

Название журнала	ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА						
Издательство	Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр Российской академии наук "Издательство "Наука"						
Сведения о переименовании и переводе	Переводная версия: <i>Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics</i> <i>Earth Observation and Remote Sensing</i>						
Год выпуска	2011	Том		Номер выпуска	3		
	Название статьи					Страницы	Цит.
	ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ						
	КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ В РОССИИ В УСЛОВИЯХ АНОМАЛЬНОЙ ЖАРЫ 2010 Г Бондур В.Г.					3-13	74
	РОЛЬ КОСМИЧЕСКИХ И ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ГЛОБАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЯХ И КОРРОЗИИ ТРУБОПРОВОДОВ Авакян С.В., Воронин Н.А.					14-29	14
	ВАРИАЦИИ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ ИОНОСФЕРНОГО СЛОЯ F2 ПО ДАННЫМ ТОМОГРАФИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА Ванина-Дарт Л.Б., Романов А.А., Шарков Е.А.					30-39	4
	РАСПОЗНАВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПО ДАННЫМ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО АЭРОЗОНДИРОВАНИЯ Козодеров В.В., Егоров В.Д.					40-48	4
	ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ АГРОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ГОРНО-ЛУГОВЫХ ЛАНДШАФТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЭРОФОТОСНИМКОВ Марданов И.И.					49-54	2
	ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА						
	ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КАПИЛЛЯРНО-МЕНИСКОВОЙ ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ Беляева Т.А., Бобров П.П., Кондратьева О.В., Репин А.В.					55-64	5
	МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ						
	ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ВИХРЕЙ ОКЕАНА ПО СПУТНИКОВЫМ ИК-ИЗОБРАЖЕНИЯМ Алексанин А.И., Загумённов А.А.					65-74	3
	МЕТОДЫ ВЫЯВЛЕНИЯ ДИНАМИКИ ТРОПИЧЕСКОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ВЬЕТНАМА ПУТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ МНОГОЗОНАЛЬНЫХ СНИМКОВ Марчук В.С., Ле Хунг Чинь					75-85	5
	ВАРИАЦИИ ТРАЕКТОРИИ СПУТНИКА МИССИИ ТОПЕКС-ПОСЕЙДОН КАК ИСТОЧНИК ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ Иванов В.В.					86-96	0

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ**

**КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ В РОССИИ
В УСЛОВИЯХ АНОМАЛЬНОЙ ЖАРЫ 2010 г.**

© 2011 г. В. Г. Бондур

ГУ Научный центр аэрокосмического мониторинга “Аэрокосмос” Минобрнауки России и РАН, Москва

E-mail: vgbondur@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 27.01.2011 г.

Описаны особенности экстремальных условий, сложившихся летом 2010 г. в Европейской части территории Российской Федерации, когда из-за аномальной жары (среднемесячные температуры в летние месяцы на 5°–9°С превышали средние температуры этих месяцев за 2002–2009 гг.) и длительных блокирующих антициклонов возникали сильные природные пожары. Проанализированы причины возникновения и последствия природных пожаров. Представлены особенности космической системы оперативного мониторинга пожаров, созданной в ГУ “Аэрокосмос”, и примеры ее применения летом 2010 г. На основании результатов обработки космических изображений низкого (250...1000 м), среднего (~30–50 м) и высокого (~6 м) разрешения установлено, что суммарные площади, пройденные огнем с марта по ноябрь 2010 г., для всей территории страны составили ~10.9 млн. га, а для ее Европейской части ~2.2 млн. га. Построены гистограммы площадей, ежедневно пройденных огнем в летние месяцы 2010 г. С использованием этих данных и эмпирических моделей оценены ежедневные эмиссии угарного газа (СО) от природных пожаров в летние месяцы 2010 г. для территорий Европейской части России и Московской обл. В отдельные дни августа 2010 г. эти эмиссии достигали 15–27 тыс. т для Европейской части России и 3–7.5 тыс. т для Московской обл. На основании результатов обработки данных спектрометра AIRS (спутник Aqua) получено пространственное распределение концентрации СО на высотах от 2 до 10 км над Восточной и Центральной Европой. Показано, что наиболее сильное задымление г. Москвы от природных пожаров происходило 6–9 августа 2010 г., когда концентрации вредных газов (СО₂, СО, СН₄, О₃) и аэрозолей в воздухе существенно превышали не только суточные, но и разовые предельно допустимые нормы.

Ключевые слова: космический мониторинг природных пожаров, аномальная жара, Европейская часть России

ВВЕДЕНИЕ

Лето 2010 г. в России отличалось необычайной жарой, засухой и сильными природными пожарами (лесными, степными, торфяными), прежде всего, в Европейской части страны. В ряде регионов от таких пожаров погибло 60 человек. Сгорело 2.5 тыс. домов в почти 150 населенных пунктах. Свыше 3.5 тыс. человек остались без крова. В течение нескольких дней были задымлены многие города и населенные пункты, в том числе такой мегаполис, как Москва. Пожары парализовали работу аэропортов, автомобильных дорог, приводили к отключениям линий электропередач и электрических подстанций, угрожали стратегически важным объектам. Они нанесли серьезный ущерб лесному фонду и сельскому хозяйству. Огромное количество вредных газовых компонент и аэрозолей, выделившихся в процессе горения лесов, травы и торфяников, попали в воздушную среду, загрязняя атмосферу и угрожая здоровью людей.

По официальным данным Федерального агентства лесного хозяйства (Рослесхоз), на территории России ежегодно возникает от 10 до 40 тыс. природных пожаров, которые охватывают площади от 0.5 до 2.5 млн. га. Статистические данные о природных пожарах предоставляет также Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС России). При этом данные МЧС и лесного ведомства различаются. Например, по данным Рослесхоза, в 2009 г. общая площадь, пройденная огнем, составила 2.4 млн. га при количестве лесных пожаров 22.54 тыс. В то время как по официальным данным МЧС России в 2009 г. площадь, пройденная огнем, составила 1.14 млн. га (т.е. более чем в 2 раза меньше, чем по данным Рослесхоза), при числе очагов пожаров 21.9 тыс. (Бондур, 2010). Однако эта статистика относится только к охраняемым территориям. С учетом того, что природные пожары происходят также на неохраняемых и эпизодических охраняемых территориях (в основ-

ном в Сибири и на Дальнем Востоке), общая площадь, пройденная огнем, для всей Российской Федерации составляет от 2 до 6.0 млн. га ежегодно (Исаев и др., 1995; Воробьев и др., 2004). На Земном шаре в целом ежегодно возникает до 400 тыс. природных пожаров (Воробьев и др., 2004).

Для получения объективной информации о количестве пожаров и площадях, пройденных огнем, необходимо использовать современные технические средства, и прежде всего — космические. В настоящей работе приводятся результаты мониторинга природных пожаров, происходивших на территории России в 2010 г., с помощью космической системы Научного центра аэрокосмического мониторинга “Аэрокосмос”.

ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ПОСЛЕДСТВИЯ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ

Основной причиной возникновения природных пожаров является деятельность человека (~79%). При этом главным виновником пожаров (~70%) является само население. От сельхоззапалов, от сжигания порубочных остатков, по вине лесозаготовителей, экспедиций, а также транспортных систем возникает ~9.1% природных пожаров. От природных факторов (молнии) возникает чуть более 13% пожаров. Остальная часть пожаров возникает по невыясненным причинам (Воробьев и др., 2004).

Пожарная опасность территорий определяется влажностью напочвенного и растительного покрова и температурой воздуха. При влажосодержании отмершей растительности, мхов, лишайников и других проводников горения менее 25% создаются благоприятные условия для возникновения и распространения низовых пожаров. Одновременно при влажности крон деревьев менее 80% возникает серьезная угроза перехода низовых пожаров в верховые, которые являются наиболее опасными как с точки зрения скорости распространения (от 3 до 100 м/мин и более), так и с точки зрения уничтожения лесной флоры и фауны (Воробьев и др., 2004; Бондур и др., 2009; Бондур, 2010). В связи с этим в жаркие, засушливые периоды частота возникновения пожаров значительно возрастает. Это подтверждают и исторические факты, и современные данные. Как следует из сохранившихся летописных сведений, вспышки интенсивностей пожаров в прошлом приходились на периоды засух. Например, Суздальская летопись сообщает, что в 1223 и 1298 гг. на территории России были засухи и бушевали сильные лесные и торфяные пожары. Никонская и Новгородская летописи упоминают о засухах и лесных пожарах в XIV—XVII вв., сопровождавшихся голодом среди населения и большими потерями среди диких животных. Сведения о засухах и сильных лесных пожарах в XVIII—XIX вв. можно найти во многих исторических документах, в сохранившихся переписках известных людей и

периодических журналах того времени. Количество упомянутых в русских летописях засух и лесных пожаров не превышает 50 случаев. В прошлом и начале этого века учет природных пожаров приобрел регулярный характер, а сама проблема получила научное развитие. Связь аномальной жары и засух с большим количеством природных пожаров подтверждают и события, произошедшие в СССР и России в 1972, 2002 и 2010 гг. (Бондур, 2010).

Природные пожары представляют собой опасные стихийные бедствия, так как они уничтожают ценную древесину. Частые пожары мешают лесовосстановлению, ухудшают состояние водосборных бассейнов. При пожарах гибнут животные и птицы, огонь может распространяться на населенные пункты, промышленные предприятия, угрожать людям, жилым домам, объектам энергетики, транспорта, стратегически важным объектам и др. (Бондур и др., 2009; Воробьев и др., 2004).

Лесные пожары задымляют большие пространства, изменяют химический состав атмосферного воздуха за счет эмиссии различных малых газовых компонентов, что приводит также к изменению концентрации озона. Увеличение эмиссии монооксида и двуоксида углерода, а также других парниковых газов влияет на климат планеты. За сезон вегетации растений поток депонированного из атмосферы углерода за счет фотосинтеза может достигать величин 80—310 гС/м² (Исаев и др., 1995). Крупные лесные пожары снижают стоки атмосферного углерода вследствие снижения объема биомассы. При этом из-за пожаров происходит трансформация лесов в источники углерода за счет прямых выбросов при сгорании биомассы (от 14.0 до 40.0 Мт/г) и косвенных воздействий пожаров на тепловую и водную режимы, а также на структуру и функционирование экосистем (Бондур и др., 2009; Воробьев и др., 2004).

Пожары приводят к частичной ликвидации растительного покрова и к понижению альбедо поверхности почвы (последнее обуславливает повышение температуры поверхности и усиление скорости разложения остатков растительности). Они прерывают процессы накопления органического вещества в почве и изменяют баланс между поступлением детрита и гетеротрофным дыханием. Пожары порождают изменения сукцессии растительности и состава ее видов, а также качества подстилки (Исаев и др., 1991; Бондур и др., 2009).

В то же время лесные пожары играют значимую роль в формировании лесных экосистем. Они являются неотъемлемым элементом их развития. Известно, что возобновление сосновых лесов после пожаров осуществляется легче и быстрее по сравнению с местами вырубок. Более того, обнаружено возрастание продуктивности лесных экосистем после пожаров. Восстановление лесных сообществ зависит от частоты и интенсивности пожаров. В таеж-

ных лесах Сибири относительно частые пожары невысокой интенсивности вызывают изменения возраста и качества древостоев. Установлено, что пожары являются необходимым элементом для поддержания биоразнообразия. Регенерация лесных экосистем после пожаров зависит от многих факторов (климатических, почвенных, состава горных пород, рельефа и т.д.). В лиственных лесах Сибири, там, где развита вечная мерзлота, кустарниковый и травяно-кустарниковый ярусы восстанавливаются после пожара через 4–5 лет, а мхи и лишайники значительно медленнее (Бондур и др., 2009).

Таким образом, проблема природных пожаров имеет две стороны – отрицательную и положительную. Отрицательная сторона связана с экономическими потерями для человека, угрозами его жизни, уничтожением хозяйственных объектов, явным ущербом лесному фонду, снижением способности к депонированию углерода, возрастанием эмиссий газовых и аэрозольных продуктов горения и др. Положительный аспект связан с эволюционной ролью лесных пожаров. При этом следует отметить, что потери лесного хозяйства от пожаров значительно превышают расходы на охрану и восстановление лесных ресурсов.

В связи с этим необходимо проводить детальный анализ последствий природных пожаров и осуществлять поиск стратегии их контроля. Главными факторами, определяющими эффективность борьбы с природными пожарами, являются оперативность обнаружения и своевременность подавления их очагов, особенно на ранних стадиях (Воробьев и др., 2004). Одним из перспективных подходов к решению этой проблемы является использование спутниковых систем мониторинга, оснащенных широким спектром современной аппаратуры дистанционного зондирования (ДЗ) (Бондур и др., 2009; Бондур, 2010).

ИСПОЛЬЗУЕМАЯ СИСТЕМА КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПОЖАРОВ

В настоящее время для контроля и предупреждения природных пожаров успешно применяются спутниковые системы. Обнаружение очагов пожаров обычно осуществляется с помощью ИК-радиометров, входящих в состав бортовых космических комплексов. Алгоритмы обнаружения очагов основаны на регистрации радиационной температуры в спектральном диапазоне 3.5...3.7 мкм и разности радиационных температур в этом канале и в спектральном канале ~11.0 мкм (Бондур и др., 2009; Бондур, 2010). Одними из наиболее часто используемых приборов для обнаружения пожаров являются радиометр MODIS спутников Terra и Aqua системы наблюдения Земли EOS (Roy et al., 2008; Бондур и др., 2009), а также аппаратура AVHRR космической системы NOAA.

Спутниковую информацию для слежения за пожарами используют в США и некоторых странах ЕС (например, Германия). Для Российской Федерации, имеющей огромную площадь (~17.1 млн. км²), множество труднодоступных территорий и большие площади лесных массивов, применение космических средств для раннего обнаружения и оценки последствий природных пожаров особенно актуально. В Рослесхозе существует Информационная система дистанционного мониторинга (ИСДМ–Рослесхоз), созданная с участием ФГУ “Авиалесоохрана”, Института космических исследований РАН, НИЦ “Планета” и других организаций (Щетинский и др., 2008). Спутниковые данные для контроля пожаров используются и в МЧС России. Космическим мониторингом пожаров занимается Инженерно-технологический центр “СканЭкс”. Современная система оперативного космического мониторинга природных пожаров (СКМ) создана и успешно эксплуатируется в ГУ Научный центр аэрокосмического мониторинга “Аэрокосмос” (Бондур, 2010; Бондур и др., 2009). Эта система позволяет проводить раннее обнаружение, прогноз динамики развития и оценку последствий природных пожаров, а также оперативное формирование и передачу заказчикам различной информации об этих природных катаклизмах.

На рис. 1 приведена структурная схема мониторинга природных пожаров, на рис. 2 – блок-схема функционирования СКМ ГУ “Аэрокосмос”, а на рис. 3 – зоны устойчивого приема космической информации наземными станциями этой системы.

В отличие от существующих средств дистанционного обнаружения пожаров СКМ ГУ “Аэрокосмос” имеет ряд особенностей, основными из которых являются:

- возможность оперативного контроля всей территории Российской Федерации и приграничных стран;
- высокая частота обзора одного и того же района – 25 раз в сутки;
- высокая скорость обработки данных и передачи информационных продуктов потребителями (10 мин с момента приема космических данных);
- полностью автоматическая работа системы в режиме оперативного обнаружения пожаров;
- высокая точность и достоверность получаемых данных;
- сочетание обзорной и детальной космической информации при обнаружении и оценке последствий пожаров;
- возможность прогнозирования развития пожаров;
- возможность оперативного предоставления информации о пожарах и их последствиях в зонах ответственности сложных технических систем

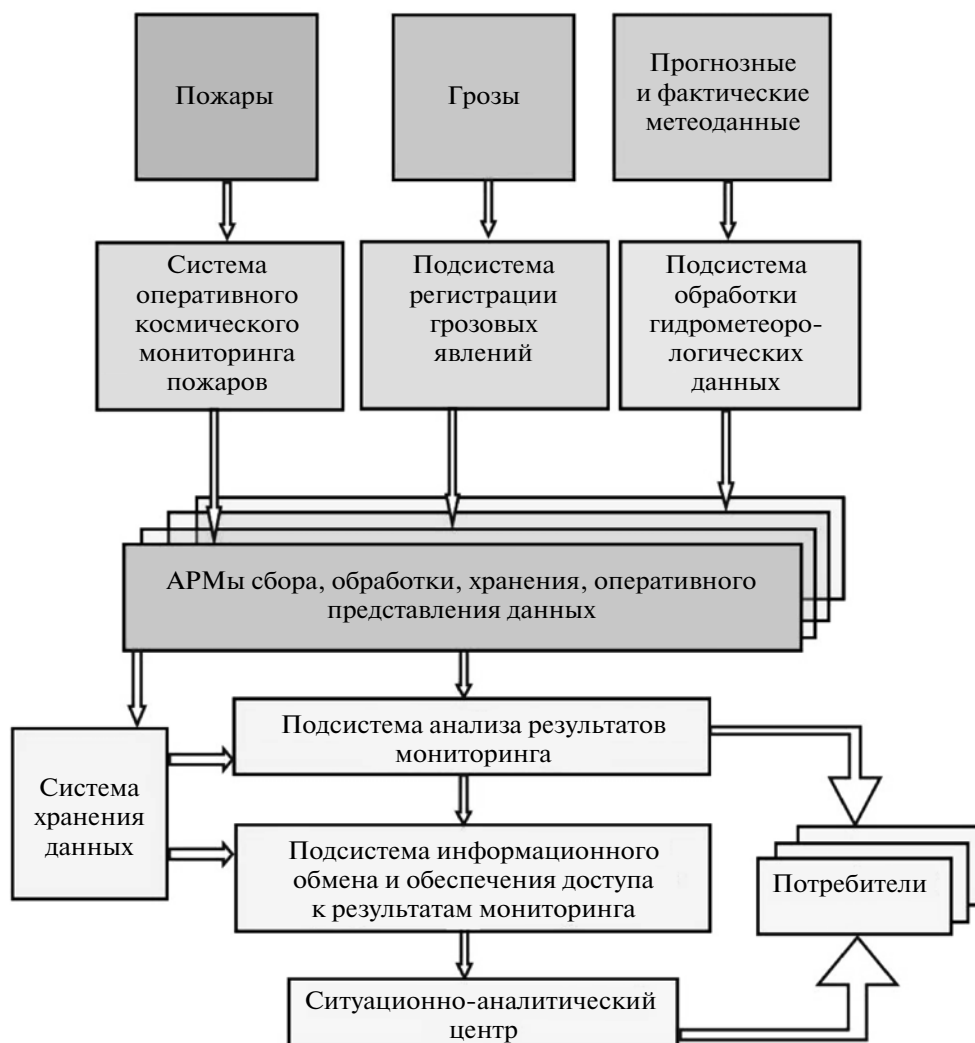


Рис. 1. Структурная схема мониторинга природных пожаров.

(объекты энергетики, ЛЭП, нефте-, газо- и продуктопроводы, стратегически важные объекты и др.);

– формирование широкого спектра информационных продуктов в формате ГИС;

– разработка рекомендаций для принятия управленческих решений.

Главные преимущества этой системы связаны с использованием специальных методов и технологий автоматического оперативного сбора и обработки космических и других данных, а также определения масштабов и последствий природных пожаров, которые разработаны в процессе выполнения ряда научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в рамках Федеральных целевых программ Минобрнауки России.

Система удовлетворяет фундаментальным принципам открытых систем: функциональная расширяемость, модернизируемость, интегрируемость информационных ресурсов (Бондур, 1995;

Савин, Бондур, 2000). Она является территориально-распределенной системой с размещением идентичных аппаратно-программных средств в трех наземных Центрах для обеспечения обзора всей территории страны.

В состав СКМ ГУ “Аэрокосмос” входят:

1. Главный (в г. Москве) и два региональных (в Сибири и на Дальнем Востоке) Центра приема космической информации, поступающей с группировок спутников, оборудованных ИК и многоспектральной оптической аппаратурой ДЗ.

2. Специальное программное обеспечение для оперативного автоматического сбора, обработки и хранения информации, а также формирования информационных пакетов и передачи данных.

3. Геоинформационное обеспечение.

4. Средства связи, обеспечивающие оперативную передачу данных с региональных станций приема в Информационно-аналитический центр

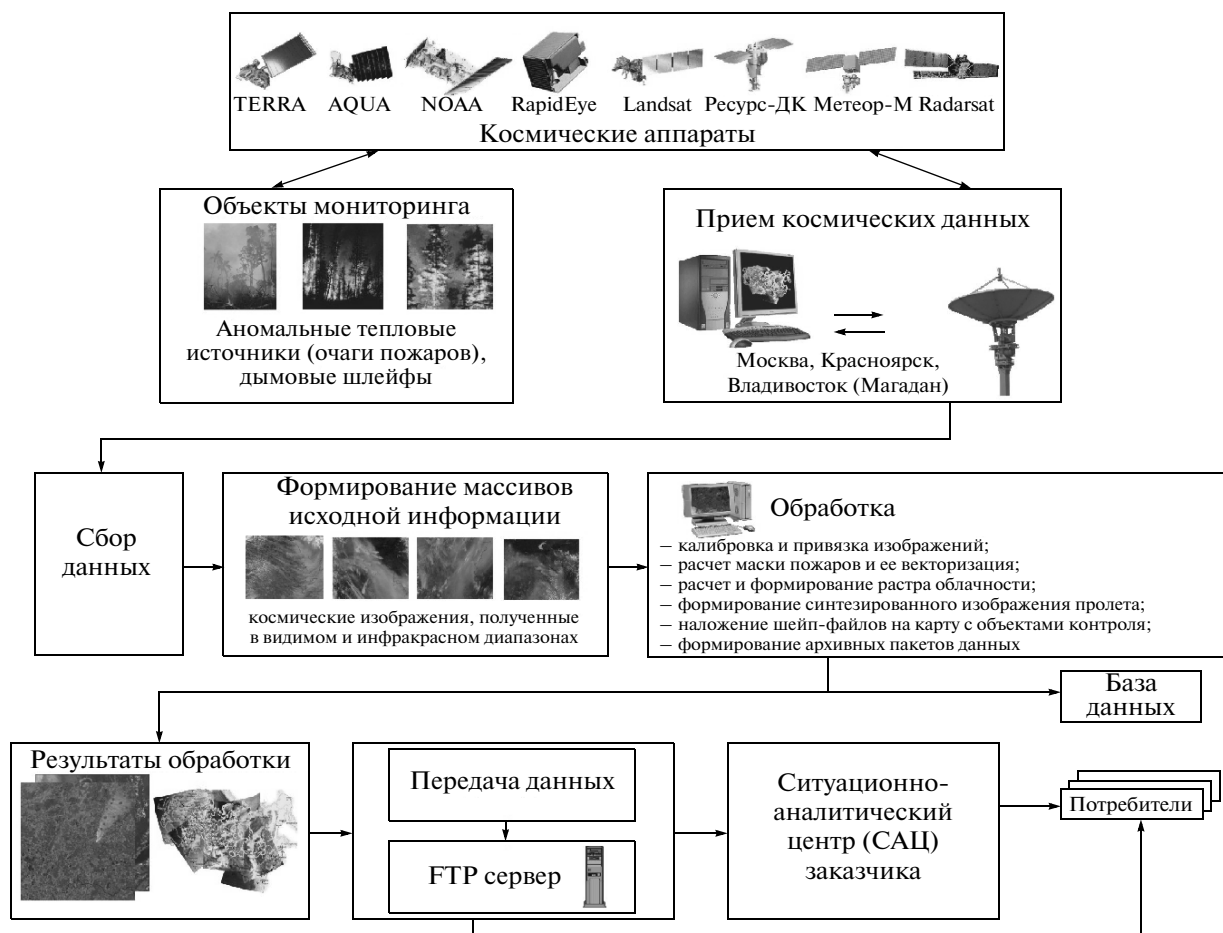


Рис. 2. Блок-схема функционирования СКМ ГУ "Аэрокосмос".

(ИАЦ) СКМ, и предоставление результатов мониторинга в Ситуационно-аналитические центры Заказчиков и локальным потребителям.

На каждой наземной станции "сырые" космические данные поступают на вычислительные средства предварительной обработки, где происходят их радиометрическая коррекция, калибровка, пространственная привязка и другие операции. После предварительной обработки информация передается на сервер хранения оперативных данных. В процессе работы СКМ с использованием алгоритмов и программного обеспечения, реализующих специальные технологии, разработанные в ГУ "Аэрокосмос", производится тематическая обработка космических изображений, сформированных в ИК-диапазоне спектра электромагнитных волн для выделения тепловых аномалий, обусловленных очагами пожаров на контролируемых территориях. Получаемые маски пожаров векторизуются. На основании результатов расчетов параметров очагов пожаров формируются атрибутивные таблицы шейп-файлов пожаров. С использованием специальных методов отсеиваются ложные тепловые аномалии (блики, детерминиро-

ванные тепловые источники и др.). Путем обработки многоспектральных космических данных создаются синтезированные изображения, позволяющие проводить оценку состояния облачного покрова и выявлять наличие дымовых шлейфов пожаров.

В ИАЦ СКМ формируются мозаики космических данных, полученных со всех трех наземных центров приема, которые отображаются с использованием геобраузеров. При формировании мозаик учитывается, что распределения яркости с различных проходов группировки спутников имеют различия. Поэтому они подвергаются специальному "яркостному выравниванию" для того, чтобы отдельные фрагменты мозаики имели минимальные отличия. Это позволяет обеспечить совместное отображение информации как с одного, так и с разных витков различных спутников.

Система оперативного космического мониторинга функционирует в различных режимах, определяемых регламентом. В процессе работы СКМ на основании обзорных космических изображений, поступающих со спутников Terra, Aqua, NOAA, "Метеор-М" и др., формируется следующая опера-

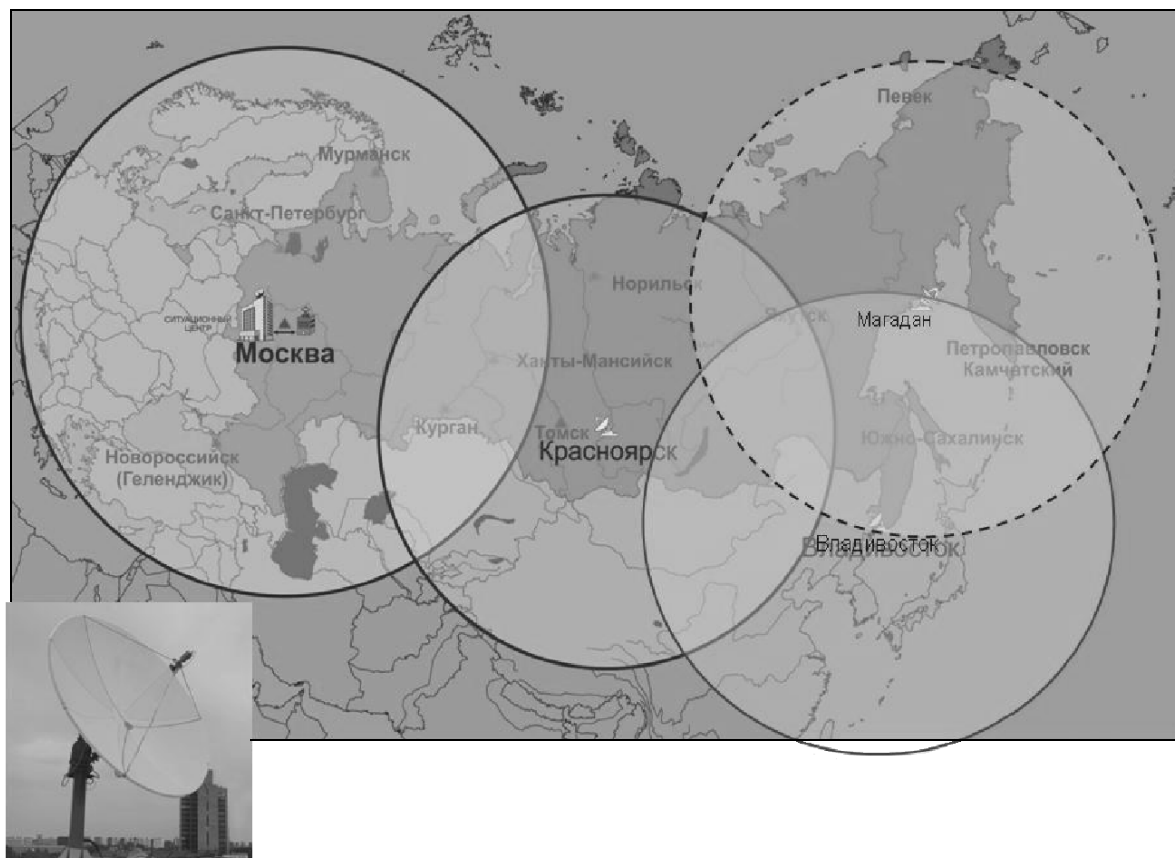


Рис. 3. Зоны приема космической информации наземными станциями СКМ ГУ “Аэрокосмос”.

тивная информация об очагах пожаров и облачных полях в пределах контролируемых территорий:

- данные об обнаруженных тепловых аномалиях (координаты, вероятность правильного обнаружения, интенсивность, предварительная площадь выгорания и др.);

- синтезированные изображения земной поверхности в формате графических файлов JPEG с привязкой файлов (файл привязки JGW) в проекции Albers Conical Equal Area;

- информация об облачности (маска облачности);

- информация о метеопараметрах;

- прогнозная информация о направлениях распространения очагов пожаров в зависимости от метеоусловий;

- расстояния от очагов пожаров до различных объектов;

- карты с наложенными шейп-файлами об очагах возгорания, дымовых шлейфах, прогнозируемой и другой информацией;

- файлы для отображения результатов мониторинга в геобраузере (формат KML);

- рекомендации для принятия решений.

Кроме того, формируются тематические слои ГИС, содержащие информацию об очагах пожаров в районе контролируемых объектов, например, линий электропередач (ЛЭП); электрических подстанций; нефтепроводов; стратегических объектов; атомных электростанций (АЭС); площадей, пройденных огнем и др.

С использованием космических изображений среднего и высокого разрешения, полученных со спутников Landsat, RapidEye и др., а также наземных данных формируется неоперативная информация (уточненные площади, пройденные огнем (см. рис. 9 на цв. вклейках), объемы эмиссий газов, статистические и другие данные).

ПРИМЕРЫ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПОЖАРОВ

На рис. 4 (на цв. вклейках) в качестве примера приведена мозаика космических изображений, сформированных 29 июля 2010 г. СКМ ГУ “Аэрокосмос” с отображением геобраузером Google Earth. Слева на этом рисунке приведены увеличенные фрагменты результатов обработки космических данных, иллюстрирующие интенсивные по-

жары в середине этого дня во Владимирской, Рязанской, Московской и Нижегородской областях.

На рис. 5 (на цв. вклейках) приведен фрагмент, демонстрирующий результат обнаружения из космоса пожаров, происходивших 29 июля 2010 г. (12:09 мск) вблизи Нижнего Новгорода. На этом рисунке отчетливо проявляются множество очагов интенсивных пожаров и мощные дымовые шлейфы. Указаны магистральные ЛЭП и их буферные зоны. Анализ данного фрагмента показывает, что большое количество очагов пожаров находится внутри буферных зон в непосредственной близости от ЛЭП.

На рис. 6 (на цв. вклейках) представлен пример прогноза развития пожаров вблизи аэропорта г. Воронежа с учетом метеословий, в том числе скорости и направления ветра. Красными зонами выделены вероятные направления распространения пожаров. Указаны расстояния от действительных и прогнозируемых очагов пожаров до аэропорта.

На рис. 7 (на цв. вклейках) приведены результаты обнаружения из космоса пожаров, происходивших 30 июня 2010 г. (12:39 мск) в Нижегородской обл. и Республике Марий Эл. На этом рисунке показаны трассы нефтепроводов и магистральных ЛЭП, а также их буферные зоны. Видно, что интенсивные пожары угрожают этим областям техносферы.

На рис. 8 и 9 (на цв. вклейках) представлены результаты обнаружения из космоса пожаров в районе г. Саров. На рис. 8 приведен фрагмент обзорного космического изображения, полученный 3 августа 2010 г. (02:27 мск), с выделенными очагами пожаров во Владимирской, Нижегородской областях и Республике Мордовия. Номерами указаны очаги пожаров вблизи Российского Федерального ядерного центра (РФЯЦ), а в таблице приведены расстояния от него до этих очагов. На рис. 9 (на цв. вклейках) иллюстрируется результат космического мониторинга пожаров 11 августа 2010 г. вблизи г. Саров на основе обзорных данных спутника Aqua (аппаратура MODIS) и детальных данных спутника RapidEye (разрешение ~6 м).

На изображении, полученном с борта спутника RapidEye в видимом диапазоне спектра, выделяются дымовые шлейфы от пожаров, обнаруженных по ИК-изображениям аппаратуры MODIS. На увеличенных фрагментах RapidEye показана зона, пройденная огнем, при пожарах за предыдущие дни, а также расстояния от трех действующих пожаров до г. Саров и до экспериментального полигона РФЯЦ.

На рис. 10 (на цв. вклейках) демонстрируется развитие природных пожаров в середине дня 29 июля 2010 г. вблизи Нововоронежской АЭС, выявленное по космическим данным. Анализ рис. 10а показывает, что в 12:09 вблизи г. Воронежа в этот день было три интенсивных очага пожаров. Через 1 ч 49 мин (в 13:58) за счет ураганного южного ветра



Рис. 12. Относительное количество пожаров за месяц (в процентах) с марта по октябрь 2010 г. в Европейской части РФ (данные ГУ “Аэрокосмос”).

пожары усилились, и их количество значительно возросло. Эти природные пожары развивались в буферных зонах магистральных ЛЭП, вблизи Нововоронежской АЭС, а также вблизи городов Воронеж и Липецк и нанесли ущерб многим населенным пунктам этого региона.

ОБОБЩЕНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Как уже отмечалось, основные особенности лета 2010 г. заключались в экстремальных погодных условиях, сложившихся в Европейской части России из-за сильнейшей жары и засухи, а также длительных блокирующих антициклонов. На рис. 11 (на цв. вклейках) приведены пространственные распределения полей изменения температуры в июне (а), июле (б), августе (в) и сентябре (г) 2010 г. по сравнению со средними температурами этих месяцев в 2002–2009 гг., построенные по данным прибора AIRS спутника Aqua (<http://mirador.gsfc.nasa.gov>). Красным цветом на этом рисунке показано превышение, а синим цветом — понижение средних температур за эти месяцы в 2010 г. по сравнению со средними значениями для этих месяцев в 2002–2009 гг. Из рис. 11 видно, что летом 2010 г. (особенно в июле) в Европейской части России была сформирована тепловая аномалия с превышением средней температуры аналогичных месяцев за 2002–2009 гг. на 5–9°C. Аналогичная тепловая аномалия была и в августе 2010 г.

На основании результатов обработки данных космического мониторинга, проводимого ГУ “Аэрокосмос” (www.aegocosmos.info), установлено, что общее количество пожаров с марта по ноябрь 2010 г. на всей территории России превысило 33 тыс., а в Европейской части России ~13.6 тыс. В то время как, например, в 2009 г. эти числа составили ~25 тыс. и ~8.5 тыс. соответственно. На рис. 12

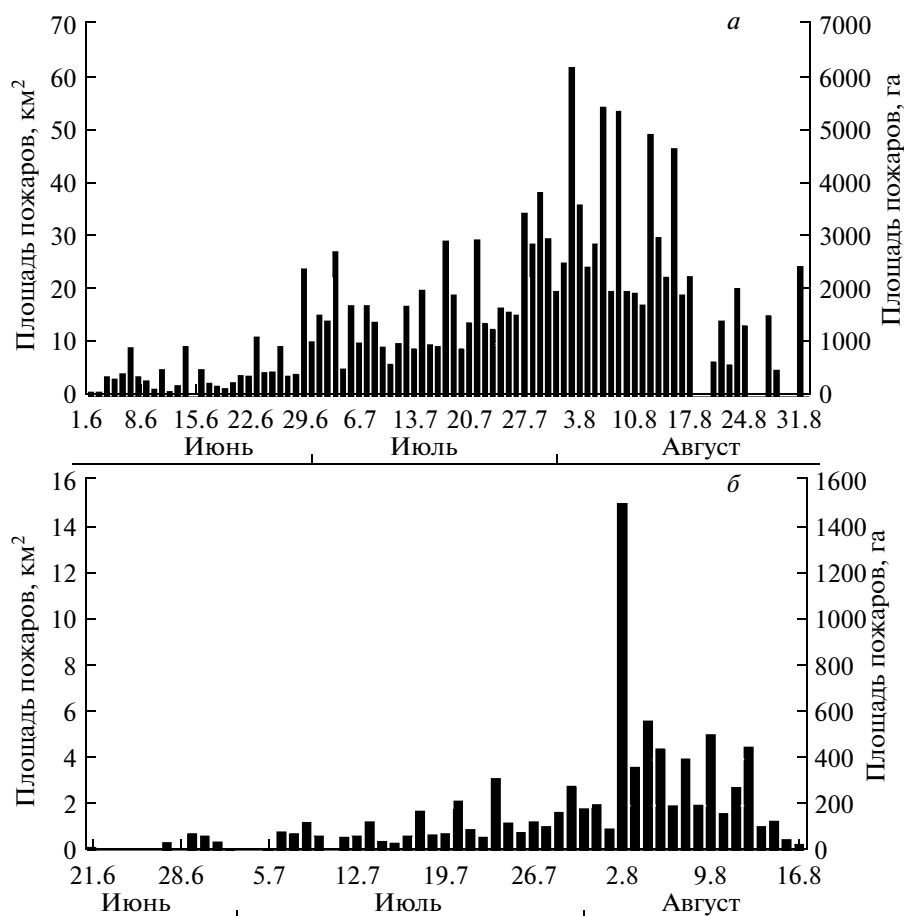


Рис. 13. Площади, ежедневно пройденные огнем с июня по август 2010 г. на территории Европейской части РФ (а) и на территории Московской области (б) (данные ГУ “Аэрокосмос”).

приведена гистограмма с распределением относительного количества пожаров по месяцам в Европейской части России за период с начала марта по конец ноября 2010 г., построенного по космическим данным ГУ “Аэрокосмос”. Анализ этой гистограммы показывает, что максимальное количество пожаров в Европейской части России было зафиксировано в наиболее жаркие месяцы – июль и август 2010 г.

Для предварительного определения площадей, пройденных огнем, использовались данные, полученные путем обработки серий обзорных космических изображений (спутники Terra, Aqua, NOAA), сформированные при мониторинге за период протекания каждого пожара. Затем эти данные уточнялись с использованием космических изображений среднего разрешения (30...50 м), полученных с борта спутников Landsat и “Метеор-М”, а также высокого разрешения (~6 м), полученных с борта спутника RapidEye. По результатам сопоставленных данных, полученных при обработке космических изображений низкого (250...1000 м), среднего (30...50 м) и высокого (6 м) разрешения, определя-

лись поправочные коэффициенты, которые использовались для оперативного определения площадей, пройденных огнем.

На рис. 13 приведены площади, ежедневно пройденные огнем в летние месяцы 2010 г. на территории Европейской части России (а) и в Московской области (б), полученные с использованием данных космической обзорной аппаратуры MODIS и AVHRR (спутники Terra, Aqua, NOAA) и их валидации по данным тематического картографа спутника Landsat (разрешение 30 м) и аппаратуры спутников Rapid Eye (разрешение ~6 м).

Для Европейской части России общая площадь, пройденная огнем, с марта по ноябрь 2010 г. составила 2.2 млн. га, а для всей территории России – ~10.9 млн. га, что практически совпадает с данными Глобального центра мониторинга пожаров г. Фрайбург, Германия и Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН (~10.8 млн. га) (<http://www.fire.uni-freiburg.de/current/globalfire.htm>).

Самое большое количество очагов природных пожаров было зафиксировано из космоса 29 июля

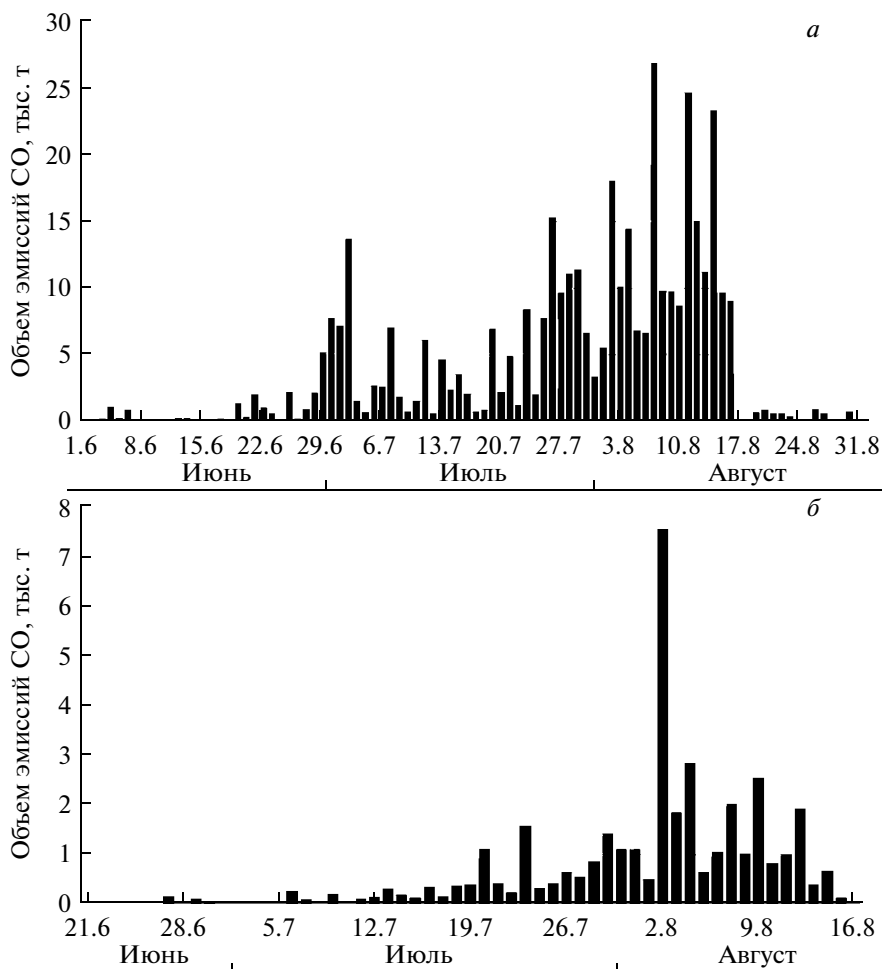


Рис. 14. Результаты оценок по космическим данным эмиссий угарного газа (CO) с 1 июня по 31 августа 2010 г. на территории Европейской части России (а) и Московской области (б).

2010 г. (см. рис. 4, 5). Наибольшие площади, пройденные огнем в Европейской части России, были зафиксированы 1–15 августа 2010 г., а в Московской области – 2–5 августа 2010 г. (см. рис. 13).

Анализ данных, полученных по результатам космического мониторинга, показывает, что в 2010 г. в Европейской части России общее число пожаров и общая площадь, пройденная огнем, были намного больше, чем в 2009 г. В 2010 г. в этом регионе страны значительно возросло, по сравнению с 2009 г., количество крупных пожаров (с площадью > 500 га), причем наиболее сильно (в десятки раз) их доля выросла в Рязанской и Владимирской областях. Отличительной особенностью лета 2010 г. явилось также большее число наиболее опасных верховых пожаров.

Как уже отмечалось выше, природные пожары приводят к интенсивным эмиссиям различных газовых компонент и мелкодисперсных частиц в атмосферу. Для оценки эмиссий продуктов горения применяется ряд методов (Вивчар и др., 2010; Seiler,

Crutzen, 1980; Wiedinmyer et al., 2006). При определении эмиссий углерода от природных пожаров все они учитывают площади, пройденные огнем, плотность пространственного распределения биомассы и содержания углерода в ней, а также полноту сгорания. Кроме этого учитываются также эмиссионные коэффициенты, характеризующие отношение величины эмиссий к количеству сгоревшей биомассы. Плотность биомассы зависит от типа растительности (Hoelzemann et al., 2004). Для оценок объемов эмиссий CO использовалась эмиссионная модель из работы (Seiler, Crutzen, 1980)

$$E = A \times B \times C \times D,$$

где E – общая масса вещества, выбрасываемого в атмосферу, в т; A – площадь, пройденная огнем, в м²; B – плотность биомассы в кг/м²; C – доля сгоревшей биомассы в процентах; D – масса вещества, выбрасываемого в атмосферу при сгорании 1 кг биомассы (в г/кг).

Площади, пройденные огнем, определялись по космическим данным, как описывалось выше. Коэффициенты B , C и D определялись для каждого типа экосистемы с использованием карт растительности и землепользования (Вивчар и др., 2010; Seiler, Crutzen, 1980; Wiedinmyer et al., 2006).

На рис. 14 в качестве примера приведены результаты оценок ежедневных эмиссий CO в летние месяцы 2010 г. на территории Европейской части России (а) и на территории Московской области (б), полученных по описанной методике на основе космических данных.

В результате природных пожаров 2010 г. происходило сильное задымление населенных пунктов, городов, в том числе Московского мегаполиса. Наиболее сильное воздействие задымления от ближайших к Москве и удаленных пожаров, выявленное по космическим и наземным данным, происходило 6–9 августа 2010 г., когда был очень слабый ветер, а 7 и 8 августа 2010 г. полный штиль.

В эти дни, по данным наземных станций Мосэкомониторинга, значения концентраций токсических соединений существенно превосходили не только суточные, но и разовые предельно допустимые концентрации. Например, концентрация углекислого газа (CO₂) в условиях блокирующего антициклона в Москве превышала 1000 мг/м³, CO ~ 20 мг/м³, озона (O₃) ~ 320 мкг/м³, метана (CH₄) ~ 3 мг/м³. Наиболее сильные загрязнения были выявлены по аэрозолям.

На рис. 15 (на цв. вклейках) приведено пространственное распределение концентрации CO для 15 августа 2010 г. на высотах от 2 до 10 км над территорией Восточной и Центральной Европы, построенное по данным, полученным с помощью инфракрасной аппаратуры AIRS спутника Aqua (http://airs.jpl.nasa.gov/maps/satellite_feed/). Из этого рисунка видно, что наиболее сильные эмиссии CO происходили над Европейской частью России, где в это время бушевали природные пожары, а с учетом переноса воздушных масс на данных высотах облако угарного газа распространилось на значительную часть Восточной Европы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ результатов космического мониторинга природных пожаров, происходивших в аномально засушливое и жаркое лето 2010 г. на территории Российской Федерации, продемонстрировал высокую эффективность космических методов и средств для борьбы с этими опасными природными явлениями. Космические системы мониторинга обеспечивают высокую оперативность обнаружения и предоставления информации об источниках возгорания, а также их последствиях, объективность и достоверность получаемых данных.

На основании проведенного анализа космической информации показано, что в условиях сильной жары летом 2010 г. (среднемесячная температура в летние месяцы превышала на 5–9°C аналогичные температуры за последние восемь лет) и сформировавшегося блокирующего антициклона над Европейской частью территории России происходили сильнейшие природные пожары. Общая площадь, пройденная огнем с марта по ноябрь 2010 г., составила для всей территории России ~10.9 млн. га, а для Европейской части ~2.2 млн. га. При этом количество крупных пожаров (с площадью >500 га) значительно превышало число таких пожаров в предыдущие годы. В Рязанской и Владимирской областях это превышение достигло десятков. Рассчитанные по космическим данным объемы эмиссии угарного газа от природных пожаров в Европейской части России достигали 15–27 тыс. т/день, а в Московской области 3–7.5 тыс. т (7–14 августа 2010 г.).

Из-за сильного задымления Московского мегаполиса 6–9 августа 2010 г. значение концентрации токсических соединений существенно превышало не только суточные, но и разовые нормы ПДК.

Перспективы развития космических систем для оперативного мониторинга природных пожаров связаны с более широким использованием космической информации с различных существующих и перспективных космических аппаратов, оборудованных различными приборами, в том числе радиолокаторами, СВЧ-радиометрами и др., развитием методов и технологий мониторинга и обработки космических и других данных, для получения большего количества информационных продуктов, повышения их достоверности, точности и оперативности с целью своевременного обнаружения, а также принятия своевременных мер по ликвидации и снижению ущерба от последствий этих природных катастроф. Для повышения эффективности борьбы с природными пожарами различным федеральным и региональным органам исполнительной власти, а также заинтересованным компаниям и организациям необходимо значительно более широко, чем в настоящее время, использовать результаты космического мониторинга, прежде всего, оперативного.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондур В.Г. Принципы построения космической системы мониторинга Земли в экологических и природно-ресурсных целях // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1995. № 2. С. 14–38.
- Бондур В.Г. Актуальность и необходимость космического мониторинга природных пожаров в России // Вестн. ОНЗ РАН. Т. 2. NZ11001. 2010.
- Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. М.: Научный мир, 2009. 692 с.
- Вивчар А.В., Моисеенко К.Б., Панкратова Н.В. Оценки эмиссий оксида углерода от природных пожаров в Се-

верной Евразии в приложении к задачам регионального атмосферного переноса и климата // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 3. С. 1–11.

Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.Н. Лесные пожары на территории России: состояние и проблемы. М.: ДЭКС-ПРЕСС, 2004. 312 с.

Исаев А.С., Коровин Г.Н., Сухих В.И. Экологические проблемы поглощения углекислого газа посредством лесовосстановления и лесоразведения в России: Аналитический обзор. М.: Центр экологической политики России, 1995. 155 с.

Савин А.И., Бондур В.Г. Научные основы создания и диверсификации глобальных аэрокосмических систем // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13. № 1. С. 46–62.

Щетинский В.Е., Котельников Р.В., Сементин В.Л., Лупян Е.А., Флитман Е.В., Щербенко Е.В., Галлеев А.А., Ефремов В.Ю., Толпин В.А., Мазаров А.А., Крашенинникова Ю.С., Еришов Д.В. Применение информационной системы дистанционного мониторинга “ИСДМ Рослесхоз” для определения пожарной опасности в лесах Рос-

сийской Федерации (Изд. второе) // ФГУ “Авиалесоохрана” г. Пушкино (МО), 2008. 87 с.

Hansen M., DeFries R., Townshead J.R.G. et al. Global land cover classification at 1 km resolution using a classification tree approach // Int. J. Rem. Sens. 2000. V. 21. № 6–7. P. 1331–1364.

Hoelzemann J.J., Schultz M.G., Brasseur G.P. et al. Global Wildland Fire Emission Model (GWEM): Evaluating the use of global area burnt satellite data // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. № D14SO4. doi: 10.1029/2003JD003666.

Roy D.P., Boschetti L., Justice C.O. et al. The collection 5 MODIS burned area product – Global evaluation by comparison with the MODIS active fire product // Rem. Sens. Environ. 2008. V. 112. № 9. P. 3690–3707.

Seiler W., Crutzen P.J. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and atmosphere from bio-mass burning // Clim. Change. 1980. V. 2. P. 207–247.

Wiedinmyer C., Quayle B., Geron C. et al. Estimating emissions from fires in North America for air quality modeling // Atmos. Environ. 2006. V. 40. № 19. P. 3419–3432.

Satellite Monitoring of Wildfires in Russia Due to Anomalous Heat in 2010

V. G. Bondur

“Aerocosmos” Scientific Center for Aerospace Monitoring under the Ministry of Education and Sciences of the Russian Federation and the Russian Academy of Sciences, Moscow

There have been described the features of extreme conditions prevailing in the summer of 2010 in the European part of the Russian Federation when heavy wildfires occurred due to anomalous heat (average summer temperatures 2010 exceeded those in 2002–2009 by 5°–9°C) and long-term blocking anticyclones. Wildfire origins and aftermath have been analyzed here. The features of the Aerocosmos’ satellite system for online fire monitoring have been given, as well as the examples of its use in summer of 2010. Based on the low (250–1000 m), mid (~30–50 m), and high (~6 m) resolution satellite image processing results it was determined that total areas burned from March till November 2010 for the whole territory of the country were ~10.9 mln. ha, and for its European part were ~2.2 mln. ha. Histograms for the areas burned daily in summer months of 2010 have been created. Using these data and empirical models, daily emissions of carbon monoxide (CO) due to wildfires in summer 2010 have been evaluated for the European part of Russia and for Moscow region. In some days in August 2010 these emissions achieved 15–27 thousand tons for the European part of Russia and 3–7.5 thousand tons for Moscow region. Based on AIRS (AQUA satellite) spectrometer data, the spatial distribution of CO concentration at 2 to 10 km altitudes over Eastern and Central Europe has been created. It has been shown that the heaviest cover of smoke over Moscow due to wildfires was in August 6–9, 2010, when concentrations of hazardous gases (CO₂, CO, CH₄, O₃) and aerosols in the air significantly exceeded not only daily but single maximum allowable values.

Keywords: satellite monitoring of wildfires, anomalous heat, European part of Russia

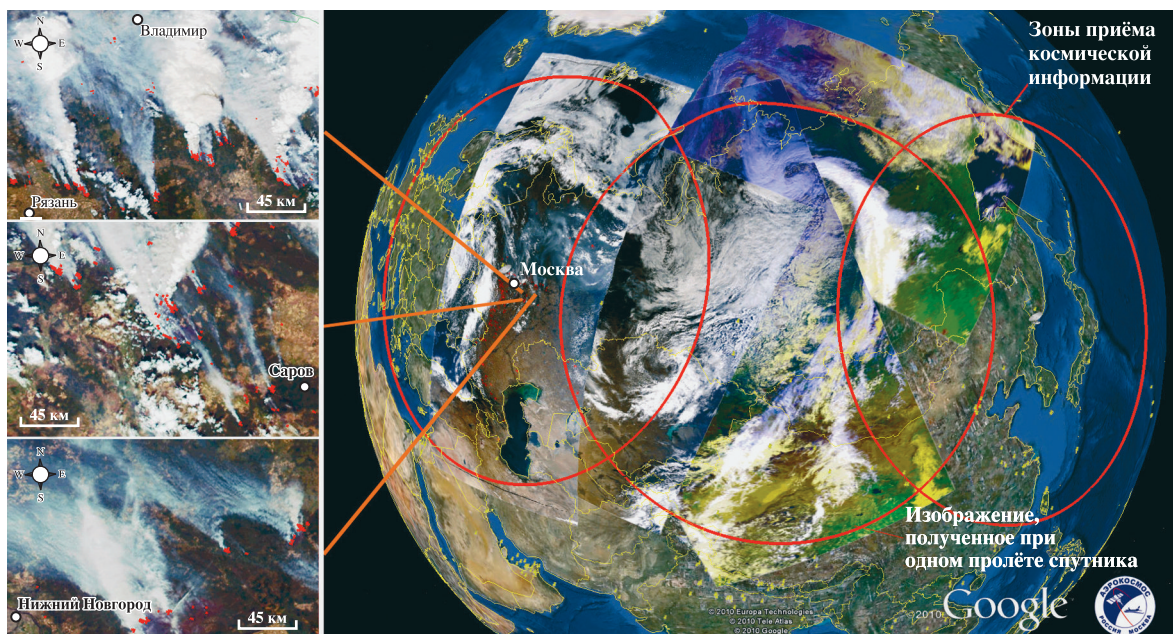


Рис. 4. «Мозаика» обзорных космических изображений, сформированная для 29 июля 2010 г. и увеличенные фрагменты с дымовыми шлейфами и выделенными очагами природных пожаров в Центральном Федеральном округе России.

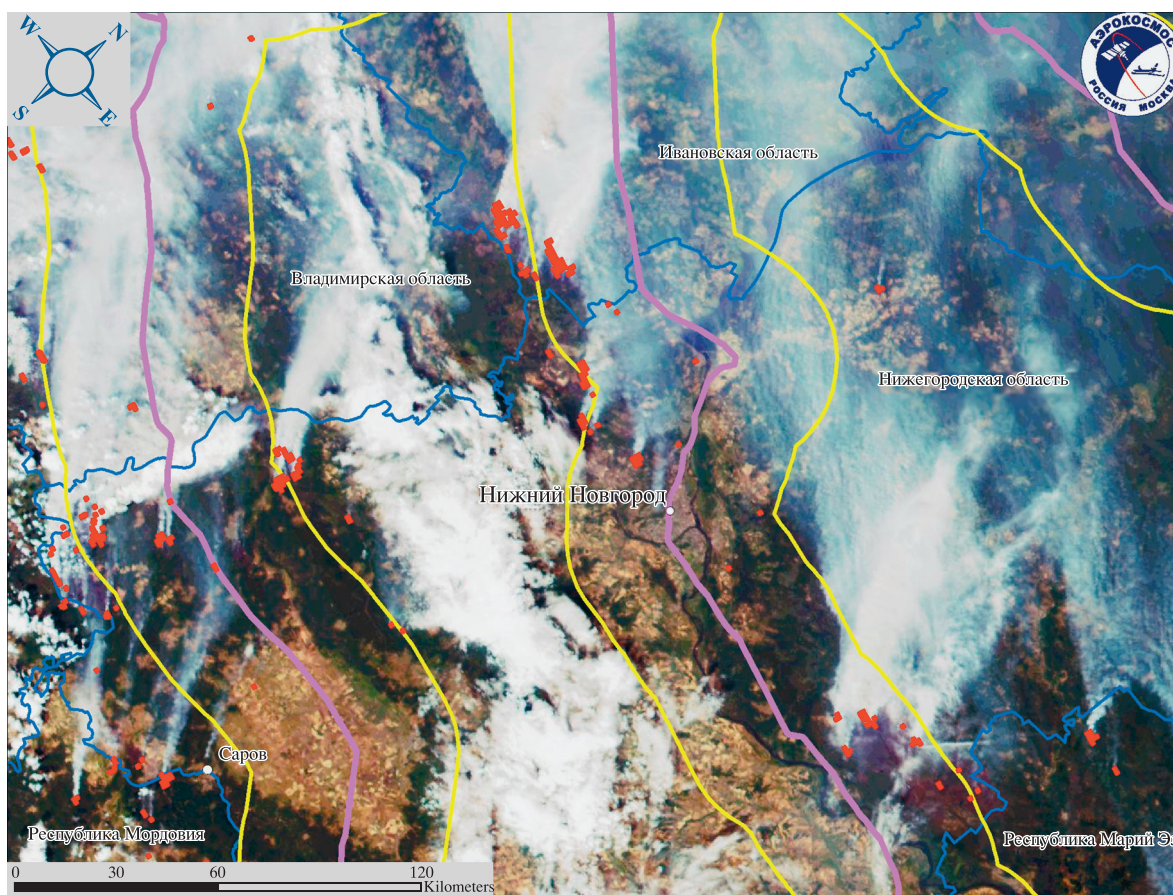


Рис. 5. Обнаружение из космоса пожаров в центре Европейской части России 29 июля 2010 г. (12:09): сиреневый – ЛЭП; желтый – буферные зоны ЛЭП.



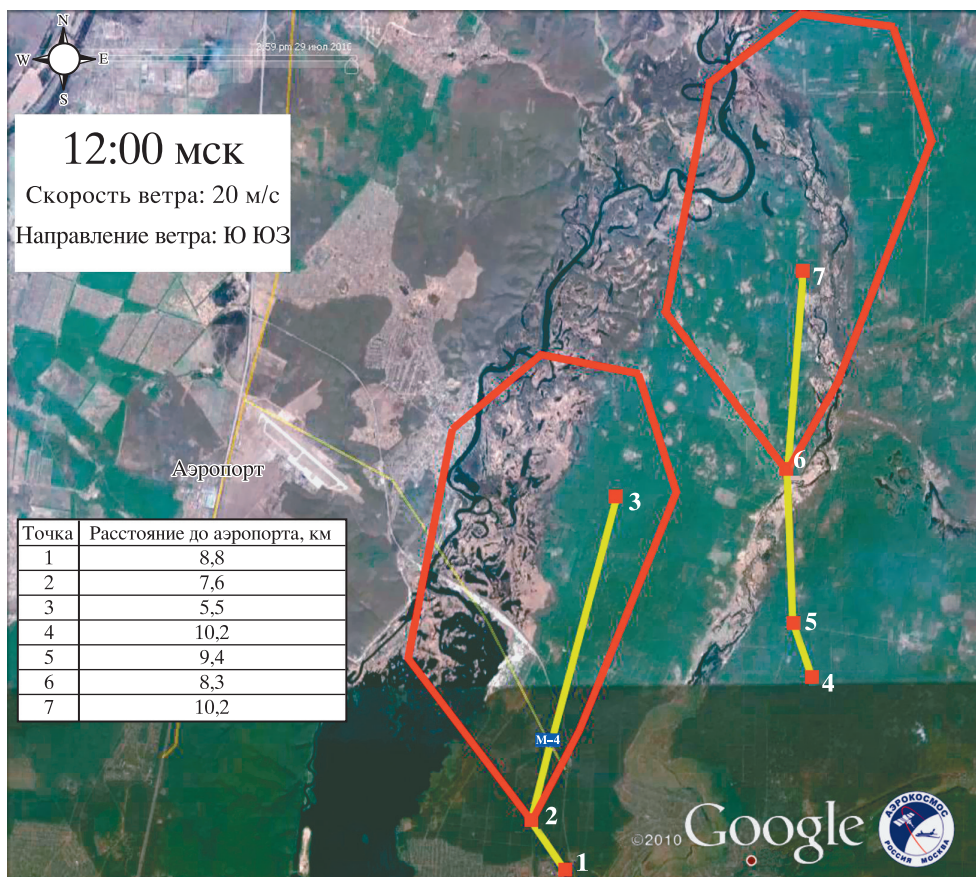


Рис. 6. Прогнозирование распространения пожаров в зависимости от метеоусловий с определением расстояний до аэропорта.

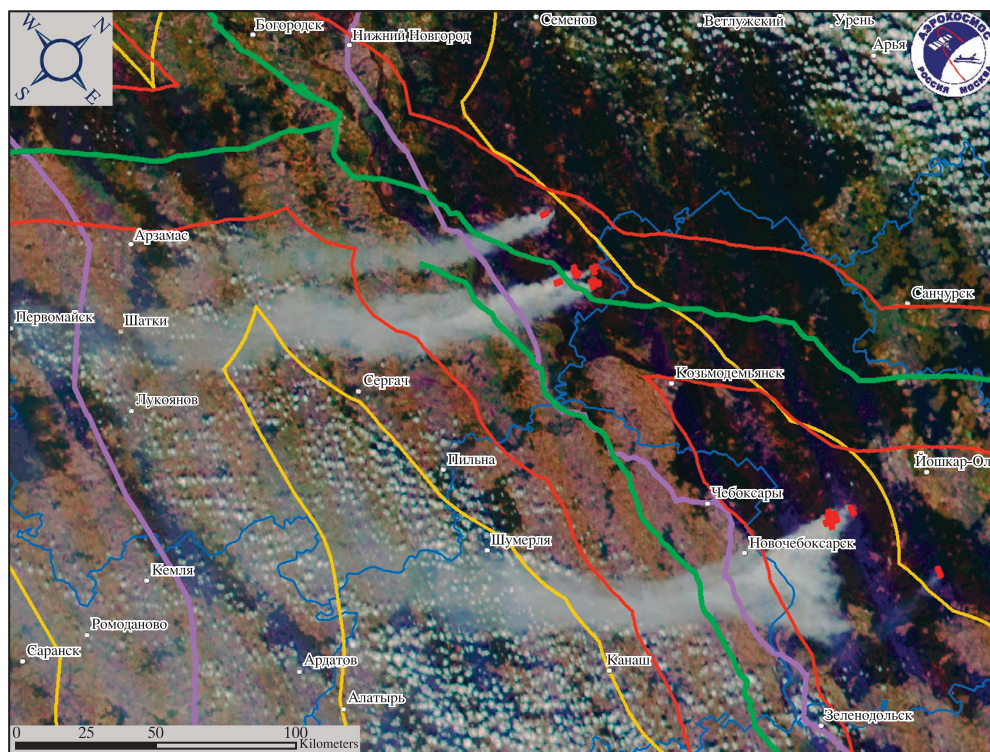


Рис. 7. Пожары, обнаруженные из космоса в Нижегородской области и Республике Марий Эл 30 июня 2010 г. (12:39) в районе магистральных ЛЭП и магистральных нефтепроводов: сиреневый – магистральные ЛЭП; желтый – буферные зоны ЛЭП; зеленый – магистральные нефтепроводы; оранжевый – буферные зоны нефтепроводов.



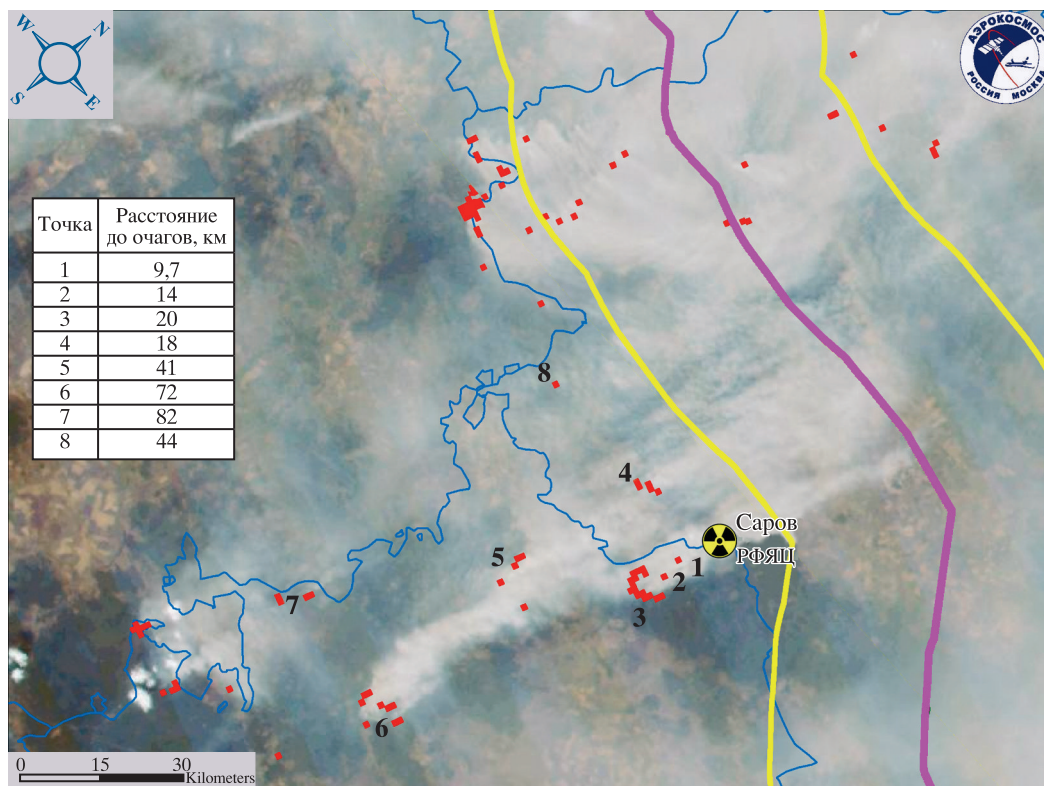


Рис. 8. Пожары, обнаруженные из космоса, в районе Российского Федерального ядерного центра (г. Саров) 3 августа 2010 г. (12:27); сиреневый – ЛЭП; желтый – буферная зона ЛЭП.

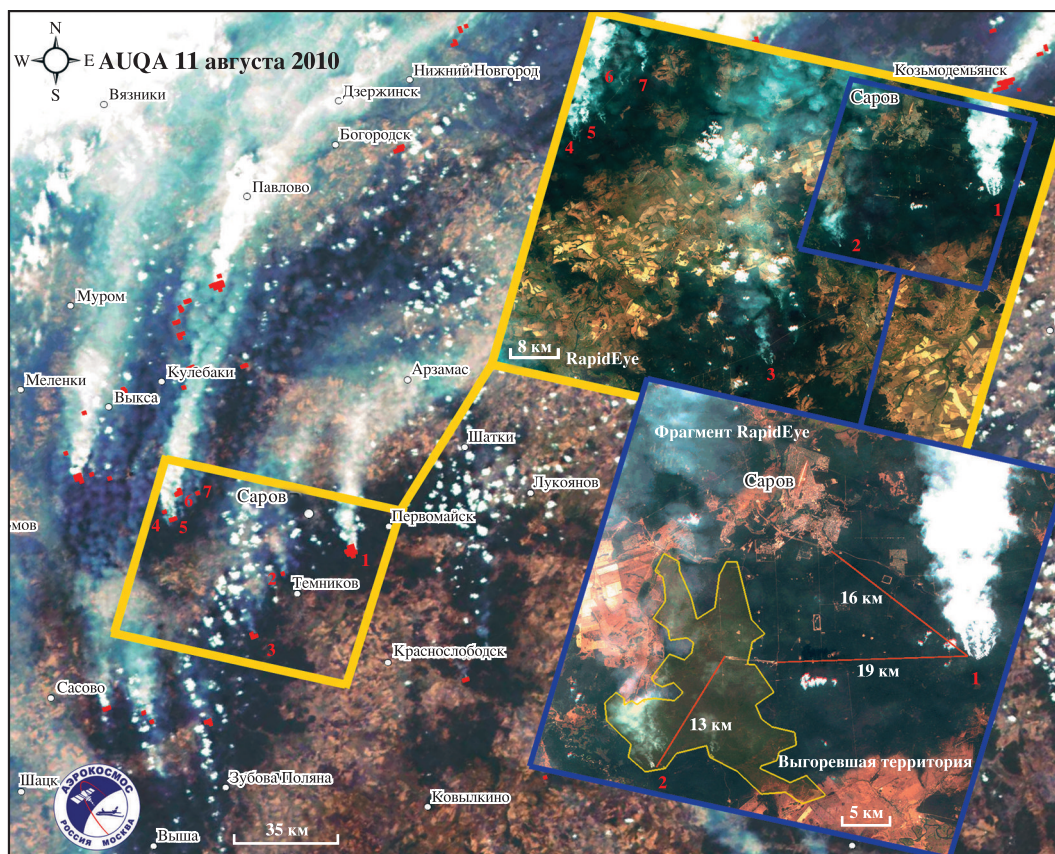


Рис. 9. Мониторинг очагов пожаров и выявление выгоревших территорий вблизи г. Саров (11 августа 2010 г.) по космическим изображениям, полученным со спутников Aqua (аппаратура MODIS) и RapidEye (пространственное разрешение 6.5 м).

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА № 3 2011 (Вклейка к ст. Бондура В.Г.)

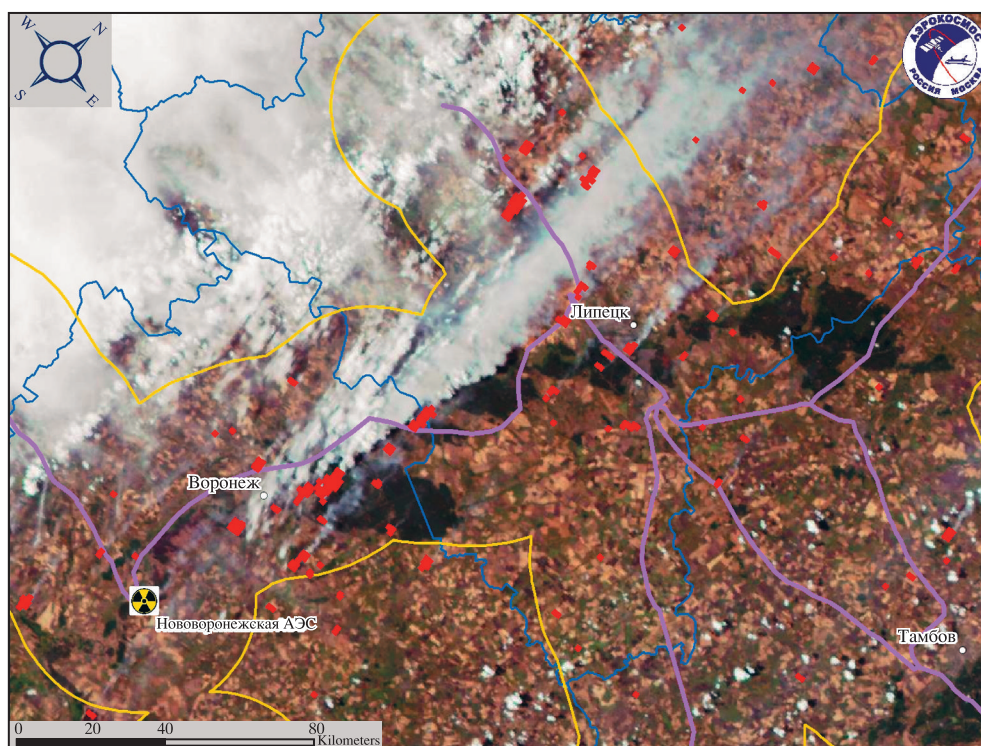
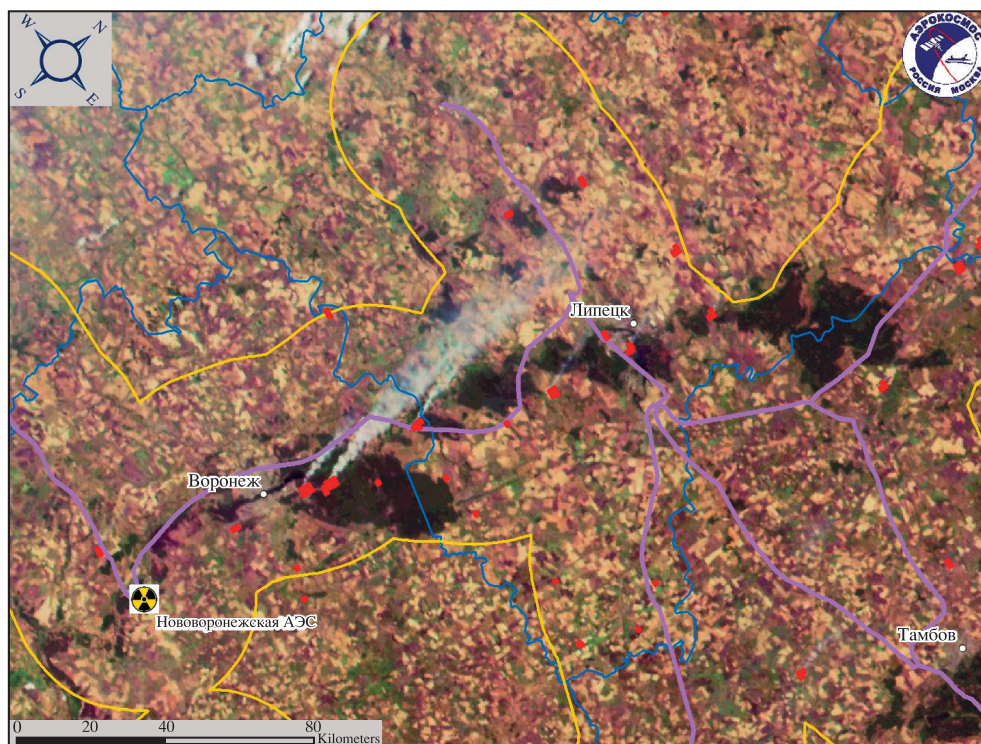


Рис. 10. Динамика развития природных пожаров 29 июля 2010 г. вблизи Нововоронежской АЭС, выявленных по космическим данным, полученным в 12:00 (а) и в 13:58 (б).



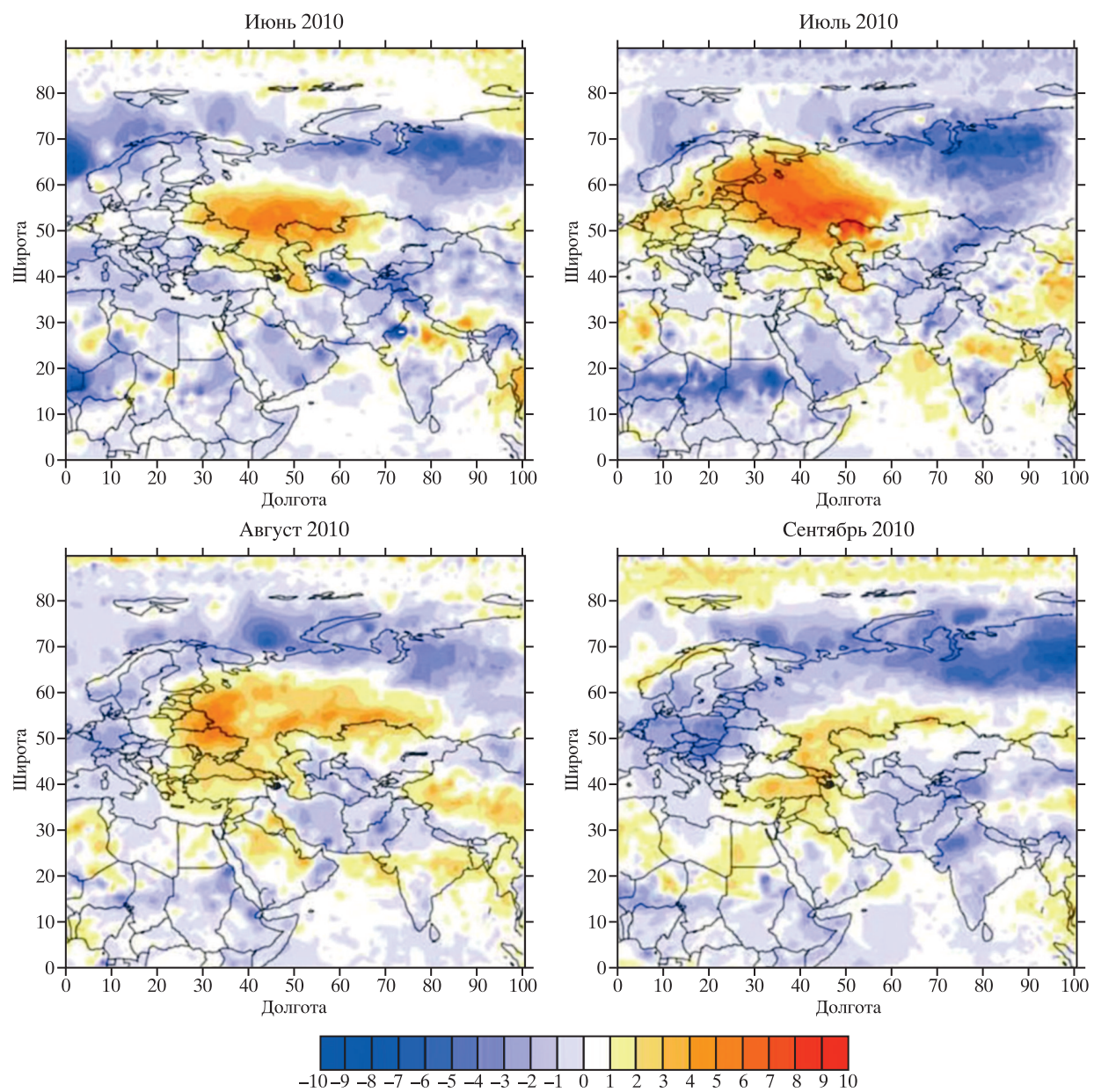


Рис. 11. Тепловые аномалии, сформировавшиеся с июня по сентябрь 2010 г. в Европейской части России по данным аппаратуры AIRS, спутник Aqua (<http://mirador.gsfc.nasa.gov>).



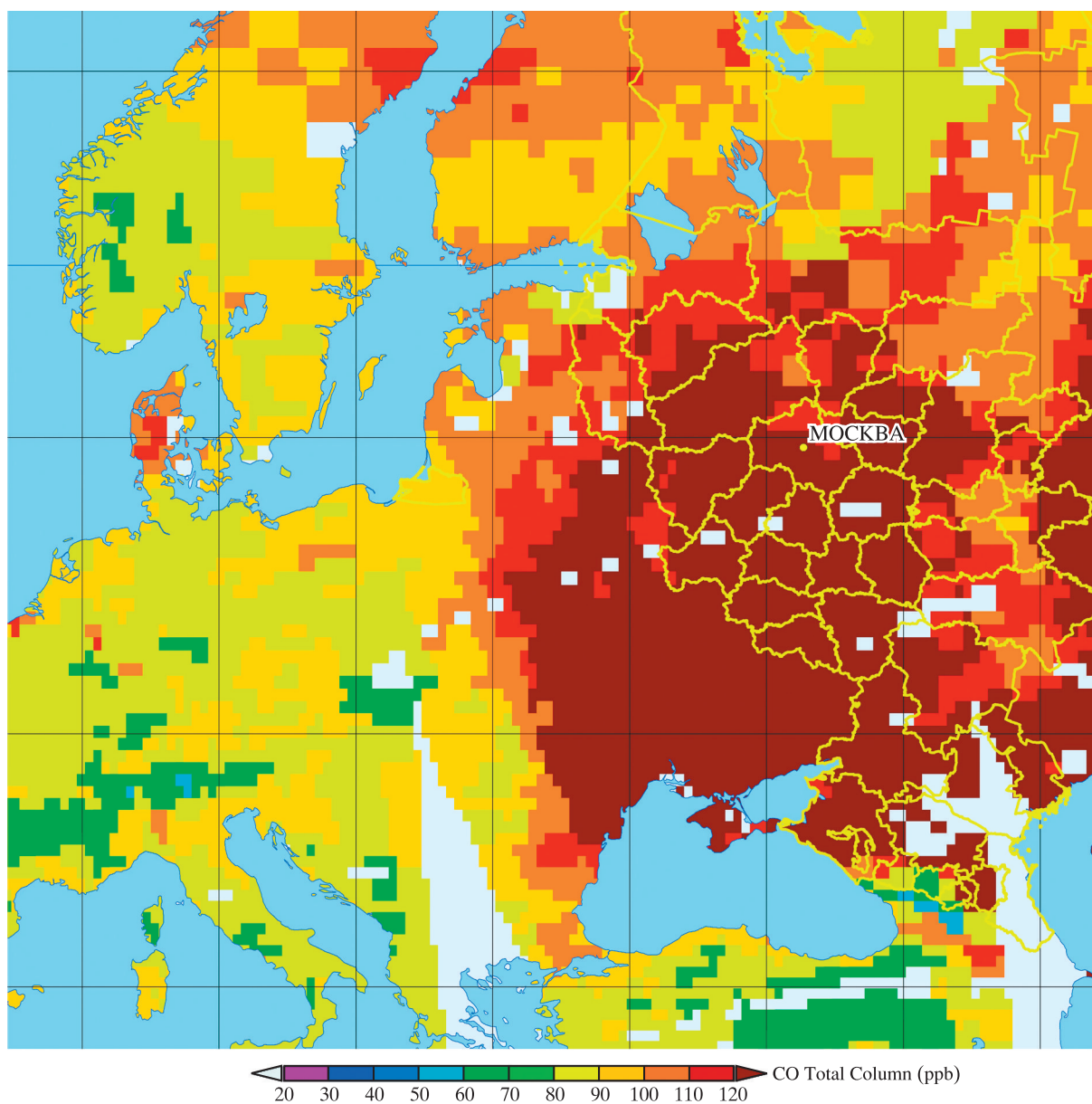


Рис. 15. Распределение концентрации CO на высотах от 2 до 10 км для 15 августа 2010 г. над Восточной и Центральной Европой, построенное по данным спутника Aqua (аппаратура AIRS) (http://airs.jpl.nasa.gov/maps/satellite_feed/).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

РОЛЬ КОСМИЧЕСКИХ И ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ГЛОБАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЯХ И КОРРОЗИИ ТРУБОПРОВОДОВ

© 2011 г. С. В. Авакян*, Н. А. Воронин

Всероссийский научный центр “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

**E-mail: avak2@mail.ru, avak@soi.spb.ru*

Поступила в редакцию 31.03.2010 г.

Проведено исследование физических причин, определяющих влияние основных космических факторов на состояние ионосферы и, далее, на погодно-климатические явления, включая глобальное потепление. В основе этих исследований — предложенное авторами ридберговское возбуждение энергичными ионосферными электронами наблюдаемого экспериментально микроволнового излучения земной ионосферы, которое практически свободно проникает в нижнюю атмосферу, обеспечивая каналы влияния солнечной вариабельности на земные явления. Анализируются также причины аномальной изношенности российских трубопроводных систем, описаны пути уменьшения их быстрой коррозии благодаря учету влияния гелиогеомагнитных и ионосферных возмущений. В обеспечение этих исследований предложен космический эксперимент по перманентному мониторингу определяющих факторов гелиогеомагнитной активности: потоков ионизирующего излучения Солнца и потоков электронов, высыпающихся из радиационных поясов.

Ключевые слова: микроволновое излучение ионосферы, ридберговское возбуждение, погодно-климатические явления, гелиогеомагнитная активность, коррозия газонефтепроводов

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее актуальной проблемой современной науки является понимание основных причин глобальных изменений в окружающей среде обитания (Кондратьев и др., 2003). Это диктуется угрозами, связываемыми с продолжающимся уже несколько десятилетий глобальным потеплением. Согласно Всемирной программе климатических исследований на 2005–2015 гг. (Detemmerman, 2005), около 90% всех земных катастроф за 10 лет (до 2005 г.) явились результатом погодных и климатических рисков. Пока превалировала та официальная точка зрения, что основной причиной повышения температуры приземного воздуха на земном шаре является увеличение концентрации антропогенных газов, прежде всего двуокиси углерода (углекислого газа CO_2) и метана CH_4 . Действительно, уже с начала XX в. содержание CO_2 в атмосфере растет, превысив исходный уровень более, чем в 1.4 раза, и скорость этого возрастания в последнее время усиливается. Именно это дало основание для международных усилий по принятию Киотского протокола о сокращении промышленных антропогенных выбросов. Однако научное обоснование Киотского протокола подвергается сомнению, в частности, из-за неопределенности аэрозольного вклада в образование облачного покрова (Кондратьев, Ивлев, 2008). В работе (Кондратьев и др., 2003) подчеркивается, что изменение солнечной радиации в качестве клима-

тообразующего фактора требует отдельного внимания, хотя возможные усиливающие механизмы влияния солнечной активности на климат пока все еще далеки от понимания. В то же время о связи гелиогеофизических факторов с погодно-климатическими явлениями, включая даже такие опасные, как ураганы, имеется все больше экспериментальных доказательств (Иванов, 2006; Бондур и др., 2008а, б). При этом для целей нашей работы важно, что в качестве основной причины погодных изменений в нижней атмосфере учитывается конденсационный механизм (Бондур и др., 2008а), в том числе при важном вкладе в этот процесс микроволнового излучения (Кондратьев, Никольский, 1995а), вызываемого повышенной активностью Солнца в виде вспышек и радиовсплесков (Крауклис и др., 1990; Авакян, Воронин, 2007).

С другой стороны, главной задачей космических исследований всегда был контроль за вариациями солнечной и геомагнитной активностей. Действительно, именно Солнце как основной источник энергии определяет условия существования самой жизни на Земле, создает радиационный фон в околоземном космическом пространстве, может вызывать естественные и техногенные катаклизмы, существенно усложняющие человеческую деятельность и в земных условиях и, тем более, в космосе. При этом, как известно, наиболее геоэффективным параметром солнечного электромагнитного спектра являются его мягкий рентгеновский (0.1–10 нм)

и крайний ультрафиолетовый (КУФ) (10–125 нм) диапазоны. Именно данные коротковолновые диапазоны спектра Солнца наиболее сильно варьируют по величине плотности потока как в течение 11-летнего цикла, так и в период 27-дневного вращения и, главное, во время солнечных вспышек (Авакян и др., 1994). Важно, что все другие компоненты активности Солнца: солнечные протоны и электроны, солнечный ветер, выбросы корональной массы — существенно меньше по плотности потока энергии. Поэтому столь важно контролировать это коротковолновое солнечное излучение, причем постоянно, учитывая и случайность распределения вспышек во времени, и существование предвестников вспышки в рентгеновском диапазоне за несколько часов и десятки минут, и, наконец, наличие фаз в процессе развития самой вспышки.

Однако, несмотря на полвека космической эры, так и не получено научно обоснованных ответов на вопросы о влиянии “дыхания” Солнца на биосферу, погоду и климат, литосферные эффекты и, наконец, на возможность техногенных катастроф. Это обусловлено в основном отсутствием прогресса в разработке механизмов солнечно-земных связей и недостаточным вниманием к ключевым космическим экспериментам (КЭ) по мониторингу солнечно-геомагнитной активности (Авакян, 2008, 2009). Так, вместо проведения непрерывных абсолютных спектрорадиометрических измерений главного фактора солнечной variability — потока мягкого рентгеновского и КУФ-излучения — до сих пор выполняются фактически суррогатные эксперименты, что заставляет использовать при оценках электромагнитной активности Солнца так называемые заменяющие индексы.

Действительно, основу солнечно-земных связей составляют те факторы солнечно-геомагнитной активности, которые не проникают до земной поверхности и могут регистрироваться только с борта космического аппарата (КА). Это ионизирующее излучение Солнца, различные корпускулы солнечного происхождения и корпускулярные высыпания из радиационных поясов и магнитосферы. Поэтому реальность вклада солнечно-геомагнитной активности на земные явления можно объяснить только, если обнаруживается механизм передачи энергии, поглощенной в ионосфере, вниз — до земной поверхности. В серии наших работ (Авакян, 2008, 1994, 2005; Авакян и др., 1997; Авакян, Воронин, 2006а), на основе ряда экспериментальных фактов, предложен подобный физический — радиооптический трехступенчатый триггерный — механизм, включающий учет возбуждения энергичными ионосферными электронами ридберговских состояний атмосферных газов. В результате в ионосфере генерируется микроволновое излучение, свободно проникающее в тропосферу. Но для построения модели солнечно-земных связей по этому механизму необходимо знание полного спектра солнечного ионизирующего излучения (для определения спектров электронов ионизации), а не отрывочные све-

дения о потоках в отдельных диапазонах или интенсивных линиях.

Совершенно неприемлемыми (Авакян, 2009) представляются предложения рассчитывать потоки солнечного ионизирующего излучения по данным ионосферного наземного радиозондирования. Например, в (Нусинов, 2004) утверждается, что каждая среднеширотная ионосферная станция может теперь служить как устройство для измерения потоков КУФ-излучения Солнца, при этом точность предсказания солнечных потоков ~7%. Напомним лишь (Avakyan et al., 2002; Avakyan, 2006a), что лучшие спутниковые измерения сейчас ведутся с точностью не более 10%, а теоретические модели дают ошибку не менее, чем в 1.4–2.5 раза в определении критической частоты E -слоя (на основе обычно используемого метода эффективного сечения — т.е. без учета реального спектра фото- и Оже-электронов) (Авакян, 2008). Такие предложения лишь подтверждают назревшую необходимость решить вопрос об осуществлении постоянного (включая периоды солнечных вспышек) мониторинга потока ионизирующего излучения от всего диска Солнца. Ни один из существующих КЭ, включая самый информативный из них — на КА TIMED (Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics), не дает таких перманентных данных. На КА TIMED в настоящее время идут спектроскопические измерения абсолютных потоков во всей области спектра от 0.1 до 200 нм, но только 4% текущего времени (Woods et al., 2005). Следовательно, этот эксперимент не предназначен для мониторинга потока излучения в периоды вспышек на Солнце, что и постулируется самими авторами (Woods et al., 2005). В модельных представлениях “справочного спектра Солнца” также пока нет возможности интерполировать спектр с достаточной достоверностью, поскольку реальные измерения дают результаты с точностью до множителя 2 (Avakyan, 2006a). Без полных же спектральных распределений ионизирующих потоков (во всем диапазоне от 0.1 до 134 нм) невозможно построение ни ионосферных, ни оптических моделей, поскольку основным энергетическим фактором возмущения ионосферы, во всяком случае в периоды солнечных вспышек, являются энергичные ионосферные электроны. Такие же электроны, вторичные от ионизации верхней атмосферы при корпускулярных высыпаниях в периоды геомагнитных бурь и суббурь, участвуют как сильный дополнительный фактор ионообразования и оптического возбуждения (полярных сияний).

В то же время уже несколько лет назад в Государственном оптическом институте им. С.И. Вавилова (ГОИ) создана оптико-электронная аппаратура — “Космический Солнечный Патруль” (КСП). Важно, что попутно получаемой информацией от радиометров КСП (части комплекта, предназначенного для измерения фона) является постоянная регистрация практически отсутствующих до настоящего времени данных о потоках кэВ-электронов, высыпающихся в периоды геомагнитных бурь (Авакян и др., 2008).

Следовательно, КЭ с аппаратурой КСП позволяет решить проблемы инструментального контроля основных параметров как солнечных вспышек, так и геомагнитных бурь, способных влиять на погодноклиматические характеристики, включая глобальное потепление, а, возможно, и на биосферу, включая человека. В совокупности с разрабатываемыми моделями воздействия солнечно-геомагнитной активности на окружающую среду, окажется возможным прогнозирование этих космофизических проявлений в земных явлениях (Avakyan, 2009; Avakyan et al., 2009, 2010).

Цель данной работы – исследование физического механизма влияния солнечно-геомагнитной активности на погодноклиматические изменения и оценка вклада такой активности в аномально быструю коррозию металла труб трубопроводов.

КОСМОС И ПОГОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

Влияние космических факторов на погодноклиматические характеристики рассматривалось в различных работах (Кондратьев, Никольский, 1995а, б; Benestad, 2002). Однако обычно исследуется вклад только одного регулирующего фактора – космических лучей галактического и солнечного происхождения, хотя имеется много информации о фактах воздействия в проблеме “Солнце – погода, климат” потоков коротковолнового излучения солнечных вспышек и корпускулярных высыпаний при геомагнитных бурях. Причина такого внимания именно к космическим лучам связана с их проникновением до самых нижних слоев атмосферы. Происходящая при этом ионизация атмосферных газов запускает конденсационный механизм, занимающий, по (Кондратьев, Никольский, 1995а; Крауклис и др., 1990), ведущее положение в солнечно-погодных явлениях.

В то же время как коротковолновое ионизирующее излучение вспышек на Солнце, так и высыпание при магнитных бурях корпускулы (электроны, а в меньшей степени протоны из радиационных поясов и геомагнитосферы) полностью поглощаются в ионосфере Земли на высотах >60 км. Поэтому необходимо рассматривать какой-то механизм передачи воздействия коротковолнового и корпускулярного излучений на ионосферу вниз в тропосферу. Такой радиооптический трехступенчатый триггерный механизм солнечно-земных связей предложен в наших работах, в том числе в приложении к солнечно-погодным явлениям (Авакян, Воронин, 2007, 2006а; Авакян, 2008). Он основан на экспериментальных фактах о возможном воздействии микроволнового излучения на конденсационный механизм (Кондратьев, Никольский, 1995а; Крауклис и др., 1990).

При этом нами как раз и рассматривается физический механизм влияния на глобальные изменения главных факторов гелиогеофизической активности,

являющихся основными как по абсолютному уровню энергетического потока, так и по динамическому диапазону изменчивости с возрастанием солнечно-геомагнитной активности – коротковолновое (крайнее УФ и рентгеновское) излучение Солнца и магнитосферные высыпания электронов в период геомагнитных бурь. Эти факторы являются определяющими в характеристиках физической величины уровня соответственно солнечной и геомагнитной активности, но характеризующие их энергетические потоки не доходят даже до стратосферы. Поэтому нами предложен новый канал влияния на погодноклиматические характеристики как солнечных вспышек, так и геомагнитных бурь – через эмиссионное микроволновое (ридберговское) излучение верхней атмосферы и ионосферы (Авакян, Воронин, 2007, 2006а, б, в, 2010; Avakyan, Voronin, 2006), которое генерируется при возбуждении высоколежащих состояний атомов и молекул атмосферных газов ударом энергичных ионосферных электронов – фотоэлектронов, вторичных электронов и электронов Оже (Авакян, 2008, 1994). Показано, что величиной потока ионосферного микроволнового излучения контролируются скорости реакций образования (ассоциации) и разрушения (диссоциации) кластерных ионов, образующихся в нижней атмосфере на высотах действия галактических космических лучей (ГКЛ) (а также солнечных космических лучей (СКЛ)) из паров воды, и, возможно, из углекислого газа. Учитывалось, что в работах (Кондратьев, Никольский, 1995а, б; Крауклис и др., 1990) при наблюдении вариаций оптической прозрачности атмосферы и ряда погодных характеристик на высокогорной обсерватории была обнаружена их связь со всплесками микроволнового излучения Солнца. При этом определено, что в результате этих воздействий образуются водные кластеры, благодаря чему появляются и углубляются кластерные полосы поглощения в ближней УФ-области длин волн и уменьшается спектральная оптическая толщина атмосферы в видимой и ИК-области.

С другой стороны, в работе (Троицкий и др., 1973) были зарегистрированы спорадические возрастания интенсивности микроволнового излучения ионосферы в периоды солнечных вспышек и полярных сияний (геомагнитных бурь и суббурь). При этом интенсивность в периоды вспышек многократно превышала типичные микроволновые всплески солнечного происхождения.

По (Bates, 1981), коэффициенты скорости диссоциации кластерных ионов из паров воды и молекул углекислого газа сильно зависят от величины орбитального момента (l) ридберговского уровня во время столкновения. При этом вероятность диссоциации увеличивается для малых величин l и, наоборот, низка при больших значениях l . Следовательно, в периоды всплесков радиоизлучения Солнца и, тем более, в периоды спорадического возрастания интенсивности микроволнового ридберговского излучения ионосферы (во время солнечных УФ и рентгеновских вспышек, а также

геомагнитных бурь), будут происходить индуцированное поглощением усиленного потока микроволнового излучения заселение ридберговских электронов с более высокими / в процессе “столкновительной диссоциативной рекомбинации” и, как результат, уменьшение вероятности диссоциации кластерных ионов нижней атмосферы. Итак, нами микроволновому излучению предложена новая роль в микропроцессах в нижней атмосфере Земли с участием водных кластерных ионов: влияние на вероятность диссоциации этих кластеров через механизм (Bates, 1981) “столкновительной диссоциативной рекомбинации” высоких значений орбитальных квантовых чисел состояний ридберговских электронов (возникающих при поглощении квантов микроволнового излучения как Солнца, так и ионосферы). Коэффициенты скорости диссоциации зависят от энергии квантов (а значит, и длины волны) поглощаемого микроволнового излучения (как солнечного, так и ионосферного происхождения).

Таким образом, обоснована следующая схема “трехступенчатого триггера” в солнечно-атмосферных (погодно-климатических) связях (Авакян, 2008):

- преобразование в ионосфере поглощенных потоков излучения Солнца и корпускул из радиационных поясов и магнитосферы (как факторов солнечной и геомагнитной активности) в поток микроволн (через возбуждение ридберговских состояний), практически свободно проникающий до земной поверхности;

- регулирование микроволновым излучением скоростей образования и разрушения водных кластерных ионов;

- вклад кластеров в образование облачных и аэрозольных слоев, влияющих на поток лучистой энергии Солнца и тепловой поток от подстилающей поверхности.

В рамках радиооптического трехступенчатого триггерного механизма понятно, например, отсутствие влияния 11-летней цикличности солнечной активности на температуру приземного слоя атмосферы (Benestad, 2002). Сглаживание происходит из-за воздействия основного фактора геомагнитной активности – высыпающихся потоков частиц, на общую интенсивность микроволнового излучения ионосферы. Действительно, если максимум числа и интенсивности коротковолновых солнечных вспышек приходится на середину цикла, то максимумов геомагнитной активности два за цикл, при этом основной запаздывает от солнечной активности на 3–4 года, а второй по величине несколько опережает максимум вспышек (Авакян и др., 1994). В то же время обнаруживается прямая корреляция между числом тропических циклонов (ТЦ) и геомагнитными бурями (Иванов, 2006). Более того, тропический ураган Katrina также возник в период наисильнейшей геомагнитной бури (Бондур и др., 2008а, б).

Подчеркнем, что все ступени предложенного механизма имеют экспериментальное подтверждение:

- микроволновое излучение ионосферы, усиливающееся во время солнечных и магнитных бурь, обнаружено (Троицкий и др., 1973);

- регулирование влажности на высотах более 3 км как микроволновым излучением Солнца, так и солнечными вспышками, зарегистрировано (Крауклис и др., 1990; Никольский, Шульц, 1991);

- непосредственное влияние солнечных и магнитных бурь на общую облачность четко фиксируется (Дмитриев, Ломакина, 1977; Веретененко, Пудовкин, 1996).

Таковы предпосылки для наших исследований влияния основных событий солнечно-геомагнитной активности (вспышек и магнитных бурь) на погодно-климатические характеристики. Их проведение позволило подробнее изучить вклад природного компонента – солнечной variability – в современные климатические изменения, включая и явление глобального потепления (Авакян, Воронин, 2010).

Общеизвестно, что глобальные потепления и похолодания происходили в истории Земли многократно. Только за последние 7500 лет было 18 похолоданий, так называемых малых ледниковых периодов. На самом деле наибольший вклад в глобальное изменение приземной температуры вносят пары воды, и лишь затем CO_2 , CH_4 , O_3 , а также N_2O и другие составляющие. Но концентрация паров воды связана с температурой воздуха, так что роль водяного пара в глобальном потеплении непрерывно растет, в то же время учет этого вклада (имеющего как антропогенную, так и, в наибольшей степени, естественную причины) для современных “парниковых” моделей очень сложен.

Эпоха современного глобального потепления отсчитывается с конца XIX в., когда среднее значение глобальной температуры приземного воздуха начало возрастать. В (Mende, Stellmacher, 2000; Krivova et al., 2007) на основе анализа палеоклиматических данных получены выводы, что намного ранее, в конце XVIII в., возникает постоянный рост содержания углекислого газа в нижней атмосфере. Последнее обстоятельство весьма плохо ассоциирует со слаборазвитостью индустриального уровня того времени в рамках гипотезы об антропогенном происхождении CO_2 , хотя, возможно, здесь проявлялся вклад сведения лесов, поглощающих углекислый газ. При этом уже с первых десятилетий XIX в., по-видимому, возникла, согласно (Calder, 1999), и тенденция уменьшения потока ГКЛ, хотя устойчивый отрицательный тренд вариации потока ГКЛ показывают с начала XX в. Это уменьшение и может быть причиной повышения практически с этого же времени уровня содержания CO_2 , поскольку есть информация об отрицательной корреляции этих величин (Calder, 1999). Отрицательная корреляция в долговременных трендах интенсивности косми-

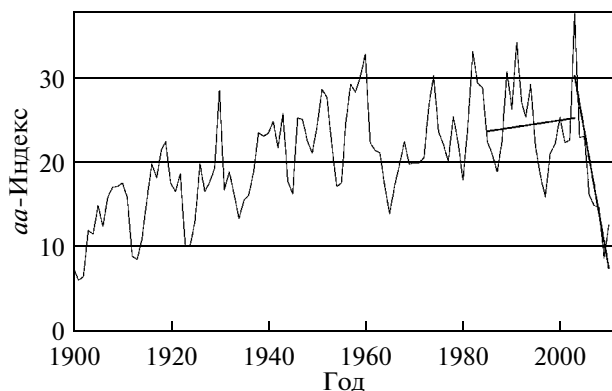


Рис. 1. Вековой ход величин *aa*-индекса и линейная аппроксимация с 1985 г. (после начала падения электромагнитной солнечной активности в вековых циклах) по 2003 г. и после 2003 г. (Авакян, Воронин, 2010).

ческих лучей и средней глобальной температуры приземного воздуха по временному ряду с 1880 г. обнаружена в (Огурцов, 2007).

По современным представлениям, при рассмотрении влияния вариабельности солнечной активности на земные явления следует учитывать:

- потоки космических лучей (ГКЛ и СКЛ);
- вариации солнечной электромагнитной активности, прежде всего изменения в полном потоке солнечного излучения, падающего на границу земной верхней атмосферы (total solar irradiance (TSI)), а также и в его самой коротковолновой, и самой изменчивой частях — крайнем УФ и рентгеновском диапазоне спектра;
- вариации геомагнитной активности, связанной с корпускулярной активностью Солнца.

Вариации этих космических факторов для современного глобального потепления климата следует рассматривать с конца XIX—начала XX вв., когда начались устойчивые тенденции их изменений, продолжавшиеся до недавнего времени. Однако прямые измерения основных параметров таких космических факторов стали выполняться только во второй половине XX в., в том числе с КА. Поэтому мы в своем рассмотрении вековых тенденций используем на более ранние периоды известные реконструкции по косвенным данным.

Так, с первых десятилетий XIX в. началось перманентное увеличение величины общепринятой характеристики уровня солнечной активности — числа солнечных пятен, достигнувшего максимального уровня в 1958 г. Согласно данным, приведенным в (Krivova et al., 2007), одновременно происходило возрастание величины солнечной постоянной TSI, и в целом рост TSI ко второй половине XX в. составил около 1.15 Вт м^{-2} . Отметим, что это удовлетворительно согласуется с последними оценками (Steinhilber et al., 2009), где для величины возрастания TSI, начиная со второй половины XVII в. и до современного уровня, получено значение $0.9 \pm$

$\pm 0.4 \text{ Вт м}^{-2}$. С самого начала XX в. регистрируется почти перманентное возрастание уровня геомагнитной активности (по *aa*-индексу, наиболее хорошо описывающему долговременный тренд геомагнитной возмущенности и частоты появления низкоширотных полярных сияний (Pulkkinen et al., 2001; Наговицын, 2006), рис. 1.

Вариации солнечной активности в различных циклах сопровождаются не только вариациями в геомагнитной активности, но и в интенсивности потока космических лучей, проникающих до нижней атмосферы. И если ГКЛ имеют небольшие вариации интенсивности в виде Форбуш-понижения при сильных возмущениях корпускулярного потока Солнца, то для СКЛ, наоборот, спорадически наблюдаются существенные возрастания потока. Вековой ход потока космических лучей показывает рост с начала XX в. Однако эти два типа событий с ГКЛ и СКЛ происходят на порядок реже, чем сильные солнечные вспышки и мощные геомагнитные бури. Действительно, в среднем за год происходит 50 солнечных вспышек класса M5 и выше, геомагнитных бурь с $K_p = 6$ и более бывает (в зависимости от этапа 11-летнего солнечного цикла) 50–90 (S.E.C., 2000). В то же время заметные Форбуш-понижения на уровень около 3% наблюдаются до двух-четырёх раз в год, на уровень 20% — один раз в год (Usoskin, Kovaltsov, 2008), а СКЛ с появлением потока протонов с энергией выше 100 МэВ регистрируется в среднем пять раз в год.

Рассмотрим также вопрос о важности каждого из космических факторов влияния на погодно-климатические характеристики в энергетическом аспекте. Основные сведения об уровне активности Солнца несут к орбите Земли потоки электромагнитного излучения в коротковолновой области спектра. Действительно, если полный поток солнечного излучения меняется с 11-летним солнечным циклом (а также с 27-дневным периодом вращения Солнца и даже во время вспышек) менее чем на 0.1%, то в далеком УФ-диапазоне (при длинах волн короче 200 нм) поток энергии на орбите Земли составляет 0.1 Вт м^{-2} , а его вариации доходят до 10%, составляя 0.01 Вт м^{-2} . В линии $L\alpha$ атома водорода (121.6 нм) поток в среднем равен 0.004 Вт м^{-2} и может меняться на 50%. На 100% может возрасти поток ионизирующей радиации Солнца с длиной волны короче 103 нм, что составляет 0.003 Вт м^{-2} (Авакян и др., 1994), при этом в рентгеновском диапазоне короче 1 нм во время вспышек возможны повышения потока в несколько тысяч раз. Корпускулярное излучение Солнца несет значительно меньшие потоки излучения (Lean, 1997): поток солнечного ветра достигает 0.0003 Вт м^{-2} , а поток СКЛ — 0.002 Вт м^{-2} . Наконец, поток ГКЛ не превышает $7 \times 10^{-6} \text{ Вт м}^{-2}$. Наибольшие величины потоков энергии при повышенной солнечной активности приносит в земную ионосферу коротковолновый диапазон спектра излучения Солнца (от 0.1 до 134 нм), а в тропосферу — полный поток излучения TSI. Однако в расчете на

единицу массы атмосферного газа в ионосфере поглощается на порядок больше энергии излучения Солнца: так, в ионосфере поглощается 10^{-3} Вт $г^{-1}$, а внизу тропосферы только 7×10^{-5} Вт $г^{-1}$ (Красовский, 1971). Это соотношение еще больше в периоды солнечных вспышек и, особенно, геомагнитных бурь (Авакян, Воронин, 2006а). Действительно, наибольшая часть энергии привносится в ионосферу при высыпаниях электронов из радиационных поясов, при этом потоки возрастают в 100 и более раз даже на средних широтах, достигая 1 Вт $м^{-2}$. Вот почему ионосфера является первым кандидатом на роль участника триггерного механизма солнечно-земных связей (Авакян, 2008) и вот почему при рассмотрении механизмов влияния солнечно-геомагнитной активности на процессы в нижней атмосфере, ответственных за погоду и климат, следует принимать во внимание эффекты солнечных вспышек и магнитных бурь.

Итак, и солнечная вспышка, и сопровождающая ее обычно с задержкой примерно на двое суток геомагнитная буря (во время которой возникают интенсивные высыпания из радиационных поясов Земли энергичных электронов с энергией в несколько кэВ и выше, а также протонов, поток которых может составлять в десятки раз меньшее значение) — это два основных агента влияния солнечно-земных связей. Именно коротковолновое излучение вспышки и поток высыпавшихся электронов и являются эффективными факторами гелиогеофизического воздействия как на ионосферу, так и далее, согласно нашему радиооптическому механизму, на нижнюю атмосферу (Авакян, Воронин, 2007, 2006а; Авакян, 2008, 2005). Такой механизм позволяет передавать энергию поглощенных в ионосфере потоков при вспышках и высыпаниях вниз до земной поверхности с минимальными потерями. Он используется в настоящей работе уже применительно к конкретной климатологической проблеме современного глобального потепления. Так как такое потепление наблюдается несколько десятилетий подряд, мы исследуем возможное влияние долговременных трендов солнечной variability, что по современным представлениям связано с вековыми — квазистолетним и квазидвухсотлетним — циклами активности Солнца.

Важно, что рассмотренные далее вековые тренды в величинах основных космических факторов: потока ГКЛ, в уровнях солнечной и связанной с ней геомагнитной активностей, изменялись со времени начала эпохи глобального потепления так, что это способствовало и росту глобальной температуры приземного воздуха и, по-видимому, концентрации как углекислого газа в тропосфере (отрицательно коррелирующей с падающим потоком ГКЛ), так и паров воды, положительно коррелирующих с повышением температуры. Очевидно, что это может свидетельствовать о преобладании именно природного (неантропогенного) компонента в первом, основном по длительности этапе глобального потепле-

ния. Поскольку уже несколько десятилетий налажены прямые, в том числе достаточно высокоточные измерения почти всех интересующих нас космических факторов, мы имеем возможность исследовать особенности в тенденциях их поведения в последние годы достаточно детально. Покажем, что и в последние десятилетия роль природного компонента — солнечной variability — является преобладающей не только в потеплении климата, но и в снижении темпов этого потепления в самое недавнее время (Авакян, Воронин, 2010).

Налаженные, начиная с ноября 1978 г., спутниковые непрерывные измерения величины TSI позволили констатировать (Lockwood, Frohlich, 2007), что после 1985 г. уровень TSI постоянно падает, хотя есть и другие мнения по тому же набору данных (Willson, Mordvinov, 2003; Scafetta, Willson, 2009). Но такое падение, по крайней мере косвенно, подтверждается тем, что в эти же десятилетия падает величина наиболее изменчивого фактора солнечной электромагнитной активности — потока крайнего УФ и мягкого рентгеновского излучения (Lean, 2005). Действительно, согласно (Lockwood, Frohlich, 2007), величина TSI упала в минимуме последнего одиннадцатилетнего цикла (в 2007 г.) ниже 1365.3 Вт $м^{-2}$ по сравнению со средней величиной в 1365.5 Вт $м^{-2}$ по двум 11-летним минимумам предшествующих циклов. Если это падение является реальным, то оно отражает, по-видимому, существование вековых циклов активности Солнца. Наиболее важные из этих циклов в плане воздействия на изменения климата считаются квазидвухсотлетний и квазистолетний циклы (Дергачев, Распопов, 2000), суммарный пик от которых пришелся на вторую половину XX в.

Падение величины TSI позволило авторам (Lockwood, Frohlich, 2007) сделать вывод, что солнечная электромагнитная variability не может быть причиной наблюдаемого последние десятилетия глобального потепления. При этом в (Lockwood, Frohlich, 2007) подчеркнуто, что для первой половины XX в. наблюдается явно выраженный вклад в глобальное потепление как раз variability солнечного излучения.

По нашему мнению, полное воздействие разных вековых циклов на климат не может ограничиваться лишь электромагнитной активностью Солнца. Не менее сильной составляющей являются корпускулярная солнечная активность и прямо связанная с ней геомагнитная активность. По наиболее изученному 11-летнему циклу известно (Авакян и др., 1994) существенное запаздывание (примерно на треть длины цикла) геомагнитной активности (числа геомагнитных бурь) по отношению к максимуму электромагнитной активности Солнца. Нами получено, что подобному запаздыванию следует и геомагнитная активность вековых циклов, в результате чего основной индекс геомагнитной возмущенности (*aa*-индекс) продолжал расти все последние несколько десятилетий с 1985 г. до последних месяцев

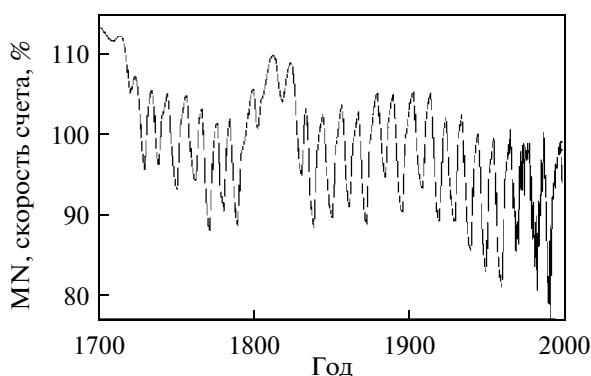


Рис. 2. Вековые вариации космических лучей (реконструкция величины скорости счета полярного нейтронного монитора NM). По данным статьи (Usoskin, Kovaltsov, 2008).

2003 г., и только после этого срока началось его быстрое падение (рис. 1). Возрастание за два десятка лет (+0.3% в год) с 2003 г. сменилось наиболее глубоким за последние 11-летние циклы непрерывно продолжающимся спадом (–10.7% в год), что с учетом суммирования вкладов как солнечной, так и геомагнитной активности в генерацию микроволнового ионосферного излучения, по-видимому, сместило срок перелома в атмосферных трендах к 2000 г. (Авакян, Воронин, 2010).

В течение последних лет произошла смена направления в изменении еще одного из главных космофизических факторов влияния на климат: в интенсивности потока ГКЛ. Будучи весь XX в. спадающим (Usoskin, Kovaltsov, 2008) (рис. 2), поток ГКЛ с 1999–2000 гг. стал возрастать (рис. 3). Роль ГКЛ в формировании облачности и соответственно погоды и климата, последние годы подробно изучалась. В ряде работ (Marsh, Svensmark, 2000; de Jager, Versteegh, 2006; Harrison, Stephenson, 2005; Svensmark, 2007) показано, что ГКЛ могут особенно активно участвовать в образовании оптически плотных облаков нижнего яруса, приводящих как правило к охлаждению приземного воздуха (Carlsaw et al., 2002; Kirkby, Laaksonen, 2000). Поэтому с указанных позиций рост

ГКЛ ведет за собой возрастание охлаждающей облачности, а значит, участвует в ослаблении глобального потепления. Рост ГКЛ наблюдается уже по крайней мере с 1999–2000 гг. (с последнего максимума солнечной активности), когда зафиксирован самый неглубокий с 1970 г. минимум в вариациях потока космических лучей. Возрастание продолжается до последнего времени, приведя в конце сентября–начале октября 2009 г. к наибольшему за текущие несколько десятилетий максимуму потока космических лучей при измерениях в средних широтах (Stozhkov et al., 2008) (рис. 3), а также и в высокогорных условиях (гора Арагац (Chilingaryan et al., 2008)). Имеются и противоположные взгляды на связь ГКЛ и облаков нижнего яруса (Kristjansson, Kristiansen, 2000; Kristjansson et al., 2004), но это, возможно, связано с маскирующим вкладом облачности верхних ярусов (Usoskin, Kovaltsov, 2008) в использованных спутниковых данных.

Обратимся теперь к экспериментальным данным по тенденциям изменения характеристик ряда основных нижнеатмосферных параметров. По мировым (при их отсутствии – на основании сведений по отдельным станциям патрульных наблюдений) данным, обнаруживаются особенности в их поведении именно в последние десять лет. Действительно, начиная, как правило, с 2000 г., произошли устойчивые смены направлений изменений тех атмосферных параметров, которые определяют немалую степень погодно-климатические характеристики, в том числе и такое явление, как глобальное увеличение температуры приземного воздуха (глобальное потепление), а именно:

– содержание паров воды в столбе атмосферы по данным высокогорных измерений непрерывно возрастало с 1980-х годов (как и метана) по 2000–2001 гг., а теперь падает (Арефьев, 2006);

– содержание озона в эти же десятилетия непрерывно уменьшалось, что привело к увеличению потока эритемной составляющей (УФ-А и УФ-Б) облученности (Feister, 2006), но после 1998 года многолетний рост потока эритемного излучения сменился на падение;



Рис. 3. Долговременная зависимость среднемесячных значений вариаций космических лучей на станции Долгопрудный, Московская обл. По данным сайта <http://cr0.izmiran.rssi.ru/mosc/main.htm>.

— глобальное покрытие облачности, падающее с 1985—1987 гг. до 2000 г., в период 2000—2004 гг. возросло, а после 2004 г. опять падает (рис. 4).

Все наблюдаемые изменения находятся в полном соответствии с радиооптическим триггерным механизмом, так как, во-первых, уменьшение содержания водяных паров означает их переход в кластеры, участвующие в свою очередь в образовании облаков, и, во-вторых, поскольку абсолютный максимум геомагнитной активности был в конце 2003 г. (по *aa*-индексу), концентрация водяных кластеров была большой. После 2004 г. глобальная облачность, как и *aa*-индекс начала падение, хотя из-за маскировки (Usoskin, Kovaltsov, 2008) нижнего яруса более высоко расположенными облаками (а они преобладали в период 2000—2004 гг. (Palle et al., 2004, 2006)), это падение для глобальной облачности не столь заметно (рис. 4). Уменьшение глобальной облачности до 2000 г. также полностью укладывается в рамки нашего радиооптического механизма и объясняется уменьшением все эти годы солнечного потока ионизирующего излучения (Lean, 2005). Действительно, это уменьшение привело к падению интенсивности микроволнового излучения ионосферы, что уменьшало весь период до 2000 г. образование водяных кластеров и соответственно сдерживало генерацию облачности в глобальном масштабе. Уменьшение скорости процесса кластерообразования прямо сказывалось на увеличении содержания водяных паров в столбе высокогорной атмосферы, как это зарегистрировано в работе (Арефьев, 2006). В период 1984—2000 гг. также уменьшалось планетарное альbedo (Palle et al., 2004, 2006), а затем оно опять начало возрастать, хотя авторы подчеркивают наличие большой неопределенности в данных по длительным циклам измерений, для чего ими были использованы данные с нескольких КА. Следует отметить важный вывод в работах (Palle et al., 2004, 2006) о преобладании (с разницей вдвое против обычного) в период 2000—2004 гг. площади высоко расположенных облаков над распространенностью облачности нижнего яруса. Ведь именно в это время величина *aa*-индекса достигла абсолютного максимума с XVII в., и именно высокая геомагнитная активность определяет зарождение (в рамках нашего радиооптического триггерного механизма) верхнего облачного слоя, см. далее.

Итак, на основании приведенных выше результатов, можно полагать, что климатическая ситуация последние десятилетия (в эпоху нарастания глобального потепления) в рамках предложенного радиооптического триггерного механизма солнечно-погодных связей определялась прохождением во второй половине XX в. вековых максимумов (квизистолетного и квазидвухсотлетнего) циклов солнечной активности. После 1985 г. полный (интегральный) поток солнечного излучения начал уменьшаться (Lockwood, Frohlich, 2007) с одновременным ослаблением потока в диапазоне ионизирующего мягкого рентгеновского и КУФ-излучения (Lean, 2005). Но геомагнитная активность (по общепринятому *aa*-индексу)

Общее количество облаков, %

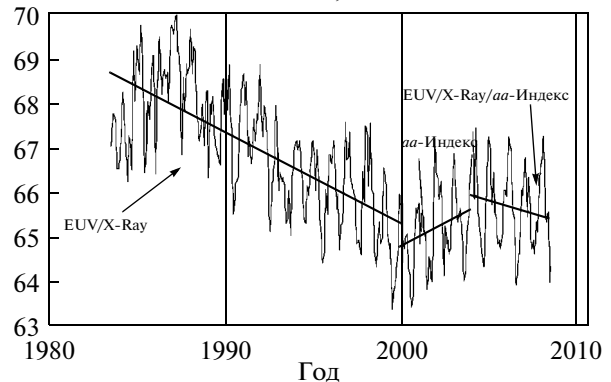


Рис. 4. Изменение глобальной облачности по наблюдениям со спутников по данным сайта <http://isc-cp.giss.nasa.gov/climanal7.html>.

еще продолжала возрастать до конца 2003 г., что, с учетом суммирования вклада солнечной и геомагнитной активности в генерацию микроволнового ионосферного излучения, и могло сместить срок перелома в атмосферных трендах к 2000 г. Возникающее при этом уменьшение роли радиооптического триггерного механизма в образовании облаков и аэрозольных слоев в атмосфере должно приводить к уменьшению общей облачности за счет облаков малой оптической плотности. Ведь очевидно, что такой тонкий механизм, как регулирование скоростью реакций диссоциации и ассоциации кластерных ионов, относится к зарождающимся, оптически тонким облакам, вне устойчивых циклонических или антициклонических образований. Для оптически толстых облаков (как правило — нижнего яруса) требуются гораздо большая энергетика и другие времена эволюции, чем сравнительно короткие всплески потоков при солнечных вспышках и магнитных бурях. Известно, что роль облаков в радиационном бюджете зависит от их оптической толщины (Tsushima et al., 2006): оптически тонкие облака верхних ярусов действуют как нагреватель атмосферы (см. также (Kirkby, Laaksonen, 2000)), в то время как облака большой оптической толщины охлаждают. В (Веретененко и др., 2007) отмечено, что облачность уменьшает как приток коротковолновой солнечной радиации к земной поверхности, так и ее эффективное (длинноволновое) излучение. Результирующий поток радиации к земной поверхности при наличии облаков увеличивается, когда радиационный баланс отрицателен (в умеренных и высоких широтах — зимой) и уменьшается, когда он положителен (летом). Таким образом, увеличение облачности может приводить к различным эффектам в зависимости от широты, характера подстилающей поверхности и сезона. В (Авакян, 2010) рассмотрен вопрос о роли определенного начального условия — наличия оптически плотной облачности — при воздействии солнечных вспышек и геомагнитных бурь на погодно-климатические характеристики. Эта ситуация является весьма распро-

страненным явлением на высоких и средних широтах, особенно, если учесть, что речь идет о плотностях лишь немного больших единицы. В такие периоды сильно нивелируется влияние солнечных вспышек и геомагнитных бурь на погоду в данном регионе, поскольку в таком случае генезис новой — тонкой облачности — незаметен: весь теплорадиационный баланс определяется (для приземного воздуха) оптически плотным облачным покровом.

Ночью, естественно, вклада вспышек нет, а присутствие ночной оптически плотной облачности в зимний период дает замедление остывания приземного слоя воздуха. На ночной стороне вся облачность в отдельности: и оптически плотная (сильно связанная с вариациями потока космических лучей), и вновь образуемая, под влиянием геомагнитной бури, оптически тонкая — в зимний период фактически вызывают замедление остывания приземного слоя воздуха. Это как раз и ведет, вероятно, к таким плохо понятным до последнего времени (Кондратьев, Ивлев, 2008) эффектам глобального изменения климата, как: “преимущественное потепление зим” и “превалирующая последние десятилетия скорость роста (вдвое) ночных (минимальных за сутки) температур приземного воздуха над дневными (максимальными) температурами”.

Следует учитывать, что имеются географические, прежде всего, широтные, особенности реакции атмосферных параметров (например, прозрачности, давления, атмосферной циркуляции) на каждый из факторов воздействия. Эффекты от этих воздействий, как правило, переналагаются и наблюдаются в совокупности, тем более что изменения микроструктуры атмосферы могут продолжаться по несколько часов (Svensmark, 2007; Yu, Turco, 2007; Svensmark et al., 2007). Так, воздействие выпадений частиц из радиационных поясов в периоды магнитных бурь (через увеличенный поток микроволнового излучения из ионосферы) или воздействие потока СКЛ могут налажаться при кластерообразовании на обратный по знаку вклад от уменьшения потока ГКЛ при Форбуш-понижениях. Это может в сумме привести к исчезновению эффекта, например, в облачном покрове (Usoskin, Kovaltsov, 2008).

Итак, в настоящей части работы нами обращено внимание на возможную определяющую роль длительных — вековых (квасистолетного и квазидвухсотлетнего) циклов солнечно-геомагнитной активности в современных глобальных, прежде всего климатических изменениях. Впервые показано, что тренд усиления такой суммарной активности сменился не позже конца 2003 г. (скорее, около 2000 г., с учетом вклада постоянного понижения потока солнечного ионизирующего излучения, начавшегося по (Lean, 2005) еще с 1980-х годов) на спад.

Все наблюдения в переломе знака, отмеченные нами для ряда трендов в последнее десятилетие, могут свидетельствовать об окончании в ближайшее время периода вклада природного — солнечного векового (квасистолетного и квазидвухсотлетнего)

компонента в регистрируемое глобальное потепление климата. Уменьшение солнечной активности ведет, как известно, к возрастанию потока ГКЛ. Кстати, в работе (Огурцов, 2007) выполнен анализ солнечно-климатических изменений с 1880 г., на основе которого отмечена отрицательная корреляция между долговременными вариациями интенсивности ГКЛ и приземной температуры. Следовательно, теперь потепление может, по крайней мере, прекратить свой рост. Это обусловлено не только ростом потока ГКЛ с 1999—2000 гг., а значит, и усилением глобальной оптически плотной (охлаждающей) облачности, но и падением уровня солнечно-геомагнитной активности, что уменьшает количество оптически тонкой (разогревающей) облачности. Действительно, в рамках нашего радиооптического трехступенчатого триггерного механизма солнечно-погодного-климатических связей уменьшение после 1985 г. потока ионизирующего излучения Солнца (Lean, 2005) и, с конца 2003 г., интенсивности корпускулярных высыпаний в ионосферу в периоды геомагнитных бурь (согласно изменениям в *aa*-индексе, наиболее хорошо описывающему долговременный тренд геомагнитной возмущенности и частоту появления низкоширотных полярных сияний (Pulkkinen et al., 2001)) ведут к падению потока ионосферного микроволнового излучения, а, следовательно, и концентрации кластерных ионов в тропосфере, определяющих зарождение оптически тонкой облачности.

В статье как раз и проведено обсуждение возможных причин и механизмов подобных погодноклиматических изменений. Вместе с тем, она носит более широкий характер, поскольку мы ранее, на основе того же радиооптического механизма солнечно-земных связей (Авакян, 2008, 2005; Avakyan, 2009, 2006b), предложили возможный путь к объяснению всей совокупности глобальных изменений в окружающей среде, включая не только погоду и климат, но и биосферные проявления, в том числе физическую основу появления неблагоприятных дней для людей с ослабленным здоровьем.

В то же время воздействие корпускул, выпадающих из радиационных поясов и прямо из геомагнитосферы во время мощных геомагнитных бурь, создает в ионосфере добавочные токовые системы, которые через электрические поля генерируют геомагнитно-индуцированные токи земной поверхности. Эти токи постоянно рассматриваются как угроза работоспособности больших энергосистем, включая ускорение коррозии магистральных трубопроводов. Рассмотрим далее эту проблему подробнее.

РОЛЬ КОСМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ В УВЕЛИЧЕНИИ СКОРОСТИ КОРРОЗИИ МЕТАЛЛА ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

Россия — вторая страна в мире (после США) по протяженности трубопроводов различного назначения и первая по их изношенности. По (Соколовский, 2009), нарастающий износ нефтегазопрово-

дов у нас превышает 60%, и нужно внедрение новейших отечественных технологий. В то же время, нефтегазодобыча является важным стратегическим приоритетом социально-экономического развития страны. Одной из главных проблем при этом являются разрывы труб из-за неблагоприятных природных факторов, включая магнитные и электрические поля, приводящие к коррозии металла (Рокитянский, 2008). Последняя проблема встает на первый план уже несколько десятилетий из-за старения трубопроводных систем. Срок службы газопроводов определен в 33 года (Рокитянский, 2008), и сейчас этот возраст достигнут более чем для 15% трубопроводов Газпрома и до 30% – для нефтепроводов. При этом более 30–40% аварий на газопроводах связывается с наружной коррозией металла труб (коррозией растрескивания под напряжением (Петров, 1986)), и эта стресс-коррозия стала в последние годы одной из наиболее серьезных причин разрывов на магистральных газопроводах (Безопасность России, 2002; Канайкин, Матвиенко, 1990). В то же время она наименее изучена.

Количество аварий в России на подземных трубопроводах различного назначения, согласно данным МЧС, ежегодно увеличивается в геометрической прогрессии, и при этом коррозия, как природный фактор аварийности – одна из основных причин аварий как на нефте- и газопроводах, так и на водоводах. Коррозионные повреждения отечественных трубопроводов начинают появляться уже спустя 5–10 лет с начала их эксплуатации, приводя к резкому нарастанию частоты отказов, а в Западной Европе это происходит после 25–30 лет эксплуатации (нормальные сроки с точки зрения материаловедения) (Варфоломеева, 2004).

Итак, на современном этапе развития трубопроводных систем самой актуальной является задача увеличения их долговечности и безопасности (в том числе в экологическом аспекте). Эта задача для отечественных магистральных трубопроводов не может быть решена без определенных организационно-информационных разработок, направленных на учет космической погоды при их эксплуатации. Действительно, космофизики из Северной Европы, Северной Америки, Австралии давно работают по заказу владельцев своих больших трубопроводных систем, в том числе, в рамках Европейской программы COST 724 (Pirjola, 2008). При работах по данной программе большое внимание уделялось как раз влиянию космической погоды, прежде всего солнечных вспышек и геомагнитных бурь, на технологические системы, включая коррозию трубопроводов, когда станции катодной защиты выходят из строя или отключены (Rodgers et al., 2000). Основным элементом такого воздействия являются геомагнитно-индуцированные токи (ГИТ) (Gumtow, Eng, 2002; Pirjola, 2008), генерируемые при достаточно сильных геомагнитных бурях на большей части территории России. К сожалению, ГИТ даже не упоминаются в действующих ГОСТ (ГОСТ Р 51164-98; ГОСТ ИСО 9.602-2005). Это, согласно ре-

зультатам нашего анализа, и является в основном источником тех промахов в эксплуатации трубопроводов, которые привели к их аномально-скоротечному коррозионному износу. В (Gumtow, Eng, 2002) отмечено, что ранние (до 1970 г.) экспериментальные результаты о незначительности вклада ГИТ в коррозию газопроводов оказались ошибочными, как из-за низкоширотного местоположения опытных трубопроводов, так и в связи с постоянным возрастанием геомагнитной активности в последующие десятилетия.

Реальное отключение катодной защиты на суммарный период в одни сутки во время геомагнитной бури действительно может привести к “годовому эффекту коррозии” в квартал. В течение года это как раз приводит к четырехкратному усилению скорости коррозии по сравнению со скоростью при штатной работе станций катодной защиты, что и было показано экспериментально. Действительно, наблюдения на северо-востоке Австралии (Rodgers et al., 2000) за скоростью геомагнитно-индуцированной коррозии газовых магистралей показали, что в отсутствие защиты требуется в 4 раза чаще менять трубы.

Основной отечественный нормативный документ ГОСТ Р 51164-98 разрешает отключение катодной защиты трубопроводной системы, функционирующей в рабочем состоянии, при проведении регламентных и ремонтных работ не более одного раза в квартал (до 80 ч). При проведении исследовательских работ допускается отключение электрохимической защиты на суммарный срок не более 10 сут/г. За такой срок могут произойти несколько мировых магнитных бурь, при этом повышенные в сотни раз ГИТ будут воздействовать на трубопровод с отключенной системой катодной защиты несколько суток. В такие периоды электрохимическая стресс-коррозия возрастает на несколько годовых (плановых) норм.

Ежегодно наблюдается до 50–90 сильных геомагнитных бурь с величиной планетарного индекса геомагнитной активности $K_p \geq 6$ (S.E.C., 2000), т.е. в среднем происходит каждую неделю одна, а то и две больших бури. При этом уровне активности эффекты бури проявляются уже на геомагнитных широтах 50°, что соответствует линии, проходящей южнее Братска, Новосибирска, Тулы. Вся территория к северу от этой линии охвачена бурей, включая зону полярных сияний. Примерно одна, еще более сильная геомагнитная буря ($K_p \geq 7$), происходит раз в 10–15 дней, и тогда уже практически вся Россия подвержена ее влиянию. Одним из главных проявлений мощных магнитных бурь является вторжение потоков энергичных корпускул в ионосферу на средних и высоких широтах. Эти корпускулы (в основном электроны) высыпаются из радиационных поясов Земли и прямо из магнитосферы и производят сильную добавочную ионизацию в ионосфере, что ведет к образованию ионосферных токовых систем, которые в свою очередь являются причиной генерации электрических полей. Электрические

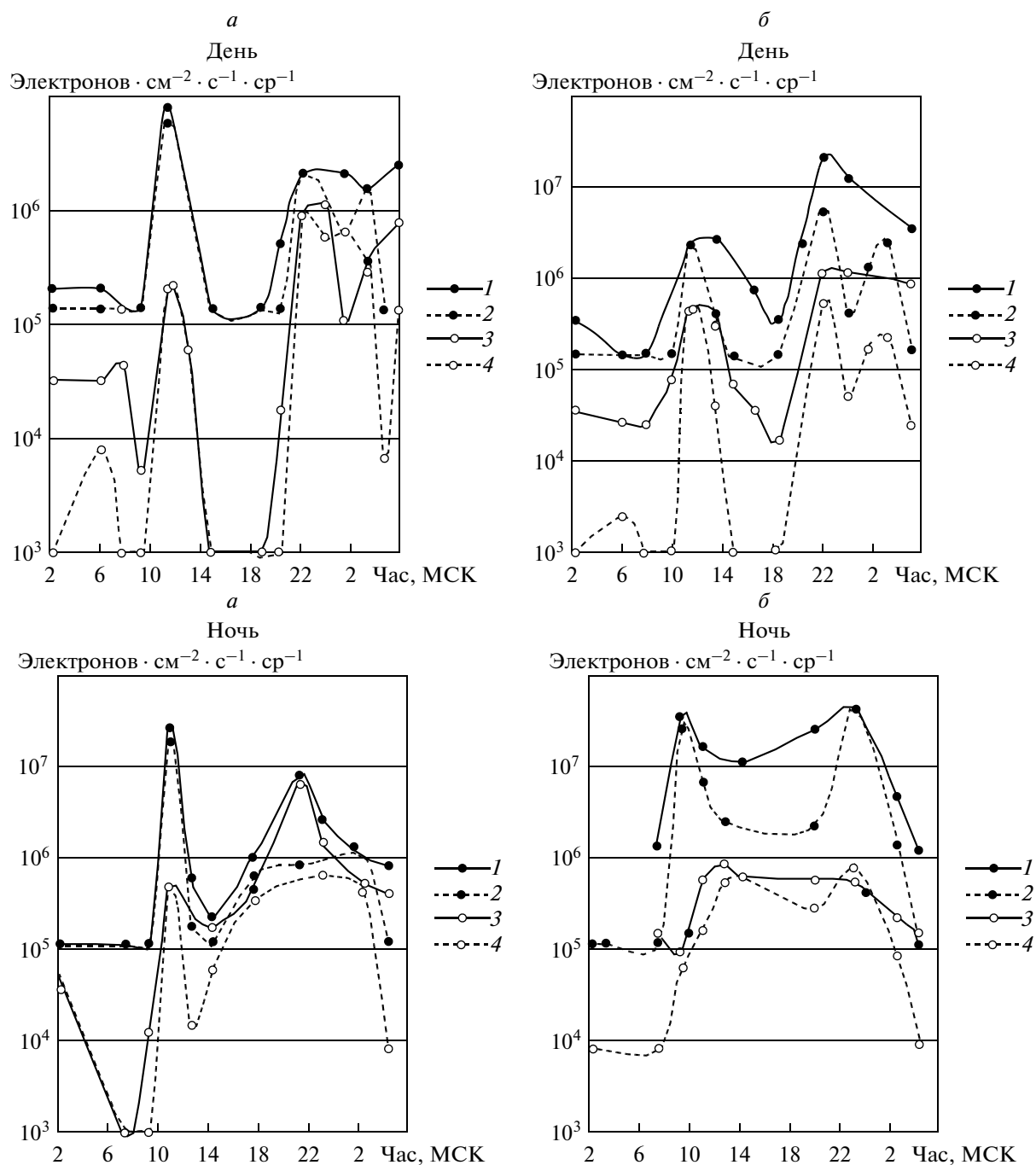


Рис. 5. Вариации интенсивности потоков электронов с энергиями в единицы и десятки кэВ в период сильной геомагнитной бури, высыпающихся из радиационных поясов на средних широтах в Северном полушарии, отдельно для дневной и ночной ионосферы и для двух областей геомагнитных широт -45° – 55° и 55° – 60° : *a* – интервал геомагнитных широт от 45° до 55° , *б* – интервал геомагнитных широт от 55° до 60° ; 1 – потоки захваченных электронов с энергией более 2.5 кэВ, 2 – потоки высыпающихся электронов с энергией более 2.5 кэВ, 3 – потоки захваченных электронов с энергией более 25 кэВ, 4 – потоки высыпающихся электронов с энергией более 25 кэВ.

поля вместе с геомагнитными буревыми вариациями создают ГИТ как в земной поверхности, так и в различных проводящих системах, расположенных над землей и в самом грунте.

В период типовой мировой магнитной бури наиболее сильные возрастания потоков электронов ки-

лоэлектронвольтовых энергий на умеренных и высоких геомагнитных широтах происходят в главную фазу бури (в течение двух–четырех часов) и на фазе восстановления, когда фиксируются рекуррентное возрастание, иногда до наивысших уровней, в течение десятков часов. Согласно (Муллаяров и др.,

2006), последствие геомагнитной бури в виде ГИТ на газопроводе в Якутске продолжается еще сутки—две после главной фазы, т.е. в фазу восстановления бури — на этапе известных рекуррентных возрастных высыпаний электронных потоков (Соколов, 1987). Усиления высыпающихся в ионосферу электронных потоков и, следовательно, ГИТ, в главную фазу и в фазу восстановления магнитной бури происходят до 300 раз и более, при этом в главную фазу такие изменения идут очень быстро (Авакян и др., 1994, 1974) (рис. 5). Эти экспериментальные данные получены радиометрами ГОИ на ИСЗ “Космос-381”. Действительно, при вариациях величины геомагнитного поля во время бури (с максимумом в центре главной фазы), сопровождающие эти изменения высыпания электронов из радиационных поясов, испытывают в начале и в конце главной фазы резкие ослабления (до порога регистрации на период в течение 1.5–3 ч). Только в центре главной фазы они на средних широтах на 2–4 ч достигают действительно максимальных значений — до уровня авроральных вторжений. Быстрые вариации интенсивных высыпаний хорошо проявляются в картинах мощных сияний в верхней атмосфере, причем внезапные их затухания, а затем всплески интенсивных свечений в главную фазу магнитной бури наблюдались на средних широтах и космонавтами (Лазарев и др., 1983, 1987).

Подобные всплески ведут к мгновенным изменениям потенциалов на трубопроводах, что особенно опасно влияет на электрохимическую коррозию. Поскольку возрастания (над уровнями добуревых эффектов (рис. 5)) до 300 раз и более для высыпающихся потоков, а значит, и в интенсивности ГИТ, происходят чуть ли не целые сутки, то следует констатировать, что отключение катодной защиты во время сильной магнитной бури даже на одни сутки способно увеличить почти вдвое годовой эффект электрохимической коррозии трубопровода. Интенсивность потока высыпающихся электронов сильно меняется с широтой, увеличиваясь от средних к высоким широтам зоны полярных сияний (рис. 5а, 5б), поэтому величины электрического поля и индуцированных токов наиболее значительно меняются именно для трубопроводов меридионального направления. При этом ГИТ могут достигать сотен ампер. По этой причине ожидаются серьезные проблемы в будущем, обусловленные коррозией повышенной интенсивности в новых (меридиональных) газовых магистральных с учетом закладываемого в этих проектах увеличения рабочего давления.

Ионосферные токи на дневной стороне Земли определяются в большой мере скоростью фотоионизации атмосферных газов под действием КУФ и мягкого рентгеновского излучения Солнца. Солнечные вспышки, наиболее сильные именно в этой области спектра, практически полностью контролируют степень ионизации дневной среднеширотной верхней атмосферы. Главное, что вспышечная деятельность Солнца является и основной причиной начала примерно через двое суток магнитных бурь на

Земле, при этом от силы вспышки зависит и мощность геомагнитной бури. Однако до настоящего времени эта связь хорошо не изучена, т.к. в мире отсутствует постоянный мониторинг спектра и потоков коротковолнового солнечного излучения.

Предлагаемый учет ГИТ при использовании и эксплуатации станций катодной защиты важен не только для нефтегазопроводов, но и везде, где применяется такая электрохимическая защита:

- на предприятиях коммунального хозяйства, обслуживающих городские коммуникации, трубопроводы тепловых и газовых сетей;

- на предприятиях химического, энергетического и промышленного комплекса, в других организациях, имеющих металлические коммуникации в области почв с повышенной электрохимической активностью.

Но настоящее предложение наиболее актуально для магистральных газопроводов, особенно меридионального направления, прежде всего из-за повышенной взрывоопасности при аварийных ситуациях.

Итак, в данной части статьи:

- показаны возможные причины сверхнормативного (до нескольких раз) увеличения скорости коррозии отечественных трубопроводных систем (при функционировании станций катодной защиты по действующим ГОСТам);

- предложены меры по исключению незапланированных эффектов стресс-коррозии через введение ограничений на регламентные отключения станций катодной защиты по геофизическим показаниям (во время геомагнитной бури) и использование при аварийных работах специального почасового графика (с учетом вариаций геомагнитно-индуцированных токов в главную фазу магнитной бури);

- определены задачи прогнозирования (по солнечным вспышкам) и контроля (по интенсивности корпускулярных высыпаний из радиационных поясов) параметров геомагнитно-индуцированных токов в периоды больших геомагнитных возмущений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Многолетние исследования по физике и оптике верхней атмосферы и ионосферы (Авакян, 2008) наряду с разработкой оптико-электронной КА для регистрации спектра и абсолютных потоков солнечного ионизирующего излучения (Авакян и др., 2008) впервые привели к получению некоторых важных результатов в области солнечно-земной физики. Среди них предложение принципиально новой концепции о физическом механизме солнечно-земных связей — через микроволновое излучение ионосферы, возникающее при возбуждении электронным ударом ионосферными энергичными электронами по атомам и молекулам верхнеатмосферных газов высоковозбужденных (ридберговских) состояний. Переходы между этими состояниями с главными квантовыми числами $n \geq \sim 10$ лежат в микроволновом диапазоне — в области длин волн

от мм до дм и выше. Такое радиоизлучение свободно (за исключением нескольких полос поглощения) проникает в тропосферу до земной поверхности и, т. о. может являться тем физическим фактором, который воздействует на биосферу и ряд погодных характеристик (Авакян, Воронин, 2007; Авакян, 2008).

Для практических целей здесь важно определение вклада солнечной variability в глобальное изменение климата, включая наблюдаемый в XX в. рост температуры приземного воздуха. В данной работе такой механизм представлен и рассмотрен в совокупности с апробированными ранее, но относящимися только к воздействию космических лучей на погоду и климат (Авакян, Воронин, 2010).

Проведенное нами параллельное изучение долговременных трендов космических факторов и ряда тропосферных характеристик позволяет выявить ключевую информацию для понимания физических механизмов солнечно-атмосферных связей и разработки прогностических оценок изменения климата. В данной работе проанализированы известные и новые характеристики трендов электромагнитной солнечной активности, геомагнитной активности и интенсивности потока ГКЛ на протяжении как всей эпохи современного этапа глобального потепления, так и в нескольких последних 11-летних циклах солнечной изменчивости. Предложено учитывать вклад вековых (квасистолетного и квазидвухсотлетнего) циклов активности Солнца, результатом которого явилась смена знаков в направлениях изменений всех названных космических факторов в последнее десятилетие (Авакян, Воронин, 2006в, 2010). Изучение тенденций в поведении ряда основных тропосферных характеристик также показало изменение их знаков в последние несколько лет. При этом получено отчетливое проявление суммарного вклада вековых трендов солнечной (электромагнитной) и геомагнитной (корпускулярной) активностей в тенденцию изменения тропосферных характеристик и, прежде всего, в вариации глобальной облачности (Авакян, Воронин, 2010).

Показано, что в формировании долговременных климатических трендов участвуют такие мощные, хотя и кратковременные проявления солнечно-геомагнитной активности, как солнечные вспышки и магнитные бури. Получено, что все рассмотренные нами космические факторы влияния на глобальную среднюю температуру приземного воздуха (солнечные вспышки, геомагнитные бури и поток ГКЛ) к настоящему времени изменяются так, что это ведет к охлаждению климата (Авакян, Воронин, 2010).

Предложено полномасштабное решение проблемы продления “жизни” отечественных трубопроводных систем различного н.-х. назначения. Дан анализ причин такой изношенности и обсуждается, что надо сделать, чтобы прекратить аномально быструю коррозию российских трубопроводных систем.

Работа по оценке коррозии трубопроводных систем существенно упростится при реализации эксперимента “Постоянный космический солнечный патруль”, для выполнения которого создана опико-электронная аппаратура ГОИ (Авакян et al., 2002, 2009, 2010; Авакян, 2006а, 2009; Авакян и др., 2008). Конструкция аппаратуры позволяет производить непрерывные измерения, со съемом полного спектра Солнца в диапазоне длин волн от 0.14 до 200 нм каждые 72 сек. Все спектральные диапазоны перекрываются, причем в КУФ-спектрометре это происходит на наиболее интенсивных линиях солнечного спектра: 30.4 нм, 58.4 нм, 911 нм, 121.6 нм. Перекрытие осуществляется и со спектральным поддиапазоном, где работает обычный фотоэлектронный умножитель с окном из фтористого магния — ФЭУ-142, размещенный в обоях — КУФ и рентгеновском спектрометрах. Все это позволяет увеличить надежность функционирования аппаратуры в космосе и контролировать возможную деградацию чувствительности каждого рабочего спектрального канала, оснащенного ВЭУ. Для радиометров предусмотрена постоянная калибровка прямо в космическом полете по изотопу ^{55}Fe на длине волны 0.2 нм. Как показал опыт работы таких радиометров на борту ИСЗ “Космос-381” (Авакян и др., 1974), по фоновому (несолнечному) каналу хорошо регистрируются потоки электронов из радиационных поясов. К настоящему времени весь комплекс аппаратуры “Космический солнечный патруль” изготовлен в расчете на запуск автоматического КА с солнечно-синхронной орбитой. Если это будет отечественный КА, то возможна установка аппаратуры на “Метеоре-3М”.

Авторы выражают глубокую благодарность Ю.И. Стожкову и А.А. Чилингаряну — за предоставленные материалы по вариациям ГКЛ; А.А. Намгаладзе — за исключительно полезные советы; Международному научно-техническому центру, Москва — за поддержку работы по созданию опико-электронной аппаратуры “Космический солнечный патруль”; Н.Г. Петрову и В.В. Притуле — за оценку ситуации с учетом спорадического возрастания ГИТ в периоды мировых магнитных бурь при эксплуатации отечественных трубопроводных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авакян С.В. Новый фактор в физике солнечно-земных связей — ридберговские состояния атомов и молекул // Тез. докл. Межд. конф. по физике солнечно-земных связей. Алматы: Наука, 1994. С. 3—5.
- Авакян С.В. Микроволновое излучение ионосферы как фактор воздействия солнечных вспышек и геомагнитных бурь на биосистемы // Оптический журнал. 2005. Т. 72. № 8. С. 41—48.
- Авакян С.В. Физика солнечно-земных связей: результаты, проблемы и новые подходы // Геомагнетизм и аэронавигация. 2008. Т. 48. № 4. С. 1—8.
- Авакян С.В. Вызов солнечно-земной физике и перспективы ответа, позволяющего решить насущные

- проблемы // Тр. Всерос. конф. по физике Солнца: Год астрономии: солнечная и солнечно-земная физика – 2009. 5–11 июля 2009 г. СПб.: ГАО, 2009. С. 27–29.
- Авакян С.В.* Каналы воздействия космофизических факторов на погодно-климатические характеристики // Тр. Всерос. конф. по физике Солнца: Солнечная и солнечно-земная физика – 2010. 3–9 октября 2010 г. СПб.: ГАО, 2010. 4 с.
- Авакян С.В., Афанасьев И.М., Богданов В.Г., Борткевич С.В., Воронин Н.А., Ефремов А.И., Зоткин И.А., Иванов А.П., Изотов А.Б., Корнилов В.Н. Кувалдин, Э.В., Курпьянов В.Н., Лебединская М.Л., Леонов Н.Б., Леханов Е.Ф., Прибыловский И.М., Сазонов Г.В., Савушкин А.В., Серова А.Е., Черников Д.А.* Исследования в ГОИ рентгеновского и крайнего УФ-излучения Солнца // Оптич. журн. 2008. Т. 75. № 12. С. 31–39.
- Авакян С.В., Болгарцева М.П., Ефремов А.И., Кринберг И.А., Кулаков А.П., Петров В.С., Подмошенский А.Л., Прибыловский И.М., Сазонов Г.В., Шаулин Ю.Н.* Потоки электронов во время магнитной бури 14–15 декабря 1970 г. по данным ИСЗ “Космос-381” // Исслед. по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. 1974. Вып. 32. С. 158–161.
- Авакян С.В., Вдовин А.И., Пустарнаков В.Ф.* Ионизирующие и проникающие излучения в околоземном космическом пространстве. Справочник. СПб.: Гидрометеоиздат, 1994. 501 с.
- Авакян С.В., Воронин Н.А., Серова А.Е.* Роль ридберговских атомов и молекул в верхней атмосфере // Геомагнетизм и аэронаука. 1997. Т. 37. № 3. С. 99–106.
- Авакян С.В., Воронин Н.А.* Возможные механизмы влияния гелиогеофизической активности на биосферу и погоду // Оптич. журн. 2006а. Т. 73. № 4. С. 78–83.
- Авакян С.В., Воронин Н.А.* Гелиоионосферные микроволновые излучения как единый агент контроля биосферы и погоды // Тр. межд. конф. Погода и биосистемы. СПб.: РГГМУ, 2006б. С. 118–132.
- Авакян С.В., Воронин Н.А.* Контроль погоды гелиоионосферными микроволновыми излучениями // Тр. X Пулковской Межд. конф. по физике Солнца: Квазипериодические процессы на Солнце и их геоэффективные проявления. СПб.: ГАО, 2006в. С. 223–230.
- Авакян С.В., Воронин Н.А.* О возможном физическом механизме воздействия солнечной и геомагнитной активности на явления в нижней атмосфере // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 2. С. 28–33.
- Авакян С.В., Воронин Н.А.* О радиооптическом и оптическом механизмах влияния космических факторов на глобальное потепление климата // Оптич. журн. 2010. Т. 75. № 2. С. 90–93.
- Арефьев В.Н., Кашин Ф.В., Семенов В.К., Акименко Р.М., Каменоградский Н.Е., Сизов Н.И., Синяков В.П., Упэнз Л.Б., Устинов В.П.* Водяной пар в толще атмосферы северного Тянь-Шаня // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 6. С. 803–815.
- Безопасность России.* Безопасность трубопроводного транспорта / Под ред. И.И. Мазура, О.М. Иванцова. М.: МГФ Знание, 2002. 749 с.
- Бондур В.Г., Пулинец С.А., Ким Г.А.* О роли вариаций галактических космических лучей в тропическом циклогенезе на примере урагана Катрина // ДАН. 2008а. Т. 422. № 2. С. 244–249.
- Бондур В.Г., Пулинец С.А., Узунов Д.* Воздействие крупномасштабных атмосферных вихревых процессов на ионосферу на примере урагана Катрина // Исслед. Земли из космоса. 2008б. № 6. С. 3–11.
- Варфоломеева Л.* Информационные технологии на службе нефтегазовой отрасли России // Нефть России. 2004. № 9. С. 24–25.
- Веретенко С.В., Дергачев И.Ф., Дмитриев П.Б.* Солнечная активность и вариации космических лучей как фактор интенсивности циклонических процессов в умеренных широтах // Геомагнетизм и аэронаука. 2007. Т. 47. № 3. С. 399–406.
- Веретенко С.В., Пудовкин М.И.* Вариации общей облачности в ходе всплесков солнечных космических лучей // Геомагнетизм и аэронаука. 1996. Т. 36. № 1. С. 153–156.
- ГОСТ ИСО 9.602-2005. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. М.: Стандартинформ, 2006.
- ГОСТ Р 51164-98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. М.: Госстандарт России, 1998.
- Дергачев В.А., Распопов О.М.* Долговременные процессы на Солнце, определяющие тенденцию изменения солнечного излучения и поверхностной земной температуры // Геомагнетизм и аэронаука. 2000. Т. 40. № 3. С. 9–14.
- Дмитриев А.А., Ломакина Т.Ю.* Облачность и рентгеновское излучение космоса // Эффекты солнечной активности в нижней атмосфере / Под ред. Л.Р. Ракиповой. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. С. 70–77.
- Иванов К.Г.* Корреляция между тропическими циклонами и магнитными бурями в 23-м цикле солнечной активности // Геомагнетизм и аэронаука. 2006. Т. 47. № 3. С. 394–398.
- Канайкин В.А., Матвиенко А.Ф.* Разрушения труб магистральных трубопроводов: современное представление о коррозионном растрескивании под напряжением. Екатеринбург: БИК, 1990. 190 с.
- Кондратьев К.Я., Ивлев Л.С.* Климатология аэрозолей и облачности. СПб.: Изд-во ВВМ, 2008. 555 с.
- Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф., Савиных В.П.* Перспективы развития цивилизации. Многомерный анализ. М.: Логос, 2003. 573 с.
- Кондратьев К.Я., Никольский Г.А.* Солнечная активность и климат. 1. Данные наблюдений. Конденсационная и озонная гипотезы // Исслед. Земли из космоса. 1995а. № 5. С. 3–17.
- Кондратьев К.Я., Никольский Г.А.* Солнечная активность и климат. 2. Прямое воздействие изменений внеатмосферного спектрального распределения солнечной радиации // Исслед. Земли из космоса. 1995б. № 6. С. 3–20.
- Красовский В.И.* Штили и штормы в верхней атмосфере. М.: Наука, 1971. 136 с.
- Крауклис В.Л., Никольский Г.А., Сафронова М.М., Шульц Э.О.* Об условиях возникновения аномальных особенностей аэрозольного ослабления ультрафиолетового излучения при высокой прозрачности атмосферы // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. № 3. С. 227–241.

- Лазарев А.И., Коваленок В.В., Авакян С.В. Исследование Земли с пилотируемых космических кораблей. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 399 с.
- Лазарев А.И., Коваленок В.В., Савиных В.П. Визуально-инструментальные наблюдения с “Салюта-6”. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 136 с.
- Муллаяров В.А., Козлов В.И., Григорьев Ю.М., Ромащенко Ю.А. Индуцированный в газопроводе ток от большого магнитного возмущения 21.01.05 // Наука и образование. 2006. Т. 1. № 41. С. 53–55.
- Наговицын Ю.А. Солнечная и геомагнитная активность на большой временной шкале: реконструкции и возможности для прогнозов // ПАЖ. 2006. Т. 32. № 5. С. 382–391.
- Никольский Г.А., Шульц Э.О. Спектрально-временные вариации остаточного ослабления в ближней ультрафиолетовой области спектра // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. № 9. С. 961–966.
- Нусинов А.А. Ионосфера как природный детектор для исследования долговременных изменений потоков солнечного геоэффективного излучения // Геомагнетизм и аэрномия. 2004. Т. 44. №6. С. 779–786.
- Огурцов М.Г. Вековая вариация в аэрозольной прозрачности атмосферы как возможное звено, связывающее долговременные изменения солнечной активности и климата // Геомагнетизм и аэрномия. 2007. Т. 47. № 1. С. 126–137.
- Петров Л.Н. Коррозия под напряжением. Киев: Вища школа, 1986. 142 с.
- Рокитянский Я.Г. Судьбоносные загадки нефтегазовой отрасли // Вестн. РАН. 2008. Т. 78. № 8. С. 704–711.
- Соколов С.Н. О связи изменений электронной концентрации в среднеширотной нижней ионосфере с интенсивностью кольцевого тока // Геомагнетизм и аэрномия. 1987. Т. 27. № 3. С. 388–392.
- Соколовский В.В. Кровеносная система российской экономики // Газовый бизнес. 2009. № 28–29. С. 68–69.
- Троицкий В.С., Стародубцев А.М., Бондарь Л.Н. и др. Поиск спорадического радиоизлучения из космоса на сантиметровых и дециметровых волнах // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16. № 3. С. 323–341.
- Avakyan S.V. Space solar patrol: absolute measurements of ionizing solar radiation // Adv. Space Res. 2006a. V. 37. № 2. P. 297–302.
- Avakyan S.V. Microwave ionospheric emission as a new factor of Solar-biosphere relations // Proc. 4th Int. Workshop Biological effects of electromagnetic fields. Crete. 2006b. P. 1513–1522.
- Avakyan S.V. Optics in the global changes of environment // Armenian J. Phys. 2009. V. 2. №. 1. P. 15–35.
- Avakyan S.V., Andreev E.P., Afanas'ev I.M., Leonov N.B., Savushkin A.V., Serova A.E., Voronin N.A. Creating of the permanent Space Patrol of ionizing solar radiation // Innovative Telescopes and Instrumentation for Solar Astrophysics / Eds. S.L. Keil, S.V. Avakyan. Proc. SPIE. 2002. V. 4853. P. 600–611.
- Avakyan S.V., Baranova L.A., Kuvaldin E.V., Leonov N.B., Savinov E. P., Savuyshkin A.V., Voronin N.A., Kovalenok V.V., Savinykh V.P., Pindurin V.F., Nikolenko A.D. Space Solar Patrol data and the weather-climate changes, including the global warming // Proc. 9th Int. Symp. Measurement Technology and Intelligent Instruments. ISTC Special Session. St.-Petersburg. Russia. 2009. P. 22–43.
- Avakyan S.V., Baranova L.A., Leonov N.B., Savinov E.P., Voronin N.A. Space Solar Patrol data and changes in weather and climate, including global warming // Measur. Sci. and Technol. 2010. V. 21. №. 8.085301. 15 p. doi: 10.1088/0957-0233/21/8/085301.
- Avakyan S.V., Voronin N.A. Condensation Process in the Low Atmosphere and Microwave Radiation of the Sun and Ionosphere // Proc. 6th Int. Conf. Problem of Geocosmos. 23–27 May 2006. St.-Petersburg: SPbSU, 2006. P. 24–29.
- Avakyan S.V., Voronin N.A. The ionospheric possible mechanism of warming and its influence today // Proc. 8th Int. Conf. “Problem of Geocosmos”, 20–24 September 2010. St.-Petersburg: SPbSU, 2010. P. 23–30.
- Bates D.R. Electron-ion recombination in an ambient molecular gas // J. Phys. B. 1981. V. 14. №. 18. P. 3525–3534.
- Benestad R.E. Solar Activity and Earth's Climate. Springer-Praxis, 2002. 287 p.
- Calder N. The carbon dioxide thermometer and the cause of global warming // Energy and Environm. 1999. V. 10. № 1. P. 1–7.
- Carslaw K.S., Harrison R.G., Kirkby J. Cosmic rays, clouds, and climate // Science. 2002. V. 298. P. 1732–1736. doi: 10.1126/science.1076964.
- Chilingaryan S., Chilingarian A., Danielyan V., Eppler W. The Aragats data acquisition system for highly distributed particle detecting networks // J. Physics: Conf. Ser. 2008. V. 119. №. 08. P. 9. doi: 10.1088/1742-6596/119/8/082001.
- de Jager C., Versteegh G.J.M., R. van Dorland R. Climate change scientific assessment and policy analysis. Scientific Assessment of Solar Induced Climate Change // Rep. 500102001. March 2006. 154 p.
- Detemmerman V. World Climate Research Programme. WCRP Strategic Framework for 2005–2015. Paris: WMO, 2005. 6 p.
- Feister U., Junk J., Woldt M. Long-term solar UV radiation reconstructed by Artificial Neural Networks (ANN) // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2008. V. 8. P. 453–488.
- Gummow R.A., Eng. P. GIC effects on pipeline corrosion and corrosion-control systems // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2002. V. 64. № 16. P. 1755–1764.
- Harrison R.G., Stephenson D.B. Empirical evidence for a nonlinear effect of galactic cosmic rays on clouds // Proc. Roy. Soc. A. 2005. V. 462. P. 1221–1233. doi: 10.1098/rspa.2005.1628.
- Kirkby J., Laaksonen A. Solar variability and clouds // Space Sci. Rev. 2000. V. 94. № 1/2. P. 397–403.
- Kristjansson J., Kristiansen J. Is there a cosmic ray signal in recent variations in global cloudiness and cloud radiative forcing? // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. P. 11851–11863.
- Kristjansson J.E., Kristiansen J., Kaas E. Solar activity, cosmic rays, clouds and climate – an update // Adv. Space Res. 2004. V. 34. № 2. 407–415.
- Krivova N.A., Balmaceda L., Solanki S.K. Reconstruction of solar total irradiance since 1700 from the surface magnetic flux // Astron. Astrophys. 2007. V. 467. P. 335–346. doi: 10.1051/0004-6361:20066725.
- Lean J. The Sun's variable radiation and its relevance for Earth // Ann. Rev. Astr. Astroph. 1997. V. 35. P. 33–67.

- Lean J.* Living with a variable Sun // *Phys. Today.* 2005. June. P. 32–38.
- Lockwood M., Frohlich C.* Recent oppositely directed trends in solar climate forcings and the global mean surface air temperature // *Proc. Roy. Soc. A.* 2007. doi: 10.1098/r5sspa.2007.1880.
- Marsh N., Svensmark H.* Cosmic rays, clouds, and climate // *Space Sci. Rev.* 2000. V. 94. № 1/2. C. 215–230.
- Mende W., Stellmacher R.* Solar variability and the search for corresponding climate signals // *Space Sci. Rev.* 2000. V. 94. № 1/2. C. 295–306.
- Palle E., Goode P.R., Montanes-Rodriguez P., Koonin S.E.* Changes in Earth's reflectance over the past two decades // *Science.* 2004. V. 304. P. 1299–1301.
- Palle E., Goode P.R., Montacés-Rodríguez P., Koonin S.E.* Can the Earth's albedo and surface temperatures increase together? // *EOS.* 2006. V. 87. № 4. P. 37, 43.
- Pirjola R.* Calculation of geomagnetically induced currents (GIC) in ground-based technological systems. In: COST 724 final report. Developing the scientific basis for monitoring, modeling and predicting Space Weather / Ed. J. Lilén, A. Belehaki, M. Messerotti, R. Vainio, J. Watermann, S. Poedt. 2008. P. 286–289.
- Pulkkinen T.I., Nevanlinna H., Pulkkinen P.J., Lockwood M.* The Sun-Earth connection in time scales from years to decades and centuries // *Space Sci. Rev.* 2001. V. 95. № 1/2. P. 625–637.
- Rodgers D.J., Murphy L.M., Dyer C.S.* Benefits of a European Space Weather Programme. 2000. ESWPS-DER-TN-0001. V. 2.1. 35 p.
- S.E.C. User Notes. 2000. № 28. 7 p.
- Scafetta N., Willson R.* ACRIM-gap and Total Solar Irradiance (TSI) trend issue resolved using a surface magnetic flux TSI proxy model // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. № L05701. doi: 10.1029/2008GL036307.
- Steinhilber F., Beer J., Frohlich C.* Total solar irradiance during the Holocene // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. № L19704. doi: 10.1029/2009GL040142.
- Stozhkov Yu.I., Svirzhevsky N.S., Bazilevskaya G.A., Kvashnin A.N., Makhmutov V.S., Svirzhevskaya A.K.* Long-term (50 years) measurements of cosmic ray fluxes in the atmosphere // *Adv. Space Res.* 2008. V. 42. № 1. P. 978–985.
- Svensmark H.* Cosmoclimatology: a new theory emerges // *Astron. Geophys.* 2007. V. 48. № 1. P. 18–24.
- Svensmark H., Pedersen J.O.P., Marsh N.D., Enghoff M.B., Uggerhøj U.I.* Experimental evidence for the role of ions in particle nucleation under atmospheric conditions // *Proc. R. Soc. A.* 2007. V. 463. P. 385–396. doi: 10.1098/rspa.2006.1773.
- Tsushima Y., Emori S., Ogura T., Kimoto M., Webb M.J., Williams K.D., Ringer M.A., Soden B.J., Li B., Andronova N.* Importance of the mixed-phase cloud distribution in the control climate for assessing the response of clouds to carbon dioxide increase – a multi-model study // *Clim. Dynamics.* 2006. V. 27. P. 113–126.
- Usoskin I.G., Kovaltsov G.A.* Cosmic rays and climate of the Earth: possible connection // *C.R. Geosci.* 2008. V. 340. P. 441–450.
- Willson R., Mordvinov A.* Secular solar irradiance trend during solar cycles 21–23 // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. doi:10.1029/2002GL016038.
- Woods T.N., Eparvier F.G., Bailey S.M., et al.* Solar EUV Experiment (SEE): Mission overview and first results // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. № A01312. doi: 10.1029/2004JA010765.
- Yu F., Turco R.P.* From molecular clusters to nanoparticles: role of ambient ionization in tropospheric aerosol formation // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. № D5. P. 4797–4814.

The Role of Space and Ionospheric Disturbances in the Global Climate Change and Pipeline Corrosion

S. V. Avakyan, N. A. Voronin

All-Russian Scientific Center S.I. Vavilov State Optical Institute, St. Petersburg

The study of the physical causes of the influence of the main factors of space on the state of the ionosphere and then to the weather and climate characteristics, including global warming is presented. The basis of this research – proposed by the authors Rydberg excitation-by the fast ionospheric electrons experimentally observed microwave radiation the Earth's ionosphere, which is almost free to penetrate into the lower atmosphere, providing channels of influence of solar variability on terrestrial phenomena. Analyzed the reasons for abnormal wear out of the Russian pipeline system and describes ways to reduce their rapid corrosion due to accounting effects geliogeomagnetic and ionospheric disturbances. In support of these studies proposed a space experiment on permanent monitoring of the determining factors geliogeomagnetic activity: fluxes of ionizing radiation from the Sun and the fluxes of electrons precipitated from the radiation belts, using the created at the S.I. Vavilov State Optical Institute optoelectronic spectroradiometric devices of new generation, "Space Solar Patrol".

Keywords: microwave emission from ionosphere, Rydberg excitation, weather and climate characteristics, geliogeomagnetic activity, corrosion of gasoilpipelines

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ВАРИАЦИИ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ ИОНОСФЕРНОГО СЛОЯ F2
ПО ДАННЫМ ТОМОГРАФИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА

© 2011 г. Л. Б. Ванина-Дарт^{1*}, А. А. Романов², Е. А. Шарков¹

¹ Учреждение Российской академии наук Институт космических исследований РАН, Москва

² ОАО Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем, Москва

* E-mail: vandart@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 16.06.2010 г.

В работе анализируются данные томографического зондирования, которое проводилось в ноябре 2007 г. над тремя пунктами, расположенными на одном меридиане: Южно-Сахалинск (47° с.ш., 143° в.д.), Поронайск (49° с.ш., 143° в.д.) и Ноглики (52° с.ш., 143° в.д.) в поиске возможного влияния тропического циклона (ТЦ) на верхнюю ионосферу. Использование метода ионосферной томографии на базе сигналов низкоорбитальных спутниковых навигационных систем позволяет выявлять вариации ионосферных параметров, вызванных распространением сильных циклонов в тропосфере Земли, чего принципиально нельзя достигнуть только с использованием глобальных спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Полученные результаты свидетельствуют о том, что после нескольких суток действия ТЦ наблюдается понижение значений критической частоты слоя F2 на расстоянии около 3000 км от очага возмущения по горизонтали (в долготном направлении). Также вблизи зоны действия ТЦ (по долготе) и на протяжении 1–2 сут может наблюдаться повышение значений f_oF2 . Сложности морфологического анализа данного явления заключаются в том, что ТЦ является “широкополосным” и длительно действующим источником возмущения.

Ключевые слова: взаимодействие слоев, ионосфера, тропический циклон, томографическое зондирование, критическая частота слоя F2, ионосферная радиотомография, низкоорбитальные навигационные спутниковые системы

ВВЕДЕНИЕ

Атмосферно-ионосферное взаимодействие является одним из самых интересных и перспективных прикладных направлений в геофизике. Ионосфера Земли моментально реагирует на изменения со стороны падающего космического излучения, а также со стороны состава нейтральной атмосферы. Отклонения в поведении параметров ионосферы обнаруживаются вследствие как литосферно-магнитосферных (землетрясения, вулканы), так и атмосферных явлений (грозы, циклоны, шквалы, ураганы и т.д.). А в последнее время много внимания уделяется такому очень важному тропосферному явлению, как тропический циклон (ТЦ). Точки зрения о возможном влиянии этого явления на ионосферу расходятся. Если в одних работах авторы находят возможный отклик ТЦ в нижней (Михайлов и др., 2005; Ванина-Дарт и др., 2007а; Ванина-Дарт и др., 2007б; Бондур и др., 2008а; Бондур и др., 2008б), верхней (Bauer, 1957; Bauer, 1958; Shen, 1982) или даже во внешней ионосфере (Mikhailova et al., 2002), то, например, в работе (Афраймович и др., 2008) результат отрицателен. Стоит отметить, что исследования в этом направлении ведутся более 60 лет (Gherzi, 1950). Они сопряжены с большими

сложностями доказательства действия гипотетически предложенных механизмов воздействия ТЦ на ионосферу. ТЦ являются самыми мощными тропосферными катастрофами, которые могут формировать принципиально иные (“быстрые”) механизмы. Последние связаны с мощными выбросами заряженных частиц и нейтралов и излучением акустогравитационных и низкочастотных электромагнитных волн из центральных зон ТЦ на значительные высоты и расстояния от ТЦ.

Впервые идеи о том, что исследования взаимодействия ТЦ с системой “океан–атмосфера” не могут ограничиваться тропосферой и должны базироваться на рассмотрении крупномасштабного кризисного состояния как глобального явления, затрагивающего различные геофизические среды, начиная с океанической поверхности и тропосферы и кончая ионосферой и магнитосферой, были высказаны в 1996 г. сотрудниками Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) (Балбанов и др., 1996). Изучение кинематических, термодинамических и электродинамических связей между элементами системы “океан–тропосфера–ионосфера–магнитосфера” в кризисных состояниях, несомненно, должно явиться важнейшей компо-

нентой космических исследований. В настоящее время предпринимаются попытки организации комплексных исследований при помощи ракетного, радиолокационного ионосферного зондирования и оптических съемок собственного (ночного) излучения верхней атмосферы с поверхности Земли и со специализированных космических аппаратов (КА) (Шарков, 2010).

В работах (Ванина-Дарт и др., 2007а, Ванина-Дарт и др., 2007б; Ванина-Дарт и др., 2008) представлены результаты комплексной обработки данных ракетного зондирования экваториальной нижней ионосферной области с ракетного полигона “Тумба” (Индия) в районе действия сильных тропосферных вихревых возмущений – ТЦ. На основе синхронного анализа серии ракетных измерений электронной концентрации и термодинамических параметров нижней ионосферы в экваториальной области, а также дистанционных данных по тропическому циклогенезу в северной части Индийского океана был впервые зарегистрирован экспериментальный факт понижения N_e в области D на расстоянии около 1000 км (по горизонтали) от ядра ТЦ, действующего в активной фазе (Ванина-Дарт и др., 2008). Наибольшего понижения N_e , в среднем в 3–4 раза, достигает на высотах 71 ± 3 км. При этом нижняя граница слоя D поднималась на несколько километров (не более пяти). В работе был предложен вариант гипотетического физического механизма “быстрых” взаимодействий тропосферных возмущений с состоянием ионосферы – внутренние гравитационные волны (ВГВ), порождаемые ТЦ.

Принципиально иной подход для верхней ионосферы рассматривается в работе (Черниговская и др., 2008). Были проанализированы короткопериодные (порядка десятков минут, часов) временные вариации максимальных наблюдаемых частот (МНЧ) сигналов наклонного радиозондирования вдоль среднеширотной трассы Магадан–Иркутск (средняя точка трассы находится южнее Якутска) для сентября месяца 2005–2007 гг. Проведенный анализ выявил временные интервалы с повышенной энергетикой короткопериодных колебаний характерной формы (волновой пакет), которые можно интерпретировать как проявление крупномасштабных перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), источниками которых являются ВГВ с периодами 1–5 ч.

В настоящей работе авторы попытались продолжить поиск возможного ионосферного отклика ТЦ, но уже в верхней ионосфере (предыдущие работы были посвящены поиску в области D). Используемые данные были получены методом фазоразностной томографии. Отличительной особенностью метода ионосферной томографии на базе сигналов низкоорбитальных навигационных систем является возможность выявления вариаций электронной концентрации, вызванных, например, распространением сильных циклонов в тропосфере Земли, чего принципиально нельзя достигнуть только с использованием глобальных спутниковых навигаци-

онных систем ГЛОНАСС и GPS. В отличие от фазовой томографии, где интегральной величиной является полная фаза, фазоразностный метод более чувствителен к относительно малым неоднородностям электронной концентрации, которые вносят незначительный вклад в фазу, и более существенный – в ее производную.

Цель данной работы – поиск возможного влияния ТЦ на верхнюю ионосферу на основе томографических данных, полученных на о. Сахалин за 2007 г. Наблюдения проводились над тремя пунктами, расположенными на одном меридиане (143° в.д.): Южно-Сахалинск (47° с.ш., 143° в.д.), Поронайск (49° с.ш., 143° в.д.) и Ноглики (52° с.ш., 143° в.д.).

БАЗА ДАННЫХ И МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Описание метода

Теоретической основой лучевой РТ-радиотомографии являются известные соотношения (Андреева и др., 1992; Куницын и др., 2007) для фаз и амплитуд радиоволн в приближении геометрической оптики.

Следующая пара равенств определяет линейные интегралы от распределений электронной концентрации N_e и эффективной частоты соударений ν :

$$\begin{aligned} \phi &= \lambda r_e \int N_e d\sigma, \\ \chi &= -\frac{\lambda r_e}{\omega} \int N_e \nu d\sigma \end{aligned} \quad (1)$$

где λ – длина зондирующей волны; r_e – классический радиус электрона; $w = kc$, k – волновое число в свободном пространстве; c – скорость света; $\int d\sigma$ – символ интегрирования по пути распространения сигналов. Линейными интегралами здесь являются разность фаз $\phi = \Phi_0 - \Phi$ и уровень χ – логарифм соотношения амплитуд сигналов $\chi = \ln(A/A_0)$ измеряемого поля ($E = A_0 \exp(i\Phi)$) и поля зондирующей волны ($E = A_0 \exp(i\Phi_0)$).

В процессе исследований измеряется линейный интеграл вида (1), умноженный на константу порядка единицы (Куницын и др., 2007), связанную с пересчетом фазы с одной частоты на другую. Основная возникающая трудность по определению этого интеграла состоит в том, что величина фазы весьма велика. Для характерных значений $N_e \sim 10^{12} \text{ м}^{-3}$, $\lambda = 2$ м и длин луча в ионосфере порядка тысячи километров ϕ составляет тысячи радиан.

Отсюда возникает проблема выделения начальной фазы, остающейся постоянной в течение сеанса радиопросвечивания $\phi_0 = 2\pi l$, которую необходимо прибавить к измеряемой (в пределах 2π) $\Delta\phi$ и получить абсолютную (полную) $\phi = \phi_0 + \Delta\phi$ или ли-

нейный интеграл (1) (Андреева и др., 1992; Куницын и др., 2007).

Для решения проблемы неизвестной начальной фазы авторами (Андреева и др., 1992; Куницын и др., 2007) был предложен метод фазоразностной томографии, суть которого состоит в использовании в качестве интегральной характеристики производной фазы df/dt (которая, очевидно, не содержит неизвестную константу, соответствующую начальной фазе сигнала). В отличие от фазовой томографии, где интегральной величиной является полная фаза, фазоразностный метод является более чувствительным к относительно малым неоднородностям электронной концентрации, которые вносят незначительный вклад в фазу, и более существенный – в ее производную. В реконструкциях поля электронной концентрации, выполненных с использованием метода фазовой томографии, не проявляются детали, размером менее нескольких сотен километров, в то время как фазоразностная томография позволяет хорошо восстанавливать структуру размером 100 км и величиной электронной концентрации 4–6% от концентрации максимума (Андреева и др., 1992; Куницын и др., 2007). Таким образом, метод фазоразностной томографии является наиболее точным и эффективным для реконструкции распределения электронной концентрации в ионосфере (Андреева и др., 1992; Куницын и др., 2007; Романов и др., 2008).

Математическая постановка задачи подразумевает дискретизацию набора интегралов вида (1) и последующее решение системы линейных уравнений (СЛУ) $Ax = b$, где A – матрица проекционного оператора, b – вектор измеренных значений и x – вектор восстанавливаемых значений электронной концентрации.

Оценку разрешающей способности метода фазоразностной томографии ионосферы без учета эффектов рефракции зондирующих сигналов можно провести в соответствии с работой (Куницын и др., 2007), из рассмотрения модельной задачи распространения в параболическом по высоте слое ионосферы

$$N_{e_0} = N_{e_m} \left(1 - \frac{(h - h_m)^2}{y_m^z} \right), \quad (2)$$

где y_m – полутолщина, а h_m и N_{e_m} – высота и максимум электронной концентрации слоя ионосферы.

В соответствии с решением лучевых уравнений (Куницын и др., 2007), величина смещения траектории $\Delta\tau$ и отклонения траектории Δh от прямой с углом θ_0 к вертикали

$$\Delta\tau \cong \frac{y_m \operatorname{tg} \theta_0}{3 \cos^2 \theta_0} \left(\frac{f_0}{f} \right)^2, \quad \Delta h \cong \frac{y_m}{3 \cos^2 \theta_0} \left(\frac{f_0}{f} \right)^2, \quad (3)$$

где $f_0 = \sqrt{(r_e N_{e_m} c^2) / (3 \cos^2 \theta_0)}$ – критическая частота заданного параболического слоя, f – частота зондиро-

вания. При $f_0 = 5\text{--}10$ МГц, $f = 150$ МГц, $y_m = 150$ км, $0 \leq \theta_0 \leq 80^\circ$, $\Delta\tau \approx 5\text{--}25$ км, тогда как $\Delta h \approx 1\text{--}5$ км.

В соответствии с приведенными выше оценками и соотношениями (3), с использованием метода ионосферной томографии на базе сигналов низкоорбитальных навигационных систем можно восстановить вертикальное распределение N_e вдоль трассы пролета спутника с разрешением не менее $\Delta\tau \times \Delta h = 20 \times 10$ км. Следовательно, появляется возможность выявления вариаций N_e ионосферы, вызванных распространением сильных циклонов в тропосфере Земли, чего принципиально нельзя достигнуть только с использованием глобальных спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS.

Результаты численного моделирования реконструкции распределения электронной концентрации в ионосфере

Для оценки качества тематической обработки данных радиопросвечивания с использованием предложенной методики (Урличич и др., 2006) были проведены реконструкции модельного распределения электронной концентрации в ионосфере с помощью разработанного программно-математического комплекса (Романов и др., 2008) для условий, идентичных реальной геометрии эксперимента, описанной в работах (Романов и др., 2008; Урличич и др., 2006).

Ошибки реконструкции оценивались путем расчета невязки между исходной и восстановленной функциями и определялись следующими соотношениями:

$$\delta_2 = \frac{\sqrt{\sum_i (F_i - \tilde{F}_i)^2}}{\sqrt{\sum_i F_i^2}}; \quad \delta_m = \frac{\max_i |F_i - \tilde{F}_i|}{\max_i |F_i|},$$

где F – значение исходной и \tilde{F} – значение восстановленной функции.

Результаты исследования показали, что при реконструкции модельного распределения, описывающего возмущенное состояние ионосферы (наличие неоднородностей и горизонтального градиента электронной концентрации), ошибки восстановления значений электронной концентрации характеризуются величинами $\delta_2 = 0.08$ и $\delta_m = 0.10$ и уменьшаются по мере упорядочения структуры ионосферы.

Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования качества функционирования разработанной системы сбора и обработки данных радиопросвечивания ионосферы проводились с использованием сети приемных установок, расположенных на о. Сахалин.

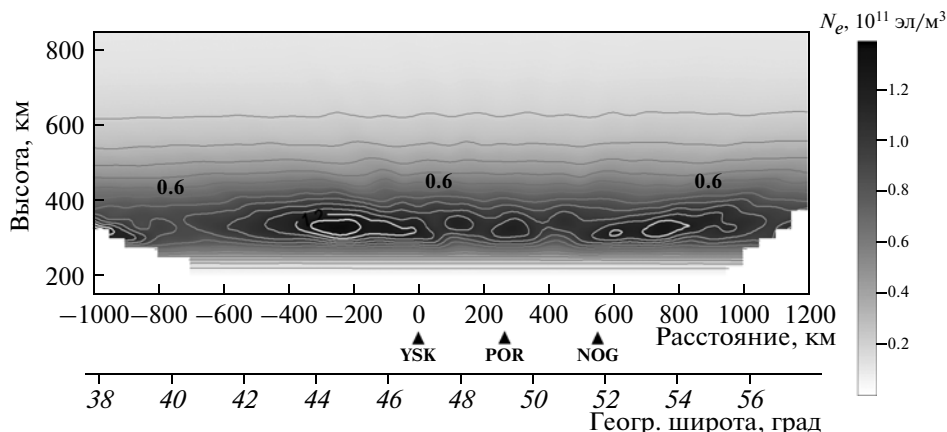


Рис. 1. Распределение электронной концентрации 29.07.2007 г. (00:30 LT) в районе о. Сахалин: YSK – пункт Южно-Сахалинск; POR – пункт Поронайск; NOG – пункт Ноглики.

Результаты работы системы сбора и обработки данных радиопросвечивания ионосферы представляют собой высотно-широтное распределение электронной концентрации (рис. 1). На рис. 2 представлены результаты сравнения данных, полученных ионозондом Вакканай (Wakkanai), расположенным на о. Хоккайдо, в 150 км к югу от томографической цепочки, с данными, полученными в результате работы программно-математического комплекса.

При анализе использовались данные 90 реконструкций, 50 из которых были получены в июле–августе 2007 г. и 40 – в январе 2008 г. Для сопоставления с данными ионозонда максимальные значения электронной концентрации в районе расположения ионозонда пересчитывались в значения критической частоты f_oF2 .

Показано хорошее соответствие результатов определения f_oF2 , средняя невязка составила 15%, $\delta_2 = 0.13$. Коэффициент корреляции между двумя рядами данных $R = 0.84$. Эти результаты хорошо согласуются с оценками точности реконструкции электронной концентрации на основе данных ионозондов, полученными в независимых исследованиях ($\delta_2 = 0.9–0.11$) (Куницын и др., 2007).

Независимые оценки были получены с применением фазоразностного подхода и без использования автоматизированной методики обработки. Согласованность этих результатов свидетельствует о том, разработанная методика позволяет в автоматизированном режиме восстанавливать распределение электронной концентрации в ионосфере с точностью, характерной для метода фазоразностной томографии.

АНАЛИЗ ДАННЫХ ТОМОГРАФИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗА НОЯБРЬ 2007 г.

Анализ ионосферных данных является многопараметрической задачей. Электронная концентрация в области F2 зависит от интенсивности падаю-

щего коротковолнового излучения (в основном в освещенные часы) и корпускулярного (в основном ночью), зенитного угла Солнца (что связано со временем суток), сезона, гелиогеомагнитной обстановки и др. параметров. Учитывая положение о. Сахалин, мы должны иметь также информацию о сейсмической активности (в целях устранения фактора влияния землетрясений на верхнюю ионосферу в нашем случае). В последние десятилетия уделялось много внимания взаимодействию слоев литосфера–атмосфера–ионосфера, и было доказано, что процессы в литосфере оказывают электродинамическое воздействие на ионосферу. Так, например, в работах (Гохберг и др., 1983; Гохберг, Шалимов, 2008; Липеровский и др., 1992; Пулинец и др., 1998; Смирнов, 2001; Pulinets, Boyarchuk, 2004) перечис-

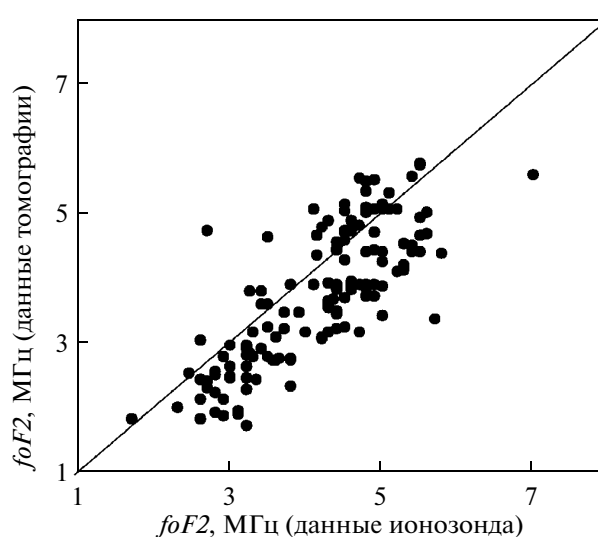


Рис. 2. Сопоставление значений критической частоты f_oF2 , полученных в результате томографии ионосферы с данными ионозонда Вакканай.

Таблица 1. Гелиогеомагнитная обстановка на время проведения томографического зондирования

Дата измерения N_e	Время измерения N_e , UT	$F_{10.7}$	Dst , нТ	Kp
05.11.2007	02:25	66	-2	1
07.11.2007	03:50	67	0	0
	21:17		2	
08.11.2007	23:06	68	5	то же
	02:05		8	
11.11.2007	03:24	то же	11	»
	01:45		-1	
	02:57		-2	

Таблица 2. Данные о ТЦ, которые находились вблизи от места и на дату (или около) проведения томографического зондирования

Дата измерения N_e	Данные о ТЦ				
	Широта, град	Долгота, град	Время, мм/дд/чч (UT)	Скорость ветра, узел	Стадия ТЦ
05.11.2007	16.80	122.5	11/04/12	33	T-1
07.11.2007	18.00	116.2	11/07/06	то же	то же
08.11.2007	16.80	114.1	11/08/00	21	TS
11.11.2007	20.00	139.9	11/11/06	15	TD

лены основные характеристики ионосферных предвестников сильных землетрясений.

Для обнаружения возможного “чистого” эффекта влияния ТЦ на ионосферу было решено отбросить данные с наличием сейсмических событий и представить для анализа в настоящей работе только те серии съемок, при которых в области приемных установок радиопросвечивания ионосферы длительное время отсутствовали землетрясения. На сайте www.sakhmeteo.ru Сахалинской Гидрометеослужбой представлены сейсмические данные, которые использовались в настоящей работе. В ноябре 2007 г. землетрясения в районе о. Сахалин отсутствовали. С учетом этого фактора авторы рассмотрели четыре серии съемок, которые были проведены в первой половине ноября 2007 г. В табл. 1 представлены информация о гелиогеомагнитной обстановке для этих серий томографического зондирования, а также индекс солнечной активности $F_{10.7}$, индексы геомагнитной активности Dst и Kp для каждой съемки. Как видно из таблицы, обстановка для данных моментов времени была очень спокойной, соответственно влиянием со стороны гелиогеомагнитной активности на изменение области F2 можно пренебречь.

В табл. 2 представлены географическое положение, скорость ветра и стадия ТЦ, расположенных наиболее близко к о. Сахалин, а также указано время проведения сбора данных о ТЦ. Более полную информацию об этих ТЦ можно найти по адресу <http://weather.unisys.com/hurricane/>. Мы же выбра-

ли ту часть информации, которая является более интересной и значимой.

Для анализа мы взяли данные за 5, 7, 8 и 11 ноября 2007 г. В эти дни в западной части Тихого океана действовали два ТЦ. Информация о них представлена в табл. 3 и 4. Все съемки томографического зондирования были проведены в один сезон, когда землетрясения в районе о. Сахалин отсутствовали долгое время. Также 5, 8 и 11 ноября можно пренебречь зависимостью N_e от положения Солнца – съемки проводились около местного полдня. Безусловно, сопоставлять результаты было бы корректнее в полночь, поскольку процесс дневной ионизации (в основном зависит от излучения Солнца в КВ-диапазоне) во много раз менее чувствительный к помехам со стороны других источников ионизации. В качестве исследуемого параметра был выбран параметр f_oF2 – критическая частота слоя F2. Как известно, f_oF2 является наиболее высокой частотой, отраженной от ионосферного слоя F2 при вертикальном зондировании. Ее значение связано простым выражением с $N_{e\max}$ – максимальным значением электронной концентрации в слое F2: $f_oF2 = 9 (N_{e\max})^{1/2}$, где электронная концентрация измеряется в m^{-3} , а частота в Гц (Брасье и Соломон, 1987).

Были получены следующие морфологические результаты в диапазоне широт 45° – 53° с.ш. (был выбран именно этот диапазон, поскольку он покрывает все серии четырех съемок).

5 ноября 2007 г. съемка происходила с интервалом 1 ч 25 мин (рис. 3). В диапазоне широт 45° – 53° с.ш.

Таблица 3. Данные о прохождении ТЦ 1–10 ноября 2007 г. над акваторией Западного Тихого океана

№ п/п	Широта, град	Долгота, град	Время, мм:дд:чч (UT)	Скорость ветра, узел	Стадия ТЦ
1	17.70	132.90	11:01:18	15	ТД
2	18.00	132.60	11:02:00	то же	то же
3	18.30	132.30	11:02:06	20	»
4	18.50	131.40	11:02:12	15	»
5	18.80	130.50	11:02:18	20	»
6	18.40	129.60	11:03:00	то же	»
7	18.20	128.50	11:03:06	25	»
8	18.10	127.20	11:03:12	35	ТШ
9	17.50	126.10	11:03:18	45	то же
10	17.00	124.90	11:04:00	50	»
11	16.80	123.60	11:04:06	60	»
12	16.80	122.50	11:04:12	65	Т-1
13	17.20	120.90	11:04:18	то же	то же
14	17.50	120.00	11:05:00	55	ТШ
15	17.60	119.60	11:05:06	то же	то же
16	17.70	119.20	11:05:12	»	»
17	18.00	118.80	11:05:18	60	»
18	18.40	118.60	11:06:00	70	Т-1
19	18.60	118.40	11:06:06	75	то же
20	18.70	118.20	11:06:12	то же	»
21	18.50	117.70	11:06:18	»	»
22	18.30	117.10	11:07:00	70	»
23	18.00	116.20	11:07:06	65	»
24	17.60	115.40	11:07:12	55	ТШ
25	17.30	114.70	11:07:18	50	то же
26	16.80	114.10	11:08:00	40	»
27	16.30	113.40	11:08:06	35	»
28	15.80	112.80	11:08:12	то же	»
29	14.80	112.20	11:08:18	»	»
30	13.70	111.60	11:09:00	30	ТД
31	12.60	111.40	11:09:06	25	то же
32	12.20	111.10	11:09:12	то же	»
33	11.80	110.30	11:09:18	»	»
34	11.50	109.60	11:10:00	20	»
35	11.50	108.50	11:10:06	то же	»

параметр f_oF2 изменялся как в 12:25 LT (местное время), так и в 13:50 LT, со средними значениями 5.04 и 3.98 МГц. Максимумы были зарегистрированы со значением 5.47 МГц (в 12:25 LT) и 4.09 МГц (в 13:50 LT). Коэффициент корреляции между измере-

ниями двух серий в указанном широтном диапазоне $R = 0.38$ (количество измерений – 18). Также на рис. 3 представлены модельные широтные зависимости f_oF2 (сплошная линия соответствует времени 12:25 LT, штриховая линия – 13:50 LT). Модельные

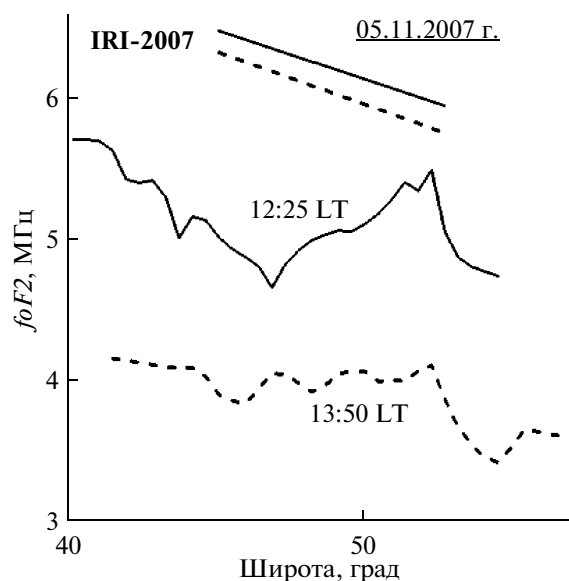


Рис. 3. Широтная зависимость критической частоты $foF2$, измеренной 5 ноября 2007 г. над о. Сахалин.

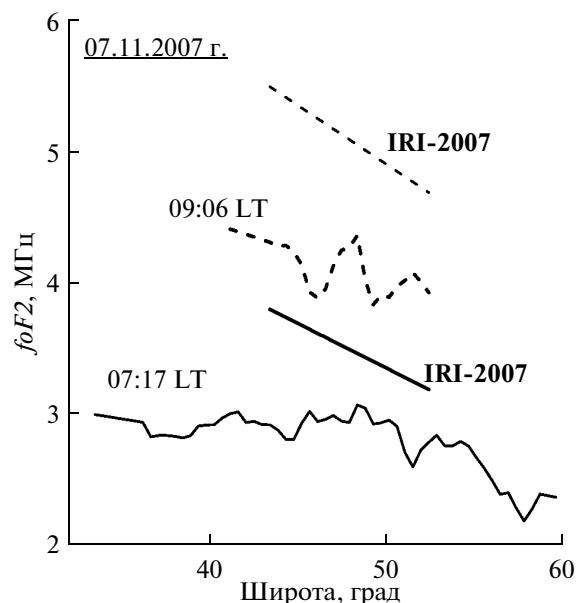


Рис. 4. Широтная зависимость критической частоты $foF2$, измеренной 7 ноября 2007 г.

линии были построены с помощью международной ионосферной модели IRI-2007 (http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri_vitmo.html).

7 ноября 2007 г. (рис. 4) съемка происходила с интервалом 1 ч 49 мин. В диапазоне широт 45° – 53° с.ш. $foF2$ претерпевала изменения со средними значениями 2.90 и 4.03 МГц. Максимумы были зарегистрированы со значением 3.07 МГц (в 07:17 LT) и 4.35 МГц (в 09:06 LT). $R = 0.16$ (количество измерений – 17).

8 ноября 2007 г. (рис. 5) съемка происходила с интервалом 1 ч 19 мин. В диапазоне 45° – 53° с.ш. критическая частота слоя F2 изменялась как в 12:05 LT, так и в 13:24 LT со средними значениями 5.33 МГц и 4.63 МГц. Максимумы были зарегистрированы со значением 5.74 МГц (в 12:05 LT) и 5.0 МГц (в 13:24 LT). $R = 0.94$ (количество измерений – 18).

11 ноября 2007 г. (рис. 6) съемка происходила с интервалом 1 ч 12 мин. В диапазоне широт 45° – 53° с.ш. $foF2$ изменялась как в 11:45 LT, так и в 12:57 LT со средними значениями 5.25 и 4.81 МГц. Максимумы

Таблица 4. Данные о прохождении ТЦ 9–12 ноября 2007 г. над акваторией Западного Тихого океана

№ п/п	Широта, град	Долгота, град	Время, мм:дд:чч (UT)	Скорость ветра, узел	Стадия ТЦ
1	16.30	147.70	11:09:06	15	ТД
2	17.00	146.00	11:09:12	то же	то же
3	17.50	144.60	11:09:18	»	»
4	18.00	143.40	11:10:00	»	»
5	18.50	142.20	11:10:06	»	»
6	18.90	141.40	11:10:12	»	»
7	19.40	140.60	11:10:18	25	»
8	19.70	140.20	11:11:00	то же	»
9	20.00	139.90	11:11:06	30	»
10	20.40	139.90	11:11:12	то же	»
11	21.20	140.60	11:11:18	35	ТШ
12	22.20	142.00	11:12:00	то же	то же
13	23.20	143.60	11:12:06	»	»
14	24.10	146.00	11:12:12	»	»
15	26.40	149.70	11:12:18	25	ТД

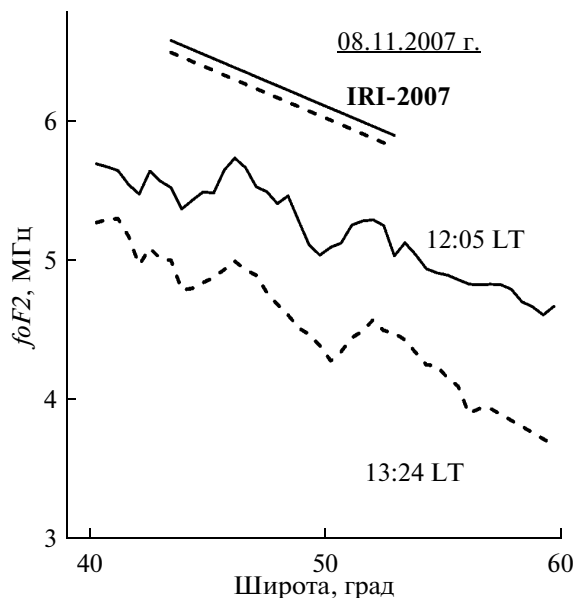


Рис. 5. Широтная зависимость критической частоты $foF2$, измеренной 8 ноября 2007 г.

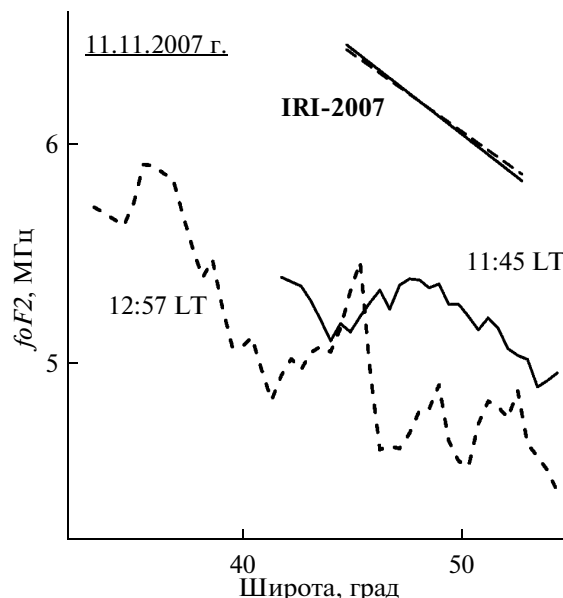


Рис. 6. Широтная зависимость критической частоты $foF2$, измеренной 11 ноября 2007 г.

мы были зарегистрированы со значением 5.39 МГц (в 11:45 LT) и 5.46 МГц (в 12:57 LT). $R = 0.26$ (количество измерений – 18).

Как видно из рис. 3, 5, 6, расхождение между двумя экспериментальными кривыми проведенной съемки больше рассчитанного по модели. Особенно велико расхождение 5 ноября 2007 г. (рис. 3), а 11 ноября 2007 г. (рис. 6) оно наименьшее. Сами же значения параметра $foF2$, полученные в эксперименте, меньше соответственно рассчитанных значений по модели.

На рис. 7 представлены зависимости параметра $foF2$ (измеренного около местного полудня) от широты для 5, 8, 11 ноября 2007 г. Как мы отмечали выше, кривая, полученная в 13:50 LT 5 ноября 2007 г., сильно отличается от других (примерно в 1.5 раза меньше по значению). Это является интересным фактом, поскольку уже были работы, в которых отмечалось понижение параметра $foF2$, отождествлявшееся с влиянием ТЦ. Отметим, что 5 ноября 2007 г. ТЦ в стадии 1 локализовался приблизительно на 30° южнее и на 20° западнее от места получения экспериментальных данных в горизонтальной проекции над о. Сахалин. Также стоит отметить, что практически за полтора часов интервал съемок критическая частота слоя F2 достигла максимального различия в 1.35 раза в районе 51.5° с.ш. и минимального в 1.15 раза в районе 47° с.ш. На рис. 6 и 7 также является интересным факт явного возмущения (“вздутия”), зафиксированного 11 ноября 2007 г. Съемка, как отмечалось выше, проходила с интервалом чуть более 1 ч. При этом критическая частота, полученная в первой серии в 11:45 LT, несколько ($\leq 10\%$) превышала значения от 47° с.ш. до 54° с.ш. с максимумом на 48° с.ш., по сравнению со второй

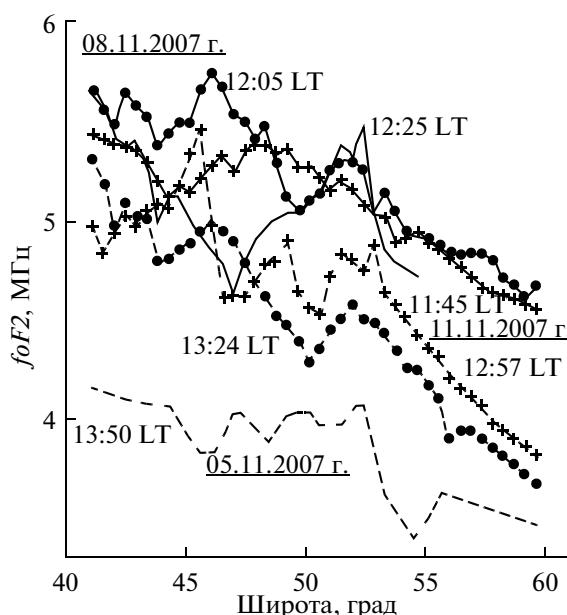


Рис. 7. Сравнение широтных зависимостей критической частоты $foF2$, измеренной 5, 8, 11 ноября 2007 г. над о. Сахалин.

серией, полученной в 12:57 LT. В серии за 12:57 LT выделяются три отчетливых максимума на широте 45° , 50° и 53° с.ш. Также является примечательным факт еще одного большого максимума в районе 36° с.ш., что, скорее всего, является фактом распространения возмущения с юга. А ведь 11 ноября 2007 г. ТЦ в стадии депрессии практически подошел с запада к меридиану зоны съемок и находился на 25° – 30° южнее. Еще раз стоит напомнить, что наблюдения

велись на одном меридиане, т.е. мы наблюдаем широтную зависимость, которая выражается в виде разнопериодных колебаний параметра $foF2$. В таком меридиональном разрезе максимальный эффект возмущения параметра $foF2$, распространяющегося с запада на восток (или наоборот), мы можем ожидать в виде расхождений между кривыми одной съемки, когда коэффициент корреляции между измерениями двух серий близок к единице (как, например, на рис. 5, для 8 ноября 2007 г.).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На всех представленных рис. 3–6 видно, что значения экспериментальных данных ниже рассчитанных модельных (IRI-2007) значений. Это может иметь связь либо с систематической ошибкой метода, либо с несовершенностью данной модели.

Как было отмечено выше, наиболее интересными являются результаты, полученные 5 и 11 ноября 2007 г. Из табл. 4 видно, что 5 ноября 2007 г. ТЦ находился в стадии тропического шторма, но менее чем за сутки – в стадии ТЦ-1 (около 121° в.д.). Также следует учесть, что данный ТЦ зарождался на 133° в.д.

Занижение значений (отбросив систематическую ошибку измерений) параметра $foF2$, полученного экспериментально, является далеко неслучайным. На рис. 3 показано, что в 13:50 LT 5 ноября 2007 г. критическая частота слоя F2 была меньше предполагаемого приблизительно в 1.35 раза. В работе (Tian et al., 2009) было показано, что после суток над зоной прохождения ТЦ электронная концентрация падает. Также в работе (Ванина-Дарт и др., 2008) наблюдалось понижение N_e где-то через сутки до начала действия ТЦ и на расстоянии около 1000 км (по горизонтالي) от ядра ТЦ.

Напротив, мы имеем повышение значений $foF2$ (широтное “вздутие”) в 11:45 LT от 45° до 55° с.ш. и очень неравномерный ход в 12:57 LT (рис. 6). 11 ноября ТЦ находился в стадии тропической депрессии на долготе 140° в.д. (а зарождался на 147° в.д.), т.е. по долготе ТЦ подошел достаточно близко к наблюдательным пунктам над о. Сахалин. Эти результаты также согласуются с работами авторов (Tian et al., 2009). Хотя авторы этой работы считают, что понижение или повышение полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере зависит от положения ТЦ в период пересечения береговой суши (если рассматривать трек ТЦ в горизонтальной проекции по отношению к Земле). Их основной вывод заключается в следующем: до “приземления” тайфуна значение ПЭС выше ежемесячного медианного значения ПЭС, но после “приземления” ТЦ становится значительно ниже, достигая минимума через сутки. Наблюдения рассматривались строго над зоной самого ТЦ.

В нашем случае из представленных серий съемок мы имеем только один случай, когда ТЦ действительно пересекал материк за сутки до наблюдения ионосферных параметров, 5 ноября 2007 г., но это

было на 20° западнее от места съемок. Связывать понижение электронной концентрации с “приземлением” ТЦ нам бы казалось слишком преждевременным. Скорее всего, механизм воздействия ТЦ на ионосферу намного сложнее и является суммой воздействия волн различной природы от источника возмущения различных периодов (от часов и даже до нескольких суток!) на протяжении нескольких суток.

ВЫВОДЫ

На основе приведенного выше анализа данных томографического зондирования, полученных в ноябре 2007 г. на о. Сахалин, можно сделать вывод, что возможным откликом верхней ионосферы, локализуемой над зоной ТЦ (в данном случае на 25° – 30° севернее и на 5° – 20° – западнее или восточнее) на расстоянии приблизительно от 3800 до 5500 км от центра ТЦ, является изменение ее параметра $foF2$ в среднем не более, чем на 10–20%. Уменьшение или, наоборот, повышение $foF2$ связано с “задержкой” момента измерений по отношению к началу действия ТЦ.

Мы полагаем, что сложности с нахождением отклика ТЦ в ионосфере (и очень непростой морфологией) связаны с тем, что ТЦ является “широкополосным” источником возмущений, действующим в течение длительного времени – т.е., если полагать, что источником переноса возмущения снизу являются ВГВ, то мы имеем результат их суммарного воздействия.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 09-05-01019_а) и Программы фундаментальных исследований РАН “Радиоэлектронные методы в исследованиях природной среды и человека” (ОФН-13).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреева Е.С., Куницын В.Е., Терещенко Е.Д. Фазоразностная радиотомография ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия. 1992. Т. 32. № 1. С. 104–110.
- Афраймович Э.Л., Воейков С.В., Ишин А.Б., Перевалова Н.П., Ружин Ю.Я. Вариации полного электронного содержания во время мощного тайфуна 5–11 августа 2006 г. у юго-восточного побережья Китая // Геомагнетизм и аэрномия. 2008. Т. 48. № 5. С. 703–708.
- Балебанов В.М., Моисеев С.С., Шарков Е.А., Луян Е.А., Калмыков А.И., Забышный А.И., Кузьмин А.К., Смирнов Н.К., Цымбал В.Н., Чиков К.Н. Проект “Геликс”: космический мониторинг системы океан–тропосфера–верхняя атмосфера в условиях крупномасштабного кризисного состояния // Исслед. Земли из космоса. 1996. № 5. С. 126–134.
- Бондур В.Г., Пулинец С.А., Узунов Д.А. Воздействие крупномасштабных атмосферных вихревых процессов на ионосферу урагана Katrina // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 6. 2008. С. 3–11.
- Бондур В.Г., Пулинец С.А., Ким Г.А. О роли вариаций космических галактических лучей в тропическом циклоге-

- незе на примере урагана Катрина // ДАН. 2008. Т. 422. № 2. С. 244–249.
- Ванина-Дарт Л.Б., Покровская И.В., Шарков Е.А. Реакция нижней экваториальной ионосферы на сильные тропосферные возмущения // Геомагнетизм и аэронаука. 2008. Т. 48. № 2. С. 255–260.
- Ванина-Дарт Л.Б., Покровская И.В., Шарков Е.А. Исследование взаимодействия нижней экваториальной ионосферы с тропическими циклонами по данным дистанционного и ракетного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 2. С. 19–27.
- Ванина-Дарт Л.Б., Покровская И.В., Шарков Е.А. Влияние солнечной активности на отклик экваториальной нижней ионосферы во время активной фазы тропических циклонов // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 6. С. 3–10.
- Гохберг М.Б., Пилипенко В.А., Похотелов О.А. О сейсмических предвестниках в ионосфере // Физика Земли. 1983. Т. 10. С. 17–21.
- Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. М.: Физматлит, 2007.
- Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 304 с.
- Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В., Дружин Г.И., Чернева Н.В. Возможные атмосферные эффекты в нижней ионосфере по наблюдениям атмосферных радиосуммов на Камчатке во время тропических циклонов // Геомагнетизм и аэронаука. 2005. Т. 45. № 6. С. 824–839.
- Пулинец С.А., Боярчук К.А., Ломоносов А.М., Хегай В.В., Лю Й.Я. Ионосферные предвестники землетрясений: предварительный анализ данных критических частот $foF2$ наземной станции вертикального зондирования ионосферы Чунг-Ли (о. Тайвань) // Геомагнетизм и аэронаука. 2002. Т. 42. № 4. С. 435–447.
- Пулинец С.А., Легенька А.Д., Зеленова Т.И. Зависимость сейсмо-ионосферных вариаций в максимуме слоя F от местного времени // Геомагнетизм и аэронаука. 1998. Т. 38. С. 178–183.
- Романов А.А., Трусов С.В., Романов А.А., Крючков В.Г. Исследование ионосферных неоднородностей методом фазоразностной томографии в дальневосточном регионе России // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 2. С. 14–20.
- Смирнов В.М. Вариации ионосферы в период землетрясений по данным навигационных систем // Исследовано в России (электр. журн.). 2001. № 153. С. 1759–1767.
- Урличич Ю.М., Романов А.А., Романов А.А., Трусов С.В. Современные подходы к созданию автоматизированной системы регистрации ионосферных предвестников землетрясений по спутниковым данным // Космонавтика и ракетостроение. 2006. № 1. С. 167–172.
- Черниговская М.А., Шарков Е.А., Куркин В.И., Орлов И.И., Покровская И.В. Короткопериодные временные вариации ионосферных параметров в регионах Сибири и Дальнего Востока // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 6. С. 17–24.
- Шарков Е.А. Дистанционное исследование атмосферных катастроф // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 1. С. 52–68.
- Bauer S.J. A possible troposphere-ionosphere relationship // J. Geophys. Res. 1957. V. 62. № 3. P. 425.
- Bauer S.J. An apparent ionospheric response to the passage of hurricanes // J. Geophys. Res. 1958. V. 63. № 2. P. 265–269.
- Mikhailova G.A., Mikhailov Yu.M. and Kapustina O.V. Variations of ULF-VLF electric fields in the external ionosphere over powerful typhoons in Pacific Ocean // Adv. Space Res. 2002. V. 30. № 11. P. 2613–2618.
- Pulinets S.A., Boyarchuk K.A. Ionospheric Precursors of Earthquakes. Berlin, Heidelberg, N.Y.: Springer-Verlag, 2004. 273 p.
- Shen C.S. The correlations between the typhoon and the $foF2$ of ionosphere // Chin. J. Space Sci. 1982. V. 2. № 4. P. 335–340.
- Tian M., Jing Song W., Guang Lin Y., Tao Y., Jin Song P., Yu Cheng S. Effects of typhoon Matsa on ionospheric TEC // Chin. Sci. Bull. 2009. V. 55. № 8. P. 712–717.

Variations of the Ionospheric Layer F2 Critical Frequency from Tomography Sounding Data during Tropical Cyclone Action

L. B. Vanina-Dart¹, A. A. Romanov², E. A. Sharkov¹

¹Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

²Russian Scientific Research Institute of Space Instrument Making, Moscow

In this paper tomography sounding data taken in November 2007 are considered for following three points located on one meridian: Uzhno-Sahalinsk (47° N, 143° E), Poronajsk (49° N, 143° E) and Nogliki (52° N, 143° E). The aim of this research is to find the possible influence of tropical cyclone (TC) on the higher ionosphere. Using the ionospheric tomography method, which based on low orbital satellite navigating system signals, allows revealing variations of ionospheric parameters of the strong cyclones caused by distribution in troposphere of the Earth. It is impossible to reach it by only using global satellite navigating systems GLONASS and GPS. The received results demonstrate that after several days of TC action the values of the critical frequency of the F2-layer fall at distance about 3000 km from the disturbance center across (in a longitudinal direction). Also near to the TC operative range (on a longitude) and throughout 1–2 days increasing of values $foF2$ can be observed. Complexities of the morphological analysis of the given phenomenon consist that TC is “a broadband” and long-running source of disturbance.

Keywords: layers interaction, ionosphere, tropical cyclone, tomography sounding, critical frequency of F2-layer

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

РАСПОЗНАВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПО ДАННЫМ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО АЭРОЗОНДИРОВАНИЯ

© 2011 г. В. В. Козодеров^{1*}, В. Д. Егоров²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

²Учреждение Российской академии наук Институт вычислительной математики РАН, Москва

*E-mail: vkozod@mes.msu.ru

Поступила в редакцию 28.10.2010 г.

В задаче распознавания образов природно-техногенных объектов по данным дистанционной гиперспектральной съемки предлагается комбинированный подход, использующий не только критерий минимума евклидова расстояния относительно спектров некоторых “эталонных” объектов, но и особенности смещения по длине той области перехода от полосы хлорофилла к максимуму спектральной отражательной способности, которая характерна для растительности. База данных предлагаемого метода распознавания строится на основе гистограмм яркости пикселей для выбранных каналов. Гистограмма в области максимума различимости классов объектов, характерных для выбранной тестовой территории, разбивается на определенное число спектральных интервалов, для которых производится группирование спектров по величине указанного сдвига. На основе вычислительных процедур выделения таких групп спектров показаны новые возможности распознавания разных типов растительности по данным аэрозондирования высокого пространственного и спектрального разрешения.

Ключевые слова: обработка гиперспектральных изображений, распознавание объектов, характерные признаки растительности

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость адаптации разрабатываемых программных средств обработки многоспектральных аэрокосмических изображений (обычно 6–7 спектральных каналов в видимой и ближней ИК-области (БИК)) к открывающимся новым возможностям обработки гиперспектральных изображений (сотни спектральных каналов) требует изучения особенностей формирования баз данных для распознавания природно-техногенных объектов (ПТО) и оценки параметров, характеризующих состояние этих объектов. В работах (Козодеров и др., 2007, 2008, 2010) показаны этапы трансформации соответствующего программно-алгоритмического обеспечения при переходе от обработки данных многоспектральной аппаратуры MODIS спутника Terra (пространственное разрешение около 500 м; семь спектральных каналов в рассматриваемой области спектра) к данным аппаратуры Landsat ETM+ спутника Landsat-7 (пространственное разрешение около 30 м; шесть спектральных каналов в указанной области спектра) и далее к данным самолетной гиперспектральной аппаратуры (пространственное разрешение достигает 1–2 м с высот 1–2 км; около 200 спектральных каналов).

В работе (Егоров, Козодеров, 2009) на примере обработки данных Landsat ETM+ продемонстрированы возможности создания эффективных алго-

ритмов оценки параметров состояния почвенно-растительного покрова для выбранной территории. Изображения, полученные этой аппаратурой, охватывают территории ~200 × 200 км с разрешением ~30 × 30 м. При обработке часто используются RGB-синтезированные изображения для улучшения изобразительных свойств обрабатываемых данных. Так, в работе (Beaubien et al., 1999) по данным трех каналов указанной аппаратуры генерируется “цветное” RGB-изображение изучаемого участка территории. Далее осуществляется сопоставление “цвета” данного участка “цветам” ряда обработанных заранее эталонных участков, в итоге чего участку присваивается тот или иной тип поверхности из присутствующих в эталонной выборке. В указанной работе показаны возможности выделения по данным Landsat ETM+ до 20–22 типов земной поверхности, в том числе до семи типов хвойных пород деревьев (от темных к светлым).

В отмеченных публикациях российских авторов, наряду с определением типа растительного покрова, вычисляется количественная характеристика — объем зеленой фитомассы и общей биомассы растительного покрова. Показано, в частности, что по данным аппаратуры ETM+ можно распознать до 11 типов лесной растительности от чисто хвойных пород до чисто лиственных с промежуточными градациями и, кроме того, до пяти-шести типов других

объектов (водная поверхность, городская застройка и т.п.). Заметим, что программа расчета объема биомассы начинает свою работу при запуске с определения принадлежности каждого текущего пиксела обрабатываемого изображения известным типам природно-техногенных объектов. И только если данный пиксел по выбранным критериям трактуется как соответствующий растительному покрову, включается собственно расчет объема биомассы для этого пиксела.

Новые возможности улучшения распознавания объектов дистанционными методами связывают с появлением гиперспектральной аппаратуры (Fuentes et al., 2001). Одной из первых была аппаратура “Самолетный видеоспектрометр видимой и инфракрасной области” (Airborne Visible and Infrared Imaging Spectrometer/AVIRIS), которая обеспечивала получение данных в 224 спектральных каналах в области длин волн 0,4–2,5 мкм с шириной каждого канала в 10 нм и выше. В (Fuentes et al., 2001) показаны особенности картографирования лесной растительности с учетом существования полос поглощения солнечного излучения хлорофиллом (основным пигментом вегетирующей растительности) и водяного пара атмосферы при обработке данных аппаратуры AVIRIS.

В работе (Zarco-Tejada, Miller, 1999) продемонстрированы результаты распознавания болотистой местности по данным самолетной гиперспектральной аппаратуры CASI/Compact Airborne Spectrographic Imager (“Компактная самолетная спектрографическая аппаратура, дающая изображения”). Акцент в этой работе сделан на изучение области перехода, названной “красной кромкой” (red edge), от полосы поглощения хлорофилла (620–680 нм) к максимуму спектральной отражательной способности растительности (720–750 нм). Возможный сдвиг всей этой области в сторону более коротких волн (назван “голубым смещением” — blue shift) может служить отличительным признаком разных типов растительности. Данное утверждение связано с экспериментально установленным фактом более значительной амплитуды указанного максимума для зеленой травы и лиственных пород деревьев по сравнению с этой же амплитудой для хвойных пород деревьев. На практике это означает, что данный максимум достигается для хвойных пород при длинах волн, на несколько нанометров более коротких, чем в случае лиственных пород. Установленный эффект тонкой структуры спектров может способствовать различению разных типов растительности по данным гиперспектрального зондирования.

В работах (Козодеров и др., 2009, 2010) по данным летных испытаний отечественной гиперспектральной аппаратуры реализованы алгоритмы распознавания наблюдаемых объектов. Большинство из этих алгоритмов основано на близости текущего спектра в евклидовой норме для каждого обрабаты-

ваемого пиксела с исследуемого трека (участка пролета самолета над той или иной местностью) одному из спектров из ранее заготовленной базы данных. Мера близости характеризуется минимумом евклидова расстояния и определяется соответствием текущих спектров и спектров известных типов поверхностей (для водоемов, грунтовых дорог и дорог с твердым покрытием, для темных и светлых лесных массивов, лесных массивов с желтеющей листвой и др.).

В настоящей публикации развивается метод распознавания растительности, основанный на изучении указанного сдвига спектров по данным гиперспектрального аэрозондирования. Использовались данные гиперспектральной камеры образца 2008 г. (156 спектральных каналов) разработки НПО “Лептон”, г. Зеленоград, при ее установке на самолетный носитель вместе с аэрофотоаппаратурой и системой спутникового позиционирования. Спектральное разрешение данного типа гиперспектральной аппаратуры достигает 1 нм в коротковолновой области (400–470 нм), 8–10 нм в области (700–780 нм) и до 20 нм в длинноволновой области (950–980 нм). Высота полета самолета составляла от 1,5 до 2 км, пространственное разрешение не хуже 4 м вдоль трека полета самолета.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Одна из существенных, но не единственная сложность, которая возникает при обработке гиперспектральных данных, — это чередование на изображении ярких и темных соседних элементов разрешения (пикселов) вследствие высокого разрешения самолетной съемки местности. Соседние пикселы часто представляют собой ярко освещенную верхушку крон деревьев, менее освещенные участки в глубине крон, часть пикселов отражает слабо освещенные промежутки между кронами. Отмеченная особенность ухудшает качество распознавания типа лесного покрова, поскольку различие в интегральной яркости спектров отдельных пород (например, елового леса и леса соснового) может быть значительно меньше различия интегральных яркостей одной и той же породы, но по-разному освещенной (на вершине кроны или в глубине кроны). В противоположность этому, без особого труда выделяются объекты с заметно отличными спектральными свойствами — уверенно распознаются водная поверхность, болотистая местность, грунтовые дороги и дороги с твердым покрытием, другие объекты.

Имеющиеся данные наземной лесотаксации территории гиперспектрального аэрозондирования способствуют созданию базы данных “эталонных” спектров по разным породам лесной растительности. Вместе с тем, имеются картосхемы лесотаксации по преобладающей лесной породе в пределах отдельных выделов для заранее выделенных кварта-

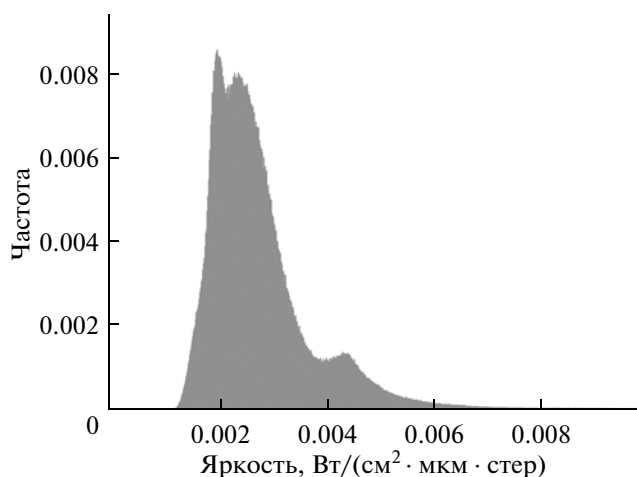


Рис. 1. Гистограмма частот появления разных градаций яркости в канале 99 (длина волны 551.33 нм) гиперспектрометра.

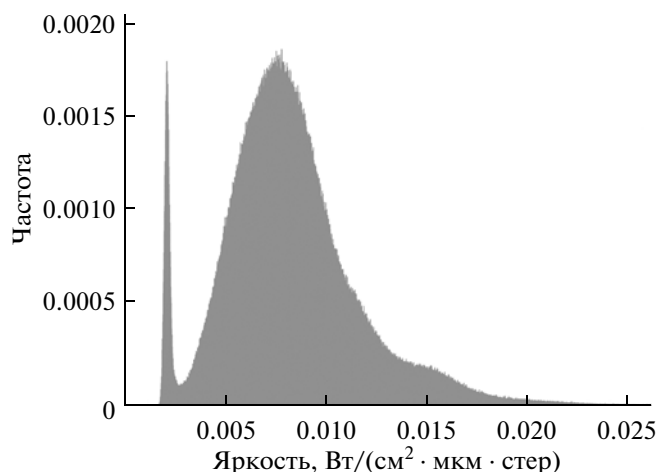


Рис. 2. Гистограмма частот появления разных градаций яркости в канале 143 (длина волны 798.10 нм) гиперспектрометра.

лов, предшествующих наземных обследований. При высоком пространственном разрешении гиперспектральных данных неизбежно обновление соответствующих картосхем, поскольку в пределах отдельных выделов часто существуют смешанные породы деревьев. Появляются сложности использования “эталонных” спектров для лесной растительности смешанного породного состава.

В процессе создания новой базы данных по данным аэрогиперспектрометрии возникла проблема нахождения “чистых пород”, т.е. протяженных участков, внутри которых дисперсии регистрируемых спектров были бы невелики. Значения интегральных яркостей спектров могут служить отличительным признаком соответствующих объектов. В реальности интегральные яркости для отдельных пикселей некоторых объектов могут отличаться на порядок величины. В некотором смысле “эталонным” может быть, например, пространственное распределение спектров протяженных болот, для которых, как правило, спектры имеют значительно более высокие яркости, чем собственно лесная поверхность. По болотистым участкам территории удастся сгенерировать эталонные спектры, которые при использовании в алгоритмах распознавания по минимуму отклонения в евклидовой норме способствуют повышению достоверности распознавания соответствующих объектов.

В основе предлагаемых здесь алгоритмов распознавания объектов лежит использование особенностей гистограммы яркостей отдельных каналов некоторого тестового трека, на котором присутствуют разные типы лесной растительности. Гистограмма — это функция распределения вероятности яркостей пикселей, представленных на гиперспектральном изображении данного трека для выбранного канала. Исследуемая тестовая территория характеризу-

ется наличием хвойных и лиственных пород лесной растительности с преобладанием сосны и березы соответственно, а также наличием населенного пункта, дорожно-транспортной сети, открытых почвенных образований и заболоченной местности в бассейне р. Орша (Тверская обл.) вблизи ее впадения в р. Волга. Результаты гиперспектральной аэро съемки тестовой территории представлены матрицей 5875×500 пикселей, формируемых вдоль и поперек самолетного трека, соответственно.

Гистограмма яркостей для выбранного трека тестовой территории (дата съемки 20.09.2008 г.) приведена на рис. 1 для гиперспектральных данных канала 99 (длина волны 551.33 нм) и на рис. 2 для канала 143 (длина волны 798.10 нм). Первый из каналов соответствует максимуму энергии приходящего солнечного излучения. Второй канал характеризует область максимальной различимости разных объектов: водная поверхность, разные типы растительности, почвы и т.д. В этом канале зарегистрированные яркости для объектов наблюдаемой территории различаются больше, чем в остальных каналах.

На гистограммах, представленных на рис. 1 и рис. 2, можно видеть наличие по крайней мере трех мод. Было установлено, что правый максимум на рис. 1 соответствует болотно-луговой растительности на обрабатываемом гиперспектральном изображении. Особенно заметный на рис. 2 первый (слева) максимум соответствует наличию водной поверхности. Средний максимум на гистограмме рис. 1, а также основной (второй слева) максимум на гистограмме рис. 2, как предполагается, относится преимущественно к лесной растительности, хотя отдельные моды гистограммы в области этих максимумов могут относиться также к грунтовым дорогам и другим объектам. Если исходить из имеющихся

Обработка спектров из гистограммы яркостей пикселей для канала 143 (длина волны 798.1 нм)

Яркости, Вт/(см ² · мкм · стер)	Число спектров трека до обработки	Число спектров после обработки
$2.73 \times 10^{-3} - 3.27 \times 10^{-3}$	19 501	9021
$3.27 \times 10^{-3} - 3.82 \times 10^{-3}$	41 662	12 151
$3.82 \times 10^{-3} - 4.36 \times 10^{-3}$	68 372	13 565
$4.36 \times 10^{-3} - 4.91 \times 10^{-3}$	109 156	388
$4.91 \times 10^{-3} - 5.45 \times 10^{-3}$	144 842	1 534
$5.45 \times 10^{-3} - 6.00 \times 10^{-3}$	185 302	4 316
$6.00 \times 10^{-3} - 6.54 \times 10^{-3}$	209 599	2 771
$6.54 \times 10^{-3} - 7.09 \times 10^{-3}$	236 104	2 121
$7.09 \times 10^{-3} - 7.71 \times 10^{-3}$	272 925	1 435
$7.71 \times 10^{-3} - 8.26 \times 10^{-3}$	241 872	664

априорных сведений наземной лесотаксации о преобладании хвойных пород (преимущественно сосняки разного возраста) на исследуемой территории, то основной (широкий) максимум гистограммы рис. 2 должен соответствовать как раз таким породам.

Оказалось, что ярко выраженных локальных максимумов, относящихся к разным типам лесной растительности, выделить по гистограммам рис. 1 и рис. 2 не удается. Было решено разбить область основного максимума рис. 2 на равные участки по интервалам яркости и с каждого участка записать координаты пикселей и соответствующие им спектры в отдельные файлы. Отбор производился в соответствии с указанным выше критерием различия в переходе от полосы поглощения хлорофилла к максимуму спектрального отражения вегетирующей растительности. Отсутствие такого перехода (изменения знака производной от регистрируемой амплитуды спектра по длине волны) служило основанием для того, чтобы не включать соответствующий спектр в класс “растительность”.

Число пикселей, попавших в каждый из 10 интервалов яркостей, соответствующих левой части основного максимума гистограммы рис. 2, представлено в таблице. Графа “до обработки” этой таблицы соответствует общему числу считанных пикселей для каждого из приведенных интервалов яркости, графа “после обработки” — числу отобранных (по описываемому здесь критерию) из них пикселей, относящихся к лесной или иной растительности. Можно видеть, что число спектров до обработки возрастает от нескольких десятков до нескольких сотен тысяч в соответствии с данными гистограммы рис. 2. Вместе с тем число отобранных спектров изменяется более сложным образом: например, достигает минимума для четвертого интервала разбиения гистограммы яркостей (388 спектров) и максимума для третьего интервала (13 565 спектров). Объяснение таких раз-

личий (близкие по величине яркости, но число отобранных спектров различается почти в 40 раз) следует искать в пространственном распределении яркостей объектов в области их максимальной различимости для выбранной сцены.

На основе указанных выборок спектров генерируется новая база данных с условно названными “эталонными” спектрами для использования схемой распознавания. Назовем ее базой данных по типам лесной растительности. Необходимость такого подхода диктуется требованием выделения разных классов растительности в области рассматриваемого максимума гистограмм. В базу данных по типам лесной растительности вошли не все спектры, первоначально представленные в записанных файлах. Как сказано выше, были отобраны лишь те из спектров, которые по величине смещения области “полоса хлорофилла — максимум отражательной способности” соответствуют разным типам растительности. Эти спектры имеют незначительный максимум в области длин волн 550–650 нм и более ярко выраженный максимум в области 780–800 нм. Первый из этих максимумов связан с влиянием атмосферы. Второй из них является характерным признаком вегетирующей растительности при переходе от полосы поглощения излучения хлорофиллом (690 нм) к более длинным волнам.

Спектры, соответствующие грунтовым дорогам или дорогам с твердым покрытием, а также спектры, отражающие городскую застройку, носят, как правило, более монотонный характер возрастания соответствующих кривых от коротковолнового диапазона длин волн к длинноволновому. Спектры таких объектов без труда могут быть включены в базу данных эталонных объектов в качестве отдельных классов, характеризующих указанные объекты. Ниже такие спектры и соответствующие им пиксели будут трактоваться как нераспознанные в рассматриваемой схеме формирования базы данных

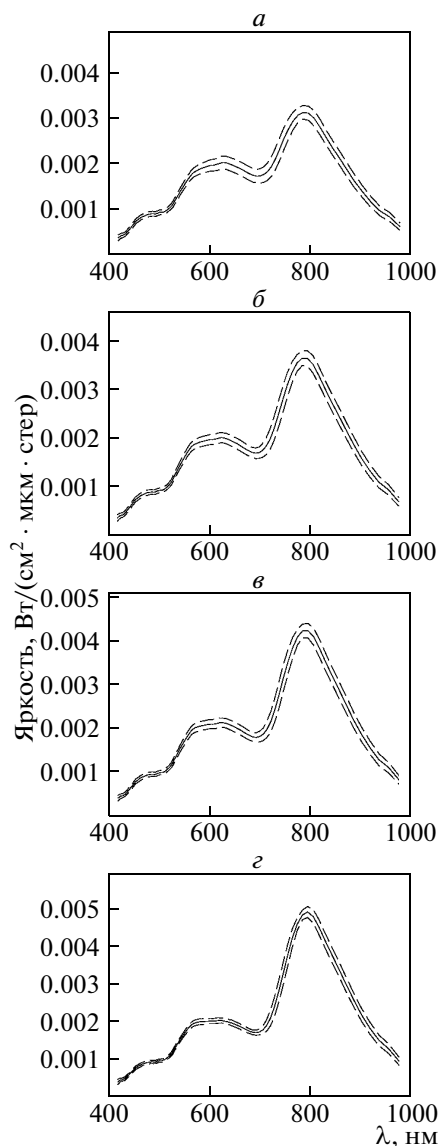


Рис. 3. Распределение исходных спектров и их среднеквадратических отклонений для выбранных классов растительности со следующей нумерацией классов: *a* – класс 3 (интегральная яркость 29.2 Вт/м^2); *б* – класс 4 (32.0 Вт/м^2); *в* – класс 5 (34.8 Вт/м^2); *г* – класс 6 (37.3 Вт/м^2).

разных типов растительности для обрабатываемых гиперспектральных изображений.

Возвращаясь к необходимости учета в расчетной схеме распознавания объектов факта чередования соседних ярких и темных пикселей, будем рассматривать особенности сдвига области перехода от минимума (полоса поглощения хлорофилла) к основному максимуму спектральной отражательной способности растительности как дополнительный признак проявления разных типов растительного покрова на гиперспектральных изображениях. Суть предлагаемой вычислительной процедуры – выделение сдвигов (обозначены далее как r) этого перехода для всех изучаемых спектров, соответствующи-

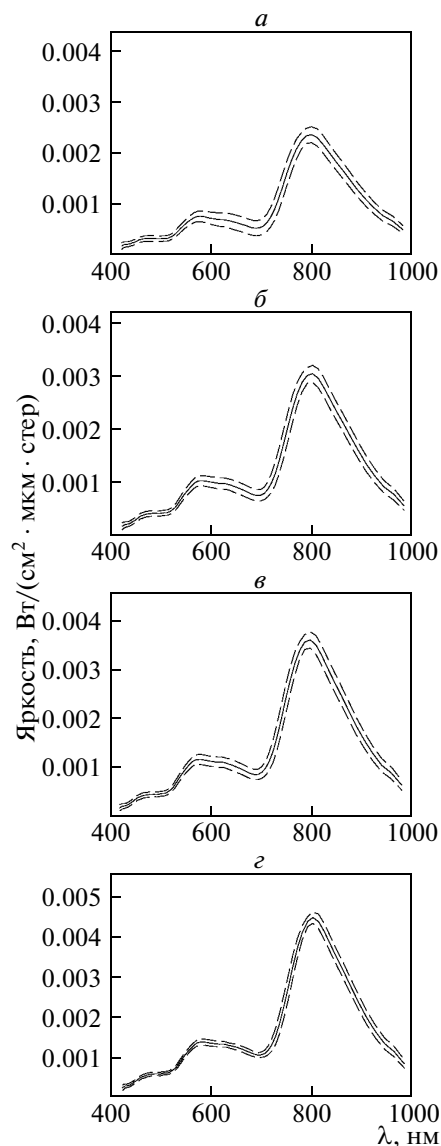


Рис. 4. Распределение спектров после обработки и их среднеквадратических отклонений для выбранных классов растительности с той же нумерацией классов, что и на рис. 3.

щих пикселям растительности, по координате длин волн. Оказалось, что положение этих сдвигов сильно маскируется искажающим влиянием рассеивающего слоя атмосферы в момент съемки. Проблема заключается в том, что влияние атмосферы уменьшает амплитуду перехода от минимума поглощения излучения в полосе хлорофилла (690 нм) к максимуму значений регистрируемых спектров (780 нм) вследствие завышенных значений спектральной яркости в области более коротких волн.

Была реализована процедура фильтрации атмосферного влияния путем построения специальной маски расчета атмосферного рассеяния. На рис. 3, 4 приведены примеры средних спектров (исходных и

модифицированных спектров после учета влияния атмосферы, соответственно) и среднеквадратических отклонений для четырех иллюстрируемых классов состояния растительности. Классы на рис. 3 соответствуют первым четырем интервалам яркостей, представленных в таблице, по интегральной яркости изменяясь от 29.2 до 37.3 Вт/м². Как видно из данных рис. 3 и 4, среднеквадратические отклонения исходных и модифицированных спектров невелики. Из сравнения данных рис. 3а и рис. 3г следует, что увеличение интегральной яркости исходных спектров происходит за счет роста амплитуды основного максимума (длины волн 700–800 нм) при уменьшении максимума для длин волн 550–650 нм. Из сравнения данных рис. 4а и 4г можно сделать другой вывод о том, что для соответствующих модифицированных спектров происходит общее возрастание интегральной яркости для обоих наблюдаемых максимумов.

Всего было выделено 10 классов растительности, исходя из данных таблицы по характерному признаку разной интегральной яркости спектров. Далее это число удваивалось в соответствии с предлагаемой ниже сдвиговой процедурой для модифицированных спектров.

Из сравнения данных рис. 3 и 4 можно видеть, что после устранения влияния атмосферы открываются более широкие возможности различения разных состояний растительного покрова по сдвиговому признаку r : на рис. 4 область перехода кривых от минимума 690 нм к максимуму 780 нм составляет 12–15 точек спектра, в то время как на рис. 3 – всего две–три точки.

На рис. 5 приведены примеры модифицированных спектров, аналогичные рис. 4, но для классов 7–10 (нижние четыре строки таблицы). Интегральные яркости исходных спектров для классов 7 и 10 изменяются от 40.4 до 50.0 Вт/м² соответственно. Аналогично результатам сравнения данных рис. 4а и 4г при переходе от данных рис. 5а к данным рис. 5г можно отметить, что различия иллюстрируемых спектров заметны как в длинноволновой, так и в коротковолновой области.

Для реализации рассматриваемой здесь вычислительной процедуры разделения объектов, относящихся к классу “растительность”, осуществлялся выбор спектров по близости значений параметра r по группам. При общем числе таких выборочных групп данных n из общего числа спектров в заданном интервале N гистограммы рис. 2 (в конкретных расчетах использовались $n = 10$, $N \approx 50000$) находились минимальный и максимальный параметры смещения (r_{\min} , r_{\max}), а все спектры были представлены в виде n групп по принадлежности параметра r текущего спектра

$$r \in (r_1, r_2),$$

где

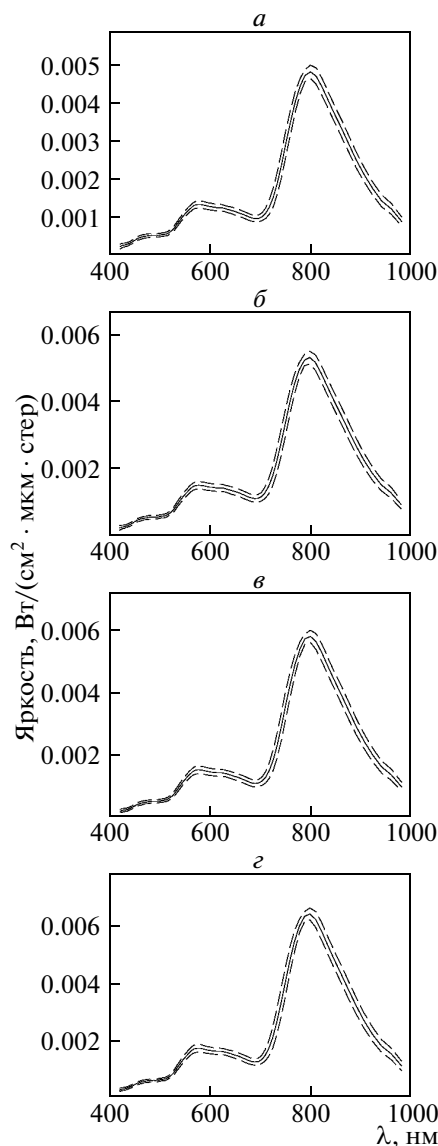


Рис. 5. Распределение спектров после обработки и их среднеквадратических отклонений для следующих классов растительности: а – класс 7 (интегральная яркость исходных спектров 40.4 Вт/м²); б – класс 8 (43.8 Вт/м²); в – класс 9 (46.9 Вт/м²); г – класс 10 (50.0 Вт/м²).

$$r_1 = r_{\min} + \frac{r_{\max} - r_{\min}}{n} i; \quad r_2 = r_{\min} + \frac{r_{\max} - r_{\min}}{n} (i + 1);$$

где $i \in [1, n - 1]$. Если $i = 0$, то $r \in [r_1, r_2]$.

Суммарное число спектров в соответствующих интервалах гистограммы рис. 2 осталось неизменным, но в результате предлагаемой процедуры спектры были упорядочены по возрастанию (убыванию) интегральных значений спектров. Это дает возможность вводить в рассмотрение градации яркостей для групп спектров с близкими смещениями по длинам волн r . Ниже приведены результаты рас-

четов, которые соответствуют двум градациям (0–50%), (50–100%). Таким образом, каждая градация яркости для выборки с близкими смещениями из (r_1, r_2) может трактоваться как отдельный класс (тип растительности). Кроме того, в предлагаемой схеме распознавания первые две подгруппы яркости зарезервированы за водными объектами (наиболее темными), а последние две подгруппы зарезервированы за болотно-луговой растительностью (здесь наиболее яркие объекты). При этом промежуточные $n \times 2 = 20$ классов по предположению представляют разные типы лесной растительности. Всего база данных включает 24 осредненных классов объектов.

Для спектров, характеризующих лесную растительность, в базу данных наряду со средними спектрами помещены средние значения интегральной яркости спектров и средние значения их параметра смещения r , рассчитанные по модифицированным спектрам. Для тех спектров, для которых параметр смещения не рассчитывался (водные объекты, болотно-луговая растительность), значения смещения принимались равными нулю. Это означает, что если текущий обрабатываемый спектр трека по некоторым предварительным условиям (аналогичным вышеуказанному алгоритму фильтрации) не соответствует спектру лесной растительности, то он, как и ранее, обрабатывается на основе использования минимального расстояния в евклидовой норме относительно спектров водной поверхности и болотно-луговой растительности. Если же текущий спектр по предварительному анализу оказался соответствующим спектру лесной растительности, то для него рассчитывается модифицированный спектр, определяется параметр смещения и по близости значения этого параметра одному из значений этого параметра из базы данных определяется принадлежность этого спектра (и соответствующего пиксела обрабатываемого трека) одному из типов растительности. Тем самым удается увязать разные признаки, характеризующие состояние растительного покрова (интегральная яркость и смещение по оси длин волн максимума отражательной способности) в общей схеме распознавания объектов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты расчетов по описанному алгоритму распознавания типов лесной и другой растительности для двух частей исследуемого трека представлены на рис. 6 и 7 (на цв. вклейках). На рис. 6а дано исходное изображение канала 143 гиперспектрометра (длина волны 798,1 нм). Данные рис. 6б характеризуют результаты попиксельного распознавания объектов по 24-м классам. Для сравнения на рис. 6в приведено аэрофотоизображение выбранной территории.

Водные объекты и нераспознанные пиксели рис. 6б и 7б соответствуют левому краю шкалы яр-

кости, болотно-луговая растительность – правому краю шкалы. Центральная часть шкалы от значения 2 до значения 22 соответствует разным типам растительности, выделенным на основе указанных выше вычислительных процедур. Если исходить из априорных сведений предшествующих лесотаксационных обследований и аналогичных текущих обследований территории, которые проводились в период летно-полевой кампании для исследуемого трека, то можно отметить следующее. Градации 2–4 (красно-оранжевые оттенки) данных рис. 6б и 7б соответствуют травянистому покрову, молодому лесу и отдельным полянам, градации 5–8 (желтые и светло-зеленые оттенки) – преимущественно листовым породам деревьев с преобладанием березняков, градации 9–22 (темно-зеленые и синие) – преимущественно хвойным породам с преобладанием сосняков.

Из данных рис. 6 можно видеть, что выбранная территория содержит населенный пункт (слева), дорожную сеть и открытые почвы (слева внизу), лесные массивы (вверху справа), а на фотоизображении рис. 6в видна также река (внизу справа). Одна часть строений в населенном пункте на рис. 6б соответствует данным рис. 6а и отображается черным цветом (как вода). Здесь можно говорить о несовершенстве работы гиперспектрометра при близком к зеркальному отражению света от кровли домов и других объектов. Другая часть строений отображается серым цветом (как нераспознанные объекты). Можно заметить: как болотно-луговые отображаются объекты, покрытые травянистой растительностью (в нижней центральной части рис. 6). К таким же объектам используемая расчетная схема относит и значительную часть лесной растительности ближе к верхней части (справа от дороги) рис. 6б. Аэрофотоснимок рис. 6в показывает, что в этой части изображения виден лесной массив красно-коричневого цвета, отличающийся от соседних с ним массивов (ближе к реке и слева от дороги в центральной части снимка).

По данным наземной лесотаксации, все наблюдаемые на рис. 6 лесные массивы представляют собой преобладающие сосняки. В реальности указанный массив красно-коричневого цвета на рис. 6в соответствует заросшей вырубке (на дату съемки там отмечается преобладание пожелтевших листовых пород). Сосновые насаждения сравнительно небольшого возраста (около 50 лет) заметны слева от указанной дороги (светло-зеленые оттенки при наличии красных оттенков), а более великовозрастные сосняки (темно-зеленые и синие оттенки) заметны в нижней правой части рис. 6б. Из сказанного можно отметить необходимость более тонкой настройки расчетной схемы распознавания на смешанные породы лесной растительности с тем, чтобы отличать заросшую вырубку от травянистого покрова. Лесная растительность в нижнем правом углу рис. 6б иная в сравнении с остальной частью терри-

тории. Из данных аэрофотосъемки (рис. 6в) можно заметить здесь наличие пожелтевших лиственных пород, несмотря на отмеченное преобладание в этих выделах сосновых насаждений.

Данные, представленные на рис. 7, характеризуют еще одну часть территории исследуемого самолетного трека. Здесь р. Орша уже видна со щели гиперспектрометра (течет слева направо при отображении на рис. 7), а не только по данным аэрофотосъемки. На картосхемах наземной лесотаксации справа по течению реки по-прежнему преобладают сосняки, а слева видны дорожная сеть и древостой преимущественно лиственных пород. В правом нижнем углу рис. 7 в р. Орша впадает р. Дубенка, образуя на противоположном берегу р. Орша плавни при наличии болот. По данным наземной лесотаксации, здесь находится выдел с преобладающей породой еловой растительности (большая часть еловых насаждений находится внутри наблюдаемого V-образного контура водной поверхности).

Можно отметить две характерные особенности территории между двумя излучинами реки на рис. 7в. Прилегающий к береговой прогалине лесной массив выглядит более темным на данном рисунке, чем остальной массив соснового леса. Здесь в большей степени, чем для остальной части рассматриваемой территории, можно различить вкрапления лиственных пород (желтые оттенки на рис. 7в). Другая особенность – наличие заросшей вырубki вблизи основного изгиба реки (сразу слева от центра изображений рис. 7). Первый из упомянутых эффектов можно объяснить более сильным увлажнением сосновых и березовых насаждений (отображаются синим цветом на рис. 7б), что приводит к отличию этой части лесного массива относительно расположенной выше части лесного массива приблизительно того же породного состава (желто-зеленые оттенки). Упомянутая заросшая вырубка явно выделяется на данных рис. 7б сравнительной однородностью цветового отображения (светло-зеленые оттенки).

Как видно из данных рис. 6 и 7, чередование ярких и темных пикселей, заметно ухудшавшее качество схем распознавания ранее, здесь практически отсутствует. Это обусловлено используемой расчетной схемой отнесения конкретного пиксела к классу “растительность” по критерию наличия выраженного перехода от полосы хлорофилла к основному максимуму регистрируемых спектров для этого класса. Критерий срабатывает для соседних пикселей, освещенных и затененных, так что указанного чередования пикселей не наблюдается. Принятая схема распознавания объектов по их гиперспектральным изображениям до некоторой степени является альтернативой общепринятой нормализации спектров (нормирование на интегральную яркость).

Любопытно, что объекты с грациями 21–22 практически отсутствуют на изображениях рис. 6б и 7б. Это связано с тем, что число спектров, отобранных в соответствии с данными таблицы для соответствующего класса (нижняя строка, 664 спектров, 10-й интервал разбиения гистограммы рис. 2), мало в сравнении с остальными грациями яркости. Число таких спектров сравнимо лишь с их числом для 4-го интервала разбиения (таблица). В итоге оказывается, что гистограмма рис. 2 в области основного максимума формируется за счет объектов, не относящихся к данным двум классам растительности.

В заключение отметим, что все разработанные алгоритмы в значительной степени являются вычислительно эффективными. Так, при использовании предложенной схемы распознавания обработка гиперкуба данных $5875 \times 500 \times 156$ для описанного выше трека измерений занимает примерно 15 мин на компьютере с процессором 3.2 ГГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показаны особенности разработанного алгоритма распознавания разных типов растительности по величине смещения спектров в зависимости от длины волны в области перехода от полосы хлорофилла к максимуму спектральной отражательной способности растительности. Основу предлагаемого подхода составляет анализ гистограммы яркости в спектральной области максимальной различимости разных классов наблюдаемых объектов. Для регистрируемых яркостей, характерных для максимума гистограммы, проведен отбор спектров по величине указанного смещения с коррекцией атмосферного влияния в коротковолновой области спектра. Приведенные примеры обработки гиперспектральных изображений для тестовой территории демонстрируют новые возможности распознавания объектов на основе создаваемой базы данных гиперспектрального аэрозондирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Егоров В.Д., Козодеров В.В. Повышение эффективности расчетных программ оценки состояния почвенно-растительного покрова по данным многоспектрального и гиперспектрального аэрокосмического зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 5. С. 11–21.
- Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Дмитриев Е.В., Егоров В.Д., Борзяк В.В. Инновационная технология обработки многоспектральных космических изображений земной поверхности // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 1. С. 56–72.
- Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Казанцев О.Ю., Бобылев В.И., Щербаков М.В., Борзяк В.В., Дмитриев Е.В., Егоров В.Д., Каменцев В.П., Беляков А.Ю., Логинов С.Б. Обработка и интерпретация данных гиперспектральных аэрокосмических измерений для дистанцион-

ной диагностики природно-техногенных объектов // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 2. С. 36–54.

Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Косолапов В.С., Головкин В.А., Дмитриев Е.В. Восстановление объема фитомассы и других параметров состояния почвенно-растительного покрова по результатам обработки многоспектральных спутниковых изображений // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 1. С. 57–65.

Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Райкунов Г.Г., Казанцев О.Ю., Белоцерковский А.В., Асташкин А.А., Бобылев В.И., Дмитриев Е.В., Каменцев В.П., Борзяк В.В., Щербаков М.В., Лесуновский А.А. Аэрокосмическая гиперспектрометрия: летные испытания аппаратуры, про-

граммно-алгоритмическое обеспечение обработки данных // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 5. С. 59–68.

Beaubien J., Cihlar J., Simard G., Latifovic R. Land cover from multiple thematic mapper scenes using a new enhancement-classification methodology // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. № D22. P. 27909–27920.

Fuentes D.A., Gamon J.A., Qui H.-L., Sims D.A., Roberts D.A. Mapping Canadian boreal forest vegetation using pigment and water absorption features derived from the AVIRIS sensor // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. № D24. P. 33565–33577.

Zarco-Tejada P.J., Miller J.R. Land cover mapping at BOREAS using red edge spectral parameters from CASI imagery // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. № D22. P. 27921–27933.

Vegetation Pattern Recognition Using Data of Hyperspectral Airborne Remote Sensing

V. V. Kozoderov¹, V. D. Egorov²

¹*M.V. Lomonosov Moscow State University*

²*Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences, Moscow*

A combined approach in the pattern recognition of natural and anthropogenic objects using remote sensing hyperspectral data is proposed to use not only the minimal Euclidean distance criteria relative to spectra of some reference objects, but specific features as well of the wavelength shift in the transition region from the chlorophyll absorption band to the spectral reflectivity maximum that is characterized for vegetation. Data basis of the proposed pattern recognition method is build using the pixel-by-pixel radiance histograms for particular spectral channels. The histogram in the maximal separability wavelength of the object classes is divided on a certain number of intervals which are grouped by the related spectra according to the mentioned shift. New opportunities are revealed of various vegetation type recognition while applied data of airborne remote sensing with high spatial and spectral resolution based on the proposed computational procedures to select the relevant groups.

Keywords: hyperspectral imagery processing, pattern recognition, vegetation characteristic features

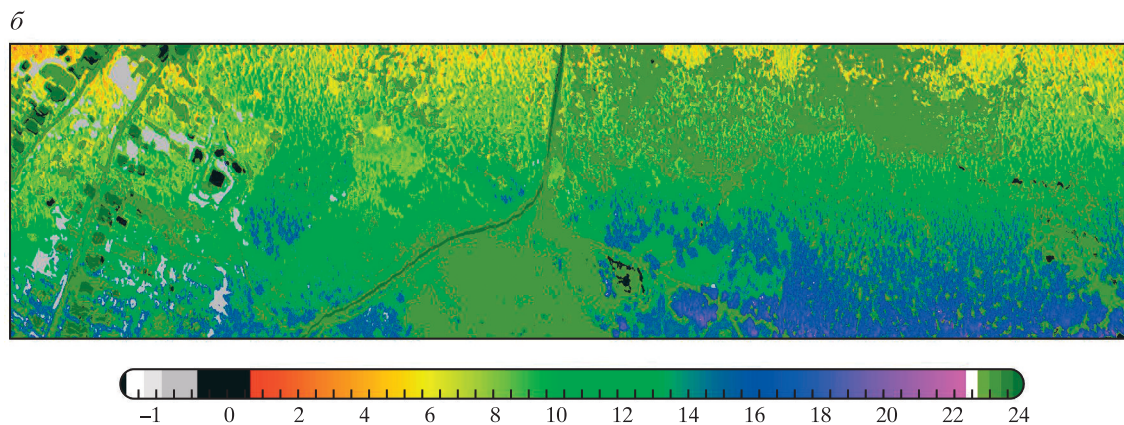
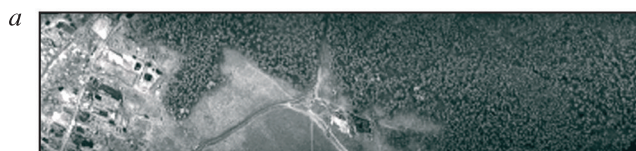


Рис. 6. *a* – Отображение первой части тестовой территории в виде гиперспектрального изображения в канале 143 (длина волны 798.1 нм); *б* – результаты распознавания изображения; *в* – аэрофотоснимок тестовой территории.



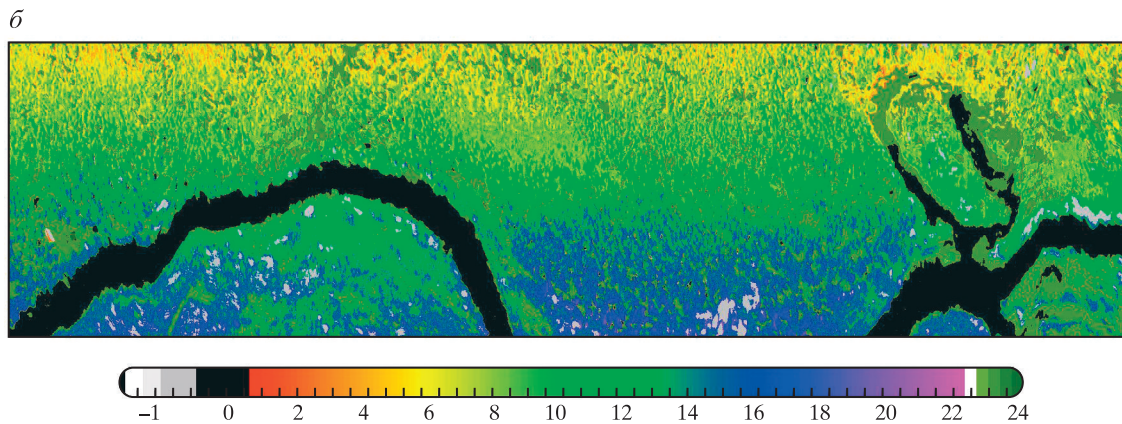
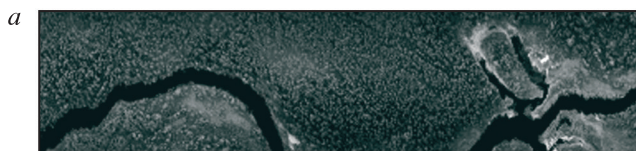


Рис. 7. *a* – Отображение второй части тестовой территории в виде гиперспектрального изображения в канале 143 (длина волны 798.1 нм); *б* – результаты распознавания изображения; *в* – аэрофотоснимок тестовой территории.



**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ**

**ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ АГРОЭКОЛОГИЧЕСКИХ
ОСОБЕННОСТЕЙ ГОРНО-ЛУГОВЫХ ЛАНДШАФТОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЭРОФОТОСНИМКОВ**

© 2011 г. **И. И. Марданов**

Сумгаитский Государственный университет, Сумгаит, Азербайджан

E-mail: geography.sumqayit@mail.ru

Поступила в редакцию 22.03.2010 г.

Неблагоприятные природные процессы, происходящие в высокогорной зоне, отражаются на физико-химических и, следовательно, агропроизводственных свойствах почв альпийских и субальпийских лугов. При этом наблюдается дифференциация почв по агропроизводственным особенностям и других процессов, связанных с ними. В этой работе рассмотрены природные факторы, влияющие на такую дифференциацию, представлены некоторые результаты полевых и камеральных исследований с использованием аэрофотоснимков отдельных крупных горных массивов Большого Кавказа и пути достижения экологического баланса в разной степени нарушенных землях, пути осуществления природоохранных мероприятий.

Ключевые слова: физико-химические и агропроизводственные свойства почв, высокогорная зона, аэрофотоснимки, Большой Кавказ.

ВВЕДЕНИЕ

Юго-восточная оконечность Большого Кавказа характеризуется наличием узкой полосы горно-луговой природной зоны, особенно на Южном склоне Главного Кавказского хребта, и достаточно высокой динамикой изменения площадей и высотных отметок распространения. Многочисленные исследования, проводившиеся в предыдущие годы на высокогорных территориях азербайджанской части Большого Кавказа, свидетельствуют о высокой активности экзогенных рельефообразующих процессов в пределах высокогорных лугов, особенно в бассейнах рек Кишчай, Шинчай, Курмухчай, Гирдыманчай, Пирсаат, Гусарчай, Гудиалчай, Агчай и др.

На территории бассейнов указанных выше рек наблюдаются большие накопления рыхлообломочного материала осыпей, полустакрепленные и подвижные оползневые массы, обвалы, овраги и участки, лишенные сплошного дернового покрова, которые являются очагами разрушительных процессов иного характера — селевых потоков.

Сели, довольно часто повторяющиеся на реках Южного склона Главного Кавказского хребта, осуществляют разрушительную деятельность в предгорных и низкогорных территориях, где уничтожение частного и государственного имущества, линий электропередач, водо- и газопроводов приводит к личным драмам для многих людей, обострению социально-экономических проблем. Таким образом, разрушение целостности горно-луговых ландшафтов приводит по цепи к природным катастрофам

различного характера (Будагов и др., 2005; Марданов, 2004). К сожалению, все мероприятия направленные на осуществление противоселевой защиты в Азербайджане за последние годы, подразумевают создание различных сооружений в низкогорьях и предгорьях без устранения причин их возникновения. Во время проводимых в течение многих лет почвенно-эрозионных и ландшафтных исследований в высокогорной зоне Юго-восточной оконечности Большого Кавказа, входящей в пределы Азербайджанской Республики, ставились задачи выявления главных причин, приводящих к усилению процессов деградации почвенно-растительного покрова, ухудшению качества горных лугов и сенокосов, картирования почвенно-экологической ситуации. С этой целью привлекались и материалы аэрокосмической съемки (в большей степени — аэрофотосъемки) с их последующим дешифрированием для интерпретации ландшафтных условий. В конечном итоге эти работы проводились с целью разработки научно обоснованных природоохранных мероприятий на основе идеи обеспечения устойчивого развития горных регионов, активно привлекаемых в хозяйственную деятельность.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Как показывают проведенные полевые и камеральные исследования, очаги селевой деятельности находятся в значительной степени в нивально-субнивальном и горно-луговом поясах, где интенсивный вынос рыхлообломочного материала в период

ливней служит причиной изменения облика горных ландшафтов и накопления обломков породы разных размеров в руслах рек, истоки которых находятся в высокогорьях. Нарушенные экзогенными процессами ландшафты горных лугов хорошо просматриваются на аэрокосмических материалах, в частности, на черно-белых аэрофотоснимках высокогорий Большого Кавказа из фонда Института экологии Национального аэрокосмического агентства Азербайджана, снятых в М 1 : 25000 и являющихся приемлемыми для подобных исследований. В качестве рекогносцировочного материала для визуального обнаружения наиболее уязвимых мест срыва и накопления склоновых отложений, возникновения линейного и плоскостного смыва в региональном масштабе могут быть использованы топографические карты М 1 : 100000, а в локальном — М 1 : 25000.

К настоящему времени определен целый ряд индикационных признаков различных морфоскульптур и экзогенных ландшафтообразующих процессов, который может быть использован при дешифровочных работах в аналогичных по характеру ландшафта территориях Большого и Малого Кавказа и Талыша.

Многолетние исследования, посвященные изучению эрозии почвенного покрова субальпийских и альпийских ландшафтов, показывают, что эродированные участки отражаются на аэрофотоснимках специфическим, в разной степени осветленным, фототонном изображении (Нагиев и др., 2004). Такие участки могут быть приурочены к склонам с разными углами наклона, но в большей степени, расположены на крутосклонных участках. Этот факт говорит о том, что эрозионный процесс имеет масштабный характер и в большей мере присущ к крутым склонам. Процесс эрозии почв высокогорных лугов становится интенсивным с увеличением уклона, что является причиной отрыва почвенных частиц в результате ослабления сцепления между ними.

Весь эрозионный процесс состоит из нескольких этапов, каждый из которых соответствует определенной степени эродированности. На первом этапе в горно-луговой зоне в результате сильного затаптывания скотобойных троп происходят нарушение сплошности почвенно-растительного покрова и образование дерновых отдельностей в виде ромбовидных участков. На следующем этапе происходит смыв, или же размыв, и этих отдельностей. Последующие этапы характеризуются разрушением почвенного покрова и смывом-размывом рыхлых почвообразующих пород до коренной основы. Эти процессы уже на начальном этапе приводят к ухудшению видового состава лугов, уменьшению количества гумуса и поглощенных оснований — кальция, магния, фосфора, водорода, очень важных компонентов питания растений. Например, в некоторых образцах неэродированных дерновых горно-луговых почв Южного склона Главного Кавказского хребта (в верхнем гори-

зонте) сумма гумуса может составить 10.55%, а азота 0.658%. В слабоэродированной же почве эти показатели составляют 6.07% и 0.378%. Сумма подвижного фосфора и обменного водорода в неэродированной почве достигает 60.8 мг/кг и 2.48 мг-экв, снижаясь до 48.4 мг/кг и 21.16 мг-экв соответственно в слабоэродированных разностях.

Определение степени эродированности почвенного профиля без проведения полевых и лабораторных изысканий только с помощью дешифрирования аэрофотоснимков представляет определенную трудность, так как качество изображений в сильной степени зависит как от погодных условий съемки, так и от характеристик съемочной аппаратуры, а также от наличия высокотехнологичных средств для изготовления фотоотпечатков. В данной ситуации один и тот же природный объект или процесс может иметь различное изображение при различных условиях. Космические же снимки, имеющиеся в наличии научных учреждений Азербайджана, не позволяют выявить все детали эрозионного процесса и его влияния на агропроизводственные свойства почв высокогорных лугов и сенокосов из-за их низкой разрешающей способности (рис. 1). По этой причине пришлось остановиться на выборе аэрофотоснимков высокогорий Большого Кавказа в качестве материала ДЗ. Их дешифрирование требует наличия предварительной информации об изучаемой территории в виде визуального опыта, литературных и картографических материалов различного характера. Результаты визуального дешифрирования позволяют определить степени качества пастбищных и сенокосных угодий и наиболее важные районы проведения противоэрозионных мероприятий различного характера (Марданов, 2008).

В ходе последних исследований пастбищные угодья высокого достоинства были отмечены на северо-восточных склонах Главного Кавказского хребта, к юго-востоку от вершины Шахдаг (4243 м), в верховьях р. Гудиалчай, где расположено с. Хыналыг, являющееся памятником истории Азербайджана и одновременно находящееся на территории Шахдагского национального парка (рис. 2). Такие пастбищные массивы характеризуются темным, почти черным фототонном аэрофотоизображения, что характерно для проявления высокой гумусированности и увлажненности почвенного профиля, а также густой и высокой травянистой растительности. Важной причиной относительно слабого развития почвенной эрозии на данной территории являются также небольшие уклоны склонов древней террасы Гудиалчая. Визуальное дешифрирование аэрофотоснимков М 1 : 25000, сделанных в 1983 г. из фонда Института экологии Национального аэрокосмического агентства Азербайджана, позволило выделить участки разной степени эродированности на основе физиономических признаков почвенно-эрозионного процесса — осветленности и зернисто-

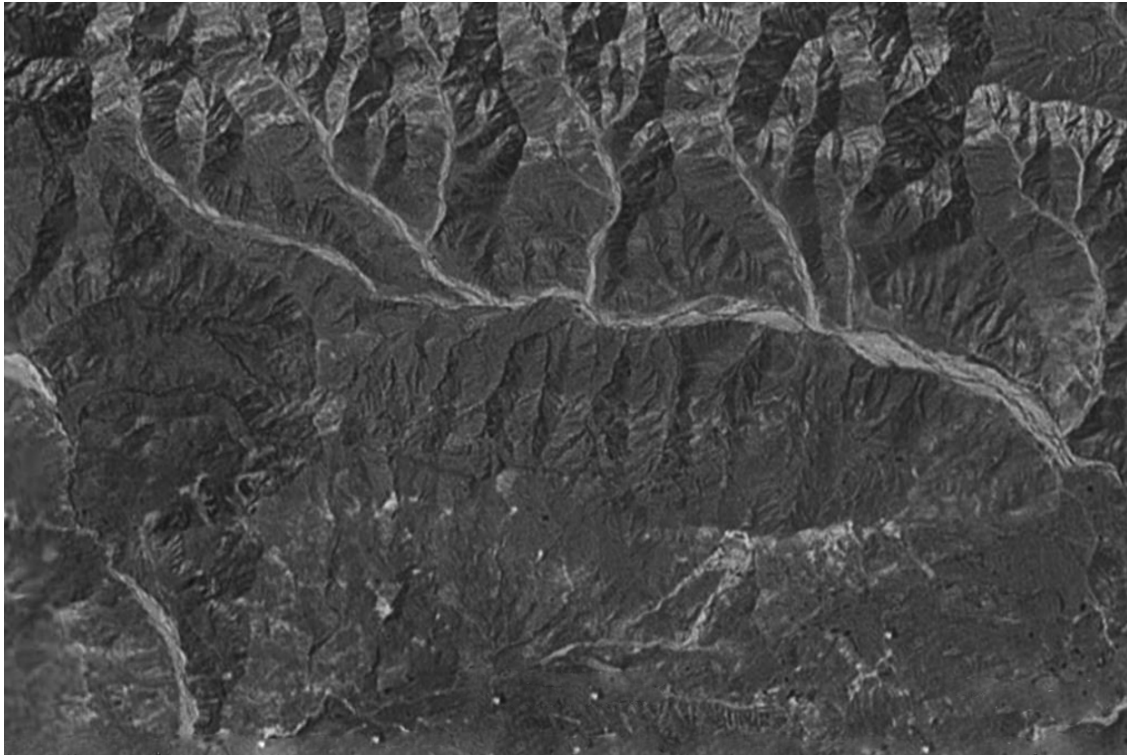


Рис. 1. Фрагмент части исследуемой территории — верховья бассейна р. Пирсаатчай, стекающего с юго-восточного склона Главного Кавказского хребта (в пределах Азербайджана) в направлении Гобустанского низкогорья, расположенного к юго-западу от Апшеронского п-ова. Высокогорные участки отображаются светлым фототонном.

сти фототона изображений, характерных линейных форм эрозии, наличия выходов на поверхность рыхлых и коренных пород, — а также выполнить последующий перенос выделенных контуров на топографическую карту М 1 : 25000. Достоверность полученных при этом карт доказывается натурными наблюдениями на исследованных территориях. К сожалению, низкое качество, большие промежутки между съемками и относительно мелкий масштаб фотоснимков усложняет определение начала эрозионного процесса. Это очень важно для предупреждения интенсификации процесса, приводящего к деградации почвенно-растительного покрова и, в целом, опустыниванию высокогорных территорий.

Активное использование пастбищных и сенокосных угодий приводит к заметному ухудшению состояния почв и видового состава растительности, что отражено в работах многих ученых (Шакури, 1986). По этой причине пастбища среднего достоинства широко распространены на обширных пространствах горно-лугового пояса Большого Кавказа. Такие участки во время дешифрирования аэрофотоснимков конца 1980-х годов были отмечены в бассейне р. Гирдыманчай близ с. Варна, разрушенного оползнем и покинутого населением. В настоящее время на этой территории наблюдается естественное зарастание расчлененной поверхности тра-

вянистой и кустарниковой растительностью. Такая ситуация, как ни парадоксально, оказывает благоприятное влияние на горные ландшафты, ослабление эрозионных и денудационных процессов. Естественное зарастание таких массивов просматривается на фотоснимках пятнистым изображением.

Данный участок, расположенный на правом берегу р. Гирдыманчай, может быть отнесен к угодьям среднего достоинства условно, так как активизация оползня, находящегося на этапе стабилизации, коренным образом изменит существующий ландшафт, превратит эту территорию в разрушенную, непригодную для хозяйствования землю.

ВЫВОДЫ

Интенсивный выпас скота на высокогорных пастбищных массивах приводит к уменьшению угодий среднего достоинства и к увеличению лугов низкого достоинства, непригодных для ведения хозяйства. Такими участками изобилуют приводораздельные территории Главного Кавказского хребта в междуречье Геокчая и Гирдыманчая, входящие в пределы Исмаиллинского госзаповедника и недавно созданного Шахдагского национального парка. К непригодным участкам относятся приводораздельные, скалистые территории вершин Главного

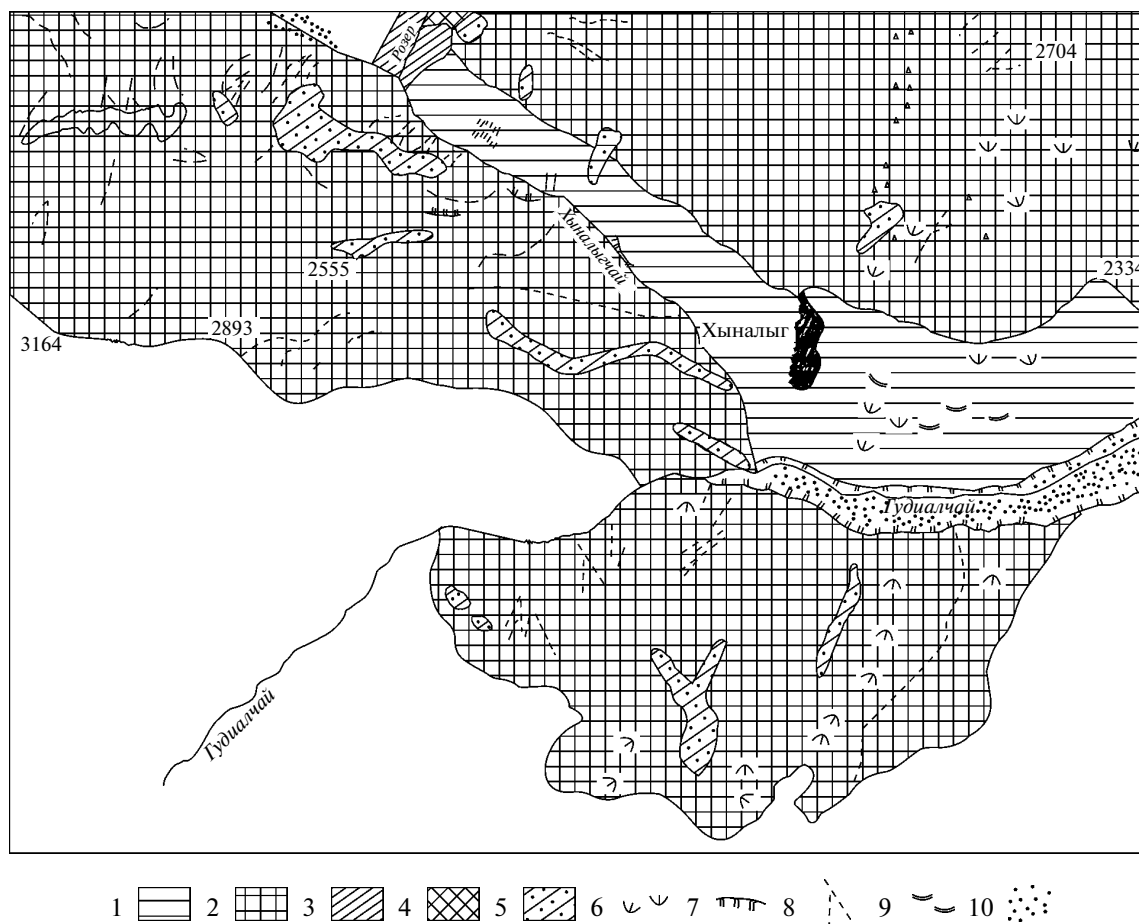


Рис. 2. Почвенно-эрозионная карта-схема ключевого участка в районе с. Хыналыг (Боковой хребт), составленная на основе дешифрирования аэрофотоснимков. Условные обозначения: 1 – неэродированные участки; 2 – слабоэродированные участки; 3 – среднеэродированные участки; 4 – сильноэродированные участки; 5 – выходы коренных пород; 6 – оползни; 7 – уступы в рыхлых породах; 8 – овраги, рытвины; 9 – сельскохозяйственные террасы; 10 – русловые отложения.

Кавказского хребта, Бокового хребта, выходов коренных и рыхлых пород на склонах этих хребтов и их отрогов. Приведение таких участков в благоприятное состояние требует вложения больших финансовых средств и может быть малоэффективным также из-за осадков ливневого характера, особенно на Южном склоне. Ливневые дожди в состоянии смыть принесенный и закрепляющийся почвенный и растительный субстрат, по этой же причине необходимы исследования по выбору наиболее устойчивых к денудации и эрозии растений, способных развиваться в угнетенных природных условиях высокогорий Большого Кавказа.

Общий характер протекания эрозионных и денудационных процессов в высокогорной зоне Южного склона Главного Кавказского хребта наглядно отражает почвенно-экологическая ситуация вокруг вершины горы Парсадан (2838.4 м). Эта территория расположена в центральной части водораздельного хребта в верховьях р. Гарасу (приток р. Гарачай) и

р. Кунахайсу (приток р. Гурмухчай). Участки, прилегающие к главному водоразделу, отличаются крутыми склонами, в сильной степени подверженными физическому выветриванию. Подножья этих склонов сплошь покрыты осыпями и россыпями, которые при соответствующих условиях могут стать рыхлообломочными составляющими селевых потоков, характерных для р. Гурмухчай и р. Гарачай, ниже по течению которых расположены крупные села Сувагиль и Касс. Сама же плоская вершина горы Парсадан на аэрофотоснимках М 1 : 25000, выполненных летом 1983 г., покрыта снежниками, под которыми почвенно-растительный покров не просматривается и потому для этих целей необходимы снимки более крупного масштаба и с более высоким пространственным разрешением или должны проводиться дополнительные полевые изыскания для детального исследования состояния почвенно-го покрова (рис. 3).

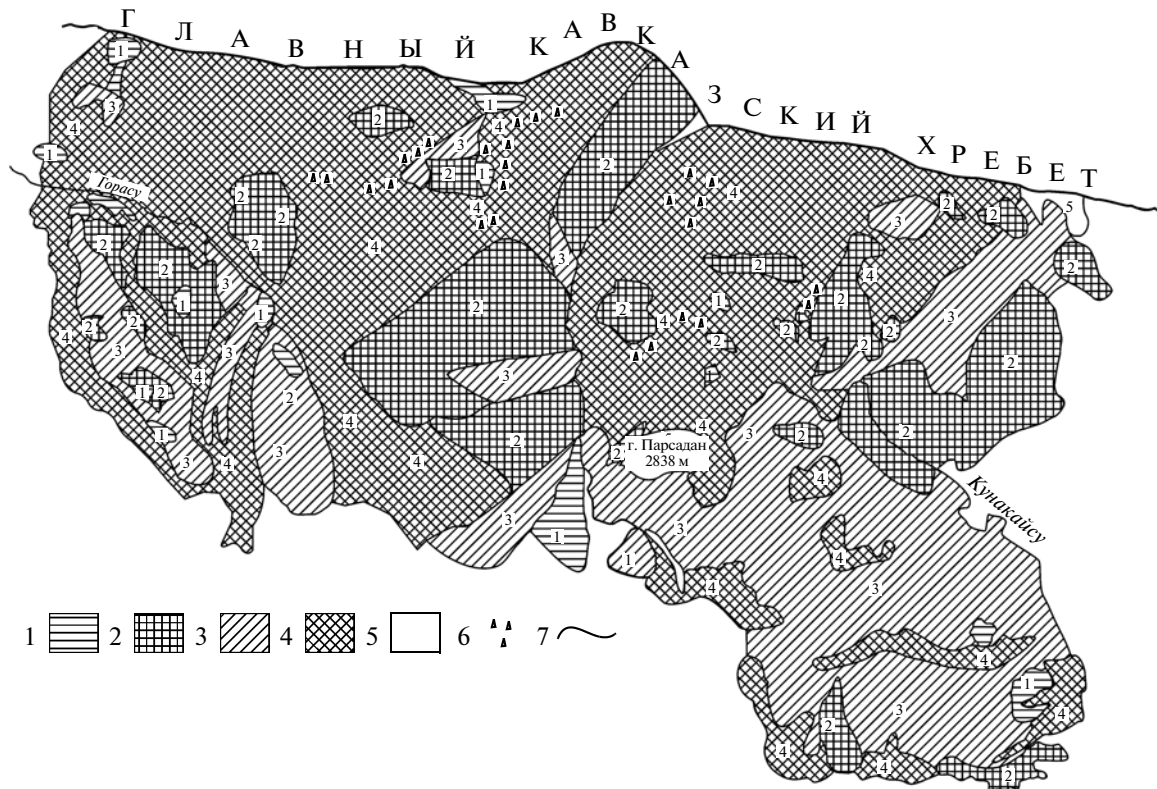


Рис. 3. Почвенно-эрозионная карта-схема территории вокруг вершины горы Парсадан (Главный Кавказский хребет), на основе дешифрирования аэрофотоснимков: 1 – неэродированные участки; 2 – слабоэродированные участки; 3 – среднеэродированные участки; 4 – сильноэродированные участки; 5 – снежники; 6 – осыпи, россыпи; 7 – реки.

Крутизна Южного склона Главного Кавказского хребта с вершинами в 2700–2900 м на данном участке находит непосредственное отражение на развитии почвенно-эрозионных процессов, проявляясь на наличие сильноэродированных горно-луговых почв, формирующих сплошную полосу в приводораздельной территории.

Широкое распространение сильноэродированных участков и скальных обнажений к северу от вершины горы Парсадан и на левом берегу долины р. Гарасу свидетельствует об интенсивном развитии как почвенной эрозии, так и физического выветривания, результатом которого является формирование осыпей и россыпей, носящих наступательный характер. Таким участкам присущи ярко выраженные селевые очаги, зоны формирования и транзита рыхлообломочного материала, являющегося твердым составляющим грязе-водо-каменных потоков. Они характерны для бассейнов р. Гарасу и р. Гурмухчай, в пределы которых входит данная территория.

Плоская вершина горы Парсадан создает условия для сохранения фрагмента снежного покрова до конца июня, который, вероятно, консервируя экзогенное воздействие как в других высокогорных массивах Большого Кавказа, защищает почвенно-растительный покров горных лугов от последствий

плоскостного смыва и линейного размыва. Об интенсивности эрозионных процессов говорит тот факт, что неэродированные участки с хорошо развитым почвенным покровом и растительностью занимают здесь очень маленькие участки в виде темных вкраплений и теряются в общем фоне изучаемой территории.

В настоящее время назрела необходимость пересмотра норм травопосевов в горных лугах Большого Кавказа и поиска оптимальных комбинаций травяных растений, примененных для посева. Определенные участки для улучшения состояния горных лугов должно осуществляться с учетом метеоусловий и рельефа местности, в том числе экспозиции склонов. Травопосевы могут быть малоэффективны на южных склонах Главного Кавказского хребта из-за ливневых дождей и поэтому должны сопровождаться комплексом других мероприятий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Необходимо напомнить, что значительная часть изученной территории входит в пределы Шахдагского национального парка, где намечается проведение работ по созданию парковой инфраструктуры. Существование паркового хозяйства идет вразрез с ве-

дением отгонного скотоводства в горно-луговой зоне и с лесозаготовкой в горно-лесном поясе. По этой причине оценка агропроизводственного состояния высокогорных пастбищ должна производиться с учетом размещения туристических объектов и вероятности экологической опасности.

Большое внимание на данной территории отводится созданию (в перспективе) центров зимнего спорта, что требует особо чуткого отношения к проблеме экологической безопасности. Такой характер развития событий подразумевает проведение природоохранных и защитных мероприятий строго параллельно со строительными работами по возведению спортивных сооружений, способных изменить геодинамическую ситуацию данных массивов и повлечь за собой катастрофические события. Это еще раз свидетельствует о том, что экологические исследования в горных областях должны носить строго периодический характер как для обеспечения нужд хозяйства, так и для обеспечения экологического баланса путем осуществления природоохранных мероприятий. В этой связи очень важна координированная работа ведомств, занимающихся землепользованием и их охраной. Для всего Большого Кавказа большое значение может иметь создание культурных ландшафтов в пределах всех высотных зон междуречья Курмухчая – Кишчая и Шинчая, стекающих с Южного склона Главного Кавказского хребта в период возможного моратория на распашку, вырубку леса, сенокоса и выпаса скота. Эта территория, в сильной степени подверженная антропогенному воздействию, нуждается в проведении комплексных экологических, инженерных изысканий и финансовых расчетов.

Научный потенциал страны в состоянии эффективно участвовать в этой работе и вносить решающий вклад в обеспечение агропроизводственного

роста всего хозяйства горных территорий, обладающих большим экономическим потенциалом. Рациональное использование этого потенциала может сыграть большую роль в воспитании экологической культуры подрастающего поколения страны, являющейся важным условием на пути европейской интеграции всего азербайджанского общества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Будагов Б.А., Ализаде Э.К., Гулиева С.Ю., Кучинская И.Я. Геодинамические особенности влияния процессов экзоморфогенеза на ландшафтно-экологическую обстановку южного склона Большого Кавказа // Тр. конф. “Природно-разрушительные явления Шеки-Закатальского района и экогеографические проблемы развития региона”. 9–10 июня 2005. Шеки, Азербайджан. 2005. С. 55–61.

Марданов И.И. Обеспечение экологического баланса на эродированных землях высокогорной зоны Большого Кавказа путем осуществления природоохранных мероприятий // Тр. Геогр. общества Азербайджана. Соц.-экон. и экогеограф. проблемы рег. разв. в Азербайджане. Баку. 2004. Т. IX. С. 167–171.

Нагиев П.Ю., Татаряев Т.М., Фараджева Л.Н., Джалилова Ш.Г. Картографирование растительного покрова северо-западной части Азербайджана по результатам цифровой обработки аэрокосмической видеoinформации // Тр. Междунар. научно-технической конф., посвященной 70-летию академика А.Ш. Мехтиева “Информационные и электронные технологии в дистанционном зондировании”. 20–23 декабря 2004 г. Баку. 2004. С. 92–94.

Марданов И.И. Оценка методов ландшафтно-экологических исследований высокогорий в азербайджанской части Большого Кавказа // Проблемы освоения пустынь. 2008. №4. С. 3–5.

Шакури Б.К. Биологическая продуктивность горных земель в Азербайджане и влияние эрозионных процессов на изменение ее параметров: Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. Баку. 1986. 54 с.

Agroecology Production Particularities Researches of Mountain-Meadow Landscapes Using Aerial Photo Images

I. I. Mardanov

Sumgait State University, Sumgait, Azerbaijan

The natural processes in high-mountainous zone are indicated on the physical, chemical and agro production properties of soils of alpine and sub alpine meadows. We see difference of soils by agro production particularities and other joint processes during it. The natural factors having the influence to the some difference considered in this article and represented some results of natural and cameral research with use aero photo images of some great massifs of Great Caucasus and ways of reach of the ecological balance, ways of realization of natural defense measures.

Keywords: physical, chemical and agro production properties, high-mountainous zone, aerial photo images, Great Caucasus

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КАПИЛЛЯРНО-МЕНИСКОВОЙ
ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ

© 2011 г. Т. А. Беляева, П. П. Бобров*, О. В. Кондратьева, А. В. Репин

Омский государственный педагогический университет, Омск

*E-mail: bobrov@omgpu.ru

Поступила в редакцию 15.03.2010 г.

Приведены результаты измерения комплексной диэлектрической проницаемости увлажненных дистиллированной водой порошков из сферических кварцевых гранул, порошка гидрофобного диэлектрика, речного песка, а также двух образцов естественных почв в диапазоне частот 0.1–8 ГГц. Обнаружено, что по диэлектрическим характеристикам в почве при влажности, не превышающей наименьшей влагоемкости, кроме прочно связанной воды можно выделить еще две ее формы. Показано, что диэлектрическая проницаемость этих двух форм воды зависит от физических свойств минерала, формы и размеров почвенных частиц. Найдены параметры модели Дебая для этих форм воды. Рассмотрены возможные причины, приводящие к изменению диэлектрической проницаемости воды при взаимодействии с почвенными частицами. Установлено, что влажность почвы, соответствующая переходу от одной формы воды к другой, близка к максимальной молекулярной влагоемкости.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, влажные смеси, сверхвысокие частоты, категории почвенной влаги, дистанционное зондирование

ВВЕДЕНИЕ

Одной из проблем микроволнового дистанционного зондирования (ДЗ) почв является зависимость комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) $\hat{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon''$ (j – мнимая единица) почв от влажности. Несмотря на большое количество экспериментальных данных и опубликованных работ (Лещанский, Лебедева и др., 1971; Dobson, Ulaby et al., 1985; Curtis, Weiss et al., 1995; Беляева, Бобров, 2003), остается до конца не решенной проблема создания моделей, способных адекватно описывать диэлектрические свойства с.-х. почв разных типов в диапазоне влажностей от нулевой до состояния полного водонасыщения и в диапазоне частот, используемых в микроволновом ДЗ (0.3–12 ГГц). В ряде работ удалось значительно продвинуться в деле создания моделей КДП, позволяющих получить зависимость диэлектрической проницаемости почвы от частоты и влажности, используя стандартизированные агрофизические показатели, в первую очередь содержание физической глины (почвенных частиц размером менее 0.01 мм) и гумуса (Mironov, Bobrov, 2003; Mironov, Dobson, 2004; Бобров, Миронов, 2008; Mironov, Kosolapova, 2009). С этими показателями статистически связаны максимальное количество связанной воды в почве и параметры модели Дебая, характеризующие ее КДП. Было установлено также, что диэлектрическая проницаемость свободной почвенной воды (в почвоведении ее подразделяют на капиллярно-менисковую и гравитацион-

ную) отличается от диэлектрической проницаемости истинно свободной воды и в разных почвах различна. Зависимостей КДП свободной почвенной влаги от каких-либо характеристик почв найдено не было, поэтому в моделях использовались усредненные значения параметров модели Дебая, найденные из экспериментальных измерений. Для почв с содержанием физической глины не менее 30% общей массы (суглинки и глинистые почвы) удовлетворительное согласование с экспериментом удавалось получить, принимая для статической диэлектрической проницаемости свободной почвенной воды при температуре 20–22°C значение $\epsilon_{0в} = 100–101$, для времени релаксации – значение $\tau_v \approx 8$ пс. В песчаных почвах параметры модели Дебая свободной почвенной влаги варьировались в больших пределах и расхождение экспериментальных данных с расчетными увеличивалось.

С целью установления взаимосвязи КДП капиллярно-менисковой почвенной влаги с размерами частиц нами были проведены тщательные экспериментальные исследования КДП увлажненных порошков сферических кварцевых гранул, порошка диэлектрика СТ-10, речного песка и проведено сравнение с КДП некоторых естественных почв.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Было исследовано несколько образцов влажных порошков с разными размерами кварцевых гранул.

Таблица 1. Распределение частиц по размерам (в % от массы) и наименьшая влагоемкость (в объемных долях) образцов 1–5

№	Образец	Размер частиц, мкм							НВ, м ³ /м ³
		0–10	10–25	25–50	50–100	100–200	200–400	400–800	
1	Кварцевые гранулы 10–50 мкм	0.08	18.89	76.81	4.22	–	–	–	0.35
2	Кварцевые гранулы 50–100 мкм	–	0.06	9.96	89.98	–	–	–	0.30
3	Кварцевые гранулы 100–400 мкм	–	–	0.01	1.93	56.52	41.54	–	0.26
4	Речной песок	–	–	–	–	2.4	67.46	30.14	0.30
5	Порошок СТ-10	63.0	37.0	–	–	–	–	–	–

Распределение частиц по размерам (в процентах от общей массы) и наименьшая влагоемкость (НВ) (максимальное количество воды, которое может удержать почва менисковыми или капиллярными силами после стекания всей гравитационной воды) приведены в табл. 1. Образцы 1–3 содержали кварцевые гранулы почти сферической формы с небольшим количеством эллипсоидных частиц и мелких обломков (рис. 1б, 1в). В образце естественного речного песка (образец 4) основную долю составляли удлиненные частицы неправильной формы, часть из них имела шероховатую поверхность (рис. 1з). Образец 5 (рис. 1а) представлял собой измельченный органический диэлектрик СТ-10 (сополимер стирола с α – метилстиролом, наполненный двуокисью титана), имеющий в монолитной форме $\epsilon' = 10 \pm \pm 0.5$ и тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = 2 \times 10^{-3}$. Частицы этого порошка имеют угловатую неправильную форму.

Распределение частиц по размерам в каждом типе порошков измерялось с помощью микроскопа. Исследуемые выборки содержали от 500 до 800 частиц. Распределение числа частиц по размерам переводили в массовые доли с учетом известной плотности минерала. В кварцевом порошке с наименьшим размером гранул (образец 1) основную массу составляют частицы с размерами 10–50 мкм. В образце 2 большая часть частиц почти равномерно

распределена в интервале 50–100 мкм. В образце 3 основная доля частиц имеет размер между 100–400 мкм. Средние размеры (полусумма наибольшего и наименьшего размера) частиц речного песка (образец 5) лежат в интервале 200–800 мкм. Размеры частиц порошка СТ-10 существенно меньше, чем у предыдущих образцов. Основная доля частиц (около 80% массы) имеет средние размеры 4–12 мкм.

Также с малым шагом изменения влажности была измерена КДП двух образцов естественных почв, взятых из одного шурфа с разной глубины. Гранулометрический состав почв (по методу Н.А. Качинского) приведен в табл. 2. Образцы незначительно отличались содержанием физической глины (частиц размерами менее 0.01 мм). Содержание гумуса в образце б составляет 6.6% (по массе), а в образце 7–0.6%.

Результаты рентгенофазового и ИК-спектроскопического анализов образца б показали, что в нем доминирует кварц ~ 55%, присутствуют полевые шпаты ~ 25% (плагиоклаз ~ 20% , и калиевый полевой шпат ~ 5%), слюда диоктаэдрическая (мусковитового типа) ~ 5%, каолинит ~ 3–5%, смектит ~ 2–3%, органика ~ 6%.

Для измерения диэлектрической проницаемости исследуемые образцы размещались в ячейках, представляющих собой отрезки коаксиальных ли-

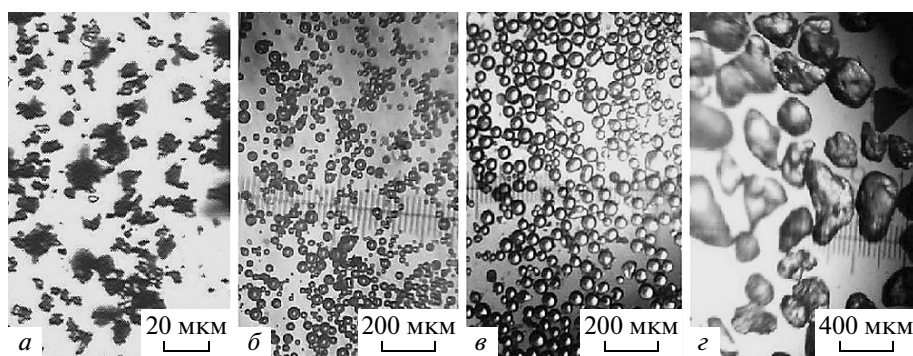
**Рис. 1.** Форма и размеры частиц исследуемых образцов: а – порошок СТ-10 (образец 5); б – кварцевые гранулы 10–50 мкм (образец 1); в – кварцевые гранулы 50–100 мкм (образец 2); з – речной песок (образец 4).

Таблица 2. Гранулометрический состав почв (в % от массы сухой почвы)

Образец	Размер фракций, мм						
	1–0.25	0.25–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	0.005–0.001	<0.001	<0.01
6	2.20	43.80	17.90	4.20	1.40	30.50	36.10
7	0.80	27.24	28.03	3.86	5.22	34.80	43.88

ний длиной от 2 до 11 см. Нужная длина выбиралась в зависимости от влажности образца и диапазона частот, в котором производились измерения. В диапазоне частот 0.1–4 ГГц модуль и фаза коэффициента передачи ячейки измерялись с помощью векторного измерителя параметров цепей ZVRE, а в диапазоне частот 4–8 ГГц измерялись модули коэффициентов отражения и передачи с помощью панорамного измерителя P2-103. Погрешность измерения КДП образца зависит от его влажности, длины ячейки и частоты. Погрешность измерения действительной части КДП с помощью ZVRE изменялась по диапазону частот от 6–9% на частоте 0.1 ГГц до 2–3% на частоте 4 ГГц, мнимой части – от 10–20% на частоте 0.1 ГГц до 2–5% на частоте 4 ГГц. В диапазоне частот 4–8 ГГц погрешность измерений действительной части КДП с помощью P2-103 составляла не более 5% для сухих образцов и не более 10% для влажных. Погрешность измерения мнимой части в этом диапазоне частот составляла от 10 до 20%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Измерения КДП влажных образцов с малым шагом изменения влажности показали, что зависимости от влажности W действительной и мнимой частей показателя преломления образцов $\hat{n} = n + jk = \sqrt{\varepsilon' - j\varepsilon''}$ можно аппроксимировать кусочно-ломаными линиями. На рис. 2 приведены такие зависимости $n(W)$ и $k(W)$ в области значений влажности, меньших, чем НВ для кварцевых порошков из сферических гранул (образцы 1–3), а на рис. 3 – для речного песка (образец 4) и порошка СТ-10 (образец 5) на двух частотах. Видно, что изломы на характеристиках $k(W)$ выражены сильнее, чем на характеристиках $n(W)$. Влажности, соответствующие точкам перегиба и обозначенные через W_i на зависимостях $n(W)$ и $k(W)$, уменьшаются при увеличении размера кварцевых гранул (рис. 2) на частоте ГГц от 0.15 м³/м³ для образца 1 до 0.11 м³/м³ для образца 3. При уменьшении частоты от 3.1 до 0.5 ГГц влажность точки перегиба уменьшается на 20–30%. На графиках, приведенных на рис. 3, для речного песка и порошка СТ-10 такой зависимости W_i от частоты не наблюдается.

В рамках рефракционной модели диэлектрической проницаемости влажных смесей (Комаров, Миронов, 2000; Mironov, Dobson et al., 2004) посто-

янство наклона зависимостей $n(W)$ и $k(W)$ в определенном интервале влажностей можно трактовать как постоянство диэлектрических свойств воды, поэтому можно сделать вывод о том, что в образцах имеются две формы воды, имеющие разную диэлектрическую проницаемость. Следует сделать оговорку, что определяемые с помощью той или иной модели смеси значения n и k разных форм воды, строго говоря, являются параметрами модели, а не истинными значениями (Беляева, Бобров, 2004; Бобров, Бобров, 2006). Однако никаким другим способом, кроме использования какой-либо модели смеси, определить диэлектрические свойства воды в дисперсной среде невозможно. Как показано в работах (Mironov, Bobrov, 2003; Mironov, Dobson, 2004; Бобров, Миронов, 2008; Mironov, Kosolapova, 2009), рефракционная модель позволяет определять диэлектрическую проницаемость почв с точностью, вполне достаточной для решения задач ДЗ в диапазоне частот 0.5–12 ГГц, поэтому ниже мы используем эту модель.

В соответствии с рефракционной моделью зависимость показателя преломления образца от его влажности W можно выразить следующим образом:

$$\begin{cases} n = n_d + (n_1 - 1)W & W \leq W_i \\ n = n_d + (n_1 - 1)W_i + (n_2 - 1)(W - W_i) & W > W_i \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} k = k_d + k_1W & W \leq W_i \\ k = k_d + k_1W_i + k_2(W - W_i) & W > W_i \end{cases}, \quad (2)$$

где n_d , n_1 , n_2 и k_d , k_1 , k_2 – значения действительной и мнимой частей показателей преломления. Индексы d , 1, и 2 в (1) и (2) относятся к сухой почве и двум формам воды в образцах, соответственно, а W_i обозначает значение влажности, соответствующее точке перегиба влажностной зависимости n и k . Зависимость действительной и мнимой частей показателя преломления сухой почвы от плотности сухого сложения образца можно представить также рефракционной моделью

$$n_d = 1 + (n_m - 1)\rho/\rho_m; \quad (3)$$

$$k_d = k_m\rho/\rho_m, \quad (4)$$

где n_m и k_m – значения действительной и мнимой частей показателя преломления твердой фазы смеси, ρ_m – плотность твердой фазы и ρ – плотность сухого сложения. Дело в том, что при экспериментальных измерениях не удается поддерживать по-

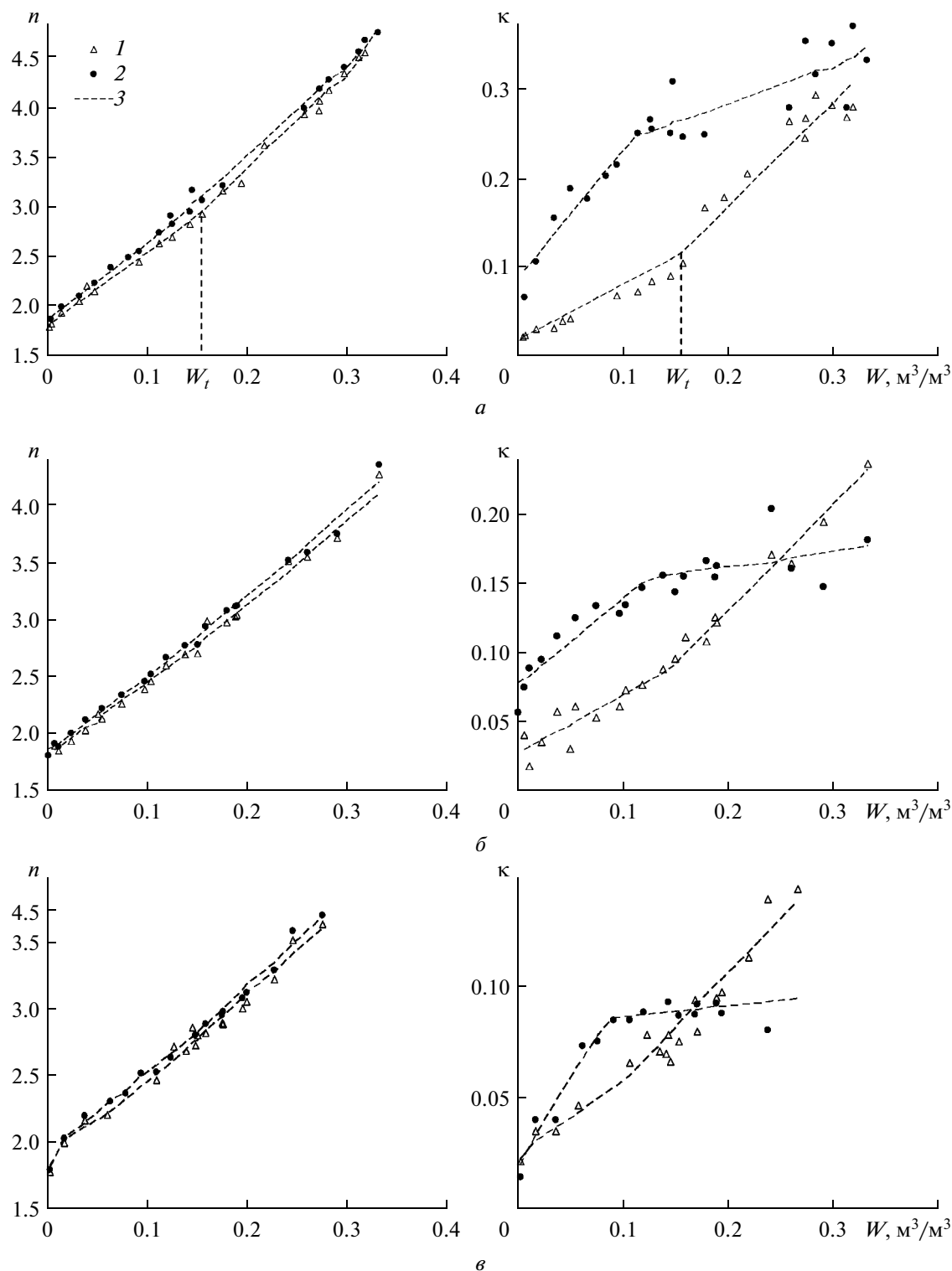


Рис. 2. Зависимость действительной и мнимой частей показателей преломления порошков из кварцевых гранул от объемной влажности: *a* – образец 1; *б* – образец 2; *в* – образец 3. 1 – на частоте 3.1 ГГц; 2 – на частоте 0.5 ГГц; 3 – расчет по рефракционной модели.

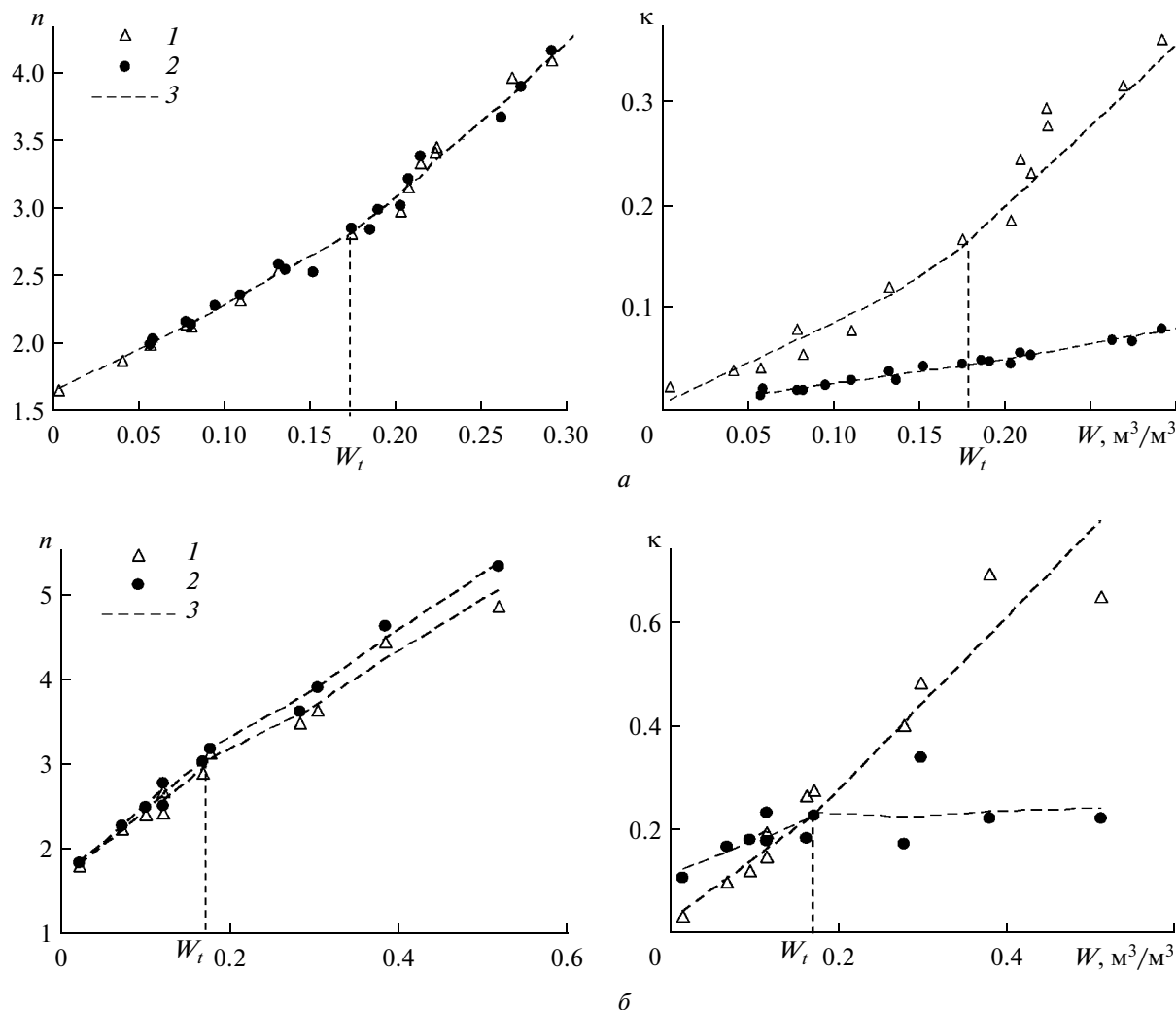


Рис. 3. Зависимость действительной и мнимой частей показателей преломления от объемной влажности: *a* – образец 4 (1 – на частоте 3.5 ГГц; 2 – на частоте 0.5 ГГц; 3 – расчет по рефракционной модели); *б* – образец 5 (1 – на частоте 7.6 ГГц; 2 – на частоте 0.8 ГГц; 3 – расчет по рефракционной модели).

стоянной плотность сухого сложения образцов разной влажности, а формулы (3) и (4) позволяют хотя бы частично учесть влияние плотности сухого сложения на КДП почв при различных влажностях.

Параметры модели подбирали для наилучшего соответствия экспериментальным данным методом наименьших квадратов. Погрешность определения n_1, n_2, κ_1 и κ_2 оценивали методом Монте-Карло. Для этого случайным образом в пределах погрешности измерений изменяли полученные в эксперименте значения n и κ , а затем находили средние значения n_1, n_2, κ_1 и κ_2 . Относительные стандартные отклонения составили на частотах ниже 4 ГГц 3–5% для n_1 , 3–8% для n_2 и 3–8% для κ_1 и κ_2 . После определения действительной и мнимой частей показателей преломления находились действительная и мнимая части КДП двух форм воды: $\epsilon'_i = n_i^2 - \kappa_i^2$ и $\epsilon''_i = 2n_i\kappa_i$, где

$i = 1, 2$. Относительная погрешность определения этих величин значительно больше, чем погрешность определения n и κ , особенно в случаях, когда значения κ приближаются к значениям n , и составляет 7–17%.

На рис. 4 приведены частотные зависимости ϵ' и ϵ'' двух форм воды в речном песке (образец 4) и в кварцевых гранулах (образец 2). Частотные зависимости КДП двух форм воды могут быть представлены в виде формул Дебая для проводящих жидкостей:

$$\hat{\epsilon}_i = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_{0i} - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau_i} + j \frac{\sigma_i}{\omega\epsilon_r},$$

где $\hat{\epsilon}_i$ – КДП двух форм почвенной влаги: при $W < W_t$ ($i = 1$) и при $W > W_t$ ($i = 2$), ϵ_{0i}, τ_i – статические диэлектрические проницаемости и времена релак-

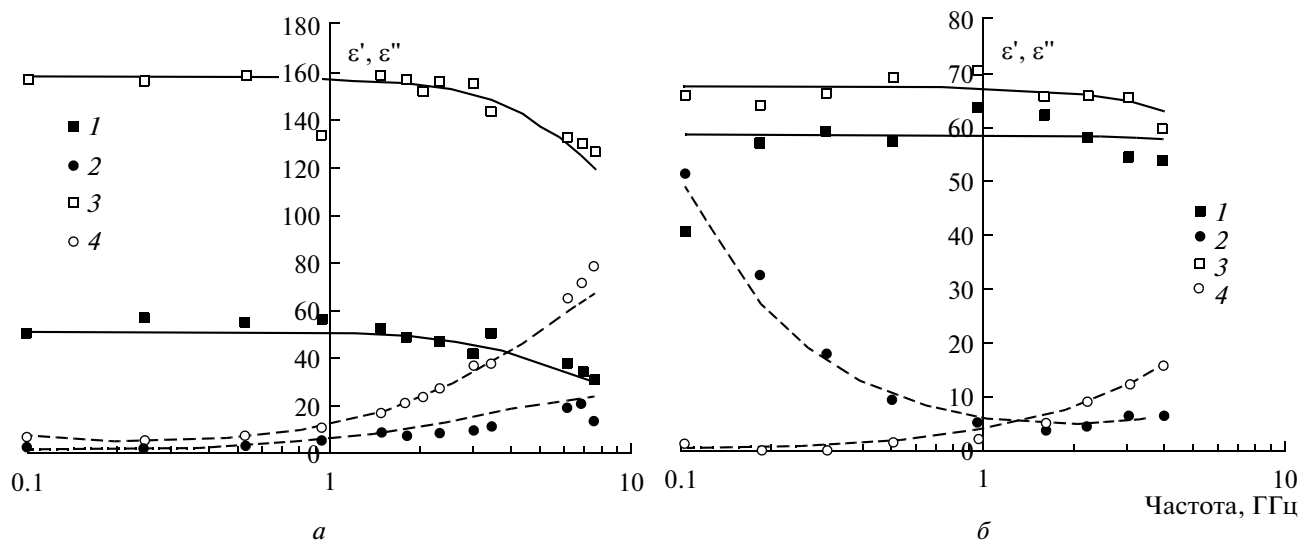


Рис. 4. Частотная зависимость комплексной диэлектрической проницаемости двух форм воды: *a* – в речном песке (образец 4); *б* – в кварцевом порошке (образец 2). 1, 2 – действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости воды при малой влажности ($W < W_t$), соответственно; 3, 4 – действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости воды при влажности ($W > W_t$); линии – расчет по модели Дебая.

сацией двух форм воды, $\varepsilon_\infty = 4.9$ – высокочастотная диэлектрическая проницаемость, ω – циклическая частота, $\varepsilon_r = 8.854 \times 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная, σ_i – ионная удельная проводимость.

Была исследована также возможность применения модели Гаврильяка-Негами, которая с учетом ионной проводимости имеет вид:

$$\hat{\varepsilon} = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{[1 + (j\omega\tau)^\gamma]^\beta} + j \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_r},$$

где γ и β – коэффициенты, имеющие значения от 0 до 1. На примере двух образцов было выяснено, что применение этой модели позволяет уменьшить сумму квадратов разностей между экспериментальными и расчетными данными на 25–30% (при минимизации методом наименьших квадратов), или уменьшить максимальные отклонения экспериментальных данных от расчетных на 5–13% (при использовании минимаксного метода). Эти значения отклонений практически не превышают по-

грешностей определения ε' и ε'' . Поэтому ниже используется модель Дебая, требующая определения меньшего числа параметров.

Результаты расчетов КДП по модели Дебая показаны на рис. 4 сплошными линиями для ε' и штриховыми для ε'' . Параметры модели Дебая, подобранные для наилучшего соответствия экспериментальным результатам, полученным для всех исследованных образцов, приведены в табл. 3. Значения высокочастотной проницаемости ε_∞ не подбирались, а во всех случаях принимались равными 4.9.

Из этих данных следует, что формы воды в исследованных образцах отличаются по своим диэлектрическим характеристикам от свободной воды. Статическая проницаемость ε_{01} первой формы воды (при малой влажности) в кварцевых порошках с крупными гранулами (образец 3) и речном песке (образец 4) имеет низкое значение, лишь не намного превышающее среднее значение для связанной воды, изменяющееся в разных типах почв от 22 до

Таблица 3. Параметры модели Дебая двух форм воды в образцах 1–5

№	Образец	Вода при влажности $W < W_t$			Вода при влажности $W > W_t$		
		ε_{01}	τ_1 , пс	σ_1 , См/м	ε_{02}	τ_2 , пс	σ_2 , См/м
1	Кварц. гранулы 10–50 мкм	72 ± 4	5.6 ± 0.8	0.59 ± 0.12	102 ± 8	11 ± 2	0.20 ± 0.04
2	Кварц. гранулы 50–100 мкм	58 ± 3	4.1 ± 0.8	0.27 ± 0.05	67 ± 5	11 ± 2	0 ± 0.01
3	Кварц. гранулы 100–400 мкм	48 ± 3	3.8 ± 0.8	0.29 ± 0.05	66 ± 5	11 ± 2	0 ± 0.01
4	Речной песок	51 ± 3	15.3 ± 2.9	0.02 ± 0.01	152 ± 12	12 ± 2	0.03 ± 0.01
5	Порошок СТ-10	90 ± 5	6.5 ± 0.8	0.42 ± 0.08	52 ± 4	10 ± 2	0 ± 0.01

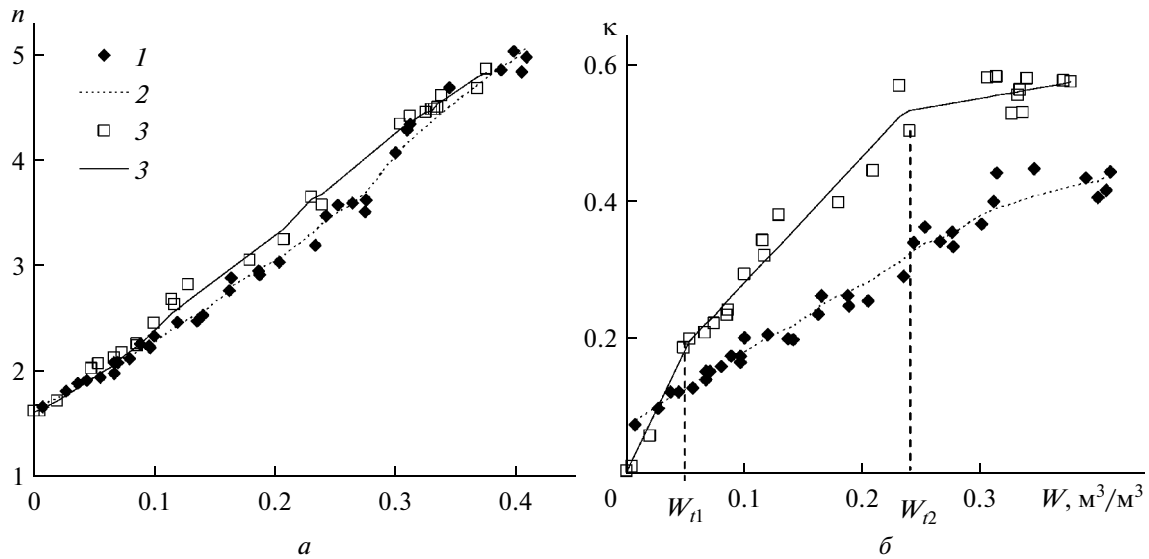


Рис. 5. Зависимость показателей преломления естественных суглинков от объемной влажности на частоте 1.4 ГГц: *a* – действительной части; *b* – мнимой части. 1, 3 – экспериментальные данные для образцов 6 (с высоким содержанием гумуса) и 7 соответственно; 2, 4 – расчет по рефракционной модели для образцов 6 и 7, соответственно. Для образца 7 показаны значения влажности, соответствующие точкам перегиба.

40 (Бобров, Миронов, 2008). При уменьшении размеров кварцевых гранул (образцы 1, 2) статическая проницаемость ϵ_{01} возрастает и в образце 1 значительно превышает значение статической проницаемости связанной воды. По-видимому, эту форму воды можно отнести к категории рыхлосвязанной.

Подобная тенденция возрастания наблюдается и у статической проницаемости ϵ_{02} , причем в образцах 1 и 4 она значительно выше статической проницаемости свободной воды, равной 79.3 при 22°C. В образцах 2 и 3 статическая проницаемость ϵ_{02} второй формы воды немного меньше, чем статическая проницаемость свободной воды.

Различие в значениях статической проницаемости ϵ_{02} и ϵ_{01} двух форм воды в образце 2 невелико и не намного превышает погрешность определения этих величин, однако эти две формы влаги существенно различаются по значениям мнимой части показателя преломления $\kappa(W)$ (рис. 2). Видно, что наклоны влажностной зависимости $\kappa(W)$ у разных форм воды различаются существенно, кроме того, различной является и частотная зависимость κ . Мнимая часть КДП первой формы воды (при малой влажности) возрастает при уменьшении частоты (см. рис. 4б), что объясняется относительно высокой удельной проводимостью $\sigma_1 = 0.27$ (см. табл. 3), а мнимая часть КДП воды при влажности $W > W_t$ уменьшается при уменьшении частоты из-за проводимости $\sigma_2 \approx 0$. Подобными свойствами обладают обе формы воды и в образце 3.

Существенно различаются статические проницаемости ϵ_{02} и ϵ_{01} двух форм воды в речном песке и

порошке СТ-10 (рис. 3). В речном песке (образец 4) проницаемость ϵ_{01} примерно такая же, как и в порошках крупных кварцевых гранул (образцы 2 и 3), однако ϵ_{02} выше, чем в порошке самых мелких гранул (образец 1). Обратная ситуация в порошке СТ-10 (образец 5). При возрастании влажности от 0 до $0.19 \text{ м}^3/\text{м}^3$ наблюдается более быстрый рост показателя преломления, чем при увеличении влажности свыше $0.19 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Здесь статическая проницаемость ϵ_{01} воды при малой влажности значительно выше, чем проницаемость ϵ_{02} воды при влажности $W > W_t$ и превышает соответствующее значение для свободной воды. Скорее всего, это объясняется тем, что кварц является гидрофильным, а сополимер СТ-10 – гидрофобным, поэтому при малой влажности вода в порошке СТ-10 может находиться только в капельной форме.

Следует отметить также различие в удельных проводимостях двух форм воды – вода второй формы имеет близкую к нулю проводимость. Пока непонятно, почему даже при учете погрешностей времени релаксации воды первой формы в кварцевых гранулах меньше, чем у свободной воды (8.77 пс при 22°C). Скорее всего, это эффект применения рефракционной модели (см. выше).

На рис. 5 приведены зависимости $n(W)$ и $\kappa(W)$ для естественных почв (образцы 6, 7) на частоте 1.4 ГГц. Видно, что в этих почвах имеется небольшое количество прочно связанной воды (влажность менее W_{t1}). Объемная доля этой воды составляет $0.1 \text{ м}^3/\text{м}^3$ в образце 6 и $0.05 \text{ м}^3/\text{м}^3$ в образце 7. Диэлектрические свойства связанной воды изучены

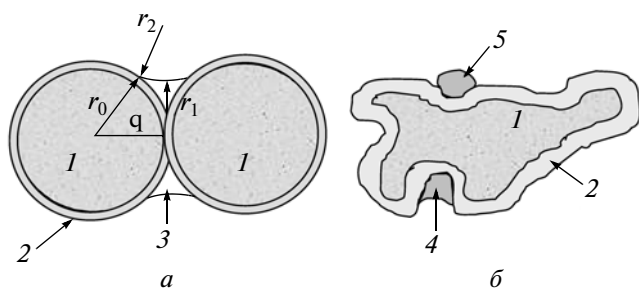


Рис. 6. Схема распределения форм влаги: *а* – при сферических частицах; *б* – при частицах неправильной формы. 1 – почвенные частицы, 2 – слой прочно связанной воды, 3 – стыковая вода, 4 и 5 – вода капиллярной конденсации (по Н.А. Качинскому), с отрицательной 4 и положительной 5 кривизной поверхности.

достаточно хорошо (Бобров, Миронов, 2008; Mironov, Kosolapova, 2009), поэтому здесь мы их не обсуждаем. При увеличении влажности более W_1 наклон зависимости $n(W)$ возрастает, а $\kappa(W)$ – уменьшается. При этом наклоны $n(W)$ в обоих образцах практически одинаковы, то есть действительная часть КДП этой формы воды (назовем ее стыковой) в обоих образцах также одинакова и на частоте 1.4 ГГц имеет значение $\varepsilon_1' = 72$, а мнимые части различаются: для образца 6 (с высоким содержанием гумуса) $\varepsilon_1'' = 16.6$ и для образца 7 $\varepsilon_1'' = 34.6$. Таким образом, диэлектрические свойства стыковой воды в почвах близки к свойствам воды при $W < W_1$ в образце 1 (кварцевые гранулы с наименьшим размером частиц). На частоте 1.4 ГГц в этом образце $\varepsilon_1' = 71.2$, а $\varepsilon_1'' = 13.7$.

Диэлектрические свойства воды при влажности выше второй точки перегиба ($W > W_2$) различаются сильнее. Действительная и мнимая части для образца 6 равны $\varepsilon_2' = 120$, $\varepsilon_2'' = 13.0$ и для образца 7 – $\varepsilon_2' = 103$, $\varepsilon_2'' = 3.5$. Возможно, это связано с наличием мелких пор в веществе гумуса, покрывающего поверхность почвенных частиц.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предпримем попытку объяснить рассмотренные отличия в диэлектрических характеристиках разных форм влаги в образцах, учитывая кривизну поверхности границы вода–воздух.

Исследованные образцы речного песка и кварцевых гранул состоят из достаточно крупных частиц и имеют небольшую удельную поверхность, поэтому содержат небольшое количество прочно связанной воды, распределенной по поверхности почвенных частиц слоем толщиной в несколько молекулярных диаметров (Качинский, 1970). Максимальная объемная доля этой воды не превышает 0.010–

0.0150 м³/м³. Наличие такого количества прочно связанной влаги практически не сказывается на значениях экспериментально определенных показателей преломления. Основная часть воды находится в форме водных манжет (стыковая или менисковая вода) на стыках почвенных частиц и в виде капель капиллярной конденсации на неровностях поверхности крупных почвенных частиц, при этом свободная граница (вода–воздух) может быть как вогнутой, так и выпуклой (рис. 6).

Оценим влияние искривления свободной поверхности воды на ее диэлектрическую проницаемость. Вода под искривленной поверхностью испытывает избыточное давление ΔP , которое положительно в случае выпуклой поверхности и отрицательно в случае вогнутой поверхности. При этом плотность ее изменяется на $\Delta \rho = \rho_0 \Delta P K$, где ρ_0 – плотность воды с плоской поверхностью; K – коэффициент изотермического сжатия (для воды он равен 4.96×10^{-10} Па⁻¹); $\Delta P = \eta(1/r_1 + 1/r_2)$ – избыточное давление Лапласа для случая поверхности с двойной кривизной (r_1 и r_2 – главные радиусы кривизны поверхности; η – коэффициент поверхностного натяжения жидкости).

При малых влажностях свободная граница менисковой воды имеет отрицательную кривизну, давление Лапласа отрицательно и плотность жидкости меньше, чем плотность свободной воды. Это приводит к уменьшению статической диэлектрической проницаемости воды. Для оценки статической диэлектрической проницаемости воды важна упаковка твердых частиц и их форма. Простейший случай, рассмотренный в литературе (Нерпин, Чудновский, 1986; Шукин, Перцов и др., 2006), позволяет учесть радиусы кривизны поверхности жидкости, формирующейся в стыках двух одинаковых сферических частиц радиуса r_0 (рис. 6). Радиусы r_1 и r_2 можно рассчитать по формулам: $r_1 = r_0(1 + \tan \theta - 1/\cos \theta)$ и $r_2 = -r_0(1/\cos \theta - 1)$, где θ – полярный угол, показанный на рис. 6.

Расчет статической диэлектрической проницаемости ε_{0e} воды в зависимости от ее плотности произведем по формуле Клаузиуса–Мосотти

$$\frac{\varepsilon_{0e} - 1}{\varepsilon_{0e} + 2\rho_e} \frac{\mu}{\varepsilon_r} = \frac{1}{3} \frac{N_A}{\varepsilon_r} \alpha_e, \quad (5)$$

где μ – молярная масса воды, ρ_e – плотность воды, α_e – поляризуемость молекулы воды, N_A – число Авогадро.

При изменении количества воды радиусы кривизны r_1 и r_2 будут меняться. Для твердых частиц разного радиуса r_0 при одинаковом количестве воды значения r_1 и r_2 будут разными. Расчетная объемная доля менисковой воды зависит от размеров твердых частиц и достигает 0.22–0.26 м³/м³ для образцов из кварцевых гранул с размерами частиц, указанными в табл. 3.

Расчеты с использованием формулы (5) показывают, что существенное влияние отрицательной кривизны поверхности на уменьшение статической диэлектрической проницаемости менисковой воды может наблюдаться в исследованных образцах кварцевых гранул при влажностях менее $0.03\text{--}0.04\text{ м}^3/\text{м}^3$, что составляет около четверти объема воды первой формы в песке и кварцевых гранулах. Таким образом, давление Лапласа лишь частично объясняет уменьшение статической проницаемости ϵ_{01} воды при влажностях $W < W_c$. По-видимому, существенную роль играет также взаимодействие с поверхностью твердых почвенных частиц, поэтому такую воду называют рыхлосвязанной. В некоторых работах, например (Чудинова, 2009), уменьшение диэлектрической проницаемости менисковой воды объясняется исключительно действием поверхностных сил.

Если вода в образцах существует в виде капель сферической формы радиуса r_1 , она находится под избыточным давлением Лапласа $\Delta P = 2\eta/r_1$. В этом случае $\Delta P > 0$ и $\Delta r > 0$, поэтому с уменьшением радиуса капли ее плотность и диэлектрическая проницаемость растут. Максимальные размеры капель воды определяются размерами пор. В случае упаковки твердых сферических частиц радиуса r_0 в кубические ячейки со стороной r_0 в пространство между частицами можно вписать жидкие капли, радиус r_1 которых можно выразить через радиус твердых частиц следующим образом: $r_1 = r_0(\sqrt{2} - 1)$. В случае тетраэдральной упаковки радиус вписанных жидких капель определяется по формуле $r_1 = r_0(2/\sqrt{3} - 1)$. Таким образом, максимальные радиусы капель составляют $(0.18\text{--}0.41)r_0$.

Расчет показывает, что заметное увеличение статической проницаемости воды происходит только при очень малых радиусах капель ($\epsilon_{0e} = 83.6$, при $r_1 = 0.1$ мкм и $\epsilon_{0e} = 131$, при $r_1 = 0.01$ мкм). Судя по экспериментальным данным, приведенным в табл. 4, такие капли могут существовать в порошке СТ-10 при малой влажности ($W < W_c$). Материал СТ-10 является гидрофобным, и вода при малой влажности не растекается по поверхности частиц, а образует капли со свободной поверхностью. Поскольку размеры частиц в этом образцы малы, то и капли имеют малые радиусы.

Вероятность существования свободных капель воды в кварцевых образцах невелика, так как кварц является гидрофильным материалом, однако на поверхности частиц при достаточно большой влажности могут возникать капли с положительной кривизной границы воздух-вода. Поскольку реальные почвенные частицы (в нашем случае это речной песок и естественные почвы) имеют сложную форму, радиусы кривизны их поверхностей могут быть весьма малыми, то и капельная вода может иметь

достаточно малые радиусы кривизны, приводящие к возрастанию статической диэлектрической проницаемости второй формы воды при $W > W_c$ по сравнению с диэлектрической проницаемостью свободной воды. Наибольшее возрастание диэлектрической проницаемости этой формы воды наблюдается в почве с высоким содержанием гумуса, что, возможно, объясняется наличием большого количества мелких пор в гумусе, вещества которого могут обладать как гидрофильными так и гидрофобными свойствами. Считая, что все поры одинаковы, можно оценить их минимальный размер по диаметру капель воды. Диэлектрической проницаемости капельной воды, равной 152 соответствуют диаметры капель, равные 0.017 мкм. Аналогичный расчет для размера пор в порошке СТ-10 дает значение 0.08 мкм.

В порошках из крупных сферических гранул вторая форма воды, хотя и имеет статическую диэлектрическую проницаемость больше, чем у первой формы, все-таки меньше, чем проницаемость свободной воды. Предположительно, это объясняется одновременным существованием менисков, как с положительной, так и с отрицательной кривизной свободной поверхности.

Сравнение полученных нами значений влажностей W_2 для почвенных образцов 6 и 7 ($0.25\text{--}0.26\text{ м}^3/\text{м}^3$) с данными диэлектрических измерений на частоте 50 МГц, приведенными в (Чудинова, 2009), а также с диаграммами термодинамического состояния воды (Воронин, 1990) позволяет сделать вывод, что эта точка перегиба близка к максимальной молекулярной влагоемкости (ММВ), то есть к точке появления капиллярной влаги.

Следовательно, можно сделать вывод о том, что основу воды первой формы составляет стыковая (или менисковая) вода с отрицательной кривизной поверхности. Вода, имеющая выпуклые свободные поверхности в виде капель или линз на поверхности почвенных частиц, составляет основу воды второй формы, у которой статическая диэлектрическая проницаемость превышает статическую проницаемость свободной воды (как в образцах 1 и 4) или близка к ней (как в образцах 2 и 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерения диэлектрической проницаемости капиллярно-менисковой воды в увлажненных кварцевых порошках и естественных почвах показали, что в почвах и влажных смесях отсутствует вода, идентичная свободной воде по своей диэлектрической проницаемости. В диапазоне влажностей, меньших НВ, по диэлектрическим характеристикам, кроме прочно связанной воды, можно выделить еще две формы. Первая из них существует в виде стыковой или менисковой воды с отрицательной кривизной свободной поверхности, и ее можно от-

нести к категории рыхлосвязанной. Вторая форма имеет статическую диэлектрическую проницаемость больше, чем свободная вода, и может существовать в виде сферических капель в гидрофобных средах или в виде мелких капель (линз) с положительной кривизной на поверхности почвенных частиц. Найденные частотные зависимости КДП этих форм воды показали, что их диэлектрические свойства удовлетворительно описываются моделью Дебая. Путем сравнения характеристик исследованных почв с почвами подобных типов, для которых в работах (Воронин, 1990, Чудинова, 2009) приведены почвенные гидрологические константы и границы смены категорий почвенной влаги, найдено, что точка перегиба на зависимостях $n(W)$ и $\kappa(W)$ близка к максимальной молекулярной влагоемкости (ММВ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беляева Т.А., Бобров А.П., Бобров П.П. и др.* Определение параметров моделей диэлектрической проницаемости почв с различной плотностью и различным содержанием гумуса по данным экспериментальных измерений в частотном диапазоне 0.1–20 ГГц // Исслед. Земли из космоса. 2003. № 5. С. 28–34.
- Беляева Т.А., Бобров А.П., Бобров П.П., Мандрыгина В.Н.* О выборе диэлектрической модели при определении диэлектрической проницаемости связанной воды в грунтах / Тез. докл. 2-й Всерос. открытой конф. “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. 16–18 ноября 2004 г. Москва: ИКИ РАН, 2004. С.181.
- Бобров А.П., Бобров П.П., Ивченко О.А., Мандрыгина В.Н.* Определение диэлектрической проницаемости прочно- и рыхлосвязанной воды на СВЧ с использованием емкостной модели диэлектрической проницаемости почв // Вестн. ОмГПУ. Вып. 2006. Омск: электронный ресурс. <http://www.omsk.edu/article/vestnik-omgpu-149.pdf>
- Бобров П.П., Миронов В.Л., Ивченко О.А., Красноухова В.Н.* Спектроскопическая модель диэлектрической проницаемости почв, использующая стандартизованные агрофизические показатели // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 1. С. 15–23.
- Воронин А.Д.* Энергетическая концепция физического состояния почв // Почвоведение. 1990. № 5. С. 7–19.
- Качинский Н.А.* Физика почвы. Часть 2. М.: Высшая школа, 1970.
- Комаров С.А., Миронов В.Л.* Микроволновое зондирование почв. Новосибирск: Наука, 2000. 350 с.
- Лещанский Ю.И., Лебедева Г.Н., Шумилин В.Д.* Электрические параметры песчаного и глинистого грунтов в диапазоне сантиметровых, дециметровых и метровых волн // Изв. вузов. Радиофизика. 1971. Т. 14. № 4. С. 562–569.
- Нерпин С.В., Чудновский А.Ф.* Энерго- и массообмен в системе растение–почва–воздух. Л.: Госметеиздат, 1986. 361 с.
- Чудинова С.М.* Диэлектрические показатели почвы и категории почвенной влаги // Почвоведение. 2009. № 4. С. 441–451.
- Шукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А.* Коллоидная химия. М.: Высш. шк., 2006. 444 с.
- Curtis, J.O., Weiss C.A. Jr., Everett, J.B.* Effect of Soil Composition on Dielectric Properties // Technical Report EL-95-34. U.S. Army Corps of Engineers. Waterways Experimental Station. Vicksburg, MS, 1995.
- Dobson M.C., Ulaby F.T., Hallikainen M.T. et al.* Microwave dielectric behavior of wet soil. Part II: Dielectric mixing models // IEEE Trans. Geosci Rem. Sens. 1985. V. GE-23. № 1. P. 35–45.
- Mironov V.L., Bobrov P.P.* Soil dielectric spectroscopic parameters dependence on humus content // Proc. IGARSS'03. Toulouse, France, 2003. V. 2. P. 1106–1108.
- Mironov V.L., Dobson M.C., Kaup V.H. et al.* Generalized refractive mixing dielectric model for moist soils // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2004. V. 42. № 4. P. 773–785.
- Mironov V.L., Kosolapova L.G., Fomin S.V.* Physically and mineralogically based spectroscopic dielectric model for moist soils // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. V. 47. № 7. Part 1. 2009. P. 2059–2070.

Dielectric Properties of Capillary–Meniscus Soil Water

T. A. Belyaeva, P. P. Bobrov, O. V. Kondratyeva, A. V. Repin

Omsk State Pedagogical University, Omsk

The results of complex permittivity measurements of spherical silica granules powders, powders of hydrophobic dielectric, river sand and two samples of natural soils, moistened by distilled water, at the frequency range of 0.1–8 GHz are presented. It is found that when soil moisture is less than field capacity, in the soils in addition to firmly bound water it can be distinguish two forms of water with different permittivity. It is shown that the permittivity of these two forms of water depends on the physical properties of minerals, the shape and the size of soil particles. The parameters of the Debye model for these forms of water have been determined. Possible causes leading to a change in permittivity of water in contact with soil particles have been considered. It is found that transient moisture from one form to another close to the maximum molecular capacity.

Keywords: dielectric constant, wet mixtures, microwaves, categories of soil water, remote sensing

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ВИХРЕЙ ОКЕАНА ПО СПУТНИКОВЫМ ИК-ИЗОБРАЖЕНИЯМ

© 2011 г. А. И. Алексанин*, А. А. Загумёнов

Учреждение Российской академии наук Институт автоматизирующей и процессов управления ДВО РАН, Владивосток

*E-mail: aleks@satellite.dvo.ru

Поступила в редакцию 09.03.2010 г.

Композиционные карты термических структур поверхности моря в форме доминантных ориентаций термических контрастов (ДОТК) позволяют регулярно получать информацию о циркуляции поверхности океана. Высокая корреляция доминант с направлениями течений позволяет использовать их для идентификации вихрей воды. Предложен новый автоматический алгоритм идентификации вихрей моря, выделяющий произвольные замкнутые циркуляции. Алгоритм состоит из трех процедур: идентификации вихря с расчетом его центра, размера и формы; построения контуров вихря на основе минимума величины “протекания” ДОТК через контур; анализа полученных контуров и отбраковки ложно выделенных объектов. Рассмотрена основная проблема автоматического мониторинга вихрей – наличие значительного количества ложных объектов. Предложены алгоритмы отбраковки, приведена их эффективность и оценена возможность автоматического прослеживания вихря по последовательности карт. Алгоритм апробирован на двухмесячной серии композиционных карт ДОТК Охотоморского района при сложных облачных условиях наблюдения.

Ключевые слова: вихри океана, автоматическое обнаружение, спутниковое изображение, ориентации термических контрастов

ВВЕДЕНИЕ

Автоматическая идентификация вихрей океана с оценкой положения центра и формы является важной задачей анализа структуры циркуляции моря. Ежедневный оперативный мониторинг вихрей в настоящее время возможен только по данным спутникового дистанционного зондирования (ДЗ) в видимом и ИК-диапазонах спектра. Наиболее часто применяемое на практике визуально-ручное дешифрирование спутниковых ИК-изображений трудоемко, субъективно и затруднительно при наличии сложных облачных условий (Алексанин и др., 1997; Бедрицкий и др., 2007). В основе дешифрирования лежит известный факт “вытягивания” изотерм в сдвиговом потоке (Федоров, 1987; Борисов и др., 1989; Essen, 1995), что приводит к высокой корреляции ориентаций изотерм с направлениями скоростей поверхностных течений (Алексанин et al., 1998; Алексанин и др., 2001). В последние годы было предпринято значительное количество попыток создания алгоритма автоматического выделения вихрей. В качестве базовой информации для идентификации вихрей используются различные градиентные характеристики поля яркости изображения: градиенты яркости в форме ориентированных текстур (Lemonnier, 1994); направления градиентов яркости, обработанные алгоритмами данного текстурного анализа (Алексанин et al., 2001; Castellani, 2006); направления оптических потоков изображения (Fernandes, 2009); направления и модули градиентов (Hai et al., 2008). Можно выделить следующие подхо-

ды к распознаванию вихрей: использование круговой модели циркуляции в качестве начального приближения при расчете центра вихря (Алексанин et al., 2001); применение нейронных сетей с обучением (Fernandes, 2009; Hai et al., 2008); использование произвольной замкнутой модели циркуляции (Алексанин и др., 2004). Для уточнения центра вихря, оценки его формы и размера часто используется эллипсоидальная модель циркуляции (Алексанин et al., 2001; Hai et al., 2008; Fernandes, 2009). Согласно последним публикациям, в настоящее время удается добиться высокой достоверности выделения вихрей при благоприятных погодных условиях наблюдений. Результаты апробированы в основном на тестовых выборках. В работе (Hai et al., 2008) представлены результаты автоматического и довольно успешного мониторинга вихрей в районе Гольфстрима за пять лет. Однако небольшое количество вихрей, прослеженное за эти годы, указывает на то, что проводился мониторинг только рингов, которые существенно легче выделяются из-за их размера и наличия ярко выраженного ядра в поле температур. В данной работе отмечаются трудности выделения циклонических рингов из-за падения со временем термических контрастов ядра. Как правило, при автоматическом выделении вихрей выделяется и значительное количество ложных объектов, эффективность фильтрации которых обычно не высока. Решение данной проблемы не достаточно детально освещается в публикациях на данную

тему, кроме того, не приводятся никакие статистические оценки и причины пропуска вихрей.

Циркуляция моря — это плотная упаковка вихрей разных размеров (Каменкович и др., 1987), поэтому результат поиска должен зависеть от размера шаблона поиска. Аппроксимация формы вихря эллипсом не всегда соответствует действительной форме объекта, что влияет как на эффективность обнаружения, так и на оценки положения центра и размера вихря. Нет также примеров решения задачи автоматической идентификации вихря по последовательности изображений. Решение этой задачи является конечной целью автоматического мониторинга вихрей. Основная масса работ сделана на материале с благоприятными погодными условиями. При облачных условиях необходимо использовать композиционные карты. Встает вопрос о выборе оптимальных алгоритмов построения композиционных карт для уверенного мониторинга вихрей и оценки допустимого временного интервала между изображениями, когда автоматическая идентификация по последовательности изображений эффективна. Поэтому основными целями данной работы были: развитие алгоритма идентификации вихрей (Алексанин и др., 2008; Алексанин и др., 2009) с оценкой положения центра на основе модели произвольной замкнутой циркуляции; создание алгоритма выделения ядра и формы вихря; построение критериев отбраковки ложных объектов; создание алгоритма идентификации вихря на последовательности изображений; апробация алгоритмов на сложном по погодным условиям регионе Охотского моря в режиме регулярного мониторинга.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКИ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В качестве исходных данных были использованы меркаторские проекции ИК-изображений спутников NOAA района Охотского моря и Курильских о-вов (41° – 52° с.ш., 141° – 160° в.д.) за период сентябрь–октябрь 2006 г. Всего было взято 199 исходных изображений с разной степенью покрытия облачностью (от 5 до 90%). Для каждого исходного изображения были построены карты доминантных ориентаций температурных контрастов (ДОТК). Для ИК-изображений поверхности океана ДОТК (Алексанина, 1997) является доминирующей касательной к изотермам в заданной окрестности точки поля (i, j) , и характеризуется углом D_{ij} , лежащим в диапазоне $(-\pi/2, \pi/2)$, и величиной статистической значимости P_{ij} . Высокая корреляция статистически значимых ДОТК с направлениями поверхностных течений (Алексанин и др., 2001) и ее рост при росте скорости течения позволили рассматривать ДОТК как оценки направлений течений. Для вихрей статистически значимые как по пространству, так и по времени доминанты аккумулируются обычно в зонах максимальных скоростей (Алексанин и др., 2007). Игнорирование доминант с низкой статистической значимостью дает более корректное пред-

ставление об общей картине циркуляции моря, но появляются области, где нет оценок циркуляции.

Обработка данных показала, что за пять дней при существующих облачных условиях набирается достаточно изображений для построения композиционной карты ДОТК, на которой представлены значительные по площади структуры циркуляции. Были построены композиционные карты ДОТК за непересекающиеся периоды по пять дней. И хотя ежедневный мониторинг более эффективен, выбор непересекающихся периодов позволяет исключить случаи сравнения вихрей, построенных по одним и тем же изображениям. Это существенно ухудшает прослеживание вихрей, но улучшает объективность оценки эффективности критериев идентификации вихрей. Всего было построено 12 композиционных карт, которые в дальнейшем были использованы непосредственно для расчетов алгоритмами идентификации.

Тестовые вихри на ИК-спутниковых изображениях выбирались визуально по характерным термическим особенностям циркуляции воды (Алексанин и др., 1997). В случае нахождения подобных структур, вручную выбирался центр вихря и оценивались его характерные размеры, закрутка, строение. Выбирались вихри с радиусами в диапазоне 30–60 км, соответствующие синоптическому масштабу циркуляции моря. Были сформированы два набора тестовых вихрей с учетом следующих условий. В первом наборе для каждой пятидневной композиционной карты ДОТК в том интервале дат, в котором она построена, были собраны тестовые вихри, которые удалось обнаружить на соответствующих ИК-изображениях. Затем наборы для всех композиционных карт ДОТК были просуммированы и получены 122 тестовых вихря, имевших разные размеры, структуру и направление закрутки. Для построения второго набора тестовых вихрей за основу был взят первый набор, в котором были выявлены устойчивые во времени вихри (от 15 дней и более). Было найдено 11 устойчивых вихрей, каждый из которых прослеживался как по полутонным изображениям, так и на непрерывной временной последовательности карт ДОТК. Поскольку для визуальной идентификации вихря требуется наличие значительной части его изображения, открытой от облачности, то, возможно, некоторые вихри не попали в список тестовых, хотя и проявились в композиционных картах ДОТК.

АЛГОРИТМЫ ПОИСКА ВИХРЕЙ И ОЦЕНКИ ИХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Отличительной чертой нового метода автоматического выделения вихрей океана с расчетом параметров их положения, размера и формы является отказ от жесткой модели циркуляции вихря. Поскольку ДОТК можно рассматривать как оценки направлений течений, то новый алгоритм базируется на построении замкнутых контуров вихря на основе минимизации “протекания” ДОТК сквозь кон-

тур. Это позволяет выделять произвольную форму замкнутой циркуляции, а также локализовать фронты, если циркуляцию разомкнуть. Метод использует два алгоритма: алгоритм поиска вихря с оценкой его размера и алгоритм построения контура ядра вихря.

Алгоритм поиска вихрей заданного характерного размера

Шаг 1. Используя ориентации термических контрастов как направления скоростей, ищем центры вихрей с характерным размером R_0 на основе модели замкнутой циркуляции.

Для каждой точки изображения $X_i = (x_i, y_i)$, рассматриваемой как потенциальный центр вихря, все пространство разбивается на K секторов, и для каждого из секторов вычисляется абсолютная величина “протекания”

$$\delta_k = \min_D 1/N_k \sum w_j |D_j - DM_j|, \quad (1)$$

где $j: \|X_i - X_j\| < R_0, j = 1, N_k, D_j$ – ДОТК в точке X_j, DM_j – модельная оценка ДОТК в секторе (используется линейная модель роста угла ДОТК в секторе k); w_j – весовой коэффициент, пропорциональный статистической значимости доминанты j ; N_k – количество доминант в секторе k .

$$DM_j = D^0 + D' \varphi_j,$$

где φ_j – угол точки X_j в полярных координатах относительно биссектрисы сектора; D^0 – средняя величина доминант в секторе.

Критерий отбора точек, претендующих на центры вихрей,

$$\sigma_D = 1/K \sum \delta_k < \varepsilon, \quad k = 1, K. \quad (2)$$

Оставляем только те центры, в R_0 -окрестности которых нет других точек с лучшим критерием σ_D .

Шаг 2. Построение начального приближения вихря – грубый расчет внешней границы.

В каждом секторе с шагом ΔR наращиваем его размер R_k до тех пор, пока выполняется условие

$$\delta_k < \varepsilon \quad \text{для } j: R < \|X_i - X_j\| < R + \Delta R.$$

Если это условие не выполняется уже для доминант, лежащих в диапазоне $R_0 - \Delta R < \|X_i - X_j\| < R$, то размер сектора уменьшаем. Контролируем размеры получившихся величин R_k таким образом, чтобы отношение максимального сечения вихря к минимальному не превышало заданной величины (трех). Грубое начальное приближение контура внешней границы вихря – контур, проходящий через K точек, лежащих по середине внешней границы секторов.

Шаг 3. Построение оптимального контура ядра вихря на основе минимизации протекания через контур

$$\sigma_c = \min_{\{X_m\}} \delta_c / L < \varepsilon_c \quad \text{для } j: \|X_c - X_j\| < \Delta R_c, \quad (3)$$

где L – длина контура; X_c – точка контура, ближайшая к точке расчета ДОТК X_j ; $\{X_m\}$ – точки концов отрезков контура; δ_c – модуль протекания через контур, рассчитываемый по формуле (1) с параметрами DM_j и N_k , характеризующие ориентацию отрезка контура с точкой X_c и количество участвующих в расчетах доминант. Отбраковка вихрей по критерию протекания через контур. Уточнение центра вихря, рассчитывающегося как точка центра тяжести контура.

Для анализа направления закрутки вихря рассчитывается также величина среднего протекания σ_A , рассчитываемая также по формуле (3), где δ_c среднее скалярное произведение единичных векторов ДОТК с единичными векторами – ортогоналями к контуру в точках X_c , направленных от центра вихря. Эта величина характеризует наклон ДОТК к зоне максимальных скоростей в сдвиговом потоке (Александрин 2001 и др.), а не величину дивергенции/конвергенции скоростей поверхностных течений.

Алгоритм построения контура вихря

Алгоритм является итерационным и сходящимся за конечное число шагов. Вход – грубое начальное приближение контура внешней границы вихря и точка его центра. Поскольку начальное приближение внешней границы вихря строилось при максимально допустимой величине протекания, то при уточнении контура по критерию протекания последний стремится в зону наибольшей когерентности доминант. Такая зона чаще всего находится вблизи области максимальных скоростей поверхностных течений (Александрин и др., 2001; Aleksanin et al., 2007).

Шаг 1. Оптимальная расстановка точек контура.

Решается оптимизационная задача (3) посредством последовательного смещения точек концов отрезков контура. Для точки X_m , обеспечивающей при ее смещении максимальное убывание величины δ_c , решается задача

$$\min_{\alpha} \delta_c(X_m + \alpha r),$$

где r – направление смещения точки, проходящее через точку конца отрезка контура и центр вихря.

Пересчет центра вихря, если центр оказался вне контура, либо точка контура совпала с центром.

Шаг 2. Есть ли еще точки, позволяющие уменьшить протекание? Да – шаг 1. Нет – шаг 3.

Шаг 3. Дробим отрезок с максимальной величиной протекания. Если дробление не предельное и критерий протекания через новые отрезки не выполняется, то переход на шаг 1.

Шаг 4. Анализ получившегося контура, уточнение центра вихря и отбраковка объекта по величине протекания σ_c .

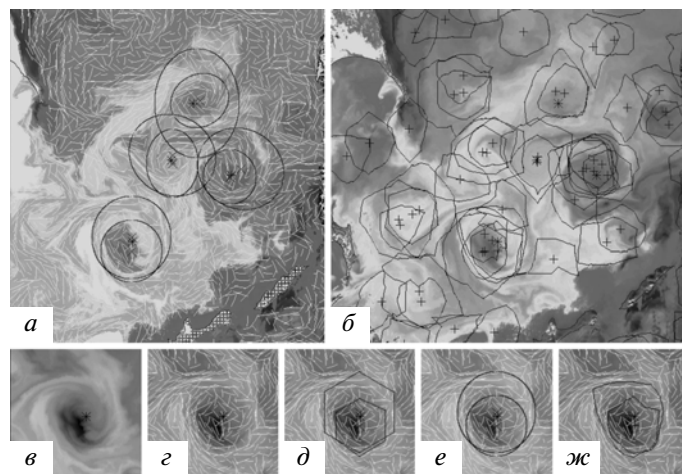


Рис. 1. *a* – Полутоновое ИК-изображение за 06.09.2006, совмещенное с композиционной картой ДОТК за 06.09.2006–10.09.2006, центры (×) и контуры внешних границ некоторых вихрей, аппроксимированные эллипсами и выделенные по двум характерным размерам одновременно (40 и 60 км); а также центры тестовых вихрей (*); *б* – полутоновое изображение за 06.09.2006 и контуры всех выделенных объектов (без отбраковки); *в, г, д, е, ж* – стадии работы алгоритмов на примере одиночного вихря.

Пример работы алгоритма поиска вихрей приведен на рис. 1*а*, на рис. 1*б* представлены результаты работы алгоритма построения контуров. На рис. 1*в–ж* приведены ключевые стадии обработки изображений на примере конкретного вихря: *в* – полутоновое изображение вихря с центром, определенным экспертом; *г* – полутоновое изображение и ДОТК; *д* – начальные приближения центров и границ вихря, построенные для двух характерных размеров R_0 ; *е* – эллиптические аппроксимации границ вихря; *ж* – построенные контура вихря для двух характерных размеров с пересчитанными центрами вихря.

стовых вихрей в экспериментах оценивалась автоматически по количеству соответствий рассчитанных вихрей тестовым вихрям. Соответствие устанавливалось в том случае, если в окрестности центра тестового вихря в пределах радиуса поиска, с которым рассчитывались вихри, находился центр рассчитанного вихря. В случаях, когда таких центров было несколько, в соответствие ставился ближайший центр, а остальные помечались специальным флагом и не учитывались ни как ложные, ни как истинные. Для интерпретации полученных результатов проводился визуальный анализ.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Был проведен ряд экспериментов, в ходе которых исследовалась эффективность выделения вихрей, возможность и эффективность отбраковки ложных объектов на этапах расчета начальных приближений и построения контуров, прослеживание вихрей во времени. Эффективность выделения те-

Оценка эффективности обнаружения вихрей

Целью эксперимента было получение оптимального критерия для выделения вихрей на этапе построения его внешней границы. В данном эксперименте по каждой композиционной карте ДОТК при разных параметрах были рассчитаны точки-претенденты на центры вихрей. Поиск велся по трем характерным размерам вихрей с радиусами окрестности расчета – 20, 40 и 60 км. Берлись различные критерии согласованности модельных и реальных доминант в секторе с параметрами согласованности σ_D – 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 и 0.6. Здесь и далее расчеты проводились с шагом $\Delta R = 4$ км и величиной $K = 6$. Отслеживались следующие показатели: количество всех выделенных объектов при разных характерных размерах и σ_D ; количество выделенных объектов, соответствующих тестовым вихрям и количество ложных объектов; количество вихрей, выделенных хотя бы при одном R_0 и количество вихрей, выделенных одновременно при двух и трех характерных размерах.

На рис. 2 приведен график эффективности автоматического выделения вихрей. Следует заметить,

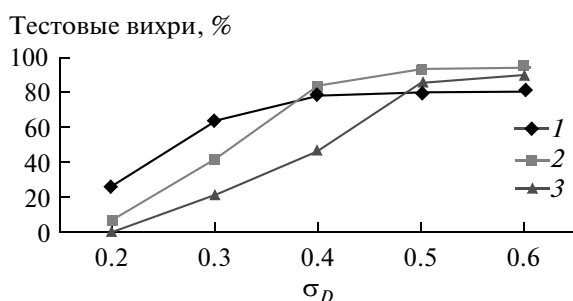


Рис. 2. Зависимость количества выделенных вихрей (в процентах) от критерия выделения σ_D и радиуса окрестности расчетов R_0 (1 – 20 км; 2 – 40 км; 3 – 60 км).

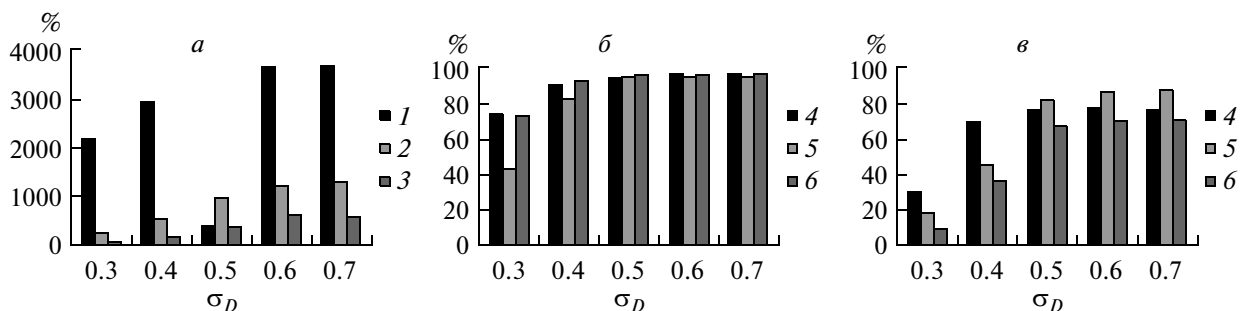


Рис. 3. Графики эффективности работы алгоритма выделения вихрей в зависимости от величины критерия σ_D и радиуса зоны характерного размера R_0 (1 – 20 км, 2 – 40 км, 3 – 60 км, 4 – 20 и 40 км, 5 – 40 и 60 км, 6 – 20, 40 и 60 км): а – процент ложных объектов относительно выделенных истинных при разных радиусах поиска; б – процент выделенных вихрей хотя бы при одном радиусе поиска; в – процент вихрей, выделенных при нескольких радиусах поиска одновременно.

что даже при слабых критериях отбраковки выделение всех вихрей при одном радиусе поиска не происходит. Максимальное количество вихрей выделяется при двух радиусах поиска (40 и 60 км). Результаты показывают, что при величине критерия отбраковки $\sigma_D = 0.5$ выделяется подавляющее большинство вихрей (94%). Анализ девяти невыделенных тестовых вихрей показал, что на значительной площади каждого вихря не было доминант. Вихри, выделенные с радиусом окрестности расчета 20 км, не добавляют новых тестовых вихрей в список выделенных и в несколько раз увеличивают список ложно выделенных объектов. Поэтому поиск вихрей с радиусом 20 км в дальнейшем не проводился.

На рис. 3 приведены результаты работы алгоритма на этапе построения грубой границы внешнего контура (шаги 1 и 2 первого алгоритма). Оценивалось количество ложно выделенных объектов и эффективность идентификации тестовых вихрей как по совокупности выделений по двум характерным размерам R_0 , так и при выделении по двум размерам одновременно. Следует отметить, что количество ложно выделенных объектов во много раз превышает количество истинных. И чем меньше радиус зоны характерного размера, тем больше этот процент. Очень большим оказался процент вихрей, которые выделяются при поиске с разными радиусами одновременно, что может служить индикатором при отсеивании ложных объектов.

Дальнейшие эксперименты показали, что уточнение центров вихрей на основе алгоритма построения их контуров улучшают показатели правильно выделенных вихрей, но не существенно.

Отбраковка ложных объектов на этапе построения начального приближения геометрии вихря

Целью эксперимента было нахождение эффективных критериев отбраковки ложных объектов по результатам расчетов алгоритмом поиска вихрей. В данном эксперименте по исходным композиционным картам ДОТК были выделены объекты по критерию $\sigma_D = 0.5$ и построены их внешние границы.

Эксперимент проводился отдельно для радиусов R_0 , равных 40 и 60 км, для которых за 100% брались 111 и 102 выделенных тестовых вихря соответственно, а за 100% ложных вихрей – 1055 и 335 объектов. В ходе эксперимента оценивался процент оставшихся после отбраковки тестовых вихрей и процент отбракованных ложных вихрей. Исследовались следующие критерии, значения которых рассчитывались для каждого объекта:

- средний модуль протекания σ_D ;
- замкнутость циркуляции (отклонение прироста углов ДОТК по всем секторам от 2π)

$$\Delta\varphi = \left| 2\pi - \sum D_k^i 2\pi / K \right|, \quad k = 1, K;$$

- отклонение циркуляции вихря от круговой модели циркуляции

$$\Delta D^0 = 1/K \sum \left| D_k^0 - \pi(2k-1)/K \right|, \quad k = 1, K.$$

Исследовалась эффективность как отдельных критериев, так и их совместное применение. Эксперименты показали, что при различных порогах представленные критерии не снижают существенно число ложных объектов без потерь тестовых вихрей. Это объясняется не столько грубостью выбранной модели циркуляции вихря, сколько сложными условиями наблюдения – наличием значительной облачности, не позволяющей рассчитать устойчивые во времени доминанты для большинства композиционных карт. Но даже при использовании “мягкого” критерия расчета композиционной карты (выбор ближайших к дате композиционной карты статистически значимых доминант) значительное количество тестовых вихрей не имеет плотного покрытия площади вихря доминантами. Для количественного сравнения эффективности критериев было выбрано значение допустимых потерь тестовых вихрей при отбраковке, равное 20%. В результате эксперимента было обнаружено, что наиболее эффективным является одновременное применение критерия σ_D с $\Delta\varphi$, или ΔD^0 . Совместное применение критериев обеспечивает 40% отбраковки ложных объектов при сохранении 80% истинных

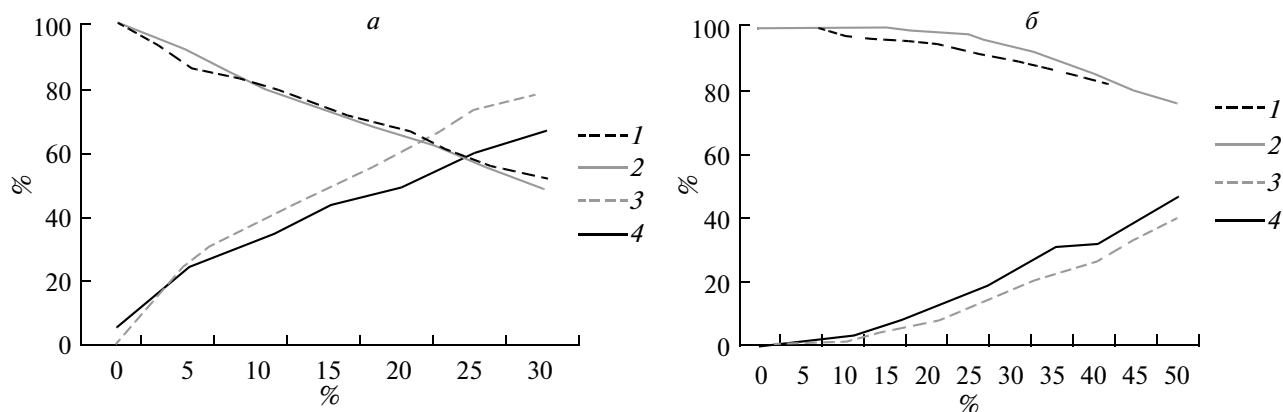


Рис. 4. Количество выделенных вихрей (линии 1, 2) и отбраковываемых ложных объектов (линии 3, 4) для двух радиусов $R_0 = 40$ км (1, 3) и 60 км (2, 4) в зависимости от порога отбраковки: а – при одновременном выполнении критерия протекания σ_D и критерия замкнутости циркуляции $\Delta\phi$; б – при выполнении хотя бы одного из критериев (σ_D или ΔD^0).

вихрей. На рис. 4 приведены графики эффективности при совместном использовании нормированных критериев отбраковки. Для нормировки критерия его порог подбирался таким образом, чтобы обеспечивался заданный процент потерь тестовых вихрей при его индивидуальном применении. Поэтому ось абсцисс графика – это процент потерь тестовых вихрей по одиночному критерию. Остальные сочетания критериев, включая одновременное выделение вихрей двумя радиусами поиска, обеспечивают лишь 20–30% отбраковки ложных объектов при сохранении 80% тестовых вихрей. Анализ “потерянных” тестовых вихрей при использовании разных комбинаций критериев показывает, что это в значительной мере разные вихри. Поэтому оптимальная настройка сочетаний критериев отбраковки объектов на этапе выделения вихрей является самостоятельной задачей.

Отбраковка ложных объектов по параметрам контуров вихрей

Целью эксперимента было исследование возможных критериев отбраковки ложных объектов на основе характеристик строящегося контура вихря. При расчете контуров использовались статистически значимые доминанты в окрестности контура $\Delta R_c = 5$ км. Производился пересчет центра вихря по полученному контуру. Эксперимент проводился на тех же данных и по той же методике, что и предыдущий. Исследовались следующие критерии:

- степень полноты контура $F = S/L^2$, где S – площадь, а L – длина контура;
- средний модуль протекания на единицу длины контура σ_c .

В результате эксперимента было обнаружено, что наиболее эффективным является критерий отбраковки по величине σ_c , применение которого обеспечивает 60% отбраковки ложных объектов при сохранении 80% истинных вихрей для $R_0 = 40$ км, а также их совместное применение (рис. 5). Сле-

дует также отметить существенно меньшую эффективность критериев при поиске вихрей с радиусом $R = 60$ км.

