

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	2013	Том		Номер выпуска	5		
	Название статьи					Страницы	Цит.
	ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА						
	ОБНАРУЖЕНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КУПОЛОВ В ЭКВАТОРИАЛЬНОМ ПОЛЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО ВОДЯНОГО ПАРА ПРИ ГЕНЕЗИСЕ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА FRANCISCO (2001) <i>Шарков Е.А., Шрамков Я.Н., Покровская И.В.</i>					3	1
	МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ АНТИЦИКЛОНИЧЕСКОГО ВИХРЯ В САХАЛИНСКОМ ЗАЛИВЕ ПО СПУТНИКОВЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ <i>Рогачев К.А., Шлык Н.В.</i>					12	0
	ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ						
	ОЦЕНКА КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА В КАРСКОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО СКАНЕРА MODIS-AQUA <i>Кузнецова О.А., Копелевич О.В., Шеберстов С.В., Буренков В.И., Мошаров С.А., Демидов А.Б.</i>					21	5
	КЛИМАТИЧЕСКИ ИНДУЦИРОВАННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ЭКОТОНЕ АЛЬПИЙСКОЙ ЛЕСОТУНДРЫ ПЛАТО ПУТОРАНА <i>Им С.Т., Харук В.И.</i>					32	0
	ХАРАКТЕРИСТИКИ КАТЕГОРИЙ ПОЖАРОВ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В СИБИРИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ И ДРУГИХ НАБЛЮДЕНИЙ <i>Пономарев Е.И., Швецов Е.Г.</i>					45	9
	МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ						
	КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ЭКРАНОЗЕМОВ МОСКОВСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ LANDSAT <i>Савин И.Ю.</i>					55	3
	СПОСОБ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕНЕНИЙ В ЛЕСАХ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПО РЯДАМ РАЗНОВРЕМЕННЫХ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ <i>Терехин Э.А.</i>					62	2
	ГЕОВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ПРОЕКТИРОВАНИИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ <i>Рюмкин А.И., Тябаев Е.С.</i>					70	2
	ДИСКУССИИ						
	ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКИ И ДАННЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ИДЕНТИФИКАЦИИ СУДОВ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ СУДОВЫХ РАЗЛИВОВ В ЧЕРНОМ МОРЕ <i>Иванов А.Ю., Кучейко А.А., Филимонова Н.А., Евтушенко Н.В., Антонюк А.Ю., Терлеева Н.В.</i>					84	7

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

**ОБНАРУЖЕНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КУПОЛОВ
В ЭКВАТОРИАЛЬНОМ ПОЛЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО ВОДЯНОГО ПАРА
ПРИ ГЕНЕЗИСