меридиональной циркуляции и усиление зональных процессов наблюдалось в течение всего 1999 года. Рассмотрены примеры ТЦ, необычных по структуре и траекториям. Использована информация Национального ураганного центра NHC (National Hurricane Center – Tropical Prediction Center NOAA, <http://www.nhc.noaa.gov>) и данные микроволнового спутникового мониторинга из электронной коллекции ИКИ РАН GLOBAL-Field (<http://www.iki.rssi.ru>), содержащей информацию о динамике распределения влаго- и водозапаса тропосферы за 18 лет.

Пространственно-временная динамика распределения радиояркой температуры атмосферы Южного полушария изучается на основе серий глобальных радиотепловых полей, сформированных в Институте космических исследований РАН из полосовых данных микроволнового спутникового мониторинга Земли радиометром SSM/I (Special Sensor Microwave / Imager) в рамках программы DMSP (Defense Meteorological Satellite Program; <http://dmsp.ngdc.noaa.gov/dmsp.html>). Хорошие регулярность и плотность

покрытия (два полных поля в сутки с шагом $0,5 \times 0,5^\circ$ по земной поверхности) делают глобальные радиотепловые поля из электронной коллекции GLOBAL-Field (<http://www.iki.rssi.ru/asp/>) пригодными для изучения энергоёмких термодинамических процессов, ответственных за перенос тепла и массы (влаги особенно) в атмосфере, в широком диапазоне пространственно-временных масштабов — от синоптических до междугодовых (за 11 лет) и как глобальных, так и региональных (от сотен километров до планетарных). Изучаются пространственно-временные колебания полей радиояркостной температуры (т.е. полей влаго- и водозапаса тропосферы) Северного и Южного полушарий, связанные с крупномасштабными (фактически планетарного масштаба) межгодовыми (на масштабах процесса Эль-Ниньо – Ла-Нинья, т.е. 4–10 лет) атмосферными колебаниями. Особое внимание уделяется межполушарным колебаниям и выявлению структурных различий между полушариями. Проведено сравнение результатов анализа выявленных атмосферных структур разного масштаба с пространственно-временной динамикой основных центров действия атмосферы Южного полушария.

Характерные масштабы и качественно различные эпохи процесса системы океан-атмосфера Эль-Ниньо – Ла-Нинья (ЭН–ЛН) изучаются с использованием данных наблюдений (палеоданных, данных индустриальной эпохи и спутниковых данных). Между океаном и атмосферой существует глубокая связь, важнейшим звеном которой является вода, содержащаяся в воздухе в виде пара, капель, кристаллов. Спутниковый мониторинг состояния атмосферы над акваториями океанов, в частности, мониторинг содержания и переноса водяного пара в атмосфере, позволил получить более полную картину развития процессов в системе океан–атмосфера на больших пространственно-временных масштабах и выявить связи, которые ранее замечены не были. Структура общей циркуляции атмосферы Южного полушария (ЮП) с её квазистационарными центрами действия и западным зональным потоком оказывает доминирующее, если даже не определяющее, влияние на развитие процесса ЭН–ЛН. Языки холодного сухого воздуха, сгоняющие теплую воду в экваториальной зоне Тихого океана на запад, направляются сюда из западного зонального потока ЮП. Такие языки, формирующиеся в результате неустойчивости этого потока, наблюдаются во всех южных акваториях океанов — они направляются в экваториальные зоны Атлантики, Тихого и Индийского океанов вдоль западных границ Африканского континента, Южной Америки и Австралии. Неустойчивость западного потока может определяться межполушарными колебаниями ОЦА, одной из составляющих которых могут быть колебания, связанные со сменой типов циркуляции (с доминированием меридиональных или широтных движений).

4.3.5 Создание принципиально новой электродинамической модели радиоизлучения арктического ледяного покрова для изучения пространственно-временных характеристик северной полярной шапки по данным многочастотной микроволновой спутниковой радиометрии в контексте задач изучения изменчивости климатических параметров планеты.

Отв. исп. канд. физ.-мат. наук Тихонов В.В.

Глобальный мониторинг ледяного покрова полярных областей может выполняться только с использованием средств дистанционного зондирования, расположенных на современных искусственных спутниках Земли. В отличие от датчиков, работающих в видимом и инфракрасном диапазонах, использование пассивных микроволновых датчиков обеспечивает полное информационное покрытие полярных регионов Земли при любых метеорологических условиях. Спутниковые измерения в микроволновом диапазоне, начавшиеся в конце октября 1978 г. с использованием радиометра SMMR, продолженные в 1987 г. с использованием прибора SSM/I и продолжающиеся по сей день благодаря запущенному на спутниках F16, F17 и F18 серии DMPS прибору SSMI/S предоставляют

уникальную возможность мониторинга климата полярных регионов.

Однако применяемые в настоящее время алгоритмы восстановления характеристик ледяного покрова из данных пассивного микроволнового зондирования по разным причинам дают существенные погрешности, особенно в летний период, а также в прикромочных зонах и в районах редких льдов. Одним из источников ошибок служит тот факт, что существующие в настоящее время алгоритмы восстановления характеристик ледяного покрова по пассивным микроволновым спутниковым данным используют, эмпирические зависимости и подгоночные коэффициенты, пренебрегая физикой процесса.

В ходе работы создана новая электродинамическая модель излучения системы «водная поверхность – лёд – снежный покров – атмосфера», проанализированы основные физические параметры, влияющие на яркостную температуру системы, проведены сравнения со спутниковыми данными. На основе разработанной модели «водная поверхность – лёд – снежный покров – атмосфера» предложен алгоритм определения сплочённости ледяного покрова Арктики по микроволновым спутниковым данным — Variation Arctic Sea Ice Algorithm (VASIA). Сравнение сплочённости ледяного покрова Арктики для различных сезонов, выполненные по разработанному алгоритму с данными, полученными по другим, наиболее используемым, алгоритмам (NASA Team, NASA Team 2, Comiso Bootstrap, ASI и др.), а также с данными корабельных визуальных наблюдений показало перспективность создаваемой методики.

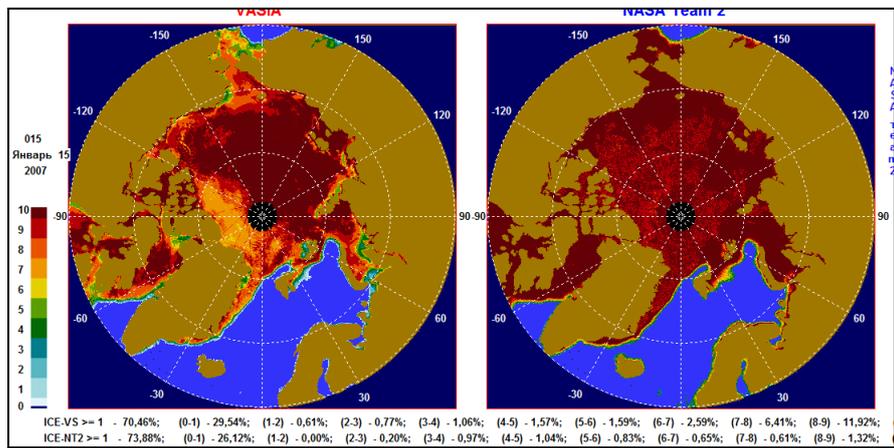
На рис. 1 показано сравнение сплочённостей ледяного покрова Арктики, рассчитанных по разработанному алгоритму (VASIA) и алгоритму NASA Team 2. Внизу каждого рисунка представлены значения в процентах общей площади покрытой льдом и площади сплоченности по баллам. Видно, что в холодное время года (см. рис. 1а, б, е, ж), ледовые поля, построенные по двум алгоритмам, в общем, соответствуют друг другу. Есть расхождения в определении сплоченности кромки льда. Этот вопрос требует дальнейшего исследования — сравнения с радиолокационными снимками и снимками оптического диапазона. Однако результаты сравнения с данными визуальных корабельных наблюдений показывают, что алгоритм VASIA лучше разрешает кромку льда, чем алгоритм NASA Team 2. Сильные различия в определении сплоченности ледяного покрова по двум алгоритмам появляются в летнее время года (см. рис. 1в, з). Связано это с тем, что повышается температура воздуха, начинает таять снежный покров и на льду появляются снежницы — снег, смешанный с водой, и лужи. Снежницы — важнейший элемент арктической климатической системы. Покрывая, в летний период, более 50 % площади льдов и обладая низким альбедо, они поглощают в несколько раз больше приходящей коротковолновой радиации, чем остальная часть снежно-ледяного покрова. Глубина снежниц может варьироваться от нескольких сантиметров до 1,5 м. Размеры их могут достигать до сотен квадратных метров. Наблюдаемая заниженная сплоченность льда в разработанном алгоритме объясняется проблемой снежниц. Поскольку алгоритм построен на основе реальной физической модели, то он и показывает реальную картину поверхности, которую «видит» прибор из космоса. Толщина скин-слоя воды в диапазоне миллиметровых волн составляет менее 0,5 мм. Соответственно, даже миллиметровый слой воды на поверхности льда, будет восприниматься радиометром, как участок открытой воды. В результате чего сведения о сплоченности льда в летний период получаются сильно заниженными. Доказательством утверждения, что алгоритм VASIA показывает именно снежницы, а не просто занижает сплоченность льда в летнее время, служит рис. 1д, е — сентябрь-октябрь, температура воздуха понизилась, снежницы стали замерзать и сплоченности льда, определенные по двум алгоритмам стали схожи.

Определение снежниц и, соответственно, видимое занижение сплоченности, ледяных полей Арктики в летнее время по микроволновым спутниковым данным алгоритмом VASIA, является одновременно его достоинством и недостатком. С одной стороны, взаимодействие поверхности с атмосферой, и соответственно, различные вариации климата, будут определяться наличием или отсутствием на поверхности льда

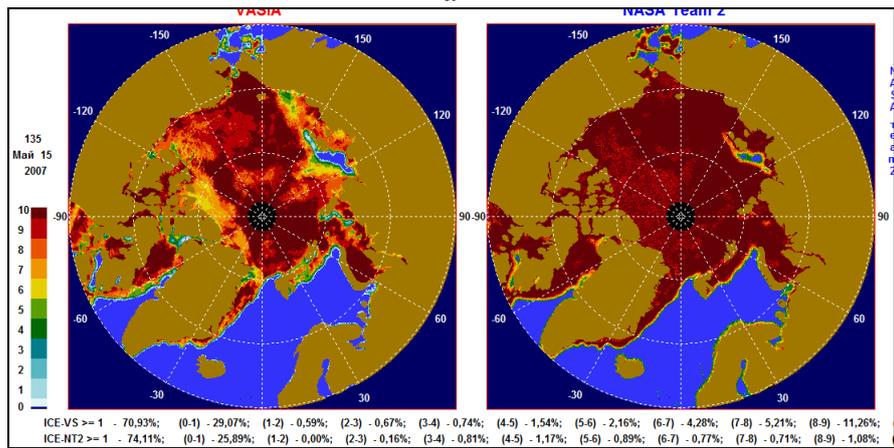
снежниц. С другой стороны, наличие снежниц на ледяных полях, дают заниженную сплоченность льда, полученную по алгоритму VASIA. В настоящее время ведется работа по усовершенствованию, разработанного алгоритма. В перспективе предполагается, что алгоритм VASIA будет показывать две картинки — со снежницами и реальную сплоченность ледяного покрова.

Основные результаты

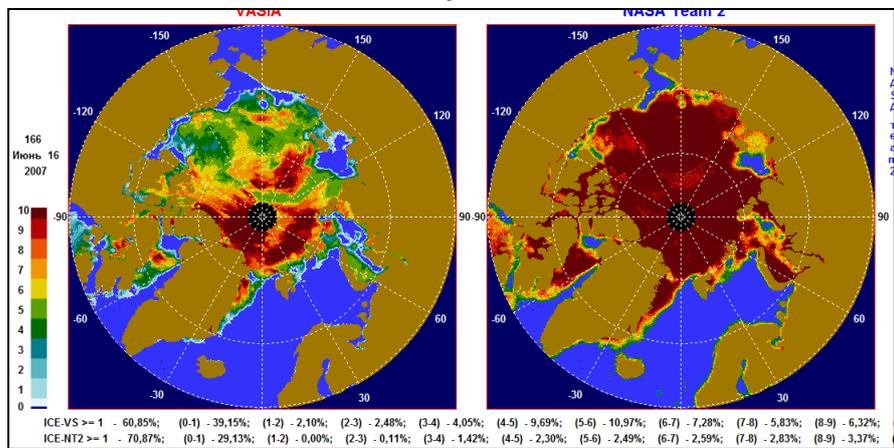
1. Разработана электродинамическая модель эффективной диэлектрической проницаемости снега и морского льда, учитывающая их физические и структурные характеристики, а также рассеяние излучения на структурных неоднородностях. Расчеты диэлектрических свойств снега и морского льда, выполненные по модели хорошо согласуются экспериментальным данным.
2. Разработана модель излучательной способности ледяного и снежного покрова, учитывающая слоистость среды, а также структурные и физические особенности каждого слоя.
3. Разработана модель излучение системы «водная поверхность – лёд – снежный покров – атмосфера» в микроволновом диапазоне электромагнитных волн.
4. Впервые теоретически показано, что для рабочих частот приборов SSM/I и SSMI/S, вклад в излучение системы «водная поверхность – лёд – снежный покров – атмосфера» даёт только небольшой слой твёрдой поверхности: от 30...40 см на частоте 19.35 ГГц, до нескольких миллиметров на частотах 85,5...91,655 ГГц. Этот результат подтверждается экспериментальными работами.
5. Впервые теоретически получено, что при наличии снежного покрова на поверхности льда, толщиной более 30 см, излучение системы определяет только слой снежного покрова (диапазон SSM/I и SSMI/S). Этот вывод подтверждается рядом экспериментов, описанных в отечественных и зарубежных работах.
6. Проведенные расчеты яркостной температуры арктического льда различной сплоченности и степени заснеженности на основе предложенной модели хорошо согласуются с данными приборов SSM/I и SSMI/S.
7. Разработан алгоритм определения сплочённости ледяного покрова полярных регионов по данным SSM/I и SSMI/S изображений — Variation Arctic Sea Ice Algorithm (VASIA).



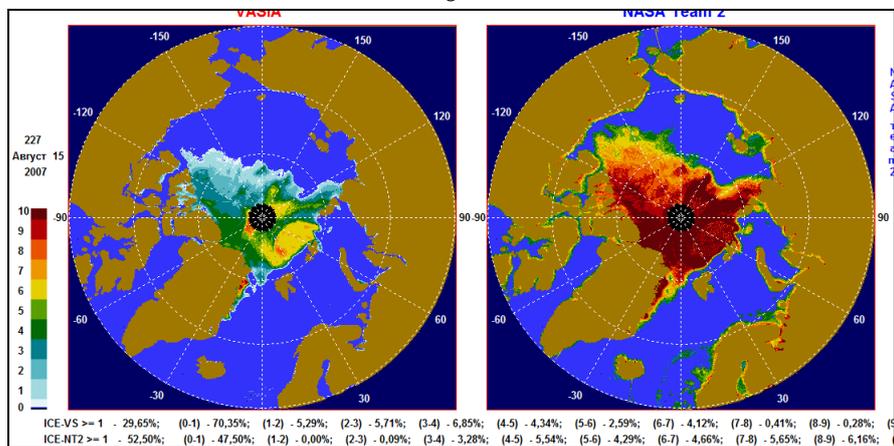
a



б



в



г

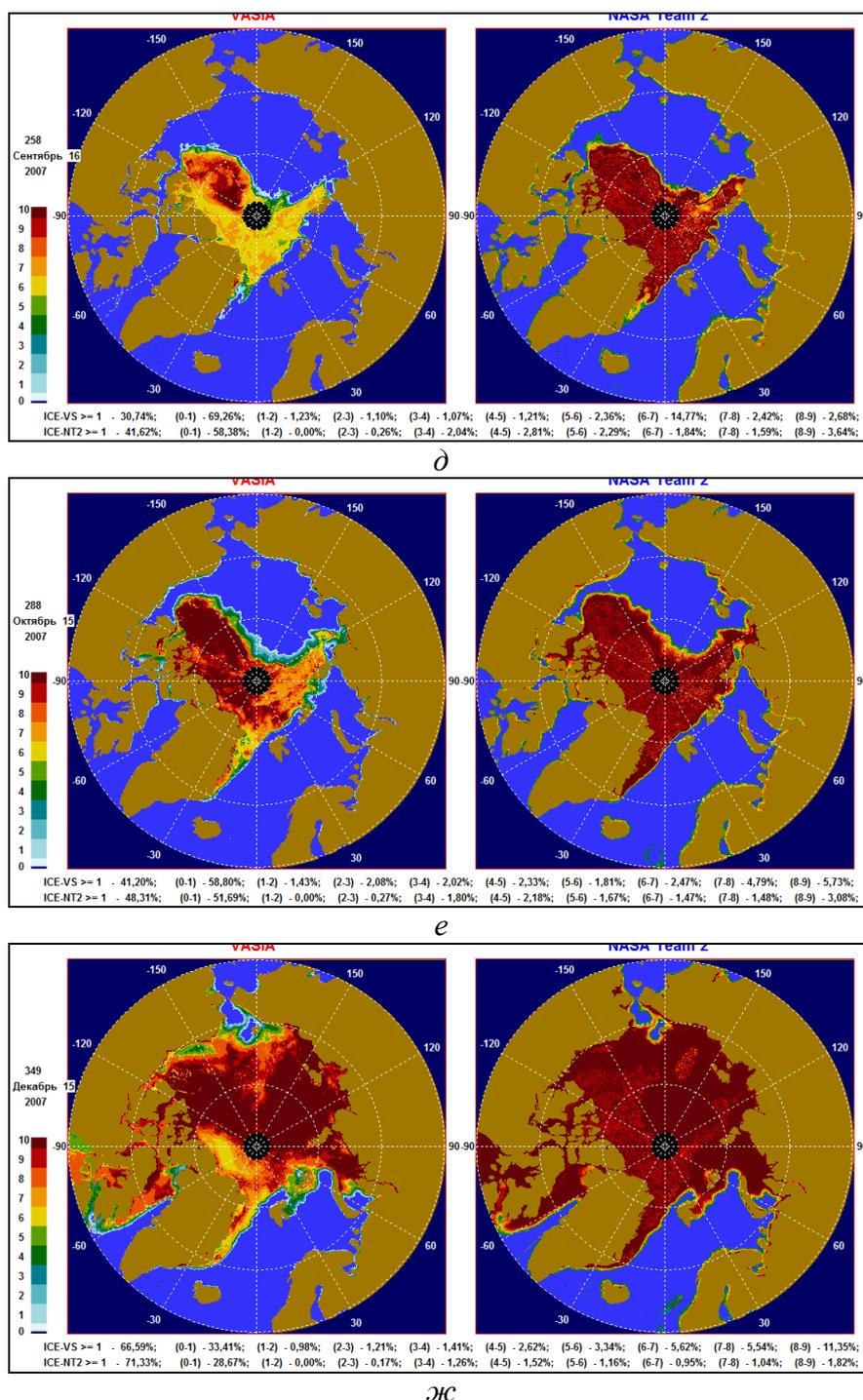


Рис. 1. Сплочённость ледяного покрова Арктики за 2007 г. по данным SSM/I. Слева — расчёт по разработанному алгоритму (VASIA); справа — по алгоритму NASA Team 2: *а* — 15.01.2007; *б* — 15.05.2007; *в* — 16.06.2007; *г* — 15.08.2007; *д* — 15.09.2007; *е* — 15.10.2007; *ж* — 15.12.2007

Работа выполняется совместно с Институтом физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ИФА РАН) и с Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом (ААНИИ).

Исполнители

Шарков Е.А. — зав. отделом, д-р физ.-мат. наук, (495) 333-13-66, easharkov@iki.rssi.ru.

Раев М.Д. — зав. лаб., канд. физ.-мат. наук, (495) 333-43-01, mraev@asp.iki.rssi.ru.

Репина И.А. — ст. науч. сотр., д-р физ.-мат. наук, (495) 333-43-02, repina@ifaran.ru.

Тихонов В.В. — ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук, (495) 333-50-78, vtikhonov@asp.iki.rssi.ru.

Боярский Д.А. — ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук, (495) 333-50-78, dboyarski@rambler.ru.

Комарова Н.Ю. — вед. спец., (495) 333-42-56, nata.komarova@asp.iki.rssi.ru.

4.3.6 Поиск ионосферного параметра, адекватно отражающего состояние ионосферы экваториальных и низких широт под воздействием тропических циклонов.

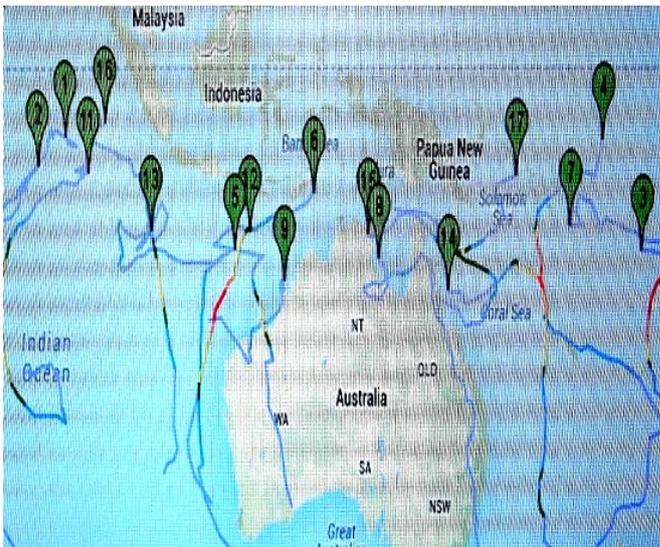
*Отв. исп. канд. физ.-мат. наук Ванина-Дарт Л.Б.,
д-р физ.-мат. наук, проф. Шарков Е.А.*

Данный поиск сопряжён с поиском механизма взаимодействия тропический циклон – ионосфера и наличием банка данных измерений параметра, способного доказать адекватность предложенного механизма. Современные международные исследования взаимосвязи тропических циклонов (ТЦ) и ионосферы сопряжены с большими сложностями доказательства действия возможных механизмов воздействия ТЦ на ионосферу. Мощные выбросы заряженных частиц и нейтралов, излучение ВГВ (внутренних гравитационных волн) и низкочастотных электромагнитных волн из центральных зон ТЦ (самых мощных тропосферных катастроф) на значительные высоты и расстояния от ТЦ являются проявлением механизма действия тропических циклонов. На сегодняшний день в литературе представлены следующие основные возможные механизмы: ВГВ (от конвективных башен) и вертикальные движения синоптического масштаба в ионосфере над ТЦ; электродинамический механизм формирования сильного электрического поля в ионосфере над ТЦ; механизм образования вторичных ВГВ на уровне турбопаузы над ТЦ. Когда мы предполагаем, что ВГВ исходят от ТЦ, то нужно понимать, что не все волны способны проникать на большие расстояния от источника. Также не стоит забывать, что ТЦ — источник «долгоживущий» и «широкомасштабный». За тропический сезон 2012–2013 гг. над Австралийским континентом (рис. 4.3.6.1) были собраны ионосферные данные Австралийской службы прогнозирования ионосферы. В работе было решено (как и прежде) использовать ежечасные карты ионосферных отклонений. Отклонения получены в результате вычитания от реального значения ПЭС (полного электронного содержания в столбе с сечением 1 м^2 над данным пунктом) предполагаемого значения ПЭС, полученного с использованием модели, основанной на нескольких климатических параметрах. Реально в остатках эмпирически исключается зависимость от зенитного угла Солнца, сезона и солнечного цикла. Данная карта составляется каждые 15 мин. В качестве примера были рассмотрены данные за январь. В январе геомагнитная обстановка была спокойной.

На рис. 4.3.6.2–4.3.6.10 в качестве примера приведён день 21.01.2013. В этот день над Австралией действовали 3 ТЦ-на, которые находились в среднем за день в точках с координатами: $12^\circ \text{ S}, 172^\circ \text{ W}$ (GARRY); $16^\circ \text{ S}, 141^\circ \text{ E}$ (OSWALD); $18^\circ \text{ S}, 122^\circ \text{ E}$ (PETA).

Над местами нахождения циклонов видны отрицательные отклонения ПЭС. При этом «отрицательные» облака очень подвижны и имеют характерные размеры (500...2000 км). На фоне общей обеднённой ионосферы отклонения ПЭС достигали до $12 \cdot 10^{16}$ электрон/ м^2 , что для данного дня означает уменьшение от 30 до 100 %.

Попытка выбрать механизм взаимодействия ТЦ – ионосфера, который наиболее соответствует полученным коллективом результатам анализа, приводит к следующему выводу: скорее всего имеет место сложный суммарный эффект от ВГВ и вертикальных движений синоптического масштаба в результате действия ТЦ.



ТЦ «GARRY»

date/time	lat	long	hPa	cat	kts
2013-01-21/00	11.5S	174.3W	996	1	35
2013-01-21/06	11.4S	172.7W	996	1	35
2013-01-21/12	11.6S	171.5W	996	1	35
2013-01-21/18	12.2S	170.8W	993	1	40

ТЦ «OSWALD»

2013-01-21/00	15.8S	140.2E	1000		30
2013-01-21/06	15.7S	140.9E	996	1	35
2013-01-21/12	15.5S	141.5E	996	1	35
2013-01-21/18	15.3S	141.9E	996	1	35

ТЦ «PETA»

2013-01-21/00	17.9S	122.4E	1010		15
2013-01-21/06	18.4S	122.0E	1007		20
2013-01-21/12	18.8S	121.4E	1007		20
2013-01-21/18	19.2S	120.7E	1004		25

Рис. 4.3.6.1. Треки тропических циклонов над Австралийским континентом (сезон 2012–2013 гг.). Справа даны координаты трёх циклонов от 21.01.2013

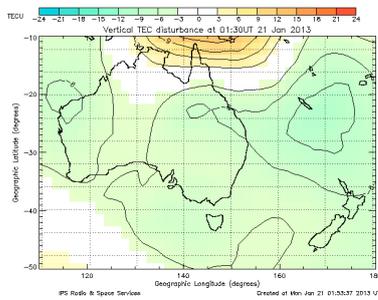


Рис. 4.3.6.2

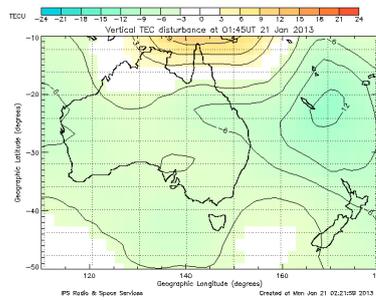


Рис. 4.3.6.3

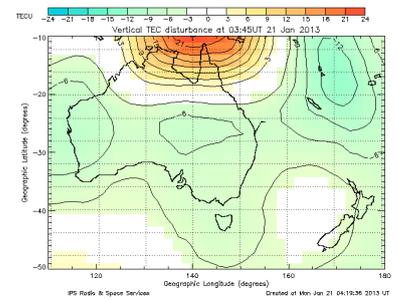


Рис. 4.3.6.4

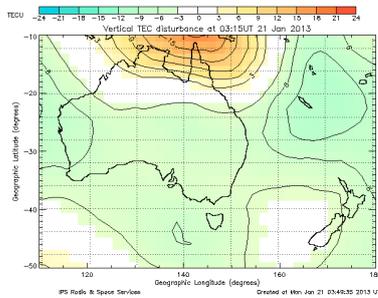


Рис. 4.3.6.5

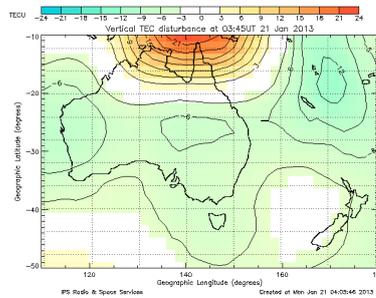


Рис. 4.3.6.6

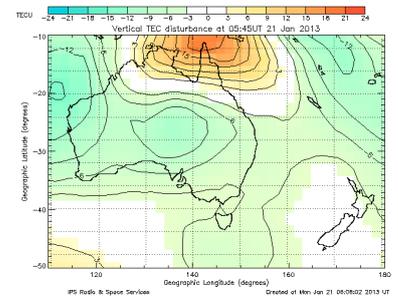


Рис. 4.3.6.7

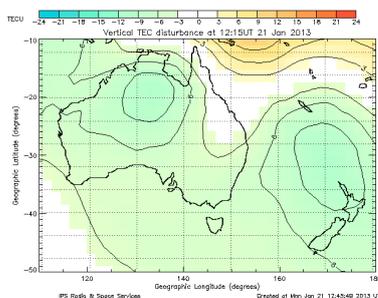


Рис. 4.3.6.8

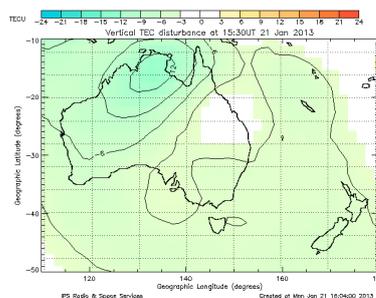


Рис. 4.3.6.9

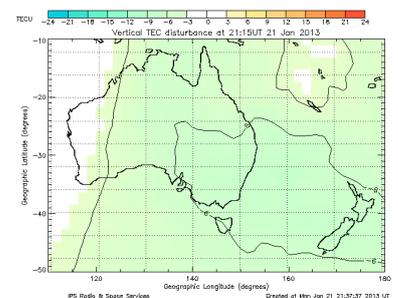


Рис. 4.3.6.10

Результатом возможного сложного взаимодействия «тропический циклон-ионосфера-землетрясения» стала работа, в которой впервые сделана попытка рассмотрения влияния ТЦ и землетрясений на ионосферу одновременно (*Vanina-Dart L.B., Dart T. Interactions between tropical cyclones, earthquakes and the ionosphere in the South East sector of the Earth // Programme Book: EMS Annual Meeting Abstracts. EMS2013-351-2, 2013, 13th EMS / 11th ECAM. 09–13 Sept. 2013. Reading, United Kingdom. 2013. V. 10. P. 58. URL: http://presentations.copernicus.org/EMS2013-351_presentation.pdf).*

РАЗДЕЛ 4.4. МОНИТОРИНГ-ОКЕАН

Отв. исп. д.ф.-м.н. Шарков Е.А.

4.4.1 Теоретическое и экспериментальное исследование динамических вихревых и волновых процессов в верхнем слое океана и в приводной атмосфере на основе данных спутникового дистанционного зондирования.

Отв. исп. канд. физ.-мат. наук Лаврова О.Ю.

В 2013 г. были продолжены теоретические и экспериментальные исследования внутренних волн в Черном море. Актуальность исследований внутренних волн, проводимых традиционными и акустическими методами на Чёрном море, возросла в последние годы вследствие появившихся возможностей регистрации спутниковых радиолокационных изображений морской поверхности с недостижимым ранее разрешением в единицы метров. Проводимые нами подспутниковые эксперименты имеют своей целью продвижение в понимании вопросов генерации внутренних волн, лучшего знания их параметров (в частности пространственного строения поля волн) и динамики. Особенный интерес представляет связь внутренних волн с их поверхностными проявлениями, которая определяет возможности спутникового мониторинга внутренних волн. Для решения всех вышеперечисленных задач необходим сбор данных о внутренних волнах одновременно с проведением спутниковых съемок районов. В связи со спецификой природы и сложностью строения внутренних волн для понимания их особенностей в бесприливном море требуется проводить сбор информации о них как можно более длительное время и охватывать большие районы и акватории. В течение летне-осеннего сезона 2013 г. были проведены обширные исследования внутренних волн на черноморском шельфе. Было выделено частое появление на шельфе квазиинерционных внутренних волн с периодом близким к 17 ч, а также цугов короткопериодных внутренних волн. Помимо преобладающего присутствия на шельфе внутренних волн первой моды отмечались случаи появления волн второй моды, как длинных периодов, так и коротких. Проведены сравнительные расчеты частотных спектров внутренних волн, выявляющие специфику поля внутренних волн узкого шельфа по сравнению с обычным шельфом. На основе проведенных измерений делается попытка обобщения полученных данных и выделения особенностей полей внутренних волн обычного, приглубого и узкого шельфов Черного моря.

Совместный анализ данных радиолокационного зондирования с помощью TerraSAR-X и Radarsat-2, полученных с высоким пространственным разрешением (до 3 м) и данных натурных подспутниковых измерений позволяет достаточно точно определить основные параметры внутренних волн, в частности их амплитуду и длину волны, а также пространственное распределение вдоль трассы акустического зондирования. В данных ADCP внутренние волны проявляются в виде колебаний повышенного звукорассеивающего слоя на картине эхо-сигнала. Так, например, в ходе измерений,

проведённых 16 сентября 2012 г. были зафиксированы внутренние волны, длина которых составляла в среднем 100 м, а амплитуда колебалась в пределах 8...12 м. Внутренние волны распространялись в сторону берега (рис. 4.4.1.1). Записи датчиков в цепочке термисторов показали, что при прохождении цугов внутренних волн амплитуда колебаний температуры на горизонтах 10 и 15 м в некоторых случаях достигала 10 °С. На радиолокационном изображении TerraSAR-X были детектированы поверхностные проявления этих внутренних волн в виде трёх параллельных сликовых полос (рис. 4.4.1.2). Длина волны, восстановленная на основе радиолокационной съёмки, составляла 90 м, что находится в хорошем соответствии с данными ADCP. Практически все случаи обнаружения внутренних волн совпадали с моментами прохождения вихрей, что свидетельствует о вихревом механизме их генерации.

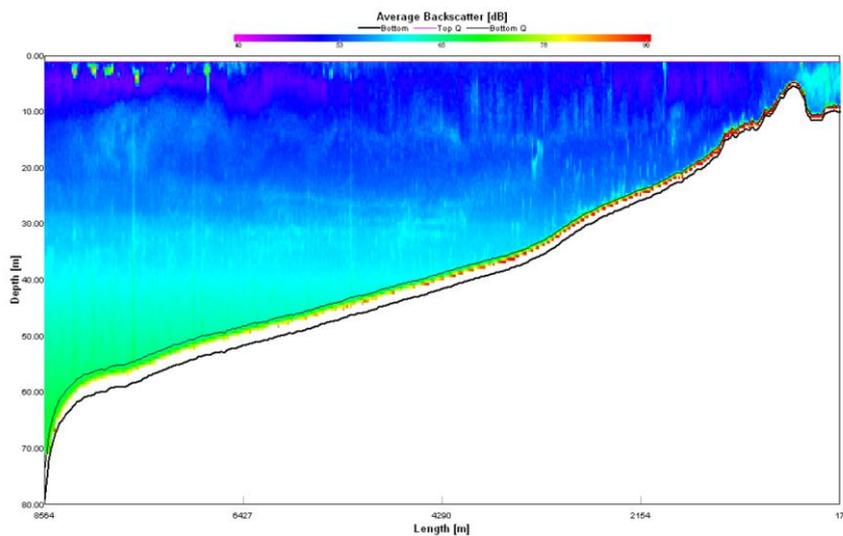


Рис. 4.4.1.1. Подспутниковые наблюдения внутренних волн в северо-восточной части Чёрного моря: проявление внутренних волн на записи эхо-сигнала ADCP 16.09.2012



Рис. 4.4.1.2. Фрагмент РЛИ TerraSAR-X от 16.09.2012. Синим цветом отмечены скорость и направление течения по данным ADCP в период спутниковой съёмки. Жёлтая стрелка указывает на положение поверхностных проявлений внутренних волн, выявленных с помощью ADCP. Белая стрелка указывает на слик, расположенный в области смены направления течения

Экспериментальные исследования параметров прибрежных течений в шельфовой зоне северо-восточной части Чёрного моря в окрестности Геленджикской и Голубой бухт, были проведены в октябре 2013 г. В ходе экспериментальных работ при помощи акустического доплеровского профилографа течений TRDI Sentinel 300 kHz проводилось изучение изменчивости тонкой трехмерной структуры течений в данном регионе. В результате проведённых исследований была выявлена пространственная неоднородность направления и скорости течений в шельфовой зоне, как по глубине, так и по пространству, а также их временная изменчивость. В период проведения подспутниковых измерений наблюдалась кардинальная смена течений (на 180°) за одни сутки, образование вихревых структур и прорыв струи Основного черноморского течения (ОЧТ). За время экспедиции было проведено 10 буксировок акустического профилографа по единому створу в пределах шельфовой зоны, что позволило оценить интегральную величину временной изменчивости параметров течений. В ходе работы получен 7-дневный временной ряд изменчивости интегрального расхода системы течений шельфовой зоны Чёрного моря (рис. 4.4.1.3а). Оценки показали, что при прорыве ОЧТ расход увеличился в 4-5 раз, скорость потока в отдельных частях достигала 0,8...0,9 м/с. Интегральная оценка расхода с STD-профилированием может быть полезна при оценке переноса тепла и соли в шельфовой зоне моря.

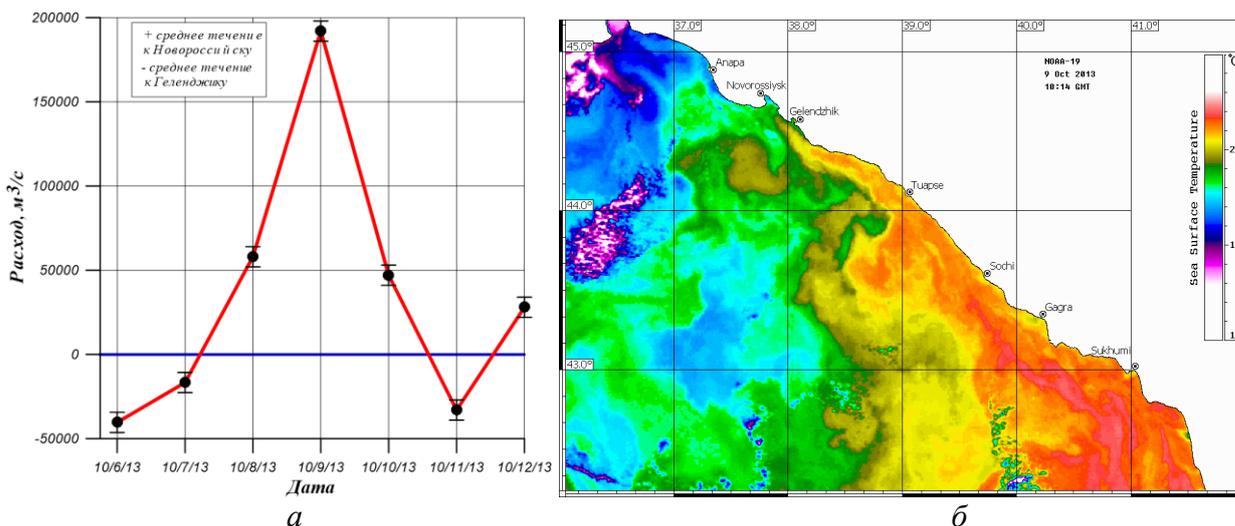


Рис. 4.4.1.3. Прорыв струи Основного черноморского течения 9 октября 2013 г.: *а* — график интегрального изменения расхода прибрежных течений; *б* — карта температуры поверхности моря, построенная по данным AVHRR NOAA-19 от 09.10.12

Совместный анализ результатов измерения обратного рассеяния акустического сигнала ADCP в толще вод с данными CTD-профилирования на отдельных станциях показал, что области повышенного рассеяния могут располагаться не только в пределах термоклина, но и находиться на границах смены направления течений. Проведение непрерывного мониторинга поверхностной (1 м) температуры вод позволило выявить горизонтальную изменчивость поля температуры в условиях резкой смены динамической активности течений в данном районе и обнаружить резкие перепады поверхностной температуры в градиентных областях.

Натурные измерения проводились синхронно со спутниковой съемкой в микроволновом (RADARSAT-2, TerraSAR-X), в видимом и ИК-диапазонах (MODIS Terra/Aqua, AVHRR NOAA). Прорыв струи ОЧТ отчетливо проявился на картах температуры поверхности моря (ТПМ), построенных по ИК-данным (рис. 4.4.1.3б). Экспериментальные работы проводились в период неустойчивой стратификации приподнятого слоя атмосферы, когда температура воздуха была ниже температуры воды. Вследствие этого на радиолокационных изображениях проявились в первую очередь конвективные процессы. Характер расположения конвективных ячеек позволил выявить воды с различной температурой, что нашло подтверждение, как на картах ТПМ, так и в контактных измерениях.

Работы проводятся совместно с коллегами из Акустического института имени Н.Н. Андреева, Университета Гамбурга, Германия, и студентами и аспирантами из МГУ имени М.В. Ломоносова географического факультета, кафедры океанология.

Исполнители

Лаврова О.Ю. — канд. физ.-мат. наук, olavrova@iki.rssi.ru.

Митягина М.И. — канд. физ.-мат. наук, mityag@iki.rssi.ru.

Серебряный А.Н. — д-р физ.-мат. наук, serebryany@hotmail.com.

Сабинин К.Д. — д-р физ.-мат. наук, ksabinin@yandex.ru.

Бочарова Т.Ю. — науч. сотр., tabo@iki.rssi.ru.

Калашникова Н.А. — мл. науч. сотр., ninak90@mail.ru.

Назирова К.Р. — knazirova@gmail.com.

4.4.2 Выявление пленочных загрязнений антропогенного и естественного происхождения на морской поверхности по данным спутникового зондирования.

Отв. исп. канд. физ.-мат. наук Лаврова О.Ю.

Продолжены работы, направленные на развитие физических и методических основ диагностики плёночных загрязнений морской поверхности средствами спутникового дистанционного зондирования, разработку методов количественной оценки экологического состояния морских акваторий и решение задачи картографирования параметров загрязнения и динамических характеристик водной среды на основе комплексного анализа спутниковой информации.

Основным средством спутникового контроля состояния морской поверхности и оценки степени загрязнённости послужили данные радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), установленных на искусственных спутниках Земли ERS-2 и Envisat Европейского космического агентства, архив которых велся в ИКИ РАН с 1999 по 2012 г.. На данный момент в этих архивах накоплено около 5000 сцен, охватывающих в основном акватории Черного, Балтийского и Каспийского морей. Следует особо отметить, что это один из немногих существующих архивов, содержащих подобный объем данных по акваториям этих морей. Кроме того, для интерпретации радиолокационных изображений (РЛИ) привлекались данные сенсоров MODIS ИСЗ Aqua/Terra, MERIS ИСЗ Envisat и AVHRR ИСЗ NOAA видимого и инфракрасного (ИК) диапазонов, несущие информацию о полях температуры поверхности моря (ТПМ) и мезомасштабной динамике вод. Дополнительно использовались данные в восьми диапазонах сканирующих радиометров ETM+ ИСЗ Landsat 7 и TM Landsat 5.

В целях совершенствования методики многосенсорного мониторинга состояния морской поверхности проведено исследование особенностей проявления, пространственного распространения, сезонной и межгодовой изменчивости пленочного (как антропогенного, так и биогенного) загрязнения морской поверхности на основе данных, полученных в ходе регулярных наблюдений поверхности Каспийского моря.

Посредством совместного анализа разнородных спутниковых данных выявлены основные типы пленочных загрязнений морской поверхности, характерные для этого моря, причинами которых являются:

- добыча нефти на шельфе;
- грязевой вулканизм и естественные выходы углеводородов;
- сбросы с судов вод, содержащих нефтепродукты;
- повышенная биологическая продуктивность, в том числе жизненные циклы продуцентов хлорофилла и активное цветение водорослей.
- выносы сточных и речных вод, содержащих пленочные загрязнения смешанного антропогенного и естественного происхождения;

Проведены обобщение и систематизация результатов.

Выявленная нами в ходе спутникового мониторинга картина поверхностных загрязнений Каспийского моря нефтесодержащими пленками во многом предопределена природными особенностями Каспийского моря, главной из которых является наличие больших запасов нефти и газа в его недрах. Показано, что наиболее существенными источниками загрязнения поверхности Каспийского моря являются разведка и эксплуатация нефтяных месторождений, а также проявления грязевого вулканизма.

Выделено два основных района наиболее интенсивного загрязнения морской поверхности Каспийского моря, каковыми являются области Апшеронского и Бакинского архипелагов, а также Западный борт Южно-Каспийской впадины (рис. 4.4.2.1).

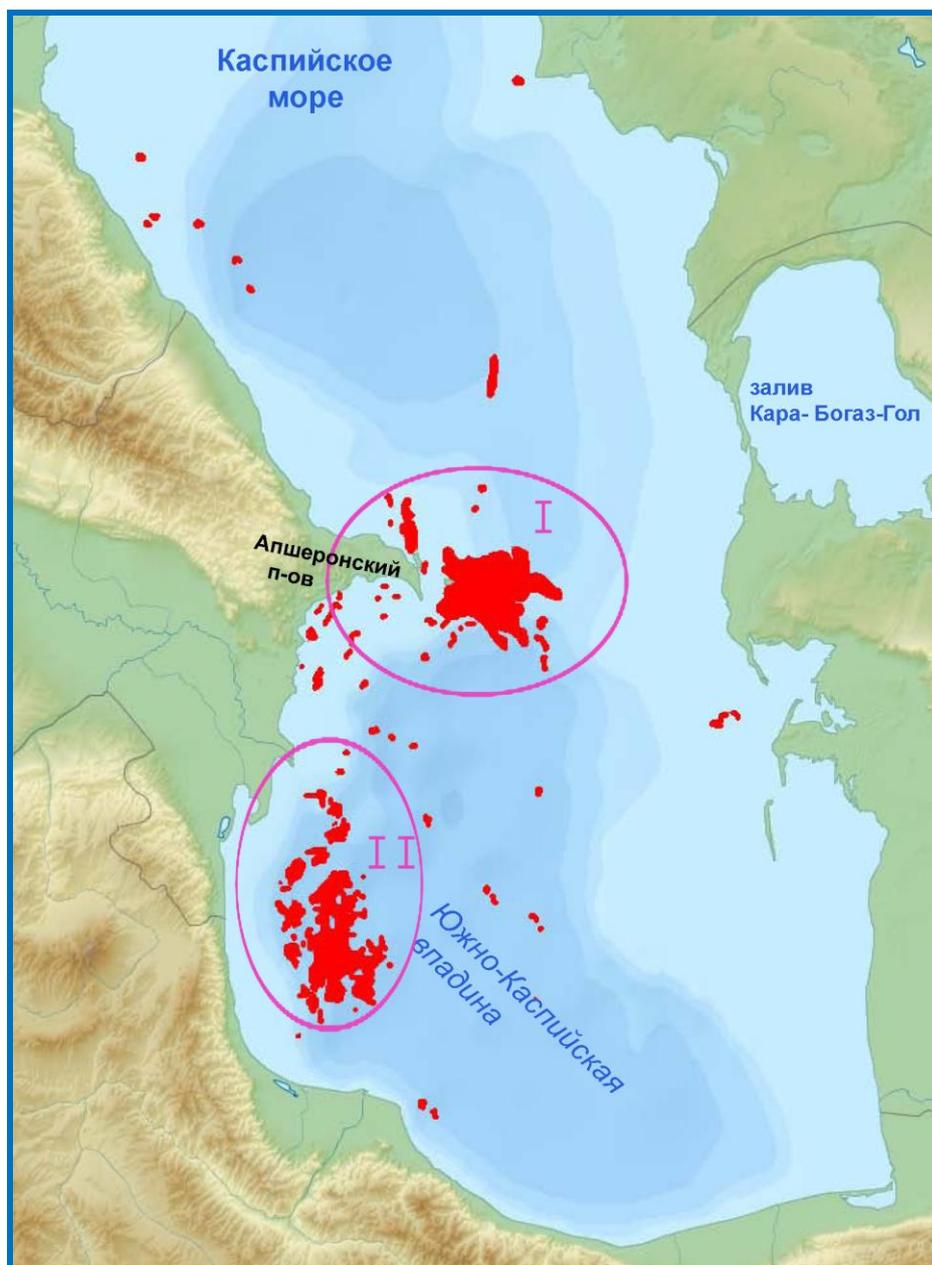


Рис. 4.4.2.1. Обобщенная карта-схема нефтяных загрязнений поверхности Каспийского моря, обнаруженных в результате анализа данных спутниковой радиолокации за 2009–2012 гг.

1. Основным источником поверхностного загрязнения открытых участков моря в центральной его части и в области Апшеронского и Бакинского архипелагов является поступление нефти при добыче и разведочном бурении, подводном ремонте скважин, при аварийных разрывах нефтепроводов и зачистке выкидных линий, и т.д. При этом количество выбрасываемой нефти во время действия грифона может колебаться от 100 до 500 тонн в сутки. На всех без исключения РЛИ, полученных нами в ходе мониторинга в районах нефтедобычи, идентифицируются нефтяные пятна, причем следы нефти выявляются зачастую на площади более 800 км² вокруг морских буровых платформ (рис. 4.4.2.2).

Отдельное внимание уделено сравнению уровня загрязнения морской поверхности, наблюдавшегося несколько лет назад, с существующей на данный момент ситуацией. Проведено сравнение результатов, полученных для 2003, 2006 и 2007 гг. и для

2009...2012 гг. Выявлено, что ситуация практически не меняется. Размер и направление распространения пятна зависят в основном от метеоусловий. Таким образом, можно утверждать, что район месторождения «Нефтяные Камни» может выступать в роли своеобразной естественной лаборатории, где можно исследовать влияние ветра и течений на распространение нефтяного пятна, а также влияние ветра на формирование радиолокационных образов нефтяных загрязнений.

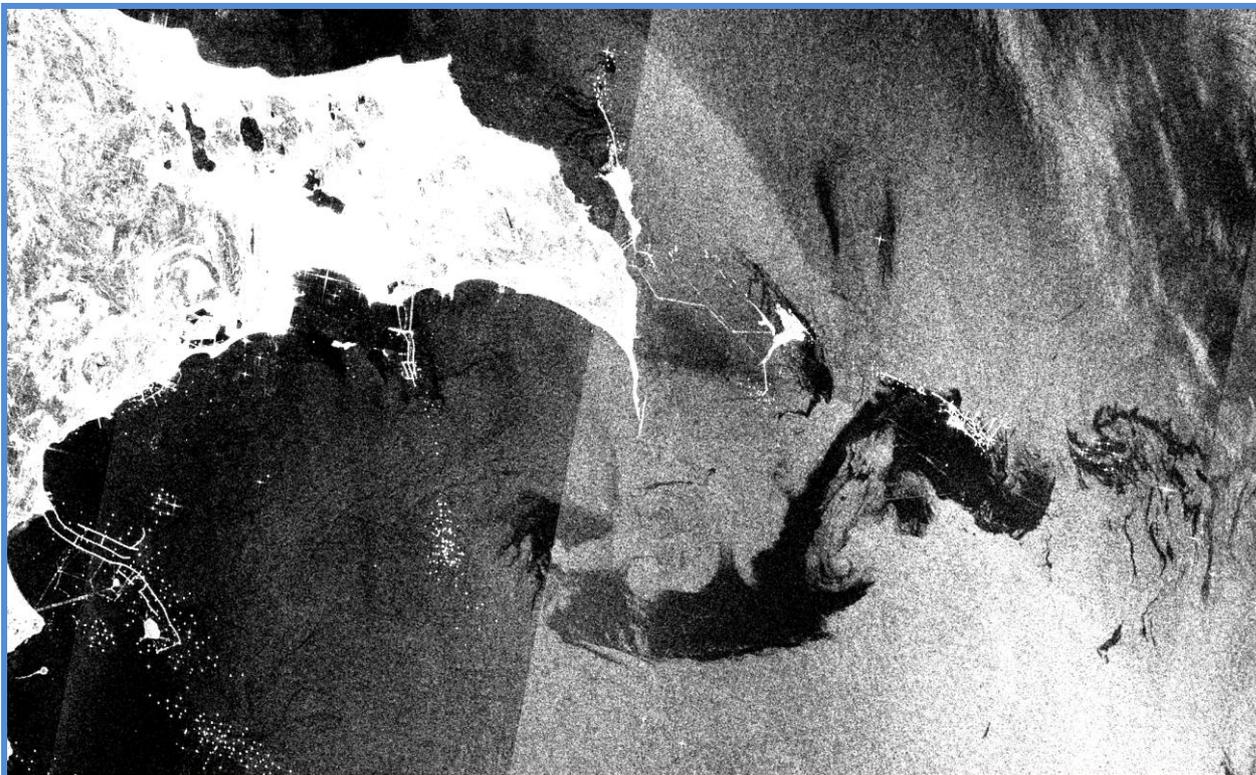
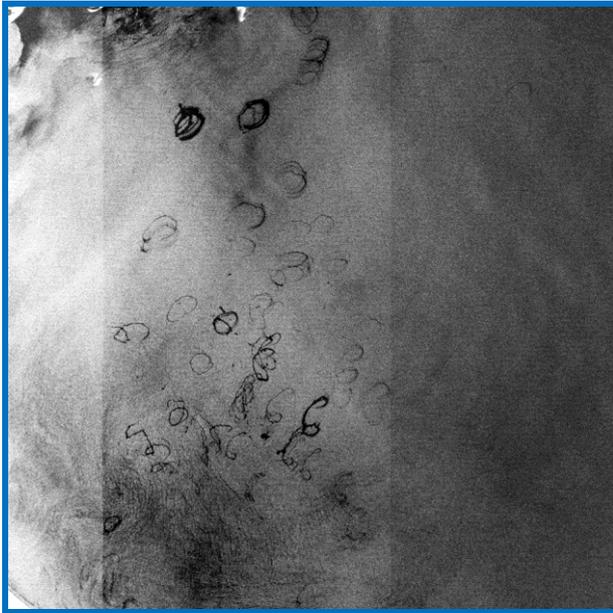


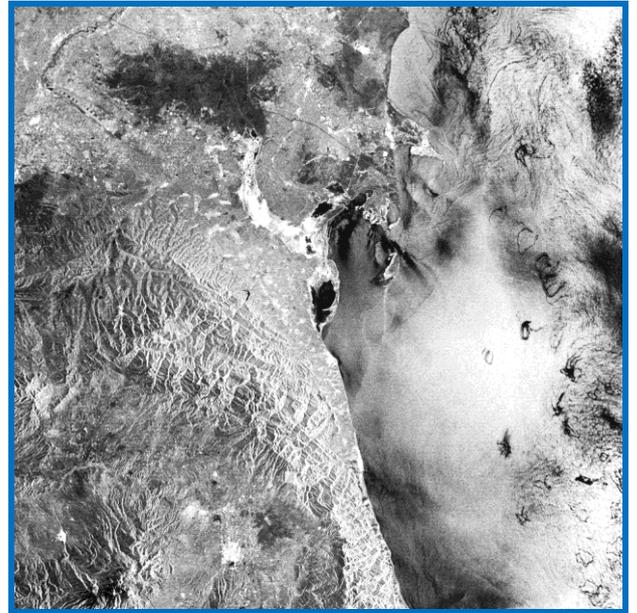
Рис. 4.4.2.2. Загрязнения акватории Каспийского моря в районе нефтепромысла «Нефтяные Камни», проявляющиеся на спутниковых изображениях. Фрагмент РЛИ ASAR Envisat WSM HH от 5 сентября 2010 г.; разрешение в точке 75 м; площадь загрязнения >800 км²

2. На северо-западном борту Южно-Каспийской впадины. Сконцентрировано наибольшее количество подводных вулканов, притом крупных. Большинство грязевых вулканов Южно-Каспийской впадины находится в грифонной стадии развития, выделяя илстую грязь, воду, газ и нефть. Активизация подводных вулканов и грифонов в местах разгрузки углеводородов приводит к появлению на воде грязевых и нефтяных пятен.

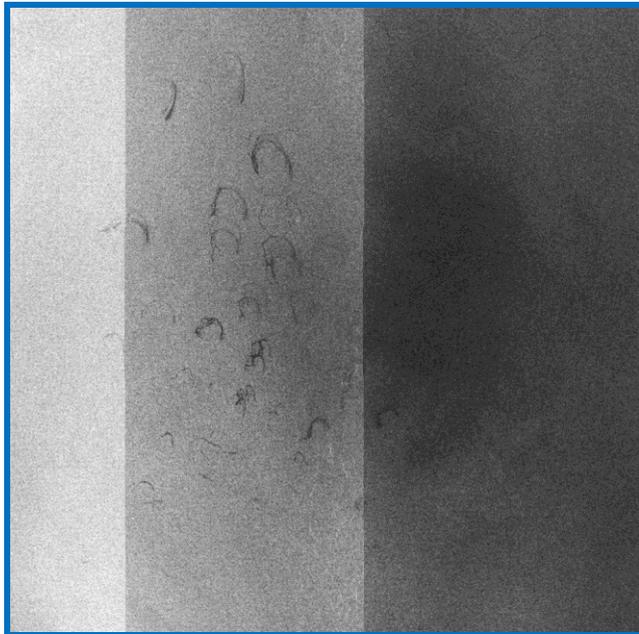
Характерные примеры пленочных загрязнений, детектированных на радиолокационных изображениях морской поверхности в юго-западной части Каспия, приведены ниже (рис. 4.4.2.3). Анализ пространственной изменчивости поверхностных проявлений, подобных представленным на иллюстрации, показал, что их географическое распределение соотносится с географическим распределением мест локализации подводных грязевых вулканов Южно-Каспийского бассейна (рис. 4.4.2.4, красные прямоугольники показывают положение фрагментов РЛИ).



a



б



в



г

Рис. 4.4.2.3. Грязевулканические проявления в Южном Каспии на спутниковых изображениях: *a* — фрагмент ASAR Envisat изображения, полученного 19.06.11 в 18:32 UTC с разрешением в точке 75 м; *б* — фрагмент ASAR Envisat изображения, полученного 28.05.11 в 18:38 UTC с разрешением в точке 75 м; *в* — фрагмент ASAR Envisat изображения, полученного 26.05.11 в 06:59 UTC с разрешением в точке 75 м; *г* — фрагмент цветосинтезированного изображения (каналы 3, 2, 1) ETM+ Landsat 7, полученного 28.05.11 в 07:13 UTC с разрешением 30 м

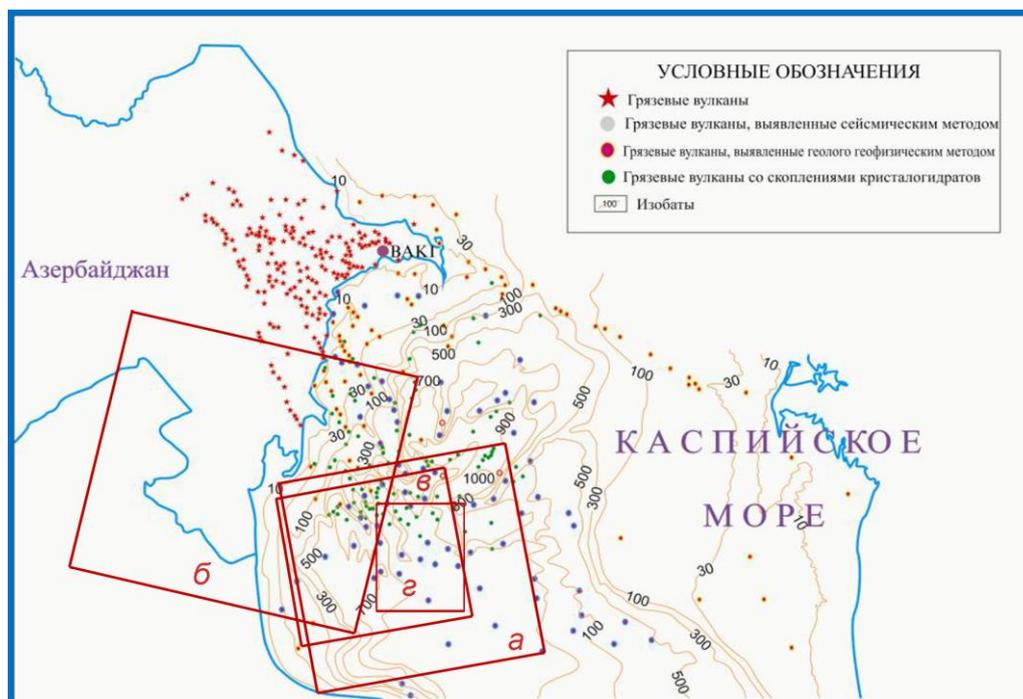


Рис. 4.4.2.4. Карта расположения грязевых вулканов Южно-Каспийского бассейна, согласно статье [Алиев Ад.А., Рахманов Р.Р. Количественная оценка грязевулканических процессов в Азербайджане // АМЕА Хябярляри, Йер елмляри. 2008. № 2. С. 47–28]

3. Безусловно, на спутниковых радиолокационных данных изображениях поверхности Каспийского моря детектируются также и антропогенные загрязнения, связанные с утечками и сбросами с судов вод, содержащих нефтепродукты. Анализ спутниковых радиолокационных данных показал, что сбросы с судов концентрируются вдоль основных маршрутов транспортировки нефти судами по Каспийскому морю, которые лежат в направлении Актау-Махачкала, Актау-Нека и Актау-Баку. В отличие от ситуации в Чёрном и, особенно, в Балтийском морях, несанкционированные сбросы нефтепродуктов с судов на Каспии не являются основным источником пленочных загрязнений морской поверхности, однако, к сожалению, их объемы с каждым годом увеличиваются.

Исполнители

Лаврова О.Ю. — канд. физ.-мат. наук, olavrova@iki.rssi.ru.

Митягина М.И. — канд. физ.-мат. наук, mityag@iki.rssi.ru.

Микроволновая биоскаттерометрия морской поверхности. Микроволновая диагностика состояния морской поверхности, возмущаемой подводным потоком газовой мелкодисперсной среды

Отв. исп. канд. физ.-мат. наук Скворцов Е.И., канд. физ.-мат. наук Раев М.Д.

Продолжены исследования сликов на морской поверхности, связанных с образованием в приповерхностном (пограничном) слое скоплений планктона и продуктов его жизнедеятельности. Проведён ряд лабораторных экспериментов для определения динамики образования, развития и распада таких плёнок и влияния на эти процессы биологических факторов. В качестве параметра, хорошо отражающее изменение плёнок на

водной поверхности во времени, был использован коэффициент поверхностного натяжения (КПН).

В ходе лабораторных экспериментов, выполненных в октябре 2013 г. в Южном отделении Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук (ЮО ИО РАН) были сняты зависимости КПН от концентрации биомассы с учётом динамики развития плёнки и видового состава фитопланктона. Для экспериментов выращивались культуры диатомовых водорослей с размерами от нескольких микрон до цепочек длиной 1...1,5 мм. КПН вычислялся по дисперсионному соотношению с подстановкой измеренной длины возбуждаемых на поверхности капиллярных волн. Калибровка установки для измерения КПН выполнялась по дистиллированной воде.

Раствор с нужной концентрацией биомассы равномерно вносился на водную поверхность с помощью ручного дозатора. Цикл измерений состоял из следующих этапов. В установку заливалась морская вода. Каждое измерение КПН состояло из трёх отсчётов с интервалом 5...10 с. Значение КПН определялось как среднее значение. Затем на поверхность равномерно тонким слоем наливали раствор с определённой концентрацией фитопланктона. Далее выполнялись измерения КПН. Сначала через 1 мин, затем через 5, и так в течение 1...2 ч. После окончания измерений в установке меняли воду, и цикл измерений повторялся с новой концентрацией фитопланктона.

На рис. 1 представлена зависимость изменения КПН от концентрации биомассы в пределах 1,7...12 мг/л.

На рис. 2 и 3 приведены графики изменения КПН во времени для разных видов биомассы. На рис. 2 — после внесения биомассы, состоящей из крупных, образующих цепочки клеток с размерами до 1,5 мм и концентрацией 5 мг/л (верхняя кривая) и 9 мг/л (нижняя кривая). После внесения биомассы величина КПН резко падала и через 5...6 мин стабилизировалась на уровне, определяемом концентрацией фито планктона. Значение КПН и плёнка в этом случае оставались практически постоянными в течение всего цикла измерения. На рис. 3 проиллюстрирована другая ситуация: случай, когда доминирующими были мелкоклеточные виды. После внесения фитопланктона КПН, как и на рис. 2, уменьшился, но через несколько минут начал расти и спустя 30 мин достиг значения, соответствующего чистой воде. При равных условиях проведения экспериментов отличие состояло только в видовом составе вносимого фитопланктона.

Заключение

В ходе лабораторных экспериментов показано, что динамика изменения параметров пограничного слоя с высоким содержанием биомассы зависит не только от концентрации клеток фитопланктона, но и от его видового состава. Это обстоятельство следует учитывать при исследовании механизма гашения капиллярных волн в биогенных плёнках такого типа.

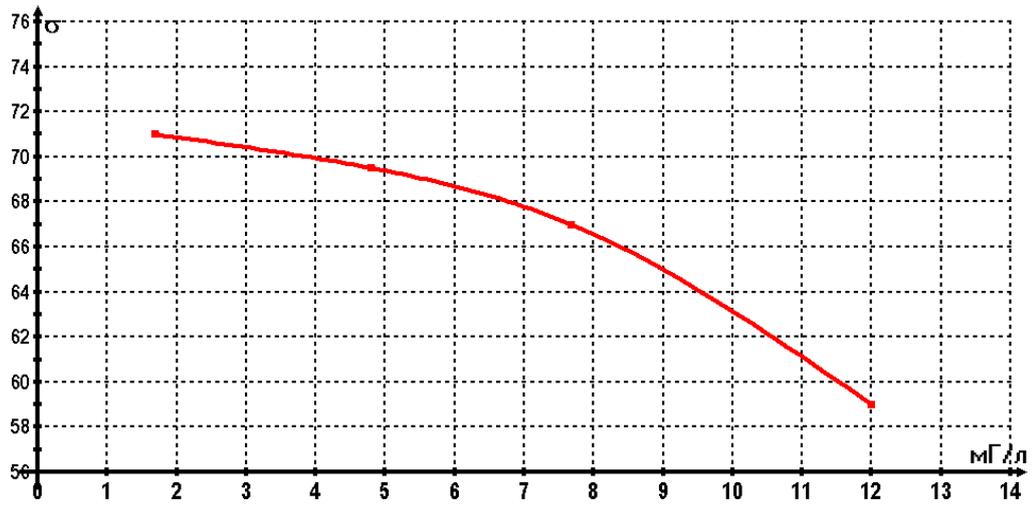


Рис. 1

07-10-2013, 13-10-2013

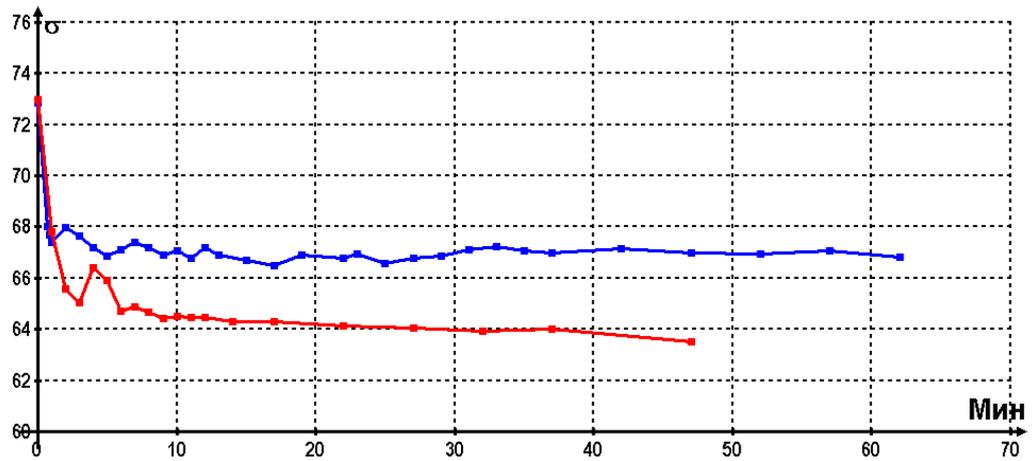


Рис. 2

27-09-2009

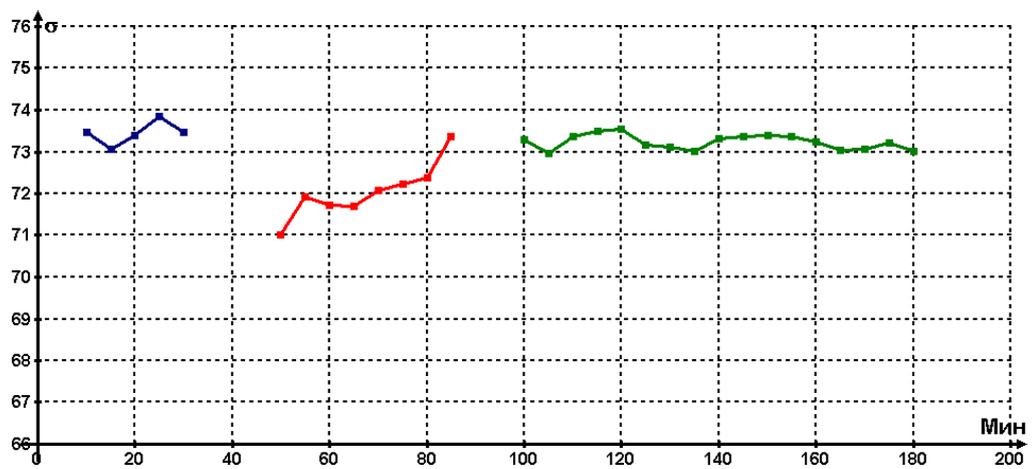


Рис. 3

Исполнители

Силкин В.А. — д-р биологических наук

Беляков Г.И. — вед. электр.

Кирсанова Н.И. — вед. констр.

Комарова Н.Ю. — вед. спец., (495) 333-42-56, nata.komarova@asp.iki.rssi.ru.

4.4.3 Микроволновые исследования нелинейной динамики морских волн с применением радиолокационных и скаттерометрических комплексов и синхронной видео- и фотосъемкой высокого разрешения.

Отв. исп. канд. физ.-мат. наук Скворцов Е.И., канд. физ.-мат. наук Раев М.Д.

В 2013 году были проведены следующие исследования:

1. Валидация комбинированного радиолокационного метода измерений полей течений.

2. Построены по данным радиолокационных измерений карты течений в Голубой бухте и прилегающей к ней акватории при различных метеоусловиях.

Для проверки точности измерений параметров течений в сентябре-октябре 2013 г. комбинированным радиолокационным методом проведено сравнение данных радиолокационных измерений и данных, полученных с установленного в 800 м от берега донного акустического доплеровского измерителя скорости течений. Совпадение полученных данных позволило построить карты течений по результатам ранее проведённых радиолокационных измерений, отражающие изменение гидрологической обстановки в Голубой бухте и прибрежной зоне при различных метеоусловиях.

Измерения выполнялись с помощью двухполяризационной радиолокационной станции высокого разрешения, поперёк шельфа на дистанции 200...1600 м от станции и охватывали как акваторию Голубой бухты (200...700 м), так и часть примыкающей к бухте прибрежной зоны. На рис. 1 проиллюстрирована достаточно типичная для этого района ситуация, когда поверхностное течение в прибрежной зоне формируется под действием юго-восточного ветра со скоростью 7 м/с и основного черноморского течения.

На рис. 2 показана гидрологическая обстановка при прохождении прибрежного антициклонического вихря. Скорость северо-восточного ветра составляла 10 м/с. Направление течения в этом случае изменилось на юго-восточное при максимальной скорости 65 см/с.

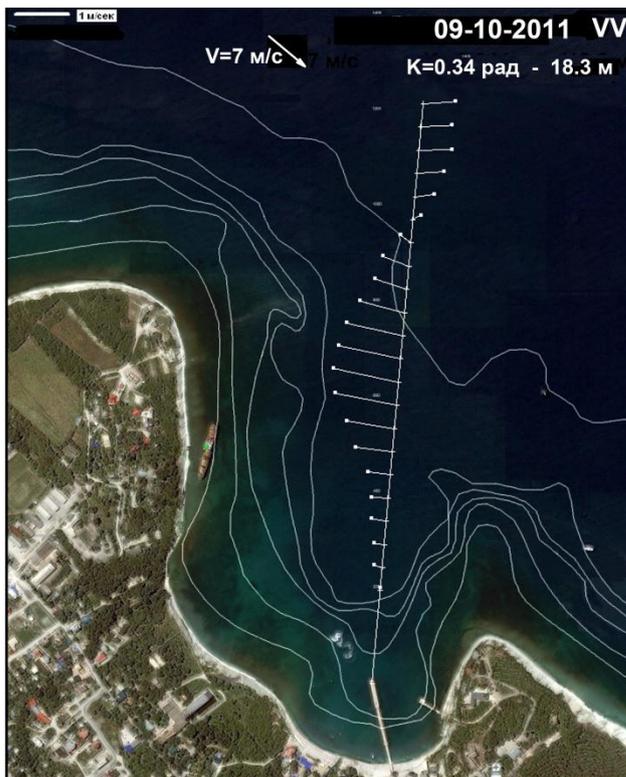


Рис. 1

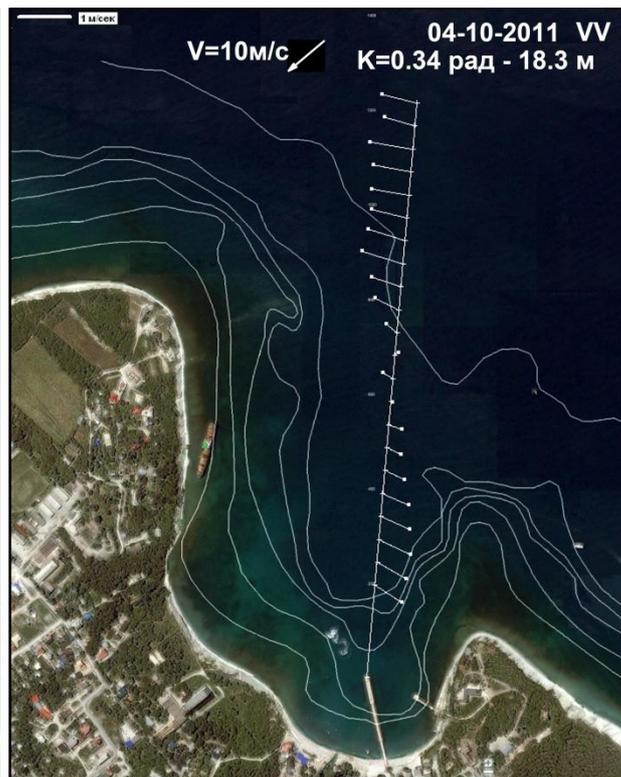


Рис. 2

При всех направлениях вдольберегового течения, зафиксированных в эксперименте, отмечалось возникновение противотечения при входе в бухту, соизмеримого по величине с основным. Появление противотечения связано, по-видимому, с особенностями рельефа дна и геометрией бухты.

Заключение

Проведена радиолокационная съёмка в Голубой бухте и прибрежной зоне с использованием разработанного метода исследования динамических процессов в приповерхностном слое. Для разных гидрометеороусловий рассчитаны и построены карты, отражающие тонкую структуру течений в этом районе.

Исполнители

Беляков Г.И. — вед. электр.

Кирсанова Н.И. — вед. констр.

Комарова Н.Ю. — вед. спец., (495) 333-42-56, nata.komarova@asp.iki.rssi.ru.

4.4.4. Разработка метода нелинейной радиотепловой резонансной спектроскопии (НРРС) и исследования пространственного спектра гравитационно-капиллярного волнения морской поверхности в мезомасштабах применительно к микроволновым измерениям спутниковых систем нового поколения; разработка точного решения математической теории дифракции электромагнитной волны с произвольной поляризацией для задачи теплового поглощения периодической водной поверхности.

Отв. исп. канд. физ.-мат. наук, доцент Садовский И.Н.

В рамках выполнения работ по данному направлению в 2013 г. были рассмотрены следующие задачи:

1. Проведён ряд мероприятий по повышению точности метода нелинейной радиотепловой резонансной спектроскопии (НРРС).

1.1. Осуществлён выбор оптимального критерия оценки нахождения решения обратной задачи в рамках метода НРРС.

1.2. Определена модель комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) морской воды, наилучшим образом подходящая для обработки данных дистанционных радиополяриметрических наблюдений на Черном море.

На основе результатов сравнения данных лабораторных измерений и модельных расчетов для решения практических задач дистанционного зондирования акваторий (когда предполагаемые температуры и значения солёности находятся в пределах $10 < T < 25$ °С, $16 < S < 18$ ‰) в микроволновом диапазоне можно рекомендовать следующее сочетание «частота излучения — модель КДП»: 9,5 и 47,78 ГГц — модель [Stogryn et al., 1995]; 35,5 ГГц — модель [Райзер, Чёрный, 1994] с изменениями: $\alpha = 0,03$; 75,5 ГГц — модель [Ellison et al., 1998].

2. Проведена комплексная обработка данных экспериментальных исследований формы спектра гравитационно-капиллярных волн в натуральных условиях.

2.1. Представлена общая характеристика проведённых экспериментальных работ.

2.2. Проведён анализ метеорологических условий для всего набора экспериментальных исследований.

2.3. Определена оптимальная функция изменения диапазона поиска калибровочных коэффициентов радиометрических приёмников при обработке данных экспериментальных наблюдений.

Внедрение результатов исследований по данному направлению в методику обработки экспериментальных данных привело к значительному сокращению времени поиска решения задачи восстановления параметров спектра по данным угловых радиополяриметрических измерений. Это позволило получать информацию о состоянии объекта исследования (морской поверхности) в ходе экспериментальных измерений в режиме реального времени.

2.4. Рассмотрен вопрос о влиянии эффекта азимутальной анизотропии собственного излучения взволнованной водной поверхности на результаты восстановления параметров спектра методом НРРС в натуральных условиях.

Обобщая результаты проведённых исследований, можно сделать следующие выводы:

- Явление азимутальной анизотропии собственного радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности накладывает определённые ограничения на применимость метода НРРС, увеличивая ошибку восстановления параметров спектра со стандартных 7,0 до 25,0 %.
- Снижению величины ошибок восстановления способствует усреднение регистрируемых значений радиояркой температуры в пределах сектора сканирования.
- Оптимальным, с точки зрения точности восстановления параметров спектра и временных затрат на проведение измерений, является выбор ширины сектора сканирования в пределах $150...180^\circ$. В этом случае, ошибка восстановления параметров спектра ветрового волнения в области ГКВ, вне зависимости от направления его распространения, не превышает 10,0 %.
- Яркая выраженная зависимость восстанавливаемых значений параметров спектра от азимутального угла визирования позволяет надеяться на возможность восстановления пространственного спектра ветровых ГКВ в будущем.

2.5. Получены результаты восстановления параметров спектра ветровых ГКВ для всех имеющихся данных экспериментальных исследований.

К настоящему моменту, коллективом лаборатории создан уникальный банк данных дистанционных радиополяриметрических наблюдений за состоянием взволнованной

водной поверхности в натуральных условиях. Он сформирован по результатам реализации четырех международных экспериментов серии CAPMOS и двух российских комплексных экспериментов ГЕЛЕНДЖИК. При этом общее время проведенных экспериментальных исследований составило 3 месяца. В результате обработки имеющегося массива данных было получено более полутора тысяч экспериментально определённых спектральных кривых, соответствующих различным условиям волнообразования.

3. Разработана новая эмпирическая модель спектра ветровых ГКВ.

3.1. Проанализирована динамика спектральных компонент волнения в гравитационно-капиллярном интервале.

3.2. Исследовано поведение амплитудно-ветровых зависимостей спектральных компонент ГКВ.

В частности, на рис. 1 представлены зависимости значений спектра кривизны от скорости ветра. Каждый из графиков построен для одного из четырёх волновых чисел (3,46; 5,0; 7,22 и 10,34 рад/см), находящихся вблизи спектрального максимума. Чёрный цвет точек соответствует данным, полученным в экспериментах 2005 г., красный — 2007 г., зелёный — 2009 г., а синие точки соответствуют данным 2012 г. Аналогичные зависимости получены и для других волновых компонент. Однако ввиду ограниченности объёма данного отчёта их графическое представление опущено.

Как видно из представленных графиков:

- за время проведения исследований накоплен обширный объем экспериментальных данных. Как уже упоминалось ранее — около 1,5 тыс. спектральных кривых;
- в пределах каждого года наблюдений наблюдается значительный разброс значений амплитуд выделенных спектральных компонент, соответствующих фиксированной скорости ветрового потока;
- для отдельно взятого периода измерений можно определить характерные границы диапазона вариаций скоростей ветра. Так, например, результаты 2012 г. соответствуют скоростям ветра 0...25 м/с. Для 2005 и 2007 гг. характерные значения скорости ветра лежат в пределах 0...13 м/с, а для 2009 г. — 2...18 м/с;
- следует отметить и следующую закономерность, в определённой мере объясняющую видимые различия представленных зависимостей при переходе от данных одного года к другому. В частности, для волнового числа 10,34 рад/см средний угол наклона кривых 2009 и 2012 гг. совпадает. Аналогичное замечание может быть сделано и для волнового числа 3,46 рад/см. Максимум отличий проявляется на промежуточных волновых числах. Таким образом, можно сделать предположение, что причиной расхождений являются либо изменение положения максимума спектральной кривой $B(k)$, либо ширины этого пика.

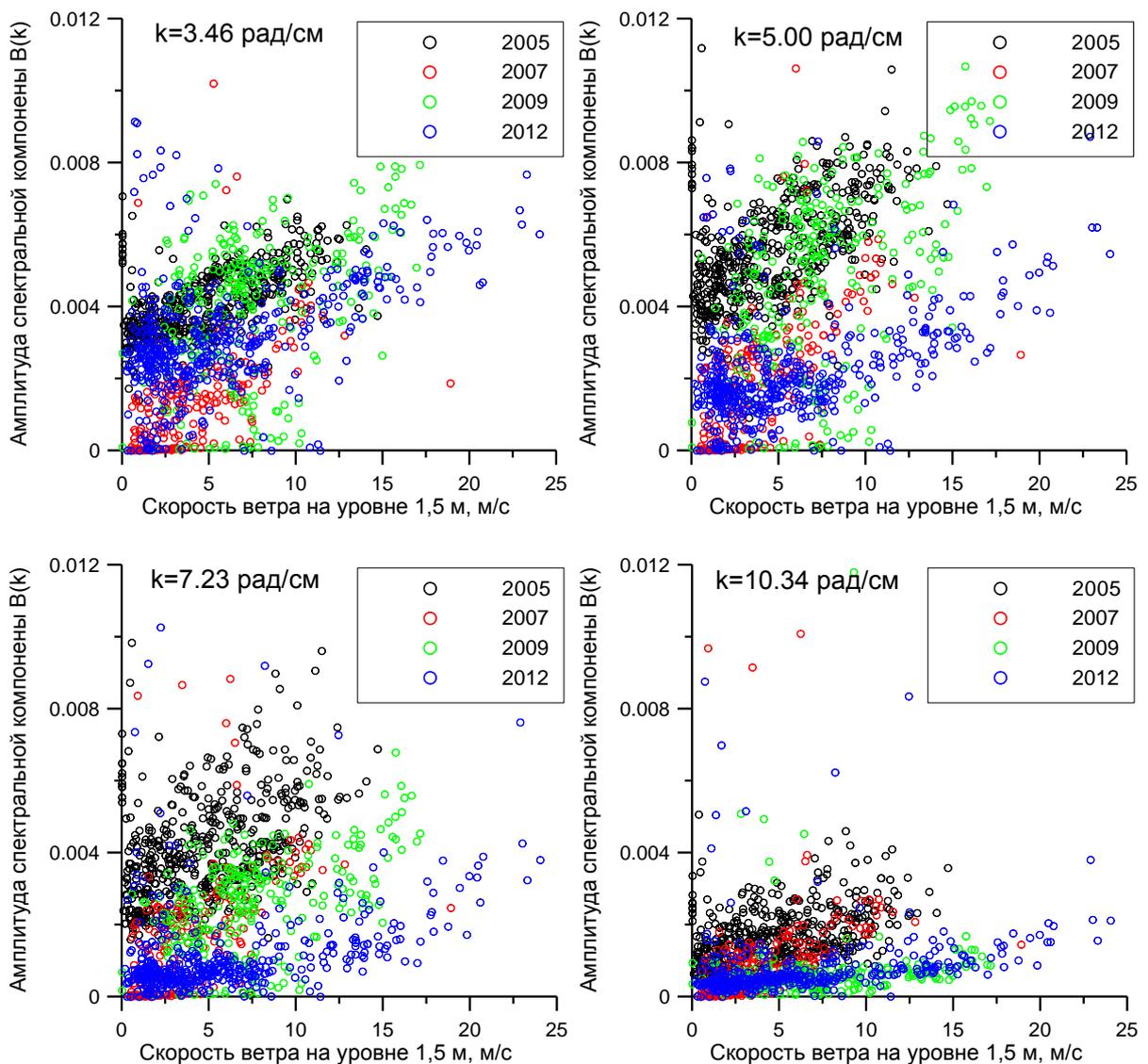


Рис. 1. Экспериментальные зависимости значений спектра кривизны, соответствующие четырём волновым числам, от скорости ветра. Пояснения даны в тексте

3.3. Выполнена сортировка экспериментальных данных по параметрам, характеризующим качество работы метода НРПС, а так же по условиям волнообразования.

3.4. Результаты исследований представлены в виде эмпирических соотношений, описывающих связь спектра кривизны поверхностного волнения в гравитационно-капиллярном интервале с интенсивностью ветрового воздействия.

Модель рекомендуется для описания смешанного неразвитого волнения в диапазоне волновых чисел от 0,39 до 40,0 рад/см. Диапазон скоростей приповерхностного ветра, в которых предложенная модель остаётся актуальной, составляет 0...17 м/с (для скорости ветра, измеренной на уровне 10 м над морской поверхностью):

$$B(k, V) = f_0(0,237947847 + 0,7661480324V) \times \{F_1(k)q_1(k) + F_2(k)q_2(k) + F_3(k)q_3(k) + F_4(k)q_4(k)\}, \quad (1)$$

где V — скорость ветра на высоте 10 м над уровнем морской поверхности в [м/с]; k — волновое число в [рад/см].

Функции F_1-F_4 в соотношении (1) представляют собой полиномиальные и экспоненциальные функции и определяют форму спектральной кривой в четырёх смежных интервалах волновых чисел:

$$\left. \begin{aligned} F_1(k) &= a_0 + a_1k + a_2k^2 + a_3k^3 + a_4k^4, \\ F_2(k) &= b_0 + b_1k + b_2k^2 + b_3k^3 + b_4k^4 + b_5k^5, \\ F_3(k) &= \exp(c_0 + c_1k), \\ F_4(k) &= \exp(d_0 + d_1k). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Значения соответствующих коэффициентов в (2) подобраны исходя из принципа максимального соответствия данным экспериментальных наблюдений:

$$\begin{aligned} a_0 &= 8,391580578 \cdot 10^{-4}, & b_0 &= -6,912459555 \cdot 10^{-3}, & c_0 &= -2,137710236, \\ a_1 &= -0,001247154493, & b_1 &= 2,167866605 \cdot 10^{-3}, & c_1 &= -0,447348221, \\ a_2 &= 4,992600856 \cdot 10^{-4}, & b_2 &= 1,768178696 \cdot 10^{-3}, & d_0 &= -5,65449085, \\ a_3 &= 2,084899602 \cdot 10^{-4}, & b_3 &= -5,217643745 \cdot 10^{-4}, & d_1 &= -0,1072609552, \\ a_4 &= -4,320753269 \cdot 10^{-5}, & b_4 &= 4,651648674 \cdot 10^{-5}, & f_0 &= 1/15, \\ & & b_5 &= -1,339456559 \cdot 10^{-6}, \end{aligned}$$

Значения функций q_1-q_4 могут принимать лишь два значения — 0 или 1, определяя таким образом вид аппроксимирующей функции (2) для действующего волнового числа:

$$\begin{aligned} q_1(k) &= \begin{cases} 1, & k \in [0,387704, 2,11), \\ 0, & k < 0,387704 \text{ и } k \geq 2,11, \end{cases} \\ q_2(k) &= \begin{cases} 1, & k \in [2,11, 7,35), \\ 0, & k < 2,11 \text{ и } k \geq 7,35, \end{cases} \\ q_3(k) &= \begin{cases} 1, & k \in [7,35, 10,3), \\ 0, & k < 7,35 \text{ и } k \geq 10,3, \end{cases} \\ q_4(k) &= \begin{cases} 1, & k \in [10,3, 40,0), \\ 0, & k < 10,3 \text{ и } k > 40. \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

Результаты модельных оценок формы усреднённого по всем азимутальным направлениям спектра кривизны $B(k)$, полученные для скоростей ветра 0...20 м/с в соответствии с соотношением (1), приведены на рис. 2.

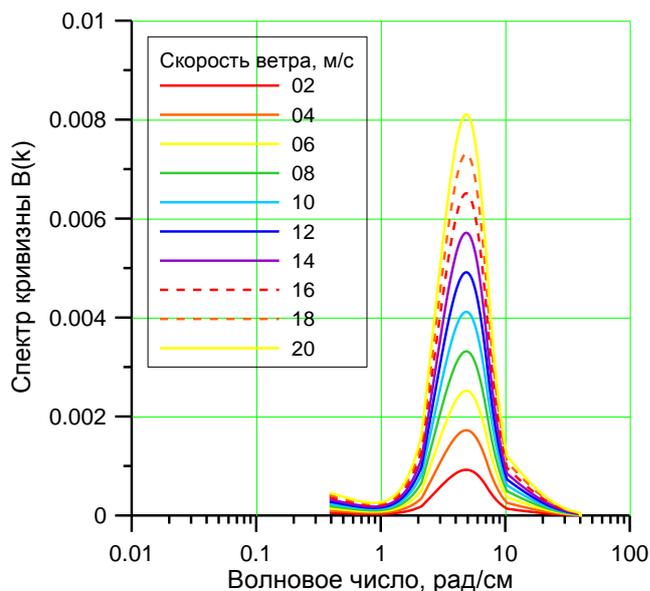


Рис. 2. Спектры кривизны $B(k)$, рассчитанные в соответствии с соотношением (1) для скоростей ветра 2...20 м/с

3.5. Произведена оценка величины полной дисперсии уклонов ветрового волнения.

Соотношение для определения спектра кривизны ветровых ГКВ дополнено эмпирической зависимостью величины полной дисперсии ветрового волнения от интенсивности ветрового воздействия:

$$\sigma^2(V) = \frac{\sigma_X^2(V) + \sigma_Y^2(V)}{2} = 0,001170848875V + 0,02318422602. \quad (4)$$

Показано, что в случае неразвитого волнения значения дисперсии уклонов ветровых волн не могут быть оценены с помощью общеизвестного соотношения Кокса и Манка, полученного в 1956 году. Анализ полученных экспериментальных результатов показал, что угол наклона ветровой зависимости полной дисперсии зависит от метеорологических условий, предшествующих процессу генерации наблюдаемой системы волнения и только в предельном случае, соответствующем условиям «развитого» волнения, описывается классическим выражением Кокса и Манка (рис. 3).

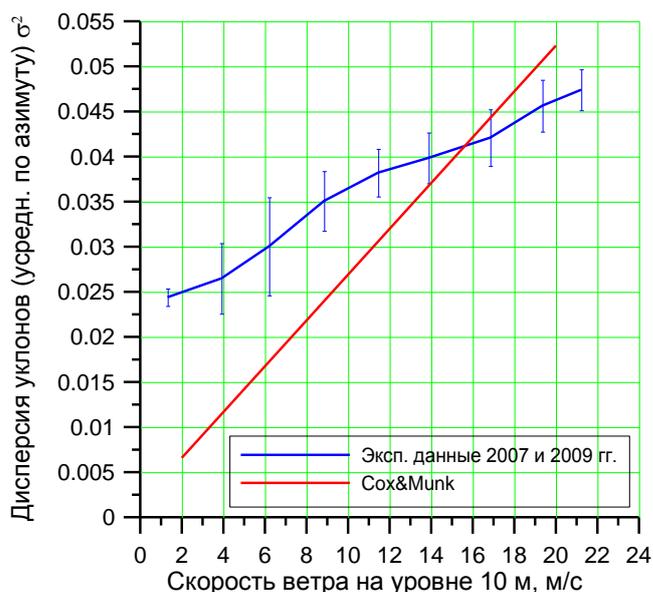


Рис. 3. Ветровая зависимость полного значения дисперсии уклонов ветрового волнения

3.6. Исследован характер влияния соотношения температуры морской поверхности и приводного слоя атмосферы на интенсивность генерации ГКВ.

Показано, что переход от неустойчивой стратификации к нейтральной и, затем, к устойчивой, сопровождается снижением интенсивности волнообразования. Данный эффект наблюдается для всех спектральных компонент гравитационно-капиллярной области и становится более заметным с увеличением скорости ветрового потока.

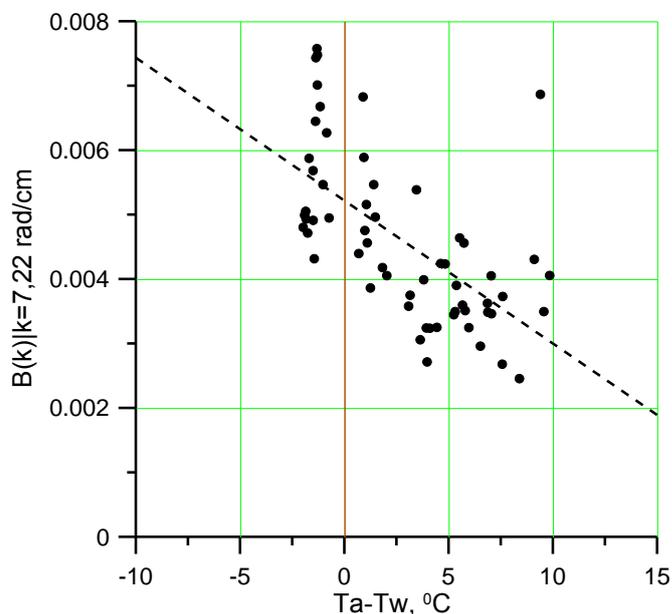


Рис. 4. Зависимость амплитуды спектральной компоненты 7,22 рад/см от соотношения температур водной среды и приводного слоя атмосферы

Исполнители

Кузьмин А.В., канд. физ.-мат. наук

Репина И.А., д-р физ.-мат. наук

Селунский А.Б.

Сазонов Д.С.

Стулов А.А.

Антонов В.С.

РАЗДЕЛ 4.5. МОНИТОРИНГ-АТМОСФЕРА

Отв. исп. д.ф.-м.н. Ерохин Н.С.

4.5.1 Развитие теоретических моделей, анализ физических механизмов, разработка и применение алгоритмов обработки натуральных данных в целях исследования, мониторинга и прогноза состояний атмосферы, в том числе для выявления закономерностей формирования и ранней эволюции вихревых структур ТЦ в зональном ветре для тропической атмосферы Земли в области внутритропической зоны конвергенции и анализа структурных свойств электрической турбулентности в грозовой облачности.

Отв. исп. д.ф.-м.н. Ерохин Н.С.

По данным облачно-разрешающего атмосферного численного моделирования получить наборы гидро- и термодинамических полей с целью иллюстрации влияния,

которое процессы генерации спиральности на облачных и крупных масштабах оказывают на динамику и энергетику формирующегося тропического циклона.

Выполнена обработка данных облачно-разрешающего атмосферного численного моделирования и получены наборы гидро- и термодинамических полей для 6 случаев, в которых изучалось зарождение тропических циклонов разной интенсивности (от тропической депрессии (средний тангенциальный ветер < 17 м/с) до вихря ураганной силы (скорость ветра > 33 м/с)). Во всех рассмотренных случаях исследована эволюция вихревых возмущений на протяжении 72 часов с шагом по времени 10 минут. Изучено влияние, которое процессы генерации спиральности на облачных и крупных масштабах оказывают на динамику и энергетику формирующегося тропического циклона. При этом пространственное разрешение составляло 2-3 км по горизонтальным направлениям и 0.5 км по высоте, а размер области формирования циклона был 276 x 276 x 20 км по горизонтальным направлениям и высоте, соответственно.

Анализ процессов генерации завихренности и спиральности на масштабах кучевой облачности и системы в целом показал ключевую роль облачных вихревых структур (Vortical Hot Towers) в существовании тропического циклона как целостной крупномасштабной спиральной вихревой системы на разных этапах его эволюции. Проведены подробные исследования того, как семейство вихревых облачных башен создает вторичную трансверсальную циркуляцию и осуществляет ее зацепление с крупномасштабной первичной тангенциальной циркуляцией. В момент времени, когда происходит такое зацепление, зарождающийся вихрь становится энергетически самоподдерживающимся.

На основе полученных результатов предложены новые количественные критерии и численный подход для диагностики зарождения тропических циклонов.

Левина Галина Владимировна, к.ф.м.н., тел.8-495-333-41-00, galchonok2002@yahoo.co.uk

Анализ возможности обобщенной масштабной инвариантности для электрической турбулентности в грозовой облачности с сильным всплеском поля

Продолжен численный анализ структурных функций (СФ) для электрической турбулентности в грозовой облачности на основе экспериментальных данных по вертикальному профилю электрического поля. Проведены расчеты структурных функций, выявлены инерционные интервалы на средних и малых масштабах, определены скейлинговые экспоненты, куртозис и другие параметры. Возникновение вариаций СФ относительной степенного скейлинга связано с перемежаемостью турбулентности и наличием когерентных структур. Показано, что для рассмотренной выборки с сильным всплеском электрического поля отсутствует обобщенная масштабная инвариантность электрических флуктуаций. Полученные результаты могут быть использованы для последующих оценок роли электрических подсистем в формировании неоднородной структуры ветровых потоков в ТЦ, при численном моделировании их нелинейной динамики с использованием схем параметризации, учитывающих электрические подсистемы вихрей. Это представляет интерес для дальнейшего развития методик обработки данных дистанционного зондирования атмосферных вихрей, более полной и корректной физической интерпретации результатов обработки экспериментальных данных

Ерохин Николай Сергеевич, д.ф.м.н., тел.8-495-333-41-00, nerokhin@mx.iki.rssi.ru

Модификация течений типа ABC в баротропной жидкости

Рассмотрена проблема существования спиральных стационарных течений ABC типа в сжимаемой жидкости. Найдено простое одномерное решение вида $v = (u(z), v(z), 0)$. Течения Бельтрами описывают широкий класс точных решений уравнений Эйлера, в которых завихренность пропорциональна скорости. Течения Бельтрами служат хорошей аппроксимацией реальных вихревых структур. Интерес к течениям Бельтрами был вызван проблемой динамо в астрофизике, в котором магнитное поле усиливается током проводящей жидкости. Этот процесс лежит в основе генерации межгалактических магнитных полей. Течения Бельтрами можно считать состояниями имеющими минимальную энергию при заданной спиральности. Недавно было предложено обобщение течений Бельтрами на сжимаемую жидкость. Ранее было получено общее решение в гидродинамической модели течения Бельтрами в баротропной жидкости в линейном случае, которое представляет собой линейную комбинацию трех независимых решений, обращающихся вокруг осей x , y , z , соответственно. Для нелинейного случая линейная суперпозиция гасится нелинейным членом и можно искать лишь одномерные решения. В работе положив $v = (v_x(z), v_y(z), 0)$ найдено решение, описывающее неоднородный поток $v_x(z) = E^{1.2} \sin[(z + \beta) \exp(-\alpha E)]$, $v_y(z) = E^{1.2} \cos[(z + \beta) \exp(-\alpha E)]$, где α , β , E постоянные.

По полученным материалам готовится статья для публикации.

Алтайский Михаил Викторович, д.ф.м.н., тел.8-495-333-53-56, altaisky@mail.ru

Анализ роли электромагнитных явлений в кризисных атмосферных процессах.

На основе данных наблюдений рассмотрены электромагнитные явления в различных кризисных атмосферных процессах (грозы, торнадо, ураганы, тропические циклоны и др.). Увеличение грозовой активности может играть роль фактора и индикатора интенсификации ураганов. Для диагностических и прогностических целей определены основные механизмы взаимодействия ТЦ с верхними слоями атмосферы (озоносферой, ионосферой). Проведён учёт влияния электромагнитных явлений на формирование структуры ТЦ (на микро-, мезо- и макромасштабах) и различных типов движения внутри ТЦ (вертикального, азимутального и вращательного). На мезомасштабах обнаружено локальное упорядочение, и данная структура сохраняется в динамическом равновесии в процессе движения ТЦ. Поскольку напряжённость электрического поля достигает экстремальных значений вблизи стены глаза ТЦ, в полосах дождя и вблизи отрицательно заряженной области ТЦ, то именно здесь электрическая сила играет существенную роль в поддержании вертикального движения. Так, электрическая сила существенно благоприятствует образованию обширной отрицательно заряженной области ТЦ на высоте около 6 км, помогая частичкам удерживаться на определённой высоте: совместно с силой аэродинамического сопротивления противодействует силе тяжести. На основе численных расчётов и введённых эффективных величин электромагнитных факторов на мезомасштабах изучено радиальное движение в ТЦ с учётом дополнительного механизма трансформации части работы электромагнитных сил в тепловую энергию. Проанализирован баланс моментов действующих сил и дополнительные механизмы, способствующие возникновению и поддержанию азимутального движения ТЦ. Согласно оценкам вклад электромагнитных факторов в окончательные равновесные характеристики структуры и движений ТЦ составляет от нескольких процентов до десятков процентов.

Ерохин Николай Сергеевич, д.ф.м.н., тел.8-495-333-41-00, nerokhin@mx.iki.rssi.ru

Совершенствование прогнозно-ситуационной модели разлива нефтепродуктов на водной поверхности по материалам аэрокосмических наблюдений.

Разработка алгоритма и реализация его в виде программного модуля предоставляет возможность прогнозирования распространения нефтезагрязнений на водной поверхности с достаточной для принятия мер по ликвидации последствий ЧС точностью при возможной неполноте исходных данных о загрязнении (марка, объём, продолжительность) и существующей гидрометеорологической обстановке. Результаты прогноза представимы в виде цифровой карты в составе геоинформационной системы (ГИС). Разработанный алгоритм предусматривает возможность уточнения результата прогнозирования при обновлении исходных данных под контролем оператора на любой итерации, что позволит учитывать меняющуюся обстановку (как, например, прекращение утечки или, наоборот, возникновение новых очагов) и результаты ведущихся работ по ликвидации.

Данный алгоритм прогнозного моделирования достаточно прост и обладает лишь базовыми возможностями, обеспечивая прогноз "на худший случай". С другой стороны, благодаря той же простоте, он достаточно универсален и способен работать при неполном наборе исходных данных. В связи с этим, в зависимости от количества и оперативности поставки исходных данных прогноз распространения нефтезагрязнений может отличаться по точности. С учётом вышеозначенных требований, при совершенствовании прогноза особое внимание уделено возможности ввода разрозненных данных (в т.ч., спутниковых данных по полю скорости ветра) и их коррекции в процессе моделирования.

Предполагается продолжение работ с верификацией разработанной прогнозной модели разливов нефтепродуктов с использованием спутниковых данных.

Разработанные алгоритмы и программное обеспечение по трансформации векторных и растровых изображений вызвали интерес при проведении медицинских исследований и были использованы при подготовке доклада на международной конференции "1st International Symposium on Optics and Biophotonics". Материалы доклада подлежат публикации в "SPIE Proceedings", paper number 9031-21.

Князев Николай Александрович, к.ф.-м.н., тел.8-495-333-51-66, nknyazev@iki.rssi.ru

Втюрин Сергей Александрович, тел.8-495-333-51-66, vturinsa@gmail.com

Унификации форматов баз данных по тропическим циклонам. Продолжение экспериментальных исследований статистических характеристик турбулентных пульсаций давления и турбулентных шумов обтекания.

Тропические циклоны (ТЦ) представляют собой крупномасштабные вихревые образования зарождающиеся в тропической атмосфере между 5-ю и 20-ю градусами, как северной, так и южной широты. ТЦ являются мощными климатообразующими факторами, способными на площади перестроить термогидродинамику атмосферы. Наивысшая стадия развития ТЦ в зависимости от региона Мирового океана именуется "тайфун" в Северо-Западной части Тихого океана и "ураган" в Западной Атлантике. Сила ветра может превышать 130 узлов (стадия супертайфуна). Одним из наиболее интенсивных ТЦ за всю историю наблюдений был тайфун "Nancy", в котором максимальная скорость ветра была 92.5 м/с. По данным Объединенного Центра Прогноза Тайфунов (Joint Typhoon Warning Center) на острове Гуам с середины 70-х годов число супертайфунов увеличивается, достигнув в 1991 г. 7 штук. Поэтому изучение трасс даже ТЦ средней силы является актуальной задачей.

Наиболее активной и циклоноопасной зоной является Северо-Западная часть Тихого океана. Второй по опасности зоной является Северо-Запад Атлантического океана, благодаря большой населенности восточного побережья США и стран Карибского

бассейна. Северо-Восток Тихого океана менее подвержен действию ТЦ, ввиду сносу циклонов восточными ветрами в океан. В Южном Океане у берегов Австралии подвержена воздействию ТЦ лишь северная часть материка. Обращает на себя внимание отсутствие ТЦ в Юго-Западной части Атлантического океана, что вероятно связано с Бразильской магнитной аномалией, которая возможно вызывает высыпание заряженных частиц и, соответственно, уменьшение центров конденсации водяного пара, необходимых для образования мощных кучевых облаков.

Данная работа посвящена с виду простой, но в то же время важной проблеме, перекодировки форматов всех возможных Мировых Центров Данных (МЦД) Баз Данных (БД) траекторий ТЦ в Единый Унифицированный Формат для дальнейшего анализа траекторий движения. Подчеркнем, что это текстовый формат поскольку он полностью совместим со всеми типами компьютеров. К основным Мировым БД по ТЦ относятся:

1. БД по Тихому океану (Западный и Южный регионы) и северу Индийского океана в Университете Гавайев. http://www.usno.navy.mil/NOOC/nmfc-ph/RSS/jtwc/best_tracks/;
2. Дубль по Западному региону Тихого океана также можно найти в Японском Метеорологическом Агентстве (Japan Meteorological Agency) <http://www.jma.go.jp/en/typh/>;
3. Данные по западной части Атлантического океана в Национальном Центре по Ураганам (National Hurricane Center, США, Флорида, <http://www.nhc.noaa.gov/pastall.shtml#hurdat>);
4. Данные по Австралийскому региону (как Тихий, так и Индийский океаны) находятся в Австралийском Метеорологическом Бюро (Australian Bureau of Meteorology) <http://www.bom.gov.au/> (однако сейчас здесь доступ к отдельным данным дается за плату, кроме того не очень удачно представлены данные по зональным австралийским метеоцентрам).

Трудность прямого использования указанных данных состоит в том, что все БД созданы в разных форматах.

Данная работа представляет исторические данные, собранные и проверенные из разных Мировых Центров Данных (МЦД), в едином унифицированном формате в период с 1945 по 2005 гг. по всему Мировому Океану, по которому имеется наиболее достоверная информация.