Визуальный анализ полученных контуров показал в целом их хорошее соответствие циркуляции вихрей, определяемой визуально, и не всегда эта форма близка к эллиптической. В результате оптимальной подгонки получившийся контур обычно меньше по размерам, чем его начальное приближение, но часто он не достигает зоны максимальных скоростей, а остается с внешней стороны этой зоны. Наиболее вероятное объяснение – многоэкстремальность задачи оптимальной подгонки контура. При радиусе окрестности $R_0 = 40$ км контур лежит ближе к зоне максимальных скоростей, что объясняется преобладанием этого характерного размера в выбранном регионе моря. Поскольку в сдвиговом потоке изотермы имеют наклон к зоне максимальных скоростей (Алексанин и др., 2001; Алексанин и др., 2007), то такая особенность построения контуров позволяет надеяться на определение знака закрутки вихря автоматически. Закрутка вихря устойчиво определяется по параметру σ_A , средняя величина которого при $R_0 = 40$ км для антициклонов равнялась $\sigma_A = -0.11 \pm 0.1$, а циклонов – $\sigma_A = 0.14 \pm 0.14$. Для $R_0 = 60$ км получены фактически те же результаты.

Была также рассмотрена величина рассогласований центров вихрей, рассчитанных автоматически и оцененных визуально. На этапе построения начального приближения вихря эта величина для $R_0 = 40$ км оказалась равной $\Delta X_{40} = 11 \pm 7$ км, а для $R_0 = 60$ км – $\Delta X_{40} = 14 \pm 16$ км. Изменение положения центра вихря при его пересчете по контуру фактически не меняло эти рассогласования, а лишь незначительно увеличивало количество правильно идентифицированных тестовых вихрей. В то же время некоторые рассогласования были значительные (более 20 км и превышали иногда размер вихря). Их анализ показал, что причинами были следующие факторы: значительное перемещение вихря в те-

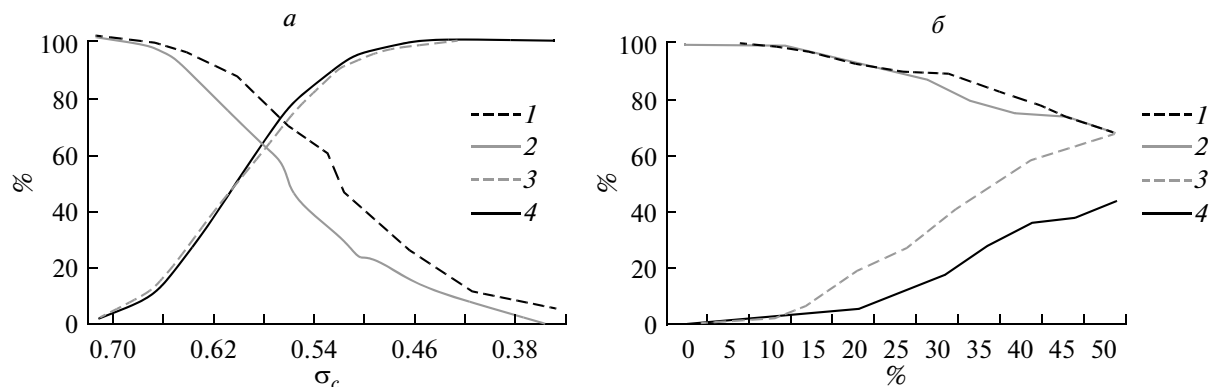


Рис. 5. Количество выделенных вихрей (линии 1, 2) и отбраковываемых ложных объектов (линии 3, 4) для двух радиусов $R_0 = 40$ км (1, 3) и 60 км (2, 4) в зависимости от порога отбраковки: а – при использовании критерия протекания σ_c ; б – при выполнении хотя бы одного из критериев (σ_c или F).

чение периода построения композиционной карты (пять дней); отсутствие доминант на значительной части площади вихря; сильная деформация вихря из-за взаимодействия с соседним вихрем, или струей.

Даже при жестких критериях отбраковки значительное количество ложных вихрей оставалась на финальной карте. Для анализа причин этого был проведен следующий эксперимент. Была проведена фильтрация вихрей одновременно по четырем критериям (σ_D , $\Delta\varphi$, σ_c , F) с порогами, соответствующими допустимым потерям тестовых вихрей в 20%. Осталось около половины тестовых вихрей при падении количества ложных вихрей в 10 раз для $R_0 = 40$ км и в 5 раз для $R_0 = 60$ км. Анализ оставшихся “ложных” вихрей (рис. 6) показал, что около половины из них являются реальными вихрями, которые либо малы по размерам, либо слабоконтрастны и поэтому пропущены экспертом, либо находятся на стадии формирования, что подтверждалось анализом изображений последующих карт. Было несколько реальных вихрей, которые выделялись по карте ДОТК и прослеживались на последующих картах, но из-за облачности их невозможно было выделить по полутоновым изображениям, использовавшимся при формировании карты ДОТК. Реально ложные вихри выделялись в основном из-за образования термических аномалий характерного размера и формы, которые появляются чаще всего из-за проникновения мелких струй в воды другой температуры и в основном в окрестностях сильных стационарных течений. Некоторое количество ложных вихрей являются результатом выделения группы мелких компактно расположенных вихрей и струй, что наблюдается в основном при выделении с $R_0 = 60$ км.

Прослеживание вихрей по временной серии карт ДОТК

В данном эксперименте использовался второй тестовый набор данных из 11 непрерывно просле-

живаемых устойчивых во времени вихрей, которые позволили сформировать 46 пар вихрей, смежных по времени. Среднее расстояние между центрами вихрей, составляющих пары, оказалось равно 21 км, а максимальное – 47 км. Смещение вихря на 40–50 км делает задачу автоматического прослеживания вихрей синоптического масштаба трудно решаемой из-за наличия плотной упаковки вихрей в море (Каменкович и др., 1987). Поэтому для быстро движущихся вихрей необходимо использовать композиционные карты за меньший интервал времени.

Центры контуров, рассчитанных автоматическим алгоритмом, были объединены в пары по смежным композиционным картам ДОТК. Пары строились таким образом, чтобы расстояние между центрами контуров было минимальным и не превышало максимально допустимого расстояния (МДР), выбранное равным 70 км, что слегка превышает максимально наблюдаемое расстояние для тестовых вихрей. Кроме того, рассчитанные данные, из которых составлялись пары, подвергались действию критерия отбраковки σ_D со значениями, обеспечивающими сохранение 100, 90 и 80% тестовых центров. Оценивались процент правильного выделения тестовых пар, длины цепочек непрерывно прослеженных вихрей и анализировались цепочки из ложно выделенных объектов.

На рис. 7 приведен процент автоматически выделенных пар тестовых вихрей, где за 100% было взято 46 пар. Пара тестовых вихрей считалась выделенной, если оба автоматически рассчитанных вихря соответствовали тестовым. Небольшое увеличение процента автоматически выделенных пар тестовых вихрей при $R_0 = 40$ км с предварительной отбраковкой связано с тем, что отбраковка ложных объектов уменьшает вероятность образования пар тестовый вихрь – ложный объект. При объединении наборов тестовых пар, выделенных отдельно при $R_0 = 40$ км и $R_0 = 60$ км, наблюдается уверенное выделение 80% всех тестовых пар при всех трех значениях уровня предварительной отбраковки.

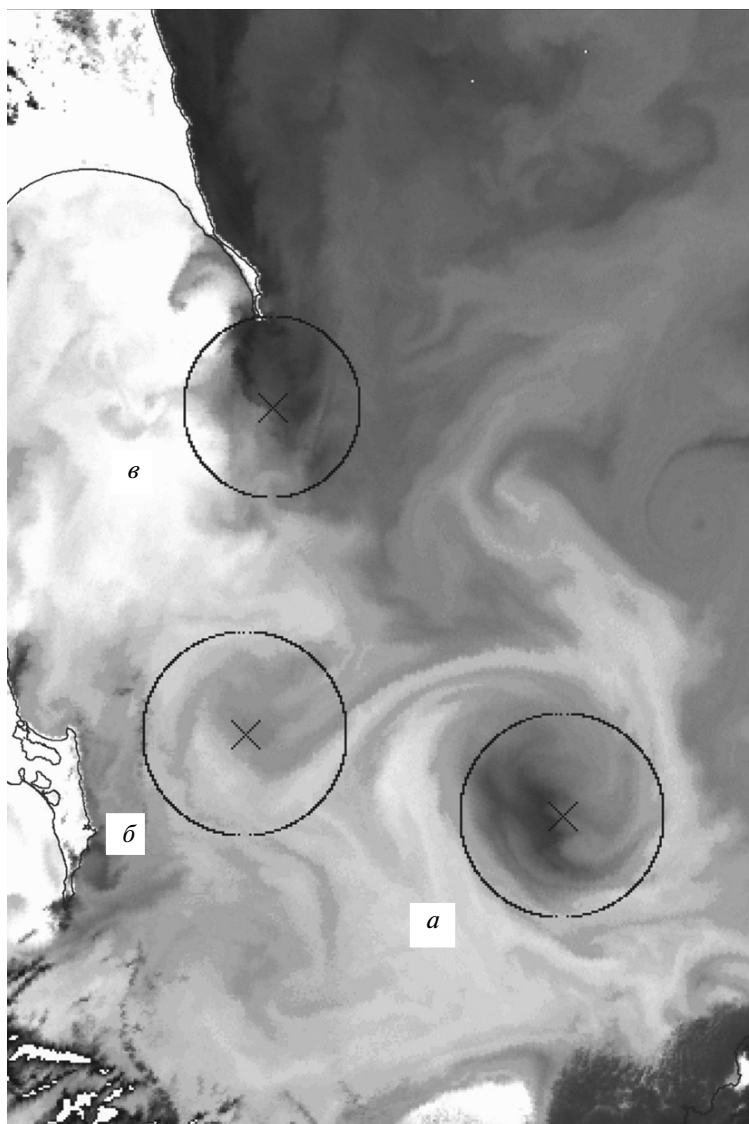


Рис. 6. Вихри: *а* – тестовый вихрь; *б* – вихрь на стадии формирования, отнесенный к ложным; *в* – ложно выделенный вихрь.

При анализе выделения тестовых пар было обнаружено, что предварительная отбраковка рассчитанных вихрей позволяет вдвое сократить количество ложных пар в сравнении с незначительным уменьшением количества выделяемых тестовых пар. Однако использование критерия расстояния между объектами, составляющими пары, не позволяет уверенно разделить пары истинных и ложных объектов по этому критерию.

Анализ длин цепочек объектов, выделенных автоматически по хронологической последовательности карт ДОТК, показал, что при разных уровнях предварительной отбраковки от 80 до 100% цепочек, состоящих из ложных объектов, имеют длину в три-четыре объекта. И если без отбраковки по критерию σ_D количество ложно выделенных цепочек длиной в три объекта превышает тестовые цепочки более чем в 3 раза для $R_0 = 40$ км, то при отбраковке

количество цепочек ложных объектов длиной более четырех быстро падает с длиной. Однако бывают устойчивые во времени объекты, которые представляют собой тепловые аномалии на поверхности воды, напоминающие в поле ДОТК по форме вихревые структуры, но вихрями не являющиеся. Встречаются также случаи, которые относились к длинным цепочкам из ложных объектов, но по сути ложными не были. Это были случаи, когда эксперт не мог в условиях значительной облачности (в основном ячеистого характера) выделить вихрь за пять дней по полутоновым изображениям, а в соответствующих композиционных картах ДОТК циркуляция этого вихря устойчиво прослеживалась.

Анализ цепочек из автоматически выделенных тестовых вихрей показал, что чем длиннее цепочка, тем больше вероятность появления в ее структуре ложных объектов либо ее преждевременного раз-

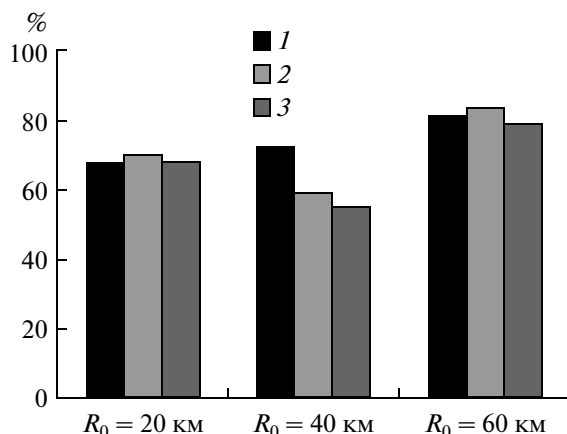


Рис. 7. Гистограмма эффективности отслеживания вихрей при МДР = 70 км с предварительной фильтрацией объектов по критерию σ_D – с сохранением 100 (1), 90 (2) и 80% (3) тестовых вихрей.

рыва. Разрыв цепочки обуславливался, как правило, сложными условиями наблюдения за вихрем, и если вихрь двигался относительно медленно, то цепочку можно было восстановить по последующему композиционному изображению. Включение ложных объектов в цепочку автоматически отслеживаемых тестовых вихрей было обусловлено в основном большой величиной МДР. Таким образом, временной интервал построения композиционных карт раз в пять дней слишком велик для заданного региона. Решение этой проблемы возможно как путем уменьшения интервала осреднения по времени при построении композиционных карт за счет, например, привлечения данных геостационарных спутников (48 изображений в день), так и посредством привлечения изображений в видимом спектральном диапазоне (например, при привлечении данных радиометров MODIS), по которым циркуляция вихря пририсовывается существенно четче и полнее, чем по ИК-изображениям. В то же время всегда будет оставаться проблема опознания вихря после продолжительного интервала отсутствия информации из-за плохих условий наблюдения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Апробация представленного алгоритма автоматического выделения вихрей моря с оценкой их центра, формы и размера по спутниковым ИК-изображениям в сложных облачных условиях наблюдения демонстрирует перспективность выбранного подхода для анализа структуры циркуляции. Композиционные карты термических структур в форме доминантных ориентаций термических контрастов, созданных по данным спутников NOAA, хорошо оценивают направления течений синоптического масштаба и являются информационной базой нового алгоритма. Поскольку океан представляет собой плотную упаковку вихрей разных размеров, то речь может идти только о выделении вихрей заданного размера. Задача автоматического выделения вихрей решается с высокой надежностью и близка по эффективности к

результатам дешифрирования изображений экспертом. С высокой вероятностью можно оценить и знак циркуляции вихря – циклон/антициклон. Основной проблемой является отбраковка ложно выделенных объектов, к которым могут быть отнесены, в том числе и мелкие вихри.

Критерии отбраковки ложных объектов, основанные в первую очередь на когерентности доминант, используемых как оценки направлений течений, показывают хорошую эффективность, но в реальных условиях наблюдения не гарантируют отбраковку всех ложных объектов. Количество остающихся ложных объектов достаточно велико. Однако автоматическое отслеживание объектов во времени показывает, что уже простой критерий контроля изменчивости положения центра вихря на смежных композиционных изображениях приводит к тому, что истинные долгоживущие вихри хорошо отслеживаются, а ложные нет.

Улучшение работы алгоритма возможно в двух направлениях. Во-первых, это улучшение информационной базы. Использование данных геостационарных спутников с более частым обзором акватории мониторинга должно улучшить информативность и достоверность композиционных карт ДОТК. Использование более коротких интервалов времени для построения композиционных карт (трехдневки, например) и ежедневное их построение должно улучшить эффективность алгоритмов распознавания. Использование данных пассивного микроволнового зондирования для получения структуры моря под облаками в настоящее время из-за их низкого пространственного разрешения позволит лишь улучшить выделение крупных вихрей, в первую очередь рингов. Во-вторых, это создание процедур анализа циркуляции внутри выделенного объекта и алгоритмов оценки схожести геометрии отслеживаемого вихря по последовательности композиционных карт.

Работа поддержана грантом РФФИ № 08-07-00227 и грантами ДВО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексанин А.И., Алексанина М.Г.* Автоматическое выделение вихрей по спутниковым ИК-изображениям // Тр. Всерос. конф. Современные проблемы дистанционного исследования Земли из космоса. 11–13 ноября 2003. М.: ИКИ РАН, 2004. С. 382–386.
- Алексанин А.И., Алексанина М.Г.* Спутниковое информационное обеспечение мониторинга океана на Дальнем Востоке / Исследования дальневосточных морей России. М.: Наука, 2007. Т. II. С. 607–641.
- Алексанин А.И., Алексанина М.Г., Булатов Н.В., Гербек Э.Э.* Методические аспекты выделения вихрей по спутниковым и судовым измерениям // Изв. ТИПРО. 1997. Т. 122. С. 2–11.
- Алексанин А.И., Алексанина М.Г., Горин И.И.* Спутниковые ИК-изображения водной поверхности: от термических структур к полю скоростей // Исслед. Земли из космоса. 2001. № 2. С. 7–15.
- Алексанин А.И., Загумёнов А.А.* Автоматическое выделение вихрей океана и расчет их формы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов / Под ред. Лупяна Е.А., Лавровой О.Ю. Вып. 5. Т. 2. М.: Азбука-2000, 2008. С. 17–21.
- Алексанин А.И., Еременко А.С.* Автоматический расчет траекторий тропических циклонов по данным геостационарных метеорологических спутников // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 5. С. 22–31.
- Алексанина М.Г.* Автоматическое выделение поверхностных структур океана по инфракрасным данным спутников NOAA // Исслед. Земли из космоса. 1997. № 3. С. 44–51.
- Бедрицкий А.И., Асмус В.В., Кровотынцев В.А., Лаврова О.Ю., Островский А.Г.* Спутниковый мониторинг загрязнения российского сектора Черного и Азовского морей в 2003–2007 гг. // Метеорология и гидрология. 2007. № 11. С. 5–13.
- Борисов С.Б., Монин А.С.* О корреляции температуры и течений в океане // ДАН. 1989. Т. 306. № 5. С. 1230–1233.
- Каменкович В.М., Кошляков М.Н., Монин А.С.* Синоптические вихри в океане. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 512 с.
- Федоров К.Н.* Физическая природа и структура океанических фронтов. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 296 с.
- Alexanin A.I., Aleksanina M.G., Herbek E.E., Ryabov O.* Scaling property estimation of thermal sea surface turbulent structures on NOAA IR-imagery // Proc. OCEANS'98. 28 September–1 October 1998. Nice, France. V. 2. P. 1000–1005.
- Alexanin A.I., Aleksanina M.G.* Quantative analysis of thermal sea surface structures on NOAA IR-images // Proc. CREAMS'2000 Int. Symp. Vladivostok, Russia. 2001. P. 158–165.
- Alexanin A.I., Aleksanina M.G.* Detection of Stable Synoptical Features of Sea Surface from a Series of Infrared Satellite Images // Pattern Recognition and Image Analysis. 2007. V. 17. № 4. P. 480–486.
- Castellani M.* Identification of eddies from sea surface temperature maps with neural networks // Int. J. Rem. Sens. 2006. V. 27. P. 1601–1618.
- Essen H.H.* Geostrophic surface current as derived from satellite SST images and measured by a land-based HF radar // Int. J. Rem. Sens. 1995. V. 16. № 2. P. 239–256.
- Fernandes A.M.* Study of the automatic recognition of oceanic eddies in satellite images by ellipse center detection – the Iberian coast case // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2009. V. 47. № 8. P. 2478–2491.
- Hai J., Xiaomei Ya., Jianming G., Zhenyu G.* Automatic eddy extraction from SST imagery using artificial neural network // Int. Archives Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science. Beijing, 2008. V. XXXVII. Part B6b. P. 279–282.
- Gangopadhyay A., Robinson A.R., Haley P.J., Leslie W.J., Lozano C.J., Bisagni J.J., Yu Z.* Feature Oriented Regional Modeling and Simulation (FORMS) in the Gulf of Maine and Georges Bank // Contin. Shelf Res. 2003. V. 23. № 3–4. P. 317–353.
- Lemonnier B., Delmas R., Lopez C., Duporte E.* Multiscale analysis of shapes applied to thermal infrared sea images // Proc. Ocean'94 OSATES. 13–16 September 1994. Brest, France. V. 3. P. III.319–III.322.

The Problems of Automatic Ocean Eddy Detection on Satellite IR-Imagery

A. I. Alexanin, A. A. Zagumyonov

*Institute for Automation and Control Processes,
Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok*

The sea surface composed charts of thermal structures as the charts of dominant orientation of thermal contrasts (DOTC) allow getting information about surface circulation regularly. High correlation between dominants and flow directions allow using theirs for water eddy identification. A new algorithm for automatic identification of the eddies as arbitrary closed circulations is proposed. The algorithm consist of the three procedures: eddy identification and its center, size and shape computation; eddy contour construction on the base of minimization the DOTC passing through the contour; the analysis of the contours constructed and screening the false detected objects. The main problem of the automatic eddy detection – ability of the false detected objects – is considered. The filtration algorithms are proposed, their effectiveness is presented and the opportunity of automatic eddy retrace on a temporary chart sequence is estimated. The algorithm has been tested on two month consequence of DOTC charts composed of Okhotsk sea region under heavy cloudy conditions of observations.

Keywords: sea eddies, satellite images, automatic detection, thermal contrast orientations

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ
И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

МЕТОДЫ ВЫЯВЛЕНИЯ ДИНАМИКИ ТРОПИЧЕСКОЙ
РАСТИТЕЛЬНОСТИ ВЬЕТНАМА ПУТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ДЕШИФРИРОВАНИЯ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ МНОГОЗОНАЛЬНЫХ
СНИМКОВ

© 2011 г. В. С. Марчуков*, Ле Хунг Чинь

Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), Москва

**E-mail: marchukov@miigaik.ru*

Поступила в редакцию 17.05.2010 г.

В статье представлены результаты исследований по разработке методов автоматизированного дешифрирования временных рядов многозональных изображений высокого разрешения (30 м) для решения задач оценки состояния и динамики тропической растительности Вьетнама. Была исследована достоверность дешифрирования тропической растительности путем контролируемой классификации исходных многозональных изображений и контролируемого дешифрирования на основе многоуровневой классификации с использованием структурно-пространственной модели изображений. Полученные результаты могут использоваться для определения площади лесных земель, классификации типов тропической растительности, для оценки динамики растительного покрова Вьетнама и создания карт изменения лесов.

Ключевые слова: автоматизированное дешифрирование, многозональная съемка, структурно-пространственная модель изображений, динамика тропической растительности, Вьетнам.

ВВЕДЕНИЕ

Территория Вьетнама полностью расположена в экваториальном поясе. Значительная ее часть, главным образом в горах, покрыта лесами. Лесное хозяйство играет важную роль в экономике Вьетнама. В условиях возрастающего разностороннего антропогенного воздействия лесной покров сильно изменяется. Важнейшей задачей является устойчивое управление лесами, обеспечивающее охрану, защиту и воспроизводство лесов. Решение этой задачи невозможно без проведения регулярного мониторинга растительных ресурсов. Наибольшим информационным потенциалом для использования в целях дистанционного мониторинга растительного покрова обладают данные космической многозональной съемки. Растительность в первую очередь отображается на космических снимках как внешний покров земной поверхности. На аэрокосмических снимках хорошо разделяются застроенные и безлесные территории, отображается распределение на земной поверхности различных типов растительных сообществ и фитоценозов (Бондур, 2006; Книжников, 1978; Савиных, 2000). Многозональные космические снимки используются как для оценки размеров площадей участков различных классов растительности, так и для определения их состояния, сезонных изменений, оценки общего состояния с.-х. культур и прогнозирования урожайности.

В данной статье приведены результаты исследований по разработке и выбору методов автоматизированного дешифрирования временных рядов многозональных изображений, обеспечивающих высокую достоверность, необходимую для решения задач оценки состояния и динамики тропической растительности Вьетнама. Была исследована достоверность дешифрирования тропической растительности путем контролируемой классификации исходных многозональных изображений и контролируемого дешифрирования на основе многоуровневой классификации с использованием структурно-пространственной модели изображений (Марчуков, 2003, 2009).

Исходными данными для исследований являлся временной ряд многозональных изображений КА серии Landsat в семи и восьми спектральных диапазонах, полученных 27.12.1993, 04.11.2000, 23.11.2001 и 08.11.2007. На первом этапе было выполнено формирование геометрически идентичных фрагментов разновременных космических снимков. Для этого были произведены географическая привязка и трансформирование изображений на даты 27.12.1993, 04.11.2000, 23.11.2001 в проекцию изображения 08.11.2007. Затем из всех четырех изображений были вырезаны идентичные фрагменты, которые в виде RGB (каналы 2, 3, 4) показаны на рис. 1–4.

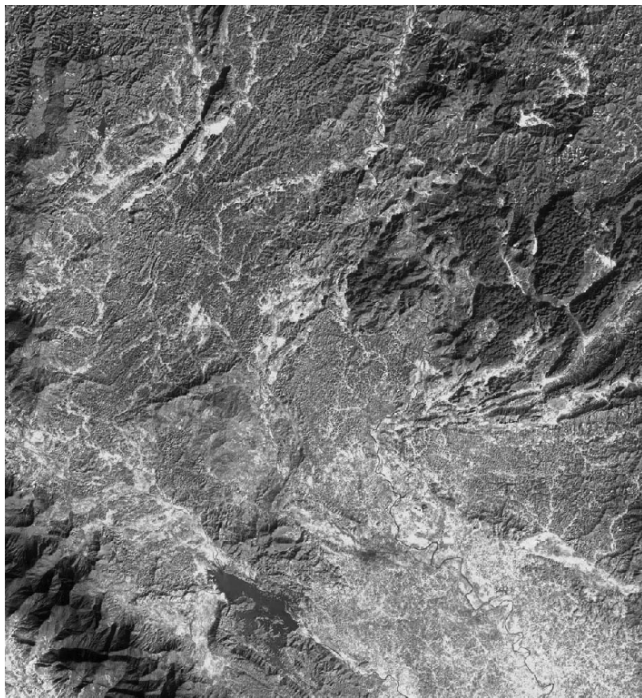


Рис. 1. RGB-представление исходного снимка 27.12.1993 г.

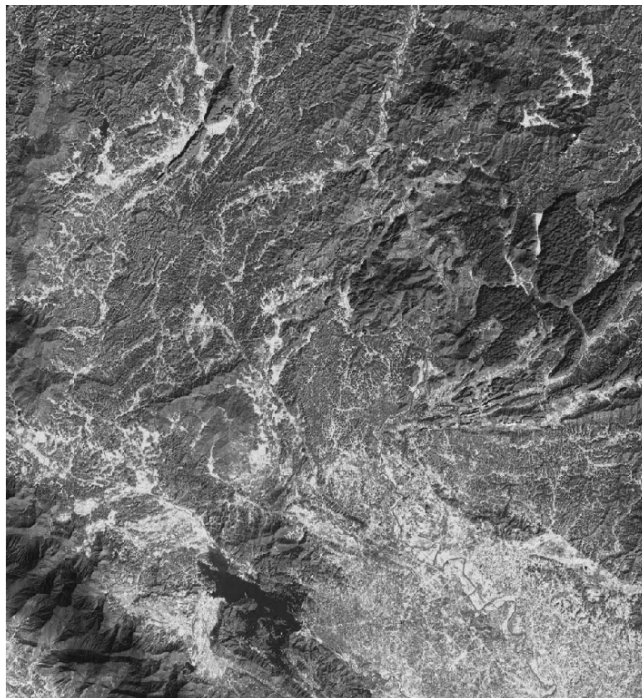


Рис. 2. RGB-представление исходного снимка 04.11.2000 г.

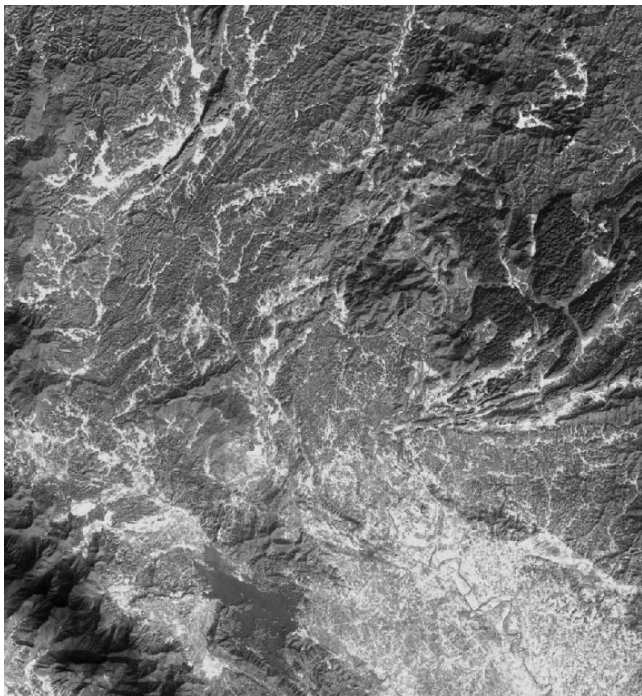
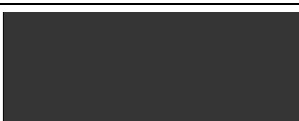
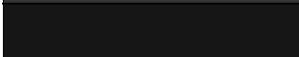
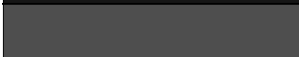
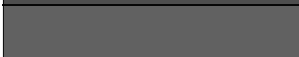

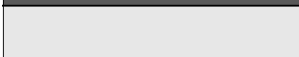
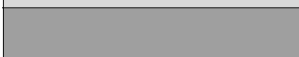
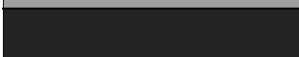
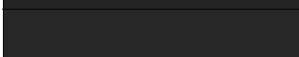
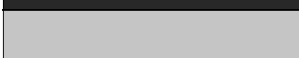


Рис. 3. RGB-представление исходного снимка 23.11.2001 г.



Рис. 4. RGB-представление исходного снимка 08.11.2007 г.

Таблица 1. Дешифрируемые классы объектов

№	Классы объектов	Условные знаки
1	Сомкнутый влажный смешанный лиственный-хвойный субтропический лес на невысоких горах	
2	Вечнозеленый сомкнутый влажный дождевой тропический лес	
3	Многолетний лиственный лес на горах	
4	Смешанный лиственный и бамбуковый лес	
5	Молодой лес и лесонасаждения	
6	Невысокий лес на плоскогорьях	
7	Бамбуковый лес	
8	Рисовые поля во время созревания урожая	
9	Рисовые поля после сбора урожая	
10	Другие виды с.-х. растительности	
11	Мелководные объекты гидрографии	
12	Глубоководные объекты гидрографии	
13	Сельские застройки с древесной растительностью	
14	Застройки и пустыри без растительности	

На исследуемых изображениях отображен участок северной части Вьетнама на территории провинции Тхай Нгуен. Провинция Тхай Нгуен расположена в горной и плоскогорной местности, в пределах $20^{\circ}20' - 22^{\circ}03'$ с.ш. и $105^{\circ}28' - 106^{\circ}16'$ в.д., на расстоянии 80.4 км от г. Ханой. Площадь ее равна 3541.1 км², причем горная территория составляет 90.73% всей площади. Самая высокая гора Там Дао с высотой 1591 м расположена на юге провинции. В соответствии с тропическим муссонным климатом, среднее количество осадков составляет 1500–2250 мм (Биоразнообразие, 2001). Верхнюю часть исследуемых снимков занимают лесные территории, в нижней части расположен горный ряд Там Дао. В центральной части снимков расположены г. Тхай Нгуен, р. Конг и с.-х. земли.

ОДНОУРОВНЕВОЕ ДЕШИФРИРОВАНИЕ ВРЕМЕННОГО РЯДА ИСХОДНЫХ МНОГОЗОНАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Для дешифрирования серии разновременных многозональных изображений применялась кон-

тролируемая классификация гиперпараллелепipedным методом с привлечением классификатора по методу максимального правдоподобия для пикселей, попадающих в разные гиперпараллелепипеды.

На основе проведенного анализа исследуемой территории были определены классы подлежащих дешифрированию объектов, которые представлены в табл. 1 с едиными условными обозначениями для всех результатов дешифрирования, приведенных в данной статье.

Определение тестовых и контрольных участков выбранных классов объектов осуществлялось на основе визуального дешифрирования отдельных фрагментов исходных изображений с привлечением дополнительных картографических материалов (Топографическая карта М 1 : 100000, 2002 г.). Были созданы единые тестовые участки для всех исходных разновременных снимков на участках территории, незначительно изменившихся за рассматриваемый временной интервал. Одна часть тестовых участков использовалась в качестве “обучающих” для определения параметров используемых классификаторов, другие тестовые участки — в качестве

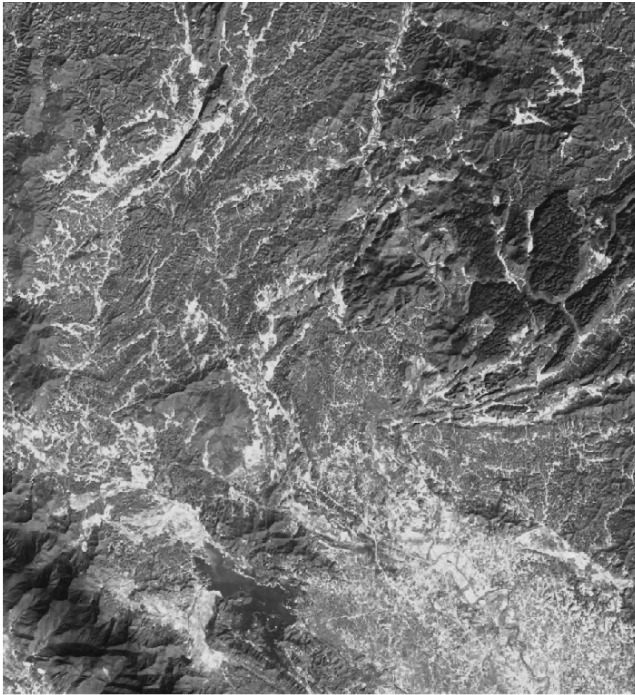


Рис. 5. Результат дешифрирования исходного снимка 1993 г.

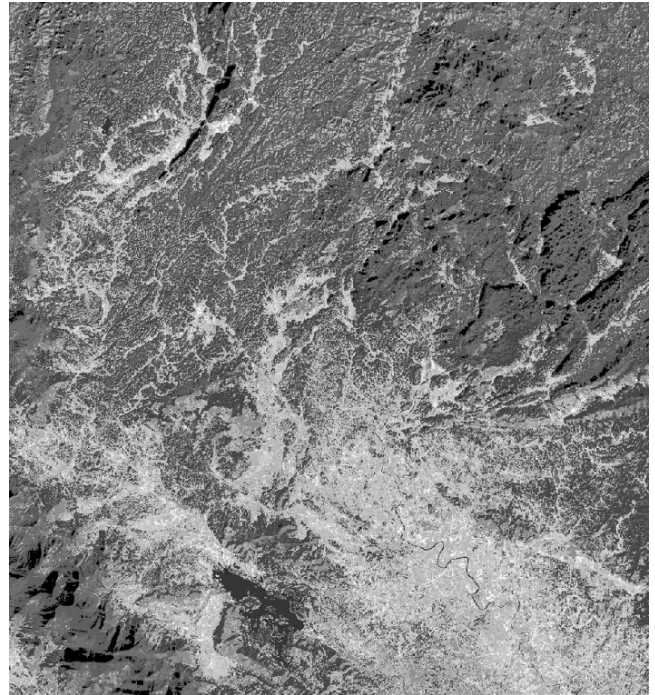


Рис. 6. Результат дешифрирования исходного снимка 2000 г.

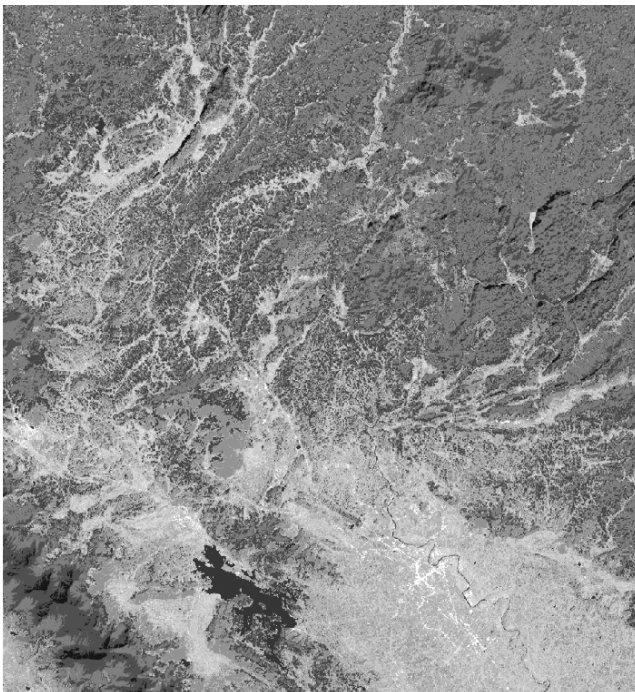


Рис. 7. Результат дешифрирования исходного снимка 2001 г.

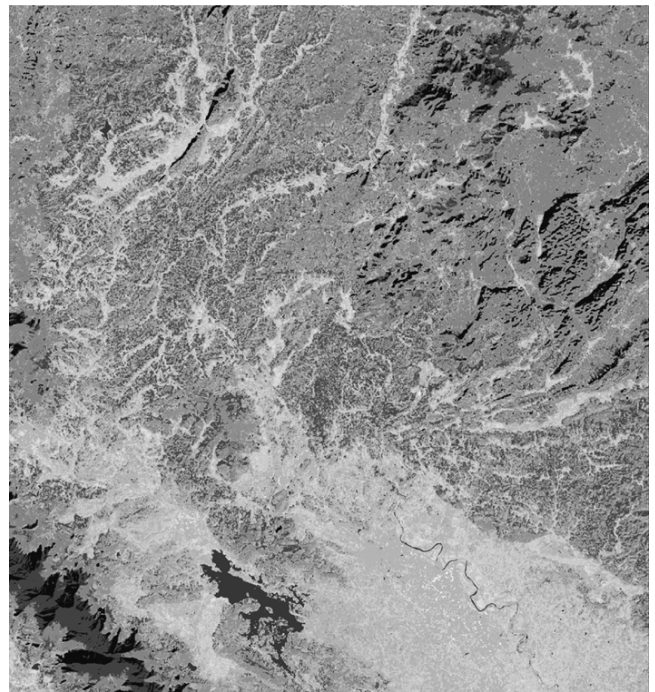


Рис. 8. Результат дешифрирования исходного снимка 2007 г.

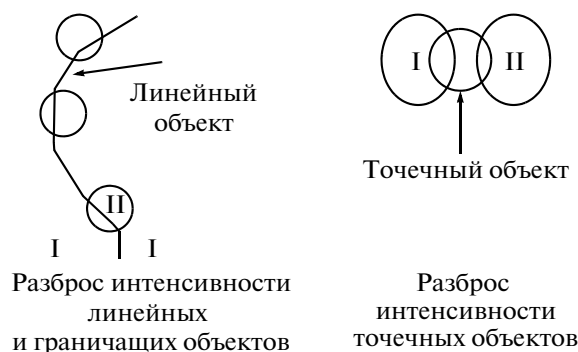


Рис. 9. Принцип формирования разброса интенсивности линейных и малоразмерных объектов.

“контрольных” при расчете достоверности полученных результатов дешифрирования.

Дешифрирование было выполнено в программном пакете ERDAS Imagine. На рис. 5–8 представлены результаты дешифрирования исходных разновременных многозональных снимков. Их анализ показал, что при обработке космических снимков в диапазонах 0.45–0.52, 0.52–0.60, 0.63–0.69, 0.76–0.90, 1.55–1.75, 10.40–12.5, 2.08–2.35 и 0.52–0.90 мкм уверенно дешифрируются крупные и средние объекты гидрографии. Узкие реки не удается дешифрировать на снимки с разрешением 28.5 м, так как их ширина на исследуемой территории составляет несколько десятков метров.

На изображении с разрешением 28.5 м дешифрируются участки лесной растительности, занимающие площадь более 1 га, с разделением на следующие подклассы: сомкнутый влажный смешанный лиственный-хвойный субтропический лес на невысоких горах; вечнозеленый сомкнутый влажный дождевой тропический лес; влажный дождевой лиственный лес; многолетний лиственный лес на горах; смешанный лиственный и бамбуковый лес; молодой лес и лесонасаждения; невысокий лес на плоскогорьях; бамбуковый лес.

По снимкам не удается дешифрировать отдельные участки с.-х. растительности, так как рисовые поля и другие виды с.-х. растительности в северной части Вьетнама представляют собой небольшие участки, площадь которых менее 0.5 га. Но по исходным снимкам успешно выделяется общая площадь с.-х. земель.

Отдельные сооружения не удается выделить на исходных изображениях, но уверенно выделяются сельские застройки с древесной растительностью.

При проведении классификации по одноуровневой схеме появляются ошибки, которые возникают вследствие присутствия на изображении точечных, малоразмерных, граничных и линейных объектов. Точечные, малоразмерные и линейные

объекты недостоверно дешифрируются на исходных изображениях, так как они характеризуются большим разбросом значений интенсивности, вызванным попаданием в один элемент разрешения различных долей площади, относящихся к разным классам (рис. 9).

ДЕШИФРИРОВАНИЕ ВРЕМЕННОГО РЯДА МНОГОЗОНАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНО-ПРОСТРАНСТВЕННОЙ МОДЕЛИ

Предварительная обработка исходных изображений на основе их структурно-пространственной модели, обеспечивающая сглаживание по полю площадных объектов и замену значений интенсивности неплощадных объектов значениями усредненной интенсивности площадных объектов в некоторой локальной окрестности, позволяет существенно повысить достоверность дешифрирования. Блок-схема предварительной обработки исходных изображений на основе структурно-пространственной модели показана на рис. 10 (Марчуков, 2010).

На рис. 11–14 показаны результаты дешифрирования предварительно обработанных на основе структурно-пространственной модели исходных многозональных изображений, полученных 27.12.1993, 04.11.2000, 23.11.2001 и 08.11.2007. При дешифрировании использовались те же самые тестовые участки, которые были использованы при дешифрировании исходных разновременных многозональных изображений. В результате дешифрирования были выделены 14 классов объектов, представленных в табл. 1.

Визуальный анализ показывает, что дешифрирование изображений с использованием структурно-пространственной модели позволяет повысить достоверность выделения классов объектов. Результат дешифрирования многолетних лиственных лесов на исходных изображениях слишком расходитс

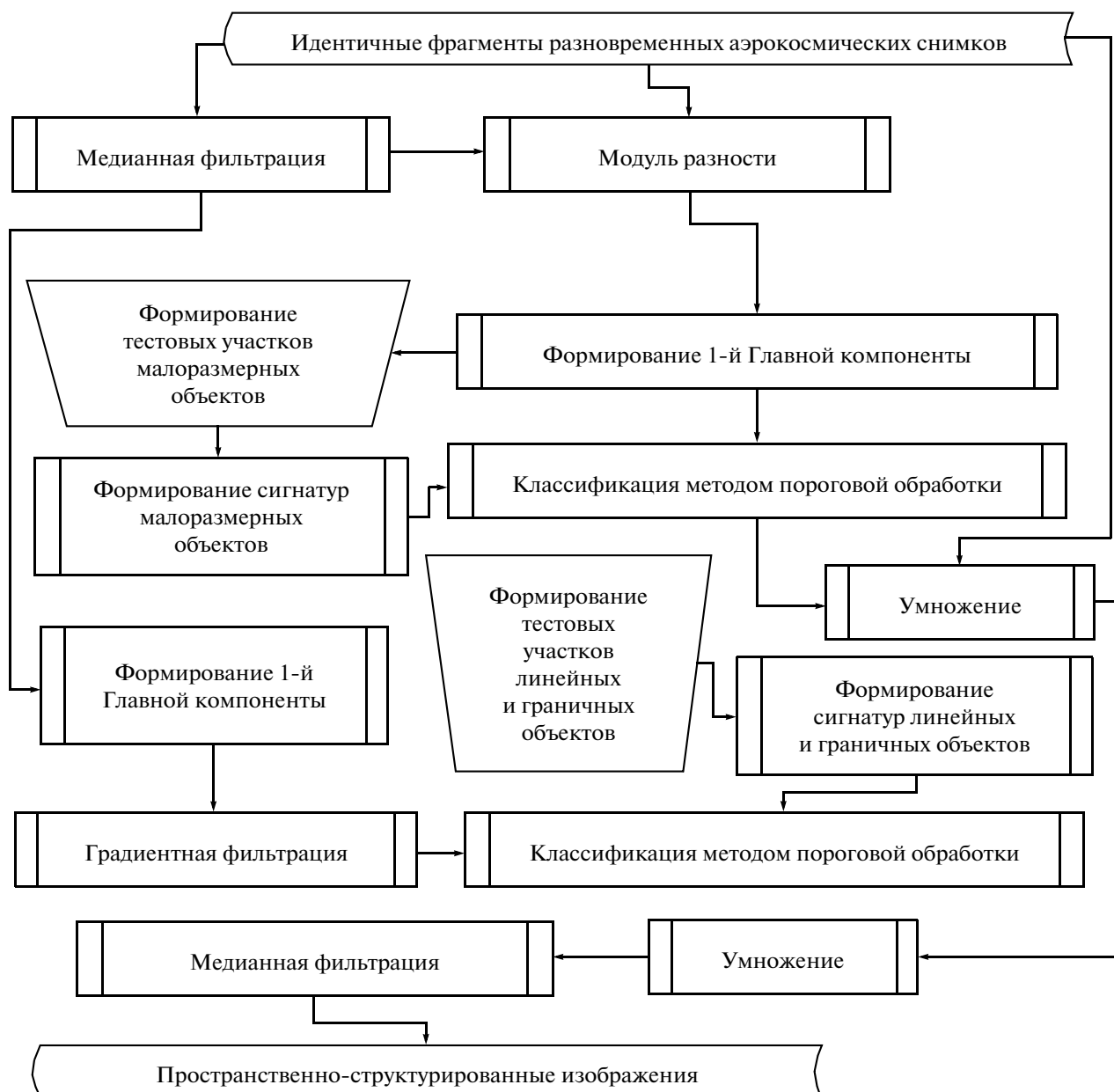


Рис. 10. Блок-схема предварительной обработки исходных изображений на основе структурно-пространственной модели.

данными топографических карт, и с детальным описанием местности. В табл. 2 и 3 показаны площади каждого класса объектов, полученные в результате дешифрирования исходных разновременных многозональных изображений и при дешифрировании с помощью структурно-пространственной модели соответственно.

Анализ полученных количественных характеристик также подтверждает преимущество второго подхода к дешифрированию (так как площадь многолетних лесов не может увеличиться в 2007 г. по сравнению с 2001 г. в 2 раза). Площади многолетних

лиственных лесов, полученные в результате дешифрирования с помощью структурно-пространственной модели, составляют: 10634.5 (1993 г.), 8475.26 (2000 г.), 7651.56 (2001 г.) и 5478.79 (2007 г.) и в основном совпадают с топографическими картами. Результаты дешифрирования других классов (вечнозеленый сомкнутый влажный дождевой тропический лес, смешанный лиственный и бамбуковый лес) по исходным изображениям, полученным в 2000–2001 гг., имеют существенные расхождения с данными топографической карты, созданной в 2002 г. Результаты дешифрирования с помощью

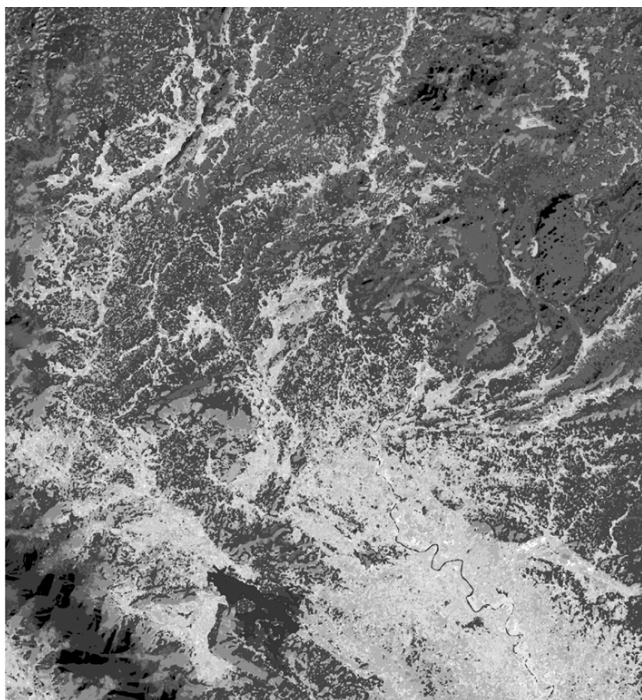


Рис. 11. Результат дешифрирования снимка 1993 г., предварительно обработанного на основе структурно-пространственной модели.

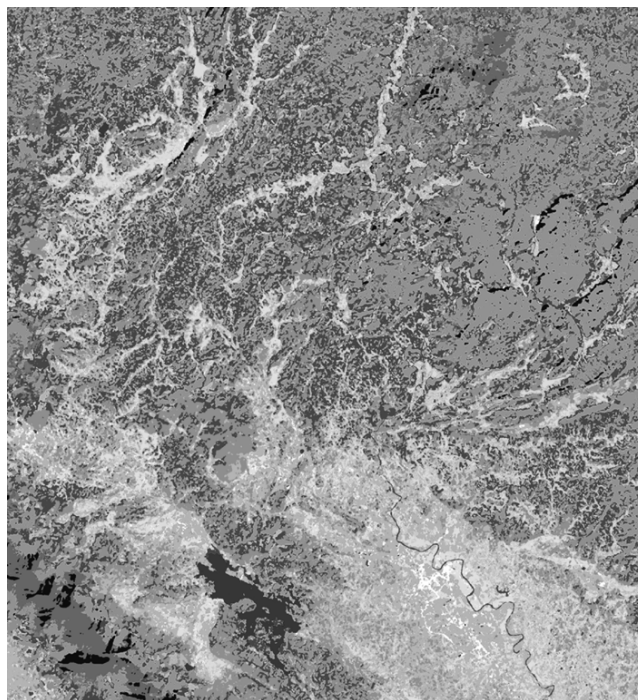


Рис. 12. Результат дешифрирования снимка 2000 г., предварительно обработанного на основе структурно-пространственной модели.

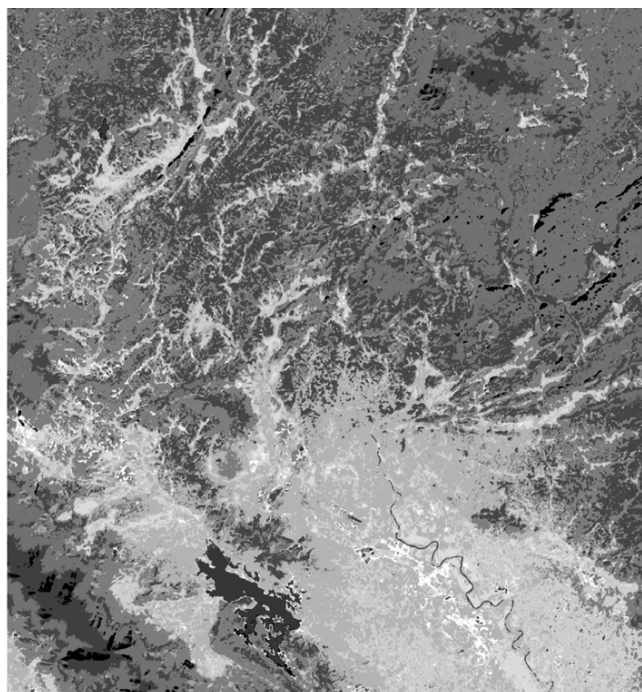


Рис. 13. Результат дешифрирования снимка 2001 г., предварительно обработанного на основе структурно-пространственной модели.

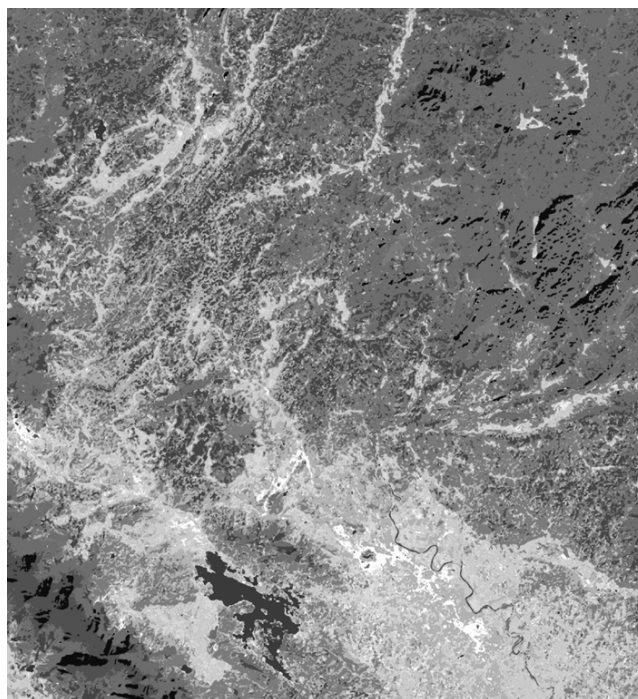


Рис. 14. Результат дешифрирования снимка 2007 г., предварительно обработанного на основе структурно-пространственной модели.

Таблица 2. Результаты одноуровневого дешифрирования разновременных изображений

№	Классы объектов	Площадь, га			
		1993 г.	2000 г.	2001 г.	2007 г.
1	Сомкнутый влажный смешанный лиственный-хвойный субтропический лес на невысоких горах	73758.7	45613.7	43484.7	28212.4
2	Вечнозеленый сомкнутый влажный дождевой тропический лес	5399.1	1500.47	3392.36	9263.47
3	Многолетний лиственный лес на горах	17865.6	13187.7	4071.98	8377.87
4	Смешанный лиственный и бамбуковый лес	6022.67	4505.55	12994.0	11936.6
5	Молодой лес и лесонасаждения	9208.15	40577.1	37728.6	32945.0
6	Невысокий лес на плоскогорьях	46459.3	68284.8	58977.1	58145.2
7	Бамбуковый лес	32943.1	6165.22	7863.8	15440.8
8	Рисовые поля во время созревания урожая	12988.9	11208.7	6955.13	9484.07
9	Рисовые поля после сбора урожая	1464.97	4370.15	2477.93	2774.73
10	Другие виды с.-х. растительности	30842.9	29510.8	39961.8	30322.1
11	Мелководные объекты гидрографии	164.9	122.2	27.45	15.19
12	Глубоководные объекты гидрографии	1974.74	2500.59	2136.22	2206.23
13	Сельские застройки с древесной растительностью	36509.6	47631.4	57234.3	68908.4
14	Застройки и пустыри без растительности	2037.28	2731.92	605.53	328.31

Таблица 3. Результаты дешифрирования разновременных многозональных изображений с использованием структурно-пространственной модели

№	Название сигнатур	Площадь, га			
		1993 г.	2000 г.	2001 г.	2007 г.
1	Сомкнутый влажный смешанный лиственный-хвойный субтропический лес на невысоких горах	78631.3	52460.5	49211.0	25975.8
2	Вечнозеленый сомкнутый влажный дождевой тропический лес	2990.54	2535.93	2453.16	4449.26
3	Многолетний лиственный лес на горах	10634.5	8475.26	7651.56	5478.79
4	Смешанный лиственный и бамбуковый лес	9723.2	9577.65	6777.74	33277.5
5	Молодой лес и лесонасаждения	14648.2	43751.8	60348.4	41247.4
6	Невысокий лес на плоскогорьях	48313.9	65398.0	51465.8	67135.1
7	Бамбуковый лес	1744.6	7331.77	6328.89	3774.61
8	Рисовые поля во время созревания урожая	19268.0	9977.44	8582.8	12349.6
9	Рисовые поля после сбора урожая	4372.5	6897.55	1844.54	1253.06
10	Другие виды с.-х. растительности	26323.1	26250.1	33473.1	29045.9
11	Мелководные объекты гидрографии	492.79	771.15	625.433	531.70
12	Глубоководные объекты гидрографии	1874.68	2267.88	2055.97	2360.48
13	Сельские застройки с древесной растительностью	41860.9	40471.9	43523.4	46822.9
14	Застройки и пустыри без растительности	1322.02	1743.41	3568.62	4207.94

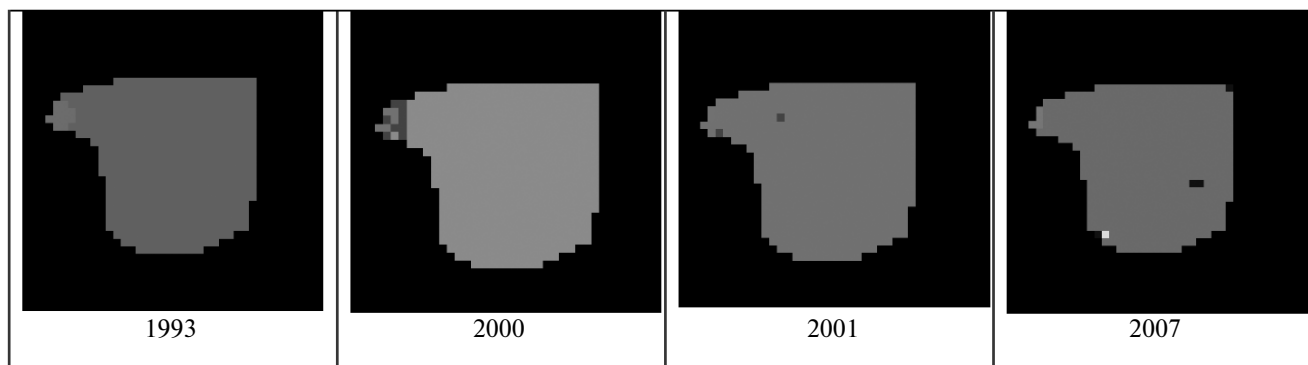


Рис. 15. Результаты дешифрирования контрольного участка класса 6 (невысокий лес на плоскогорьях) по изображениям, предварительно обработанным на основе структурно-пространственной модели.

структурно-пространственной модели гораздо лучше согласуются с картами и другими дополнительными материалами.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДОСТОВЕРНОСТИ ДЕШИФРИРОВАНИЯ

Для получения корректных всесторонних оценок достоверности дешифрирования классов тропической растительности Вьетнама были построены матрицы ошибок дешифрирования классов 1–7 по результатам одноуровневого дешифрирования исходных изображений и по результатам дешифрирования изображений, предварительно обработанных на основе структурно-пространственной модели. Для получения матриц использовались одни и те же предварительно сформированные контрольные участки классов объектов. Принцип расчета столбца матрицы показан на рис. 15, на котором представлены результаты дешифрирования контрольного участка класса 6 (невысокий лес на плоскогорьях) по изображениям, предварительно обработанным на основе структурно-пространственной модели.

По контрольным участкам определялись:

- площадь контрольного участка в пикселах – S_j ;
- количество пикселей, дешифрированных как класс j – N_j .

Значения элементов матрицы P_{ij} определялись по формуле

$$P_{ij} = \frac{N_j}{S_i} \times 100\%. \quad (1)$$

Значения элементов центральной диагонали матрицы ($i = j$) определяют вероятность правильной классификации i -го класса в процентах. Остальные элементы матрицы P_{ij} соответствуют вероятности ложной классификации класса i , как класс j .

Результаты расчетов матриц на даты 27.12.1993, 04.11.2000, 23.11.2001 и 08.11.2007 приведены в табл. 4–7 соответственно.

Сравнительный анализ количественных оценок достоверности дешифрирования путем одноуровневой классификации исходных многозональных изображений и дешифрирования изображений, предварительно обработанных на основе структурно-пространственной модели, показал, что для большинства классов объектов исследуемого

Таблица 4. Матрицы ошибок дешифрирования тропической растительности Вьетнама по съемке 1993 г. (слева по исходным изображениям; справа по изображениям, предварительно обработанным на основе структурно-пространственной модели)

№	1	2	3	4	5	6	7
1	39	1.3	0	22	1.8	32	15
2	0	88	9.0	0	0	0	0
3	0	11.7	91	0	0	0	0
4	5.6	0	0	41	31	5.9	2.5
5	0	0	0	0	89	0	7.0
6	0.5	7.9	0	5.8	2.8	88	0
7	11.5	1.7	0	15	70	2.4	27

№	1	2	3	4	5	6	7
1	93	0.4	0	6.9	0	0	0
2	0	91	7.1	0	0	0	0
3	0	2.7	97	0	0	0	0
4	0	0.4	0	93	0.2	2.3	0
5	0	0	0	0	95	0	12.9
6	0	5.3	0	1.9	0	96	0
7	2.6	0	0	0.5	4.1	0	86

Таблица 5. Матрица ошибок дешифрирования тропической растительности Вьетнама по съемке 2000 г. (слева по исходным изображениям; справа по изображениям, предварительно обработанным на основе структурно-пространственной модели)

№	1	2	3	4	5	6	7
1	48	0	0	26	7.5	12	34
2	0	88	1.6	0	0	0	0
3	0	260	61	0	0	5.1	0
4	1.4	0	0	89	0	1.1	4.9
5	0.3	0	0	0	89	2.0	26
6	8.2	38	0.6	0	1.0	85	0
7	2.5	0	0	11	6.3	1.1	62

№	1	2	3	4	5	6	7
1	86	0	0	2.5	0.3	1.8	7.3
2	0	97	1.5	0	0	0	0
3	0	3.1	97	0	0	0	0
4	5.3	10.1	0	83	0	1.0	0.6
5	0	0	0	4.1	91	0	28
6	4.8	4.8	3.4	0	0	93	0
7	1.3	0	0	1.6	1.3	0	90

Таблица 6. Матрица ошибок дешифрирования тропической растительности Вьетнама по съемке 2001 г. (слева по исходным изображениям; справа по изображениям, предварительно обработанным на основе структурно-пространственной модели)

№	1	2	3	4	5	6	7
1	88	0	0	0.3	3.1	1.1	1.2
2	0	88	9.3	0	0	0	0
3	0	0.9	99	0	0	0	0
4	13	2.6	0	47	18	2.8	38
5	0	0	0	0.6	86	0.8	33
6	7.9	22	0.3	3.0	0	85	0
7	0	0.4	0	5.0	11	0.4	56

№	1	2	3	4	5	6	7
1	95	0.5	0	0	1.1	0.4	0
2	0	96	1.8	0	0	0	0
3	0	11.4	93	0	0	0	0
4	0.4	0	0	95	0.7	0.4	0
5	0	0	0	0	93	0	15
6	1.3	27	0	15	0	86	0
7	0	0	0	26	4.1	0	74

Таблица 7. Матрица ошибок дешифрирования тропической растительности Вьетнама по съемке 2007 г. (слева по исходным изображениям; справа по изображениям, предварительно обработанным на основе структурно-пространственной модели)

№	1	2	3	4	5	6	7
1	86	0	0	2.6	2.3	0.8	0.7
2	0	79	10	0	0	6.3	0
3	0	1.3	98	0	0	0.2	0
4	5.0	0	0	79	0.6	0.8	22
5	0	0	0	0	87	0	44
6	43	7.0	0	0	0	82	0
7	3.7	0	0	6.0	1.8	1.6	74

№	1	2	3	4	5	6	7
1	91	0	0	6.9	0.2	0	1.1
2	0	84	13	0	0	0.8	0
3	0	1.9	98	0	0	0	0
4	1.3	0	0	88	0.7	0.8	8.8
5	0	0	0	0	97	0	6.6
6	5.8	7.9	1.0	0	0	92	0
7	0	0	0	0	0.7	0	97

участка территории Вьетнама второй подход обеспечивает существенное повышение вероятности правильной классификации наряду со снижением вероятности ложной классификации.

Достоверности дешифрирования сомкнутого влажного смешанного лиственно-хвойного субтропического леса на невысоких горах (класс 1), вечнозеленого сомкнутого влажного дождевого тропического леса (класс 2), многолетнего лиственного леса на горах (класс 3) и невысокого леса на плоскогорьях (класс 6) достаточно стабильны при дешифрирова-

нии многозональных снимков разных лет и составляют более 90%. Несколько более низкие значения достоверности дешифрирования в случаях смешанного лиственно-бамбукового леса (класс 4), молодого леса и лесонасаждений (класс 5), бамбукового леса (класс 7) определяются быстрыми изменениями в составах древостоев этих классов и, как следствие, возможностью возникновения некоторого несоответствия древостоев их тестовых участков, определенных по априорным данным, составу их древостоя на момент осуществления съемки.

ВЫВОДЫ

Использование структурно-пространственной модели позволяет повысить достоверность дешифрирования различных типов тропической растительности Вьетнама. Полученные результаты могут применяться при определении площади лесных земель, классификации типов тропической растительности, а также при оценке динамики растительного покрова Вьетнама и создании карт изменения лесов. Результаты дешифрирования тропической растительности могут использоваться для обновления топографической карты М 1 : 100000, созданной в 2002 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Биоразнообразие в национальном парке Там Дао // Научная деятельность. Министерство науки и технологии Вьетнама. 2001. № 1.
- Бондур В.Г. Основы аэрокосмического мониторинга окружающей среды // Курс лекций. М.: МИИГАиК, 2006. 369 с.
- Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И. Многозональная съемка и ее применение при изучении окружающей среды. Обнинск, 1978. 46 с.
- Марчук В.С. Дешифрирование многозональных аэрокосмических изображений с использованием структурно-пространственной информации // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2003. № 6. С. 54–66.
- Марчук В.С. Технология динамического картографирования по данным ДЗЗ // Тез. докл. Междунар. научно-технической конф. Геодезия, картография и кадастр – XXI век. МИИГАиК, 2009. С. 131.
- Марчук В.С. Автоматизированные методы оценки динамики пространственного распределения растительного покрова и грунтов по данным дистанционного мониторинга // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 2. С. 63–74.
- Савиных В.П., Малинников В.А., Сладкопеев С.А., Цыпина Э.М. География из космоса. М: МИИГАиК, 2000. 222 с.
- Топографическая карта провинции Тхай Нгуен М 1 : 100000. Министерство природных ресурсов и окружающей среды Вьетнама. 2002.

The Methods of Identification of the Vietnamese Tropical Vegetation Dynamics Using Automated Interpretation of the Multi-Spectral Images

V. S. Marchukov, Le Hung Trinh

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow

This article includes the results of the research in the area of development and selection of optimal methods of automated interpretation of the multi-spectral high resolution images (30 m) for solving problems of the Vietnamese tropical vegetation state value and dynamics. We investigated the effectiveness of interpretation of tropical vegetation on the original multi-spectral images with usage of the supervised classification and the supervised interpretation on the basis of multilevel classification using the spatial structural model of images. The results received can be used for determining the area of forests, classification of tropical vegetation types, evaluating vegetation dynamics of Vietnam and mapping forest changes.

Keywords: automated interpretation, multi-spectral image, spatial structural model of images, tropical vegetation dynamics, Vietnam

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ВАРИАЦИИ ТРАЕКТОРИИ СПУТНИКА МИССИИ ТОПЕКС-ПОСЕЙДОН КАК ИСТОЧНИК ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

© 2011 г. В. В. Иванов

Учреждение Российской академии наук Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Ю. Сахалинск
E-mail: Ivanov.v38@gmail.com

Поступила в редакцию 05.02.2010 г.

Для исследования природы геофизических объектов и событий анализируются вариации траектории спутников миссии Топекс-Посейдон. Предполагаемый источник вариаций — неоднородности плотности земной коры. Предполагаемый механизм действия — гравитационные силы. Предварительно выделены возможные источники возмущения. Полагается, что неоднородности появляются вследствие различия плотности суши и воды. На материалах наблюдения вариаций траектории треков 025, 060, 212, 034 спутников миссии Топекс-Посейдон обнаружены три типа аномалий. К первому типу аномалий отнесены вариации малой амплитуды (100 м) с характерными временами изменения в несколько секунд. Ко второму типу отнесены импульсные аномалии, которые наблюдаются в моменты пересечения траектории и границы суша-вода. Они совпадают с ожидаемыми аномалиями по месту расположения, однако по амплитуде превосходят оценочные значения в десятки раз. К третьему типу аномалий относятся квазипериодические колебания траектории с амплитудой в несколько километров. Эти аномалии квазигармоничны, период колебаний составляет несколько секунд и изменяется в зависимости от расположения точки наблюдения. Возможно, аномалии имеют геофизическое происхождение. Проведена попытка подтверждения естественного происхождения периодической компоненты. Построен спектр поглощения сейсмического излучения сильных землетрясений при регистрации на станциях системы IRIS. Прогнозированы линии полосы поглощения спектра излучения. Прогнозируемые линии поглощения обнаружены.

Ключевые слова: миссия Топекс-Посейдон, вариация траекторий, гравитационная сила, геофизические параметры, землетрясения, о. Сахалин, Охотское море

ВВЕДЕНИЕ

Вариации траектории падающих частиц с начала XX в. стали основным источником информации о природе объектов, используемым при исследовании физических и химических объектов (Борн, 1970; Галицкий и др., 1980; Давыдов, 1963). В настоящей работе анализируются измерения траектории спутников Земли, содержащиеся в файлах MGDR (Benada, 1993). Эти файлы содержат записи параметров траектории спутника за период с 1992–2005 гг. Приведены ежесекундные значения широты и долготы спутника с точностью до 10^{-4} град. Параметры орбиты спутника: высота $H_0 = 1336$ км, период цикла 9.9156 дней, количество оборотов в цикле 127, расстояние между проекциями траектории по экватору 315 км, орбитальная скорость 7.2 км/с, скорость по поверхности Земли $V_0 = 5.8$ км/с. Точность регистрации орбиты по высоте 1 см (Benada 1993).

Цель анализа — обнаружить влияние геофизических объектов и событий на вариации траектории спутника.

При исследовании данных MGDR в процессе обнаружения волны цунами (Иванов, 2003) и при анализе ледовой обстановки в Амурском лимане

(Иванов, 2004) обнаружено, что на траектории наблюдаются существенные отклонения от гладкой кривой, по амплитуде значительно превосходящие погрешность регистрации. В настоящей работе главным предметом является исследование природы наблюдаемых отклонений. Предполагаемый источник вариаций — неоднородности плотности земной коры. Предполагаемый механизм действия — гравитационные силы. Предварительно выделены возможные источники возмущения. К таким источникам можно отнести: границы суша-океан, горные хребты, подводные впадины и отдельные острова.

Возможные эффекты оценены на основе простейшей модели, в которой характеристики неоднородности оцениваются по рельефу местности. Полагается, что неоднородности появляются вследствие различия плотности суши и воды. При оценке плотность грунта суши предполагалась равной 3.5 г/см³, плотность воды 1 г/см³.

Оценивались следующие эффекты. Во-первых, это преломление на угол $\delta\theta$ траектории при пересечении границы шельфа (Прохоров, 1980а). Оценка отклонения траектории при пересечении границы составляет значение

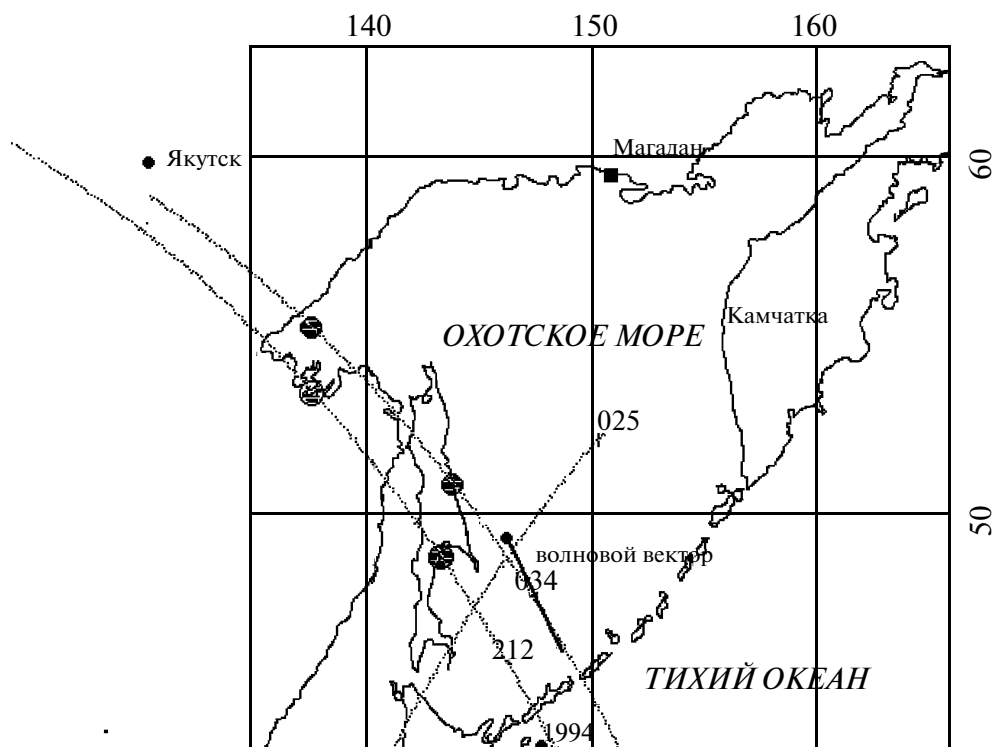


Рис. 1. Траектории треков 025, 212, 034, пересекающих о. Сахалин и Охотское море. Кружки указывают место появления наблюдаемых особенностей. На карте указаны также эпицентр землетрясения 4 октября 1994 г. и положение сейсмических станций Якутск и Магадан.

$$\delta\theta = \text{tg}\theta(\rho - 1)gH_0/v_n^2,$$

где: g – ускорение силы тяжести = $9.8 \text{ см}^2/\text{с}^2$; H_0 – скачок глубины на шельфе $\approx 1000 \text{ м}$; ρ – плотность грунта = $3.5 \text{ г}/\text{см}^3$; v_n – скорость спутника = $5.9 \text{ км}/\text{с}$. Численная оценка ($\delta\theta \sim 10^{-3}$ град) показывает, что такое отклонение может быть зарегистрировано при использовании четырех–пяти точек траектории для оценки направления движения.

Второй источник возмущения – хребты и впадины. Эффект моделируется как два последовательных преломления на угол $\delta\theta$, с расстоянием между преломляющими плоскостями $X_0 \approx 100 \text{ км}$. В результате траектория смещается на расстояние $l = \delta\theta X_0 \approx 100 \text{ м}$, которое вполне отчетливо измеряется при существующей точности регистрации. Третий эффект – это отклонение траектории при пролете мимо острова. Отклонение траектории θ находится из формулы Резерфорда (Прохоров, 1980б)

$$H_0 = f M/v^2 \text{ ctg } \theta/2,$$

где $M = SD_0(\rho - 1)$ – масса острова; S – площадь острова; D_0 – глубина океана = 1000 м ; гравитационная постоянная $f = 7 \times 10^{-8} \text{ см}^3/\text{г}(\text{сек})^2$. Угол отклонения траектории $\theta = f M/H_0 v^2$. При размере острова = 500 км , величина отклонения $\theta \approx 7.5 \times 10^{-6}$ рад. Эта

величина может быть измерена при анализе десяти точек траектории. Таким образом, отклонения траектории, обусловленные неоднородностями земной поверхности, могут наблюдаться при существующей манере формализации спутниковых данных в файлах MGDR.

НАБЛЮДЕНИЕ ВАРИАЦИЙ ТРАЕКТОРИИ СПУТНИКА ПО ДАННЫМ МИССИИ ТОПЕКС-ПОСЕЙДОН

На рис. 1 показана карта Сахалинской обл., на которой приведены треки 212 и 034, пересекающие область в направлении с северо-востока на юго-запад. На своем пути они пересекают: границу суша-море при выходе с материка в окрестности Амурского лимана; две границы суша-море при пересечении о. Сахалин; Охотское море; о. Итуруп и глубоководную впадину Курильского желоба.

Вариации широты и долготы траектории спутника показаны на рис. 2. Это плавные монотонные кривые с небольшими, едва заметными (амплитуда 10^{-2}), вариациями координат. Это участок эллиптической траектории спутника между 139° и 157° в.д. Всего на траектории содержится 500 точек регистрации. Выделяются скачки амплитуды, которые отчетливо видны, если из приведенных в файле ва-

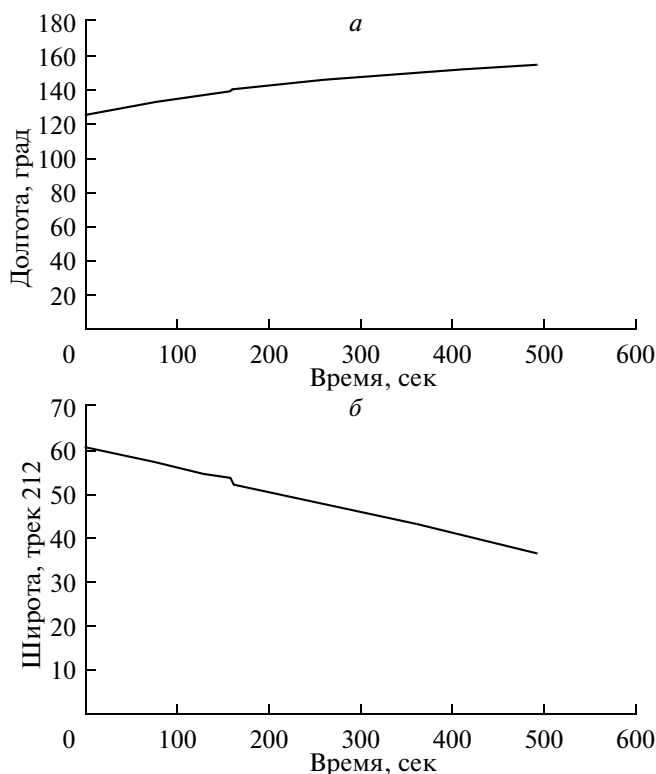


Рис. 2. Вариации во времени долготы (*a*) и широты (*б*) траектории спутника для трека 212 (цикл 60) Время в градусах широты, проходимых со средней скоростью спутника. Участок траектории над о. Сахалин и Охотским морем.

риаций координат вычесть детерминированную компоненту, полученную в результате сглаживания по 24 точкам наблюдения.

Результат вычитания показан на рис. 3. На рисунке отчетливо выделяются три различных типа вариаций. Первый тип — это непрерывные колебания примерно постоянной амплитуды с характерным расстоянием изменения порядка 20 км, второй тип — это несколько резких импульсов сравнительно большой амплитуды, третий тип — это сравнительно медленные вариации средней линии колебаний с характерной амплитудой, в 10 раз меньшей амплитуды самих колебаний. Если сравнивать наблюдаемую амплитуду отклонений и ее теоретическую оценку для о. Сахалин, то очевидно, что теоретической оценке соответствуют медленные вариации средней линии колебаний. Именно эти вариации можно рассматривать как опознанный сигнал и использовать в целях геофизических измерений. Однако для проведения таких измерений желательно разработать технологию вычитания помехи. Такие технологии составляют главную часть спутниковой геофизики (PORSEC, 2008). Для ее разработки необходимо исследовать свойства поме-

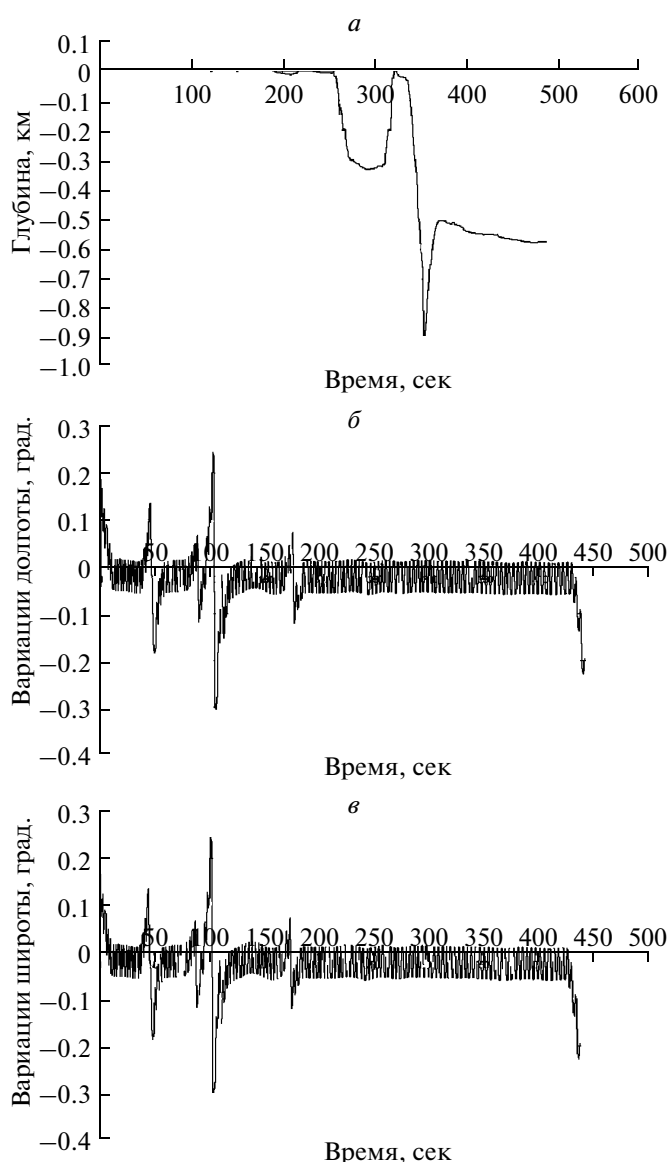


Рис. 3. Отклонения траектории спутника при прохождении трека 212 (цикл 60): *a* — глубина бассейна под точкой траектории; *б* — вариации долготы спутника; *в* — вариации широты спутника. По оси абсцисс отложено время, выраженное в секундах.

хи. Результаты этого исследования представлены в следующем параграфе.

СВОЙСТВА КОЛЕБАНИЙ ТРАЕКТОРИИ СПУТНИКА МИССИИ ТОПЕКС-ПОСЕЙДОН

Анализ пространственной и временной зависимости периодической непрерывной компоненты вариаций траектории проведен по результатам регистрации вариаций траектории для треков 025, 60 и 217, пересекающих о. Сахалин и Японское море. Используемые для анализа участки треков показаны на рис. 4. На рис. 5 показаны вариации широты

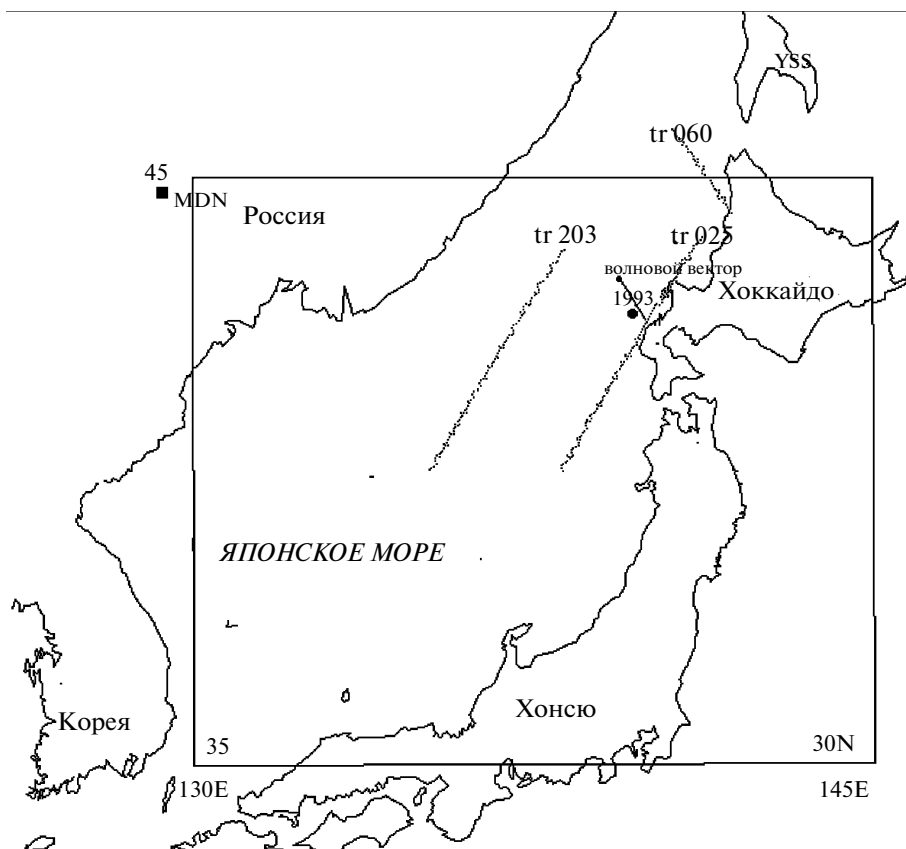


Рис. 4. Участки треков 025, 203 и 060 на карте Японского моря, использованные для исследования пространственной и временной зависимости колебательной помехи. На карте указано положение эпицентра землетрясения 12 июля 1993 г. и сейсмических станций MDN и YSS.

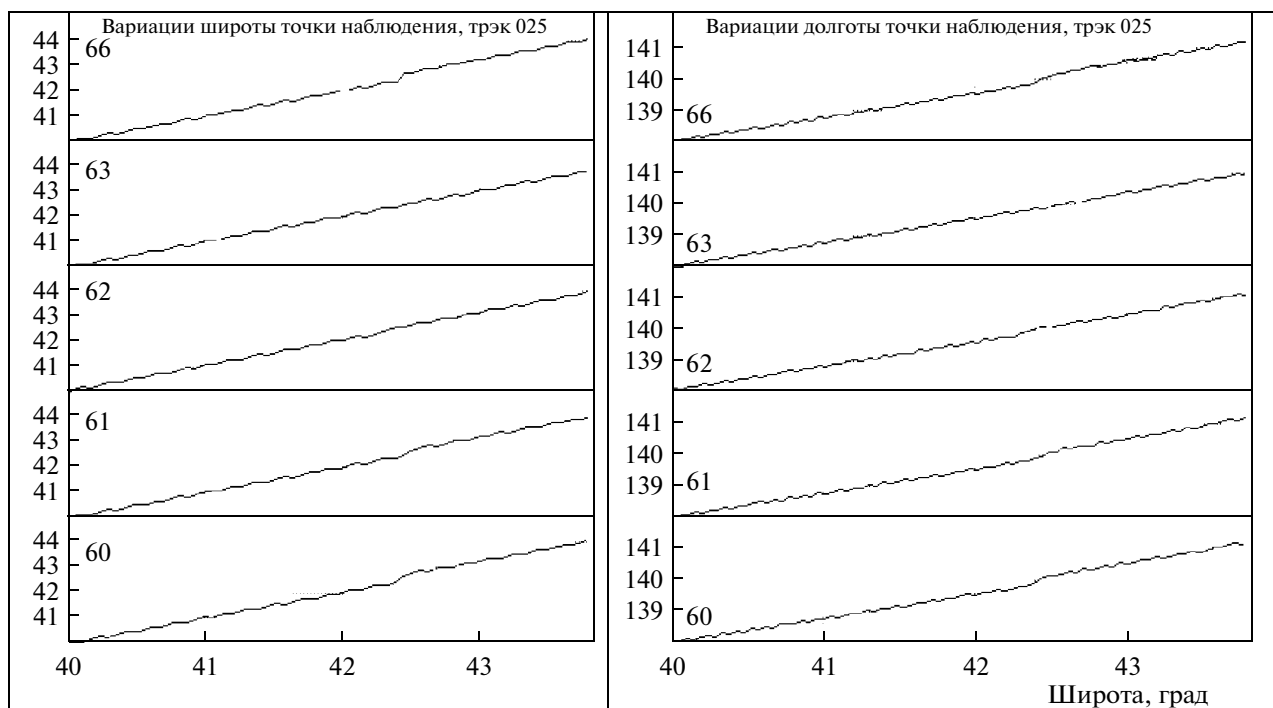


Рис. 5. Вариации широты (слева) и долготы (справа) траектории спутника для трека 025 для различных циклов. Номер цикла показан у начала соответствующей кривой.

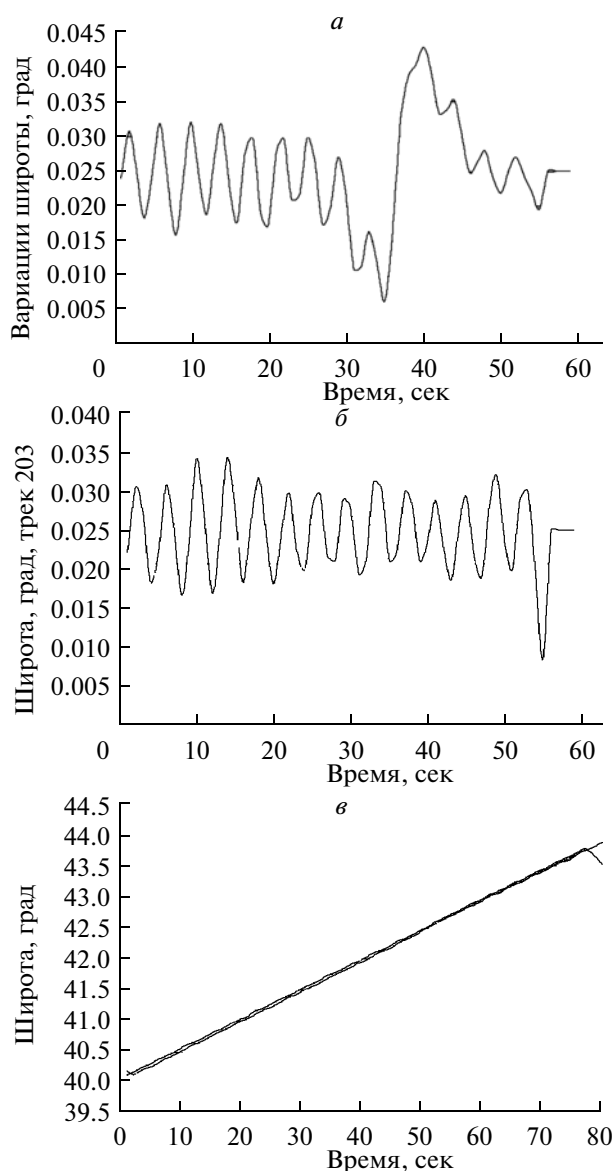


Рис. 6. Колебания широты вдоль траектории для треков 025 (а) и 203 (б, в).

и долготы, полученные при прохождении различных циклов трека 025, пересекающего о. Хоккайдо и проходящего мимо о. Окусири. Внимание к треку связано с известным землетрясением 12 июля 1993 г. (Иванов, 1995).

Первое свойство состоит в том, что периоды колебаний вариаций широты и долготы отчетливо различны. Период случайной компоненты вариаций долготы примерно вдвое меньше периода колебаний вариаций широты (рис. 5).

Это обстоятельство естественно в том случае, если указанные колебания не связаны с колебательными движениями самого спутника. Вероятный

источник эффекта — геофизические особенности планеты Земля.

Второе свойство состоит в том, что эти вариации сравнительно устойчивы во времени, и форма и временные характеристики колебаний мало изменяются от цикла к циклу. Каждый цикл соответствует движению спутника над одним и тем же участком земной поверхности. Номер цикла соответствует задержке траектории от момента запуска миссии (сентябрь 1992 г.). Интервал времени между циклами = 9.915 сут.

Видно, что колебания траектории имеют одинаковые временные и амплитудные характеристики для различных циклов. Более того, расположение импульсной помехи большой амплитуды одинаково для всех циклов. Используются материалы наблюдения трека 025, проходящего между 40° и 45° с.ш. и пересекающего Японское море. Траектория показана на рис. 4.

Третье свойство состоит в том, что вариации на соседних треках имеют одинаковые временные и амплитудные характеристики. Это свойства иллюстрируется на рис. 6, где показаны колебания широты вдоль траектории для треков 025 и 203.

Видно, что колебательная компонента примерно одинакова для обоих треков, в то время как импульсная помеха наблюдается только на треке 025, который пересекает границу вода—суша на о. Хоккайдо.

Более детальные характеристики помехи выявляются при спектральном анализе кривых. Пространственные спектры вариаций широты для различных циклов трека 025 показаны на рис. 7. Видно, что для всех циклов спектры распадаются на два участка — высокочастотный и низкочастотный, и что расположение участков одинаково для различных циклов. Оба участка довольно широкополосные.

Амплитуды спектральных компонент, соответствующих низкочастотной полосе, соответствуют амплитудам оценочных сигналов, обусловленных неоднородностями земной поверхности. Высокочастотная полоса по диапазону частот и по амплитуде соответствует колебательной компоненте помехи. Поскольку для интерпретации сигнала, соответствующего низкочастотной полосе, используются импульсные представления (рефракция, подвижка), то для интерпретации необходимо разработать правила очистки сигнала от высокочастотной помехи. Такие алгоритмы составляют конструктивную часть спутниковой геофизики. Они излагаются в руководствах по использованию данных и ежегодно обсуждаются на конференциях PORSEC 9 (PORSEC, 2008). Стабильность помехи и слабая и прогнозируемая зависимость ее от номера цикла являются основой для построения таких методов.

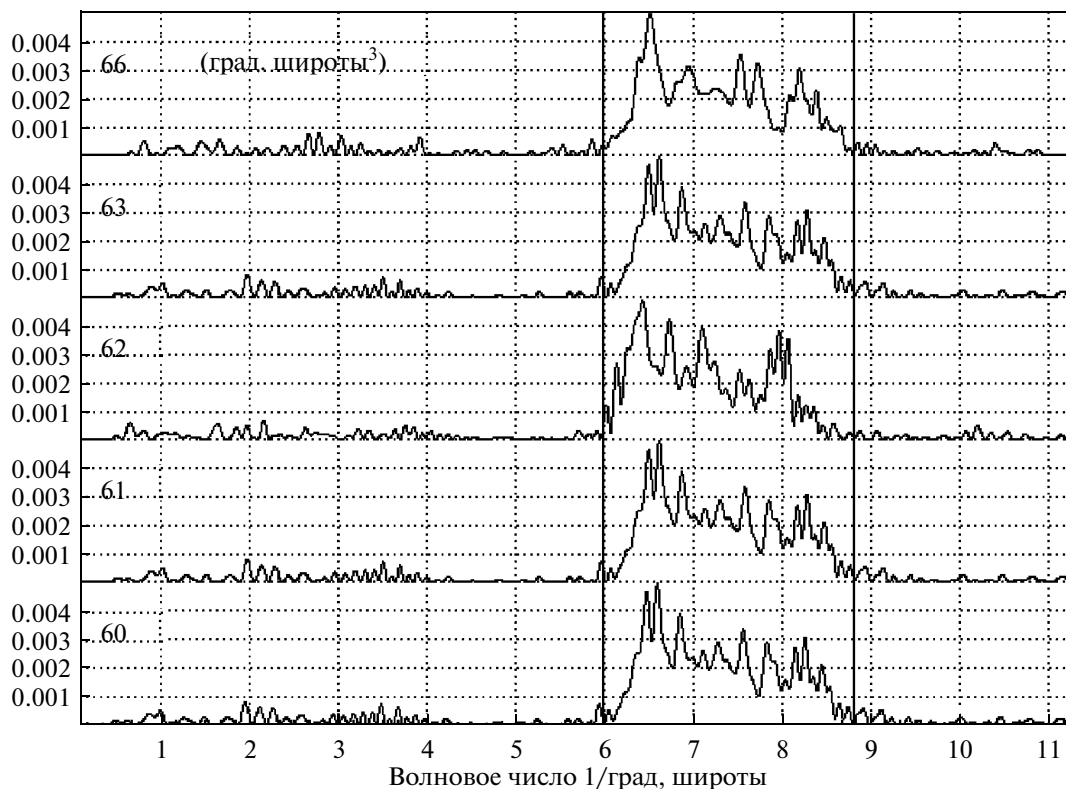


Рис. 7. Спектры вариаций широты для траектории 025 для различных циклов. Номер цикла поставлен рядом с соответствующей кривой. Спектры вычислены по участку траектории длиной в 15° с.ш.

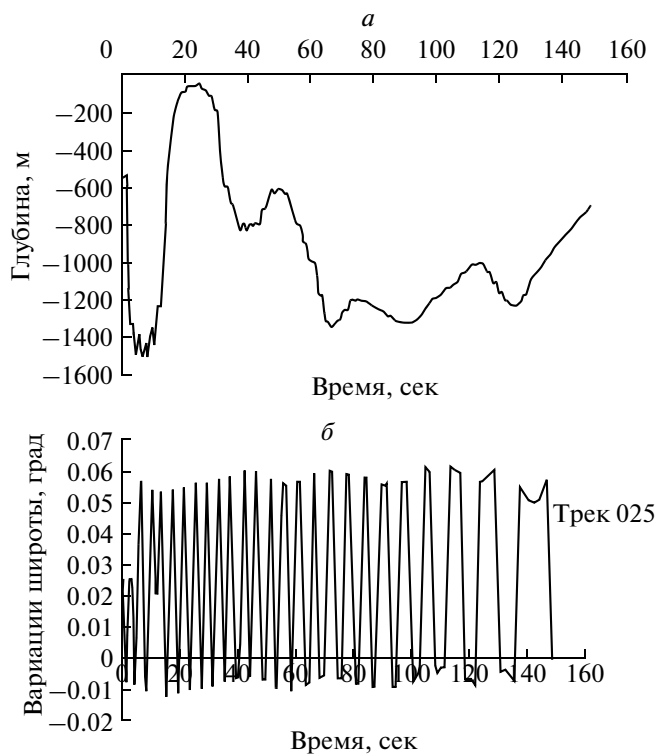


Рис. 8. Вариации колебательной компоненты траектории спутника при пересечении спутником Охотского моря по треку 025: *a* – зависимость глубины моря от широты в точке прохождения спутника; *б* – вариации широты точки наблюдения в зависимости от времени движения спутника.

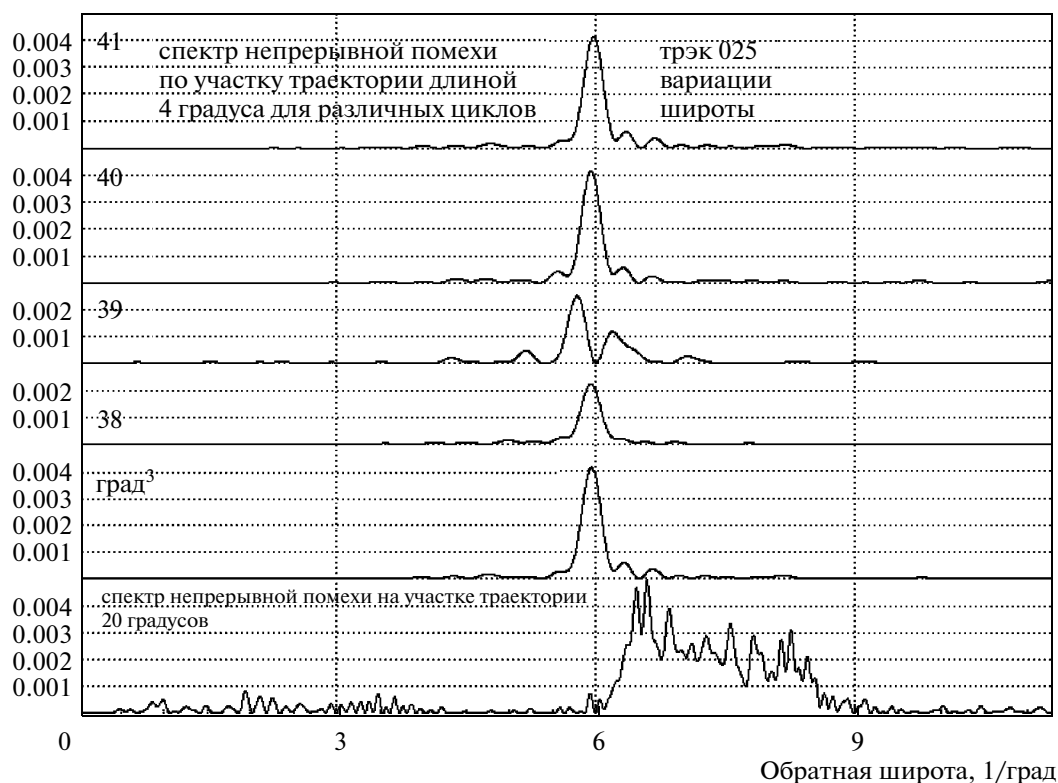


Рис. 9. Спектр сигнала колебательной помехи, зарегистрированной в файлах MGDR для различных циклов на участке трека 025. На нижней кривой показан спектр, вычисленный по участку траектории длиной 15° для того же трека (цикл 38). Номер кривой соответствует номеру цикла.

МЕТОД ОЧИСТКИ СИГНАЛА ВАРИАЦИЙ ТРАЕКТОРИИ СПУТНИКА ОТ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ ПОМЕХИ

Из рис. 7 видно, что спектры полезного геофизического сигнала и колебательной помехи практически не пересекаются. Последнее означает, что такая помеха надежно вычитается. Для такого вычитания

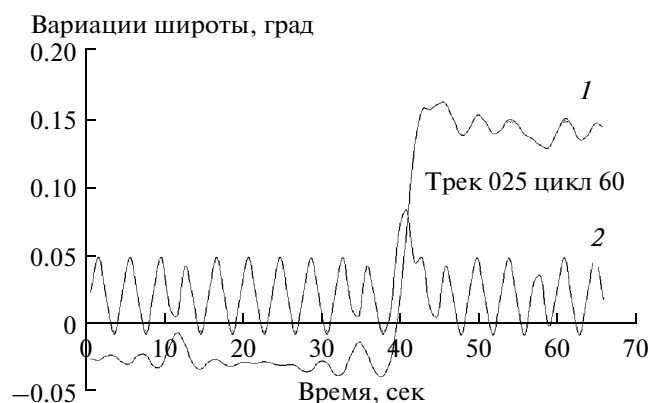


Рис. 10. Результат вычитания периодической компоненты вариаций траектории из записи вариаций широты трека 025 для участка между 40° и 44° с.ш. (1), вычитенная осцилляция (2).

в Институте морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН) разработан эффективный метод (Кайстренко, 2002), опирающийся на технологию последовательных спектров (Иванов, 2002). Однако ни эта технология, ни этот метод не используются достаточно широко и мало апробированы на практике. Поэтому ниже предложена упрощенная процедура, которая опирается на специфические особенности колебательной помехи. Эти особенности иллюстрируются на рис. 8, где показаны вариации колебаний широты точки траектории при пересечении спутником территории Охотского моря по треку 025.

На рис. 8 видно, что сигнал обладает специфическим свойством — квазимонохроматичностью, которое означает, что в основном это гармонические колебания, частота которых медленно изменяется со временем. Для такого сигнала характерной особенностью является аномальная зависимость ширины спектра от длительности отрезка наблюдения сигнала. В общем случае, если сигнал короче, то спектральный диапазон сигнала шире. В случае квазимонохроматического сигнала уменьшение длительности сигнала до определенных пределов сопровождается уменьшением ширины спектра. Последнее свойство отчетливо видно на материалах вычислений спектров, показанных на рис. 9. На

верхних кривых рисунка показаны спектры колебательной помехи, вычисленные по интервалу длиной 4° (40° – 44° с.ш.). На нижней кривой показан спектр, вычисленный по интервалу длиной 16° (40° – 57° с.ш.). Видно, что спектр сигнала по короткому интервалу намного уже, чем спектр сигнала по большому интервалу. Это обстоятельство позволяет, изменяя диапазон наблюдения, добиваться лучшей очистки сигнала с использованием вычитания из сигнала единственной гармоники, частота, амплитуда и фаза которой соответствует характеристикам максимума спектра.

Эта особенность спектра позволяет сформулировать понятие частоты колебаний, которая зависит от точки наблюдения. При этом каждой точке (размером в несколько градусов) можно сопоставить значение максимума частоты спектра, вычисленного по интервалу времени длительностью $(d\omega/dt)^{-1/2}$. Характеристики этого спектрального максимума могут быть использованы для вычитания из результата наблюдения колебательной компоненты. Результат такого вычитания показан на рис. 10 (верхняя кривая) для трека 025 для 42° с.ш.

Видно, что при разумном выборе участка наблюдения (длина участка в 4°) периодическая компонента практически полностью вычитается при применении простейшей процедуры – вычитания колебаний, соответствующих максимуму спектра. То есть каждой точке пространства можно сопоставить характеристику – период колебаний траектории. Это векторная характеристика, так как периоды колебаний вариации широты и долготы траектории различны. Практически при анализе периодических систем используется не вектор периодов колебаний, а волновой вектор, компоненты которого равны значениям обратных периодов колебаний по долготе и по меридиану. Направление этого волнового вектора для участка траектории 025 вдоль берега о. Хоккайдо показано на карте, представленной на рис. 11. Видно, что линии равной фазы колебаний практически параллельны береговой линии.

Таким образом, со спутника наблюдаются периодические вариации неизвестного свойства земной поверхности, которые приводят к периодическим отклонениям траектории спутника. Эти вариации, по-видимому, представляют значительный научный интерес в геофизике.

О ГЕОФИЗИЧЕСКОМ ПРОИСХОЖДЕНИИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ СВОЙСТВ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В том случае, когда наблюдаемое явление непонятно и не может быть истолковано как результат действия известных геофизических компонентов, главным вопросом исследования становится оценка достоверности полученных наблюдений. При анализе данных MGRD такой вопрос вполне зако-

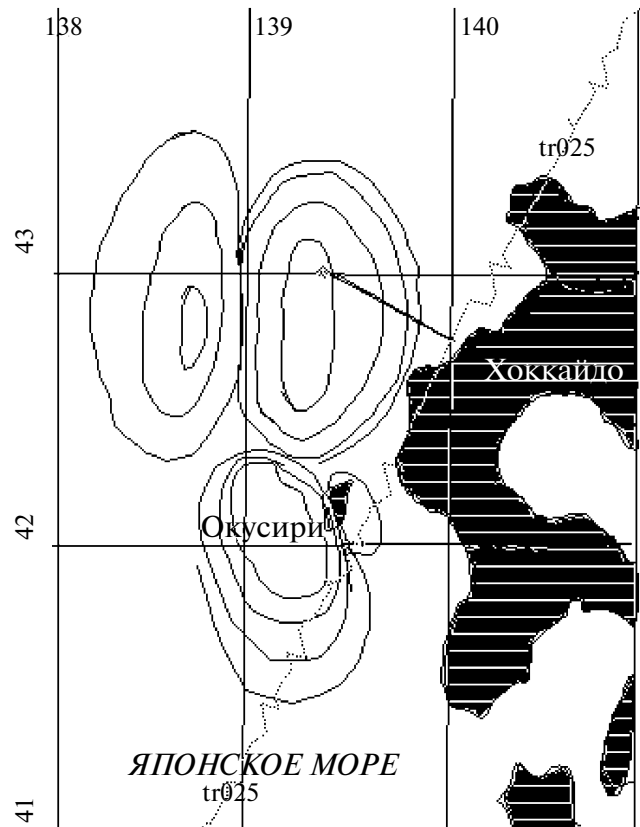


Рис. 11. Карта очага землетрясения 12 июля 1993 г., на которой указана траектория спутника (трек 025). Линия со стрелкой – волновой вектор колебаний; замкнутые линии – изолинии смещения уровня при землетрясении 12 июля 1993 г.

номерен. Хотя правила определения траектории спутника достаточно хорошо разработаны (Ricklefs, 2006), материалы наблюдения апробированы при использовании методики GPS, в процедуре толкования и записи спутниковых наблюдений остается много возможностей для ошибки интерпретации, записи и истолкования. В таких случаях для проверки достоверности рекомендуется на основе обнаруженного свойства сделать дополнительный прогноз, который никак не связан с процедурой получения основополагающих данных.

В настоящем параграфе предпринята попытка такого прогноза, причем свойством, которое проверяется, является периодичность вдоль поверхности Земли механического действия на объекты, в том числе на земную кору. В результате такого действия механические (упругие свойства) земной коры должны периодически изменяться в пространстве, причем направление вектора Браве (Прохоров, 1980в) этой периодической структуры должно совпадать с направлением построенного нами волнового вектора, а величина периода должна совпадать с наблюдаемым периодом колебаний вариации орбиты спутника. Предполагается, что периодичность

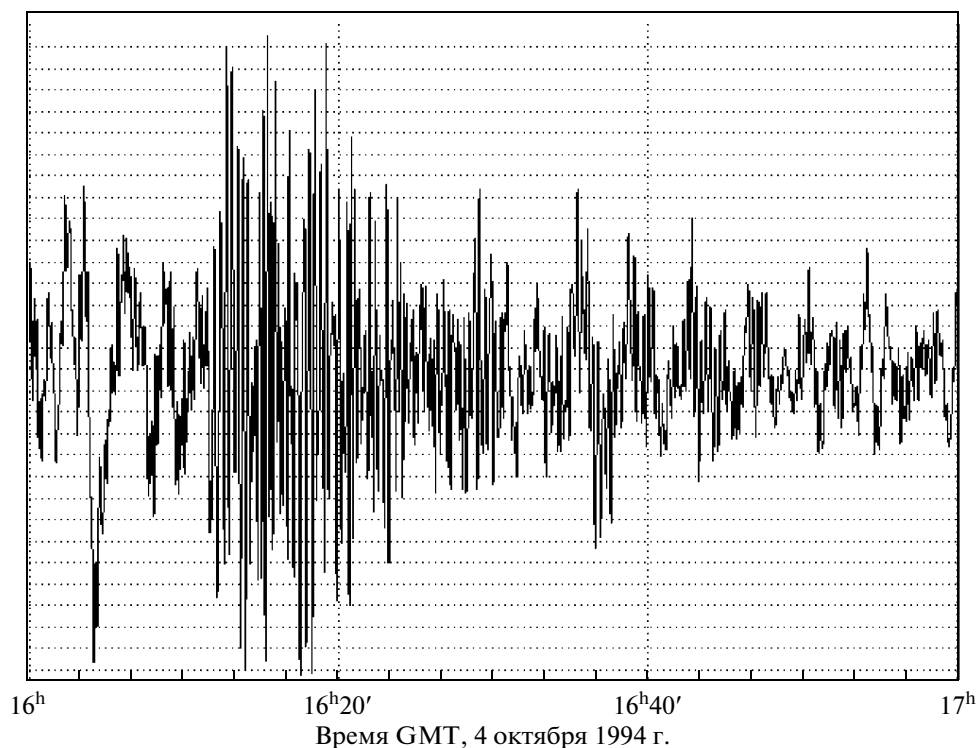


Рис. 12. Запись сейсмического сигнала землетрясения 12.10.1994 г. на станции Якутск. Использована запись колебаний в восточном направлении в течение 30 мин после момента прихода поверхностной волны. Ордината – запись скорости смещения в SAC-формате на станции IRIS.

одномерна и полностью определяется направлением вектора Браве.

Такая периодичность может быть обнаружена при исследовании распространения поверхностных сейсмических волн, в частности, сейсмических волн сильных землетрясений (Иванов, 1995; Иванов и др., 1997).

Действие среды на характеристики волны хорошо известно и является одним из важнейших источников информации в астрофизике. Оно сводится к появлению в спектре прошедшей волны линий поглощения на частотах собственных колебаний среды.

В случае, если среда периодична и действие на волну достаточно слабо, собственные частоты сре-

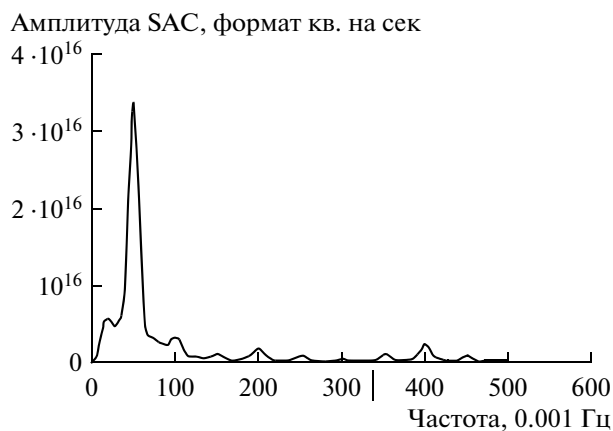


Рис. 13. Спектр записи поверхностной волны землетрясения 4 октября 1994 г., полученной на станции Якутск. Восточная компонента.

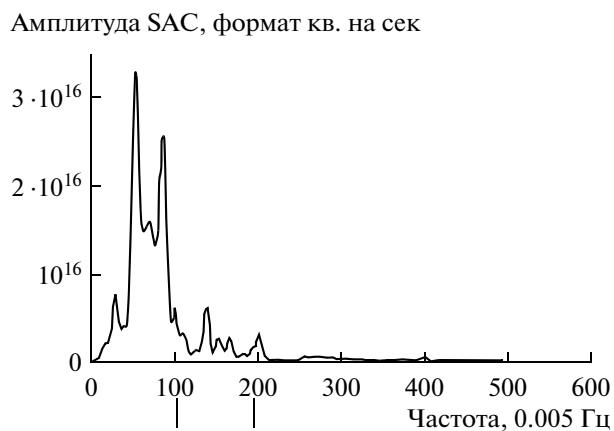


Рис. 14. Спектр записи поверхностной волны землетрясения 12 июля 1993 г., полученной на станции MDN. Восточная компонента.

ды, по которой проходит волна, вырождаются в узкие полосы, расположенные в окрестности гармоник времени прохождения волной периода решетки. Учитывая сказанное, прогнозировать можно появление спектра поглощения сейсмической поверхностной волны на частотах n/T , где T – время прохождения волной периода трассы, равное L/v ; L – период пространственной структуры; n – целое число; v – скорость поверхностных сейсмических волн.

Для анализа использованы материалы наблюдения сейсмических волн двух сильнейших землетрясений Курило-Камчатского региона за последнее десятилетие XX в. (Иванов, 1995; Иванов и др., 1997). Рассмотрены сейсмический сигнал землетрясения 12 июля 1993 г. в Японском море, зарегистрированный станцией системы IRIS в Муданжане, и сигнал землетрясения 4 октября 1994 г., зарегистрированный станцией системы IRIS в Якутске. Трассы распространения этих сигналов показаны на рис. 1, 4. Направления волн близки к трекам 060 и 212, сигналы зарегистрированы системой IRIS (Science plan, 1990) без насыщения. Запись сейсмического сигнала землетрясения 12.10.1994 г. на станции Якутск показана на рис. 12. Использована запись колебаний в восточном направлении в течение 30 мин после момента прихода поверхностной волны.

При регистрации сейсмического сигнала землетрясения 12.10.1994 г. на станции Якутск использована запись колебаний в восточном направлении в течение 30 мин после момента прихода поверхностной волны. Ордината – запись скорости смещения в SAC-формате на станции IRIS. По записи построен спектр.

Как известно, спектры поглощения Солнца были открыты в XIX в., когда спектры строились экспериментально с помощью дифракционных решеток. При таких построениях не используются сложные процедуры оценки спектра с разделением сигнала на несколько независимых участков с последующим усреднением результатов (Брилинджер, 1980). Как показано в (Иванов, 2002), такая процедура пагубно влияет на результаты анализа. В настоящей работе она не используется. Полученные спектры показаны на рис. 13, 14.

На рис. 13 показан спектр записи землетрясения 12.10.1994 г. На представленном участке содержится 1000 счетных точек. На кривой показан результат сглаживания по 20 точкам. Прямой линией около оси абсцисс показана частота гармоник времени прохождения поверхностной волной периода обнаруженной периодичности, построенного по данным трека 212. Величина периода 10.8 км. Для оценки скорости распространения волны использовано значение 3.3 км/с. Оценка произведена по моменту прихода фронта волны с использованием оценки положения

эпицентра JMA (Иванов, 1995). Величина периода = 3.1 с. В окрестности ожидаемого значения частоты наблюдается отчетливый минимум спектра.

Аналогичная процедура проделана по материалам регистрации землетрясения 12 июля 1993 г. в Японском море на станции MDN системы IRIS. Траектория спутника, расположение станции, эпицентр землетрясения и станция регистрации показаны на рис. 4.

Результат оценки периода равен 6.4 км, скорость распространения поверхностных волн 3.16 км/с, время прохождения периода 2.1 с. Частоты гармоники показаны линиями.

Видно, что в соответствующих точках спектра наблюдаются довольно отчетливые минимумы, которые с некоторыми натяжками можно рассматривать как линии поглощения. Так что, по-видимому, обнаруженная по спутниковым данным периодическая структура реально существует и является интересным геофизическим объектом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По материалам наблюдения вариаций траектории спутников миссии Топекс-Посейдон обнаружены три типа аномалий.

К первому типу аномалий отнесены вариации малой амплитуды (100 м) с характерными временами изменения в несколько секунд. По месту расположения и амплитуде они могут быть истолкованы как отклонения траектории, обусловленные неоднородностями земной поверхности, вызванными различиями плотности грунта и воды.

Ко второму типу могут быть отнесены импульсные аномалии, которые наблюдаются в моменты пересечения траектории и границы суша-вода. Они совпадают с ожидаемыми аномалиями по месту расположения, однако по амплитуде превосходят оценочные значения в десятки раз.

К третьему типу аномалий относятся квазипериодические аномалии, наблюдаемые всегда с амплитудой в несколько километров. Эти аномалии квазигармоничны, период колебаний составляет несколько секунд и изменяется в зависимости от расположения точки съема. Аномалии хорошо устраняются из записи при вычитании монохроматической помехи на участке величиной 4° . Возможно, аномалии имеют геофизическое происхождение. Проведена попытка подтверждения естественного происхождения периодической компоненты. Построен спектр поглощения сейсмического излучения сильных землетрясений при регистрации на станциях системы IRIS. Прогнозируемые линии обнаружены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Борн М.* Атомная физика. М.: Наука, 1970. 540 с.
- Браун Д., Массет Ф.* Недоступная Земля. М.: Мир, 1984. 261 с.
- Бриллинджер Д.* Временные ряды. Обработка данных и теория. М.: Мир, 1980. 535 с.
- Галицкий В.М., Никитин Е.Е., Смирнов Б.М.* Теория столкновений атомных частиц. М.: Наука, 1981. 320 с.
- Давыдов А.С.* Теория атомного ядра. М.: Физматгиз, 1958. 450 с.
- Иванов В.В.* Движение сейсмического источника землетрясения 12 июля 1993 года в Японском море // *Физика Земли*. 1995. № 11. С. 3–17.
- Иванов В.В., Михайлова Т.Г., Храмушин В.Н.* Эволюция землетрясения 4 октября 1994 года // Проявление конкретных цунами / Под ред. К.Ф. Сергеева. Южно-Сахалинск: ИМГиГ, 1997. С. 155–170.
- Иванов В.В.* Интерпретация спутниковых измерений вариаций уровня моря // *Исслед. Земли из космоса*. 2003. № 3. С. 41–53.
- Иванов В.В.* Периодические вариации погоды и климата // *Успехи физ. наук*. 2002. Т. 172. С. 777–811.
- Иванова Е.В., Иванов В.В., Пищальник В.М., Любичский Ю.В.* Периодическая структура поверхностных течений на шельфе Сахалина: верификация // *Исслед. Земли из космоса*. 2003. № 3. С. 1–8.
- Кайстренко В.М.* Отчет по Курильской программе. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2002. 150 с.
- Прохоров А.* Физический энциклопедический словарь // *Рефракция волн*. М.: Сов. энциклопедия, 1983. С. 930.
- Прохоров А.* Физический энциклопедический словарь // *Резерфорда формула*. М.: Сов. энциклопедия, 1983. С. 930.
- Прохоров А.* Физический энциклопедический словарь // *Браве решетки*. М.: Сов. энциклопедия, 1983. С. 930.
- Прохоров А.* Физический энциклопедический словарь // *Спектральные линии*. М.: Сов. энциклопедия, 1983. С. 930.
- Benada R.* Physical oceanography distributed active archive center. PO.DAAC. Merged GDR (TOPEX/Poseidon) users handbook. Version 1.0 // JPL/California Institute of Technology, 1993. P. 170.
- PORSEC 2008 // Proceedings*. Guangzhou, China, 2008. 105 p.
- Science plan for a new global seismographic network // IRIS*. Washington, 1984. 110 p.
- Ricklefs R.L.* Consolidated Laser Ranging Prediction Format. Version 1.01 // ILRS Prediction Format Study Group. Center for Space Research. Univ. of Texas. 2006. 37 p.

The Variations of Satellite Trajectory as a Geophysical Information

V. V. Ivanov

Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk

The variations of satellite trajectory are investigated by data of satellite mission Topex-Poseidon. The information about geophysical objects is regarded. The possible sources of trajectory perturbation are estimated by using the simple model. The model proposes that the perturbation is constructed by the non-homogeneity of mass distributions along the earth's surface. The trajectories of tracks 212, 034, 025, 203, 060 in the range of latitude from 40° to 60° have been investigated for period from 1992 to 2003. The anomalies of trajectories have been discovered. The anomalies can be distributed into 3 types. The anomalies of the first type are the variations with amplitude 100 m and characteristic times of several decades of seconds. The positions of anomalies and amplitudes can be associated with theoretical estimations. The anomalies of the second type are the jumps of coordinates, which is raising on the transitions between land and sea surfaces. The time of peculiarity is the same as theoretical, but the amplitude is ten times more. The anomalies of the third type are the quasi-periodic deflections with amplitude of several hundreds of meters. The period of oscillations do not changes from cycle to cycle and depends on the latitude of the observation point. The hindrance can be reduced by special procedure. The attempt to check the origin of hindrance has been carried on. If the periodicity is the feature of the earth surface then the seismic radiation of the great earthquakes contains the bands of absorbing. These bands have been discovered on the IRIS records of the earthquakes July 12, 1993 and October 04, 1994.

Keywords: satellite mission Topex-Poseidon, trajectory perturbation, geophysical objects, earthquakes, Sakhalin Island, Okhotsk Sea