Пример формата отдельной унифицированной записи файла данных для Северной Атлантики:

200511 KATRINA 2005 8 28 18 26.3 88.6 150 902

Здесь следующие позиции: 1-6 – Год и Номер ТЦ; 8-17 – Имя ТЦ по классификации ВМО; 19-22 – Год действия ТЦ; 24-25 – Месяц; 27-28 – Дата; 30-31 – Гринвичское время данной записи, часы; 35-38 – Координаты центра ТЦ, градусы широты (северной); 40-44 – Координаты центра ТЦ, градусы долготы (западной); 47-49 – Скорость ветра в ТЦ, узлы; 51-54 – Давление в центре ТЦ, мбар.

Построенные БД Единого Унифицированного Формата открыты для свободного и бесплатного использования любому исследователю ТЦ при получении от него запроса и анкеты.

Для преодоления трудностей экспериментальных исследований турбулентного шума возникает необходимость в создании экспериментальной установки и проведении экспериментальных исследований турбулентных пристеночных полей давления в турбулентном пограничном слое всплывающего устройства в условиях глубокого моря. В работах за 2013 г. значительные усилия потребовались на модернизацию основных компонент береговой и морской инфраструктуры глубоководного морского стенда для экспериментальных исследований гидродинамических шумов. Совместно с Гидрофизическим институтом АН Абхазии были проведены пуско-наладочные испытания морской инфраструктуры: работа с тросовой дорогой; отработка заглублия, всплытия и доставка всплывающего устройства на пирс. Разработаны методика и технологии работы береговой и морской инфраструктуры, в состав которых входят пирс с тельфером; рельсовой путь на пирс; береговые лебедки; якорное устройство (6 тонн) на дне моря. В

результате выполненных работ была создана Автономная морская лаборатория для исследования турбулентного шума Автономная морская лаборатория представляет собой удлиненное тело вращения диаметром 650 мм. Его длина при проведении экспериментальных исследований может варьироваться в пределах от 6 до 14 м. Моделью в эксперименте является всплывающее устройство, на котором заподлицо с корпусом в носовой и кормовой частях всплывающего тела установлены виброустойчивые миниатюрные и протяженные преобразователи турбулентных пульсаций давления с повышенной разрешающей способностью.

Всплывающее устройство в погруженном состоянии имеет избыточную архимедову плавучесть и способно самостоятельно всплывать из глубоководных частей морской акватории, куда оно предварительно доставляется с помощью специальных заглубляющих приспособлений. Устойчивость движения при вертикальном всплытии обеспечивается наличием кольцевого стабилизатора в кормовой части тела. Движущая сила Архимеда достаточна для того, чтобы максимальная скорость всплытия достигала 25 м/с, что обеспечило измерение статистических характеристик турбулентных давлений при практически важных значениях числа Рейнольдса более 10^8 .

После завершения работ по модернизации береговой и морской инфраструктуры глубоководного морского стенда была выполнена серия экспериментов по исследованию статистических характеристик турбулентной составляющей гидродинамических шумов обтекания в глубоком море в турбулентном пограничном слое при обтекании всплывающего устройства при значении числа Рейнольдса более 10^8 . При всплытии устройства с глубины 200 м в широком диапазоне частот проведено экспериментальное исследование спектров мощности и взаимных спектров турбулентных пульсаций давления. В этих экспериментах удалось расширить диапазон измерения турбулентных шумов обтекания до 40 КГц. Впервые были обнаружены неожиданные особенности поведения спектров (их перегибы) в высокочастотной области спектра. Был выполнен анализ экспериментальных данных на основе модернизированной теории разрешающей способности преобразователей конечных размеров при регистрации мелкомасштабных турбулентных пульсаций. Результаты обработки экспериментальных данных позволили объяснить обнаруженные особенности поведения спектров. Было найдено, что для определения неискаженных значений турбулентных спектров следует отказаться при построении корректировочной функции от однопараметрического подобия в модели безразмерного взаимного спектра псевдозвуковых давлений в пограничном слое на пластине (модель Коркоса). Показано, что необходимо использовать более сложную - двухпараметрическую модель взаимного спектра турбулентных пульсаций давления. С физической точки зрения возникновение перегибов измеренных спектров на высоких частотах объясняется тем, что распределение энергии по волновым числам в частотно-волновом пространстве для двухпараметрической модели взаимного спектра получается более компактным, что эквивалентно большей степени «замороженности» поля турбулентных давлений. Построена корректировочная функция турбулентных спектров и выполнена обработка экспериментальных данных на основе двухпараметрической модели взаимного спектра турбулентных пульсаций давления. В результате получен для представления частотного спектра турбулентных давлений монотонный (без перегибов) спад спектральных уровней на высоких частотах.

Лазарев Андрей Алексеевич, к.ф.м.н., тел.8-495-333-41-67, feliscatus@mail.ru
Кудашев Ефим Борисович, д.т.н., тел.8-495-333-12-34, kudashev@iki.rssi.ru

Разработка алгоритма для определения эффективного поперечного сечения частиц в приземном слое атмосферы с использованием цифровых изображений.

Разработан алгоритм и составлена программа обработки изображений частиц на языке C++ в среде разработки Visual Studio 2008. С помощью указанной программы произведен анализ крупной фракции несферических частиц в приземном слое атмосферы. Показано, что распределение частиц по поперечным сечениям близко к логнормальному. Для этих частиц эквивалентное сечение составило $1.4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$ (29%). Если среда содержит только такие частицы и концентрация этих частиц меняется во времени, то лидарному сигналу однозначно можно поставить в соответствие концентрацию частиц. Эта концентрация относится к эквивалентной среде, состоящей из монодисперсных сферических частиц с указанными эквивалентными сечениями. Эквивалентная рассеивающая среда производит такое же искажение и ослабления зондирующего пучка как исследуемая среда. В случаях, когда нижний слой атмосферы содержит частицы размером 1 мкм и менее, для определения эквивалентного сечения частиц следует использовать другие измерительные средства с большим увеличением, например электронный микроскоп. Для случаев, когда природа зондируемых частиц меняется, может быть использовано зондирование на нескольких длинах волн. Спектральная зависимость сигналов обратного рассеяния может являться индикатором изменения оптических параметров частиц в среде.

Арумов Гергий Петрович, к.ф.м.н., тел.8-495-333-31-33, arumov@iki.rssi.ru
Бухарин Алексей Владимирович, к.ф.м.н., тел.8-495-333-32-01, tumbul@iki.rssi.ru

Пункт 4.5.2. Разработка и применение алгоритмов обработки натуральных данных, средств исследований в целях мониторинга состояния атмосферы, в том числе методик дистанционного определения характеристик облачности кучевых форм и облачности верхнего яруса на основе данных измерений собственного ИК-излучения и отраженной солнечной радиации.

Развитие методов дистанционного определения характеристик облачности на основе данных измерений собственного ИК излучения и отраженной солнечной радиации. Исследование содержания малых газовых составляющих в атмосфере в фоновых условиях и экстремальных условиях антропогенного влияния и опасных явлений.

По тематике развития методов дистанционного определения состояния атмосферных компонент, включая определение концентрации атмосферных газов, параметров облачности и высотных профилей метеопараметров, проведен анализ результатов измерений спектральной яркости атмосферы в ИК диапазоне спектра для нисходящего излучения атмосферы. Измерения выполнены с помощью Фурье-спектрометра ИКФС-2, предназначенного для исследований с ИСЗ в рамках программы испытаний, проведенных разработчиком аппаратуры. Данные измерений сопоставлены с расчетами интенсивности излучения с учетом селективного и континуального поглощения атмосферных газов. В качестве входных данных использованы высотные распределения температуры и концентрации водяного пара, полученные при аэрологическом зондировании, и результаты восстановления этих параметров по измерениям уходящего излучения, выполненных с помощью сканирующего спектрометра MODIS спутника Aqua. На основании этих данных получены критерии для валидации измерений спектральной яркости атмосферы. Сделан устный доклад на одиннадцатой всероссийской открытой ежегодной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, природных и антропогенных объектов).

Городецкий Александр Константинович, к.ф.-м.н., тел.8-495-333-32-12, gora@mx.iki.rssi.ru

Адаптация алгоритмических средств и накопление данных для задач определения атмосферных метеопараметров с использованием спутниковых измерений в ИК и СВЧ диапазонах спектра.

Суть рассматриваемой здесь задачи сводилась к возможности получения количественных физических характеристик атмосферы и поверхности (как то температура поверхности, вертикальные профили температуры и влажности и пр.) для анализируемых критических явлений в атмосфере (например, циклоногенез). Однако, для рядов полученных спутниковых данных в видимом, ИК и СВЧ диапазонах с различных спутников для заданного района и времени зондирования (накопление за период наблюдений от 10 дней) возникают проблемы как географической привязки данных с различных приборов с разным пространственным разрешением, так и привязки к радиометрической шкале (данных калибровки, амплитудно-частотных характеристик). Это предполагает тесную кооперацию с разработчиками привлекаемых спутниковых приборов (преимущественно иностранных), что пока представляется нереальным.

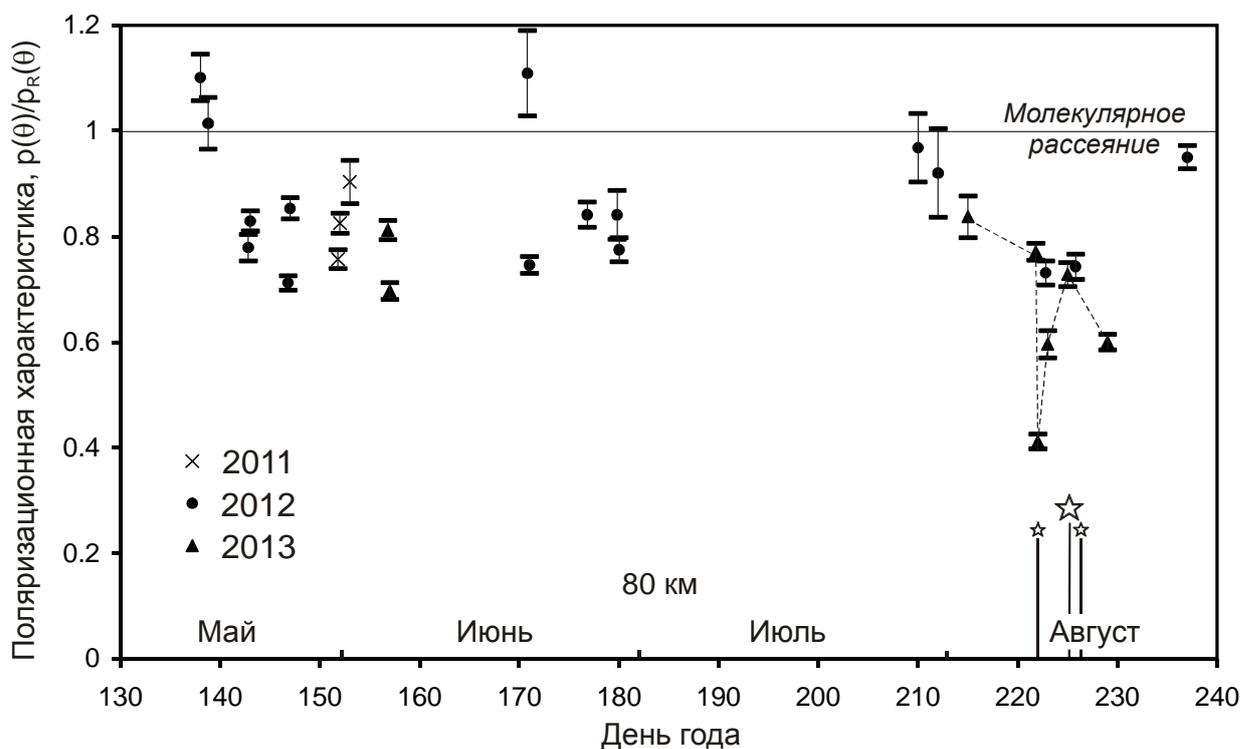
В части развития отечественной приборостроительной базы по ранее решаемой задаче определения химической (экологической) обстановки из космоса совместно с МГТУ им. Н.Э. Баумана проводились работы по макетированию отдельных узлов космического радиолокатора с синтезированной апертурой.

Князев Николай Александрович, к.ф.-м.н., тел.8-495-333-51-66, nknyazev@iki.rssi.ru

Измерения интенсивности и поляризации фона неба при помощи широкоугольной камеры с большим полем зрения

В 2013 году были продолжены поточечные измерения интенсивности и поляризации фона неба при помощи широкоугольной камеры с полем зрения 140° . На основе этих данных получены значения температуры на высотах 70-85 км. Поляризационные измерения позволяют обнаружить компоненту рассеяния света на частицах метеорной пыли в мезосфере. Ее содержание существенно возросло после 10 августа 2013 года, что, по всей вероятностью, связано с максимумом активности метеорного потока Персеиды. Сопоставление данных о поляризации фона неба и профиля активности потока показывает корреляцию с максимумами малых частиц, наступающими до и после основного максимума Персеид (показано на рисунке ниже).

Поляризационная характеристика однократного рассеяния (отношение наблюдаемой $p(\theta)$ и релеевской $p_R(\theta)$ поляризации рассеяния под углом θ) на высоте 80 км по наблюдениям в летние месяцы 2011-2013 годов. Звездочки показывают моменты максимумов мелких и крупных частиц потока Персеиды.



Угольников Олег Станиславович, 8-495-333-40-11, ougolnikov@gmail.com

Пункт 4.5.3. Развитие теоретических моделей, анализ физических механизмов в целях разработки средств исследований гидросферы и атмосферы, в том числе для выявления долгопериодических (10-100 лет) вариаций, развитие моделей для описания колебаний КС и зависимости от внешних факторов

Исследование нелинейной динамики крупномасштабного регионального циклогенеза на основе малопараметрической модели с учетом вариаций скорости ветра в ТЦ.

На основе численных расчетов в рамках нелинейной малопараметрической модели (МПМ) для максимальной скорости ветра в тайфуне (ТЦ) и температуры поверхности океана в зоне ТЦ продолжен анализ временной динамики регионального крупномасштабного циклогенеза (РКЦ) с учетом влияния внешних факторов (типа солнечно-земных связей, явления Эль-Ниньо и др.), определяющих нестационарность фоновой обстановки и интенсивность РКЦ. Выбором параметров задачи рассмотрены варианты временной динамики РКЦ при реализации вариаций фоновой обстановки с характерным временем этих вариаций порядка суток и параметром амплитуды вариаций 0.01 при генерации трех ТЦ в активный сезон. Из проведенных численных расчетов следует, что сравнительно малые изменения фоновой обстановки могут инициировать значительные вариации скорости ветра в ТЦ при генерации нескольких тайфунов в активном сезоне региона причем характеристики формирующихся ТЦ (скорость ветра, длительность жизненного цикла и др.) могут существенно различаться. Из проведенных расчетов следует возможность описания РКЦ конкретного региона на основе используемой нелинейной малопараметрической модели при соответствующем подборе параметров МПМ, которое будет соответствовать данным наблюдений. Предлагаемый подход представляет большой научный и практический интерес в том числе для разработки современных методов прогноза крупномасштабных кризисных атмосферных явлений и моделирования их связей с другими процессами в период активного сезона, зависимости их характеристик от внешних факторов, в частности, космической погоды.

Построение теоретической модели генерации тропических циклонов, содержащую термодинамику фазовых превращений атмосферной влаги и восточную волну.

Обычно считается, что градиент температуры в тропосфере равен 6,5 град/км. Но часто не произносится, что речь идёт о среднем градиенте температуры, кроме того остаётся непонятен механизм усреднения: по высоте, по широте, по времени, и т.п. С одной стороны видим практически универсальную константу. Но, с другой стороны, остается непонятным — каким же образом этот градиент устанавливается. Ведь в атмосфере насыщенных облаков немного, а градиент ненасыщенного воздуха близок к сухому. Казалось бы, градиент температуры в тропосфере должен устанавливаться на всей планете сухоадиабатическим, то есть 10 град/км.

Однако измеряемый градиент температуры в тропической тропосфере существенно меньше (по абсолютной величине), чем в сухом воздухе. Таким образом, можно сказать, что вертикальное распределение в тропосфере не равно 6,5 град/км по всей высоте, но имеет достаточно сложный характер. В широком диапазоне климатических поясов (от континентального до тропического) и времен года (от зимы до лета) наблюдается схожая картина: инверсия вблизи поверхности Земли, рост градиента до 10 град/км и инверсия вблизи тропопаузы. Средний по высоте градиент во всех случаях действительно близок к общепринятому (6,5-7,0) град/км.

Скорость приповерхностного воздуха определяет величины потоков тепла и пара, и потому является важным параметром задачи. Возникновение нового тайфуна подразумевает малую начальную скорость поступающего воздуха с последующим её ростом вплоть до урагана. Такая функция должна естественно получаться при решении полной трехмерной задачи, однако это выходит за рамки рассмотренной постановки. Для одномерной задачи необходимо задать скорость как непрерывную функцию параметров задачи и изменяющуюся от некоторого минимального до максимального значений. Количество пара в атмосфере является одним из важнейших условий возникновения тайфуна, по этому аргументу функции скорости выбрано полное количество пара в столбе воздуха. Принимаем достаточно малую начальную скорость ветра 3 м/с и максимальную скорость ветра 50 м/с. Это значение соответствуют общепринятой шкале ураганов Саффира — Симпсона для тайфунопограничной категории (между второй и третьей).

Оказывается, что результат расчёта (время достижения облаком тропопаузы) сильно зависит от профиля температуры в поступающем воздухе. Если этот профиль близок к профилю температуры в облаке, то есть, если «щель» между профилями достаточно мала, то поступающие с поверхности океана потоки явного скрытого тепла могут быстро её заполнить до состояния насыщения. Если эта «щель» слишком велика, то время её заполнения увеличивается и могут нарушиться (довольно хрупкие) условия образования тайфуна, и депрессия распадается. То же самое касается и общего количества пара, изначально находящегося в тропосфере.

Формирование циклонических вихрей в тропической атмосфере Земли в области внутритропической зоны конвергенции

Продолжено изучение механизмов формирования циклонических вихрей в тропической атмосфере Земли в области внутритропической зоны конвергенции. Региональная негидростатическая математическая модель системы ветра используется для исследования начальной стадии формирования крупномасштабных вихрей в тропических широтах.

Модель воспроизводит трехмерное распределение параметров атмосферы на высотах от 0 до 15 км по ограниченной области поверхности Земли; область вычислений включает в себя внутритропическую зону конвергенции. Моделирование выполнено для ряда случаев, когда в начальный момент зона конвергенции содержит изгибы разной формы, которые выбирались в соответствии с результатами спутникового микроволнового мониторинга атмосферы Земли. Возникающая неустойчивость потока приводит к значительным изменениям поля ветра. Дальнейшие изменения зависят от начальной формы изгиба и от условий окружающей среды, в частности от степени насыщенности воздуха водным паром. Результаты моделирования показали, что выбранные конфигурации зоны конвергенции могут приводить к формированию в поле ветра различных крупномасштабных вихрей. Наблюдались специфический циклонический вихрь, пара вихрей циклон-антициклон и пара циклонических вихрей, которые формировались за период времени не более трех дней. Размеры полученных в результате численного моделирования крупномасштабных вихрей составляют приблизительно (400-600) км. Горизонтальная скорость ветра в этих вихрях может достигать величины (15-20) м/сек.

Астафьева Наталья Михайловна, д.ф.-м.н., в.н.с., тел.333-21-45, ast@iki.rssi.ru

Одновременный мониторинг естественного радиационного фона и метеорологических параметров.

Совместно со специалистами университета г. Таубате (штат Сан Пауло, Бразилия) спроектирован и запущен комплекс аппаратуры для одновременного мониторинга естественного радиационного фона и метеорологических параметров. Установка обеспечивает непрерывное измерение параметров окружающей среды с временным разрешением до 1 минуты. Подобная точность позволяет детальное сравнение временных профилей осадков и сопутствующей радиации, что необходимо для исследования динамики изменения концентрации изотопа ^{214}Pb в дождевых осадках. (^{214}Pb является дочерним продуктом распада природного ^{222}Ra .) Количество осаждённого ^{214}Pb (fallout) определялось сравнением измеренного профиля интенсивности гамма-квантов с их выходом рассчитанным для цепи распада $^{214}\text{Pb} \rightarrow ^{214}\text{Bi} \rightarrow ^{214}\text{Po} \rightarrow ^{210}\text{Pb}$. Подбирался такой временной профиль выпавшего ^{214}Pb , который обеспечивал наилучшее совпадение рассчитанного и измеренного временных профилей потока распадных гамма-квантов. Концентрация ^{214}Pb в осадках рассчитывалась, как отношение определенного указанным выше образом выпавшего ^{214}Pb , к одновременно измеряемой интенсивности дождевых осадков. Обеспечиваемое установкой достаточно высокое временное разрешение впервые позволило определить реальный диапазон изменения концентрации изотопа в дождевых осадках. Показано что концентрация ^{214}Pb может варьироваться в пределах двух порядков как от одного дождя к другому, так и в ходе одного дождя. При этом наблюдается явная антикорреляция между интенсивностью дождевых осадков и концентрацией в них ^{214}Pb . Большая концентрация наблюдается в продолжительных морозящих дождях или в начале более сильных дождей. По-видимому эффект может быть объяснён существованием двух механизмов попадания находящихся в атмосфере радионуклидов в дождевые капли: непосредственно при формировании капель в дождевом облаке (in-cloud scavenging) или через адсорбцию на поверхности дождевых капель при их движении из облака к поверхности земли (below-cloud scavenging). Моделирование этих процессов предполагается выполнить в ближайшее время.

А.А.Гусев, к.ф.м.н., тел.8-495-333-30-45, vpan-iki@yandex.ru

РАЗДЕЛ 4.6. МОНИТОРИНГ-ЭФФЕКТ

Отв. исп.к.ф.-м.н. Форш А.А.

4.6.1 Разработка методов и средств повышения качества калибровки и привязки данных российских приборов ДЗЗ, в том числе синтеза и радиометрических свойств изображений приборов МСУ-100 и МСУ-50 (КА "Метеор-М" №1 и №2).

Комплекс многозональной спутниковой съемки (КМСС) на КА Метеор-М" №1 включает две камеры МСУ-100 с пространственным разрешением около 60 м и спектральными зонами, оптимизированными для исследований суши, и одну камеру МСУ-50 с пространственным разрешением около 120 м и спектральными зонами, оптимизированными для исследований океана. Хотя камеры КМСС прошли наземную радиометрическую калибровку, их чувствительность может измениться в полете под воздействием изменений температуры, радиации и других факторов. Для контроля изменения чувствительности камер КМСС в полете разработана методика их кросс-калибровка со спектрорадиометром MODIS на КА Terra по снежным полям на высокогорном Антарктическом плато. Для корректной кросс-калибровки КМСС и MODIS необходимо учитывать различие их спектральных зон, а также углов освещения и наблюдения в моменты съемки КМСС и MODIS.

Путем моделирования спектров отражения системы поверхность-атмосфера получены линейные регрессионные соотношения, позволяющие пересчитывать значения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) широкого круга природных объектов между спектральными зонами камер КМСС и MODIS (рис.1). Для спектральных зон КМСС видимого диапазона достаточно использовать ближайшую зону MODIS, а для адекватного расчета КСЯ в зоне 0,76-0,90 мкм МСУ-100 – три зоны MODIS. Среднеквадратическая ошибка пересчета КСЯ между спектральными зонами КМСС и MODIS составляет 0.002-0.008 в зависимости от спектральной зоны.

Зависимость КСЯ антарктического снега от углов освещения и наблюдения (индикатриса рассеяния) исследована по изображениям MODIS и пересчитана для каждой спектральной зоны камер КМСС. Зависимость КСЯ от зенитного угла Солнца в 60-75°, при котором проводились съемки, аппроксимировалась линейными функциями (рис.2). Отклонения от указанной линейной зависимости, которые возрастают с увеличением зенитного угла наблюдения, аппроксимировались квадратичными функциями. В результате ошибка моделирования индикатрисы рассеяния антарктического снега в спектральных зонах КМСС не превышала 2%.

Кросс-калибровка камер КМСС и MODIS проводится путем сопоставления значений КСЯ яркости Антарктического плато, измеряемого каждым элементом линейных ПЗС-детекторов в каждом канале каждой камеры КМСС, и рассчитанных по данным MODIS при соответствующих углах освещения и наблюдения. Результаты усредняются по 20-30 тыс. строк. Полученные результаты используются для коррекции распределения чувствительности элементов ПЗС-детекторов.

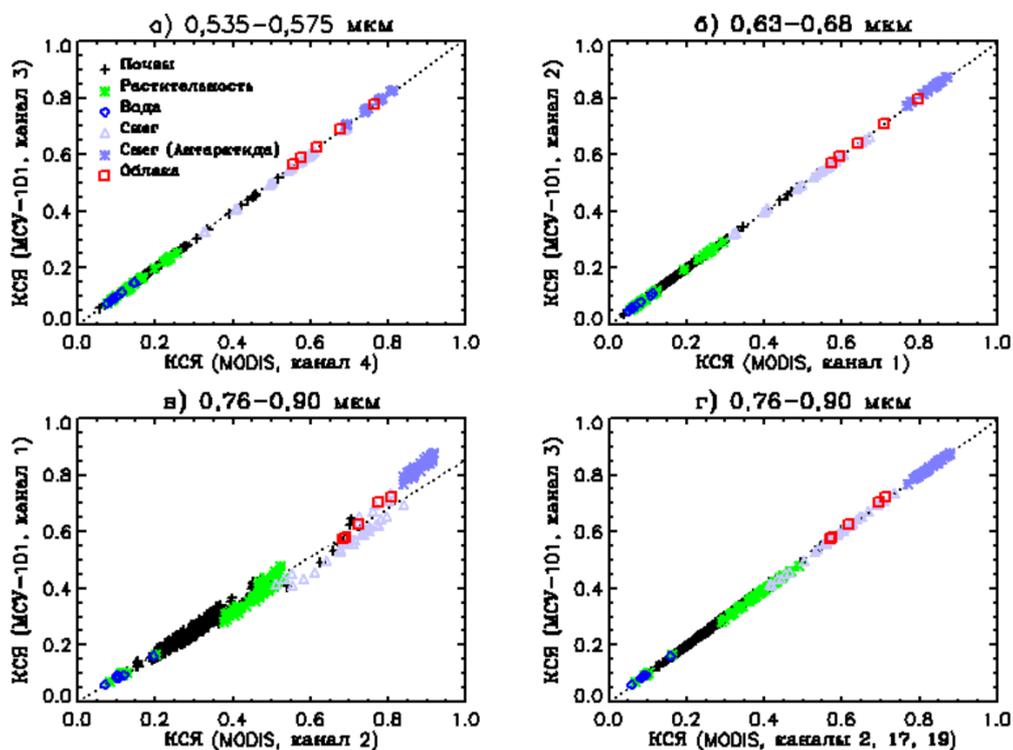


Рис.1. Связь значений КСЯ в спектральных зонах МСУ-100 и MODIS; для канала 0,76-0,90 мкм показаны регрессионные зависимости, полученные при использовании одного (в) и трех (г) каналов MODIS

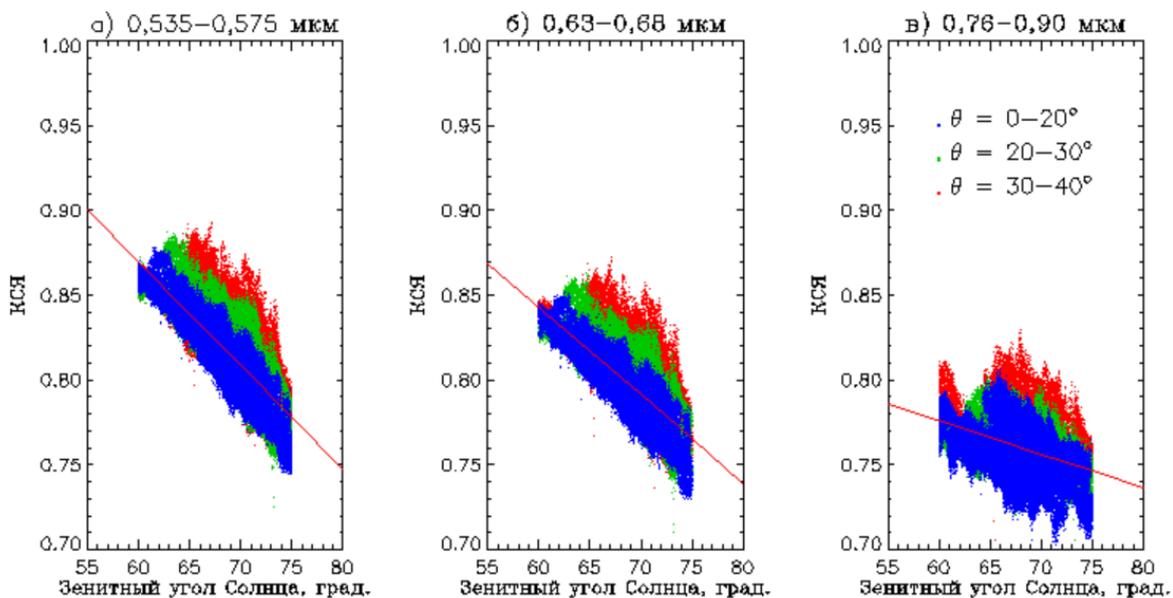


Рис.2. Зависимость КСЯ антарктического снега от зенитного угла Солнца при разных значениях зенитного угла наблюдения

При использовании данной методики точность относительной (flat-field) радиометрической калибровки камер КМСС составляет не хуже 2%. Учитывая точность абсолютной радиометрической калибровки MODIS ~5%, точность абсолютной калибровки

камер КМСС можно оценить в 6-7%. На протяжении трех лет наблюдений чувствительность камер изменилась незначительно (рис.3).

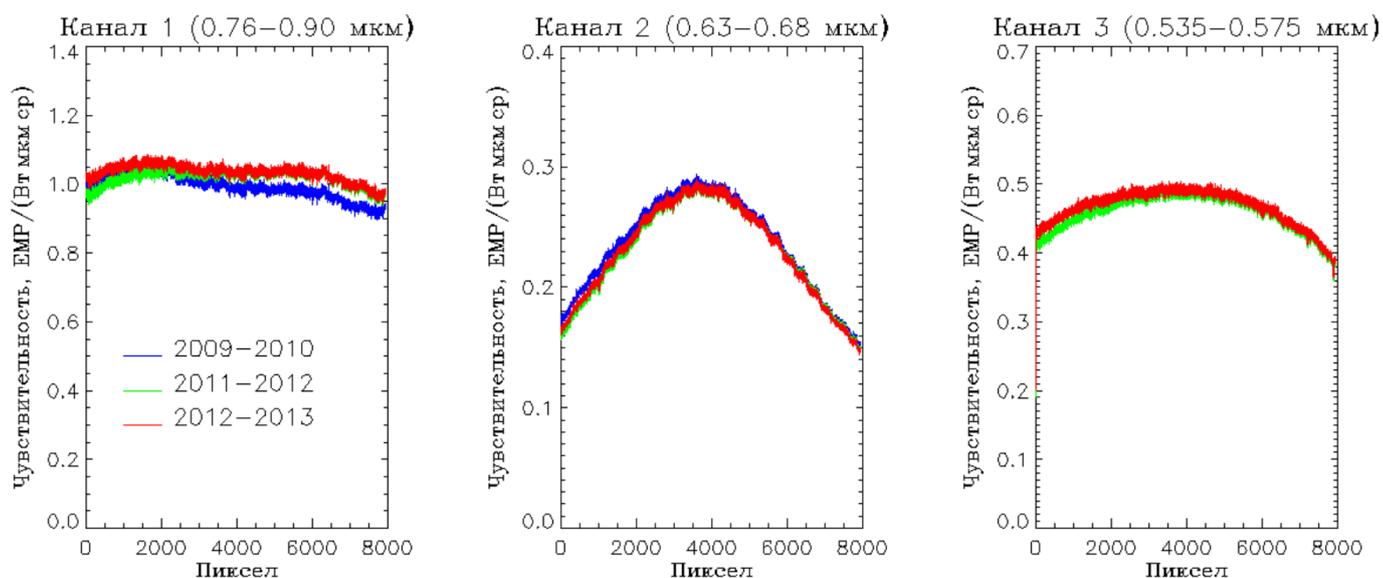


Рис.3. Распределение чувствительности каналов камеры МСУ-100 по данным полетной калибровки в течение трех лет наблюдений

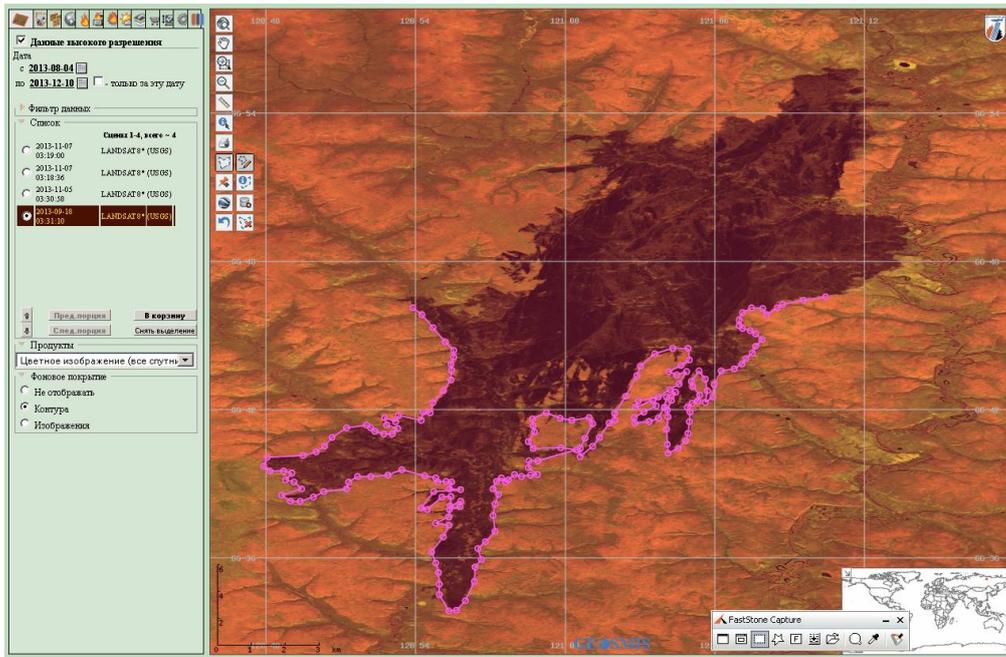
4.7.1. Многосенсорная автоматизированная технология спутникового картографирования и оценки площади гарей в лесах России

Разработана автоматизированная технология картографирования и оценки площади лесных пожаров на всей территории России на основе совместного использования спутниковых данных различного пространственного разрешения, получаемых системами дистанционного зондирования MODIS и Landsat. Технология включает комплексирование трех типов оценок площади пожаров, отличающихся уровнями оперативности и точности. Оперативное детектирование пожаров осуществляется на основе спутниковых измерений температуры земной поверхности с пространственным разрешением 1 км. Последующее уточнение площади пожаров проводится по результатам анализа спектрально-отражательных характеристик поверхности на основе спутниковых данных пространственного разрешения 230 м. Окончательная и наиболее точная оценка площади пожаров достигается за счет использования спутниковых данных пространственного разрешения 30 м. Технология предполагает комплексирование различных данных путем использования наиболее точной оценки из всех доступных на текущий момент времени. На основе разработанной технологии в 2013 году на территории России было выявлено 9,9 млн. га природных пожаров, в том числе 4,8 млн. га лесных площадей пройденных огнем. Технология функционирует в составе информационной системы дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз).

Контакты:

Лупян Е.А., д.т.н., e-mail: evgeny@smis.iki.rssi.ru

Барталев С.А., д.т.н., e-mail: bartalev@smis.iki.rssi.ru



Веб-интерфейс картографирования пожаров по данным Landsat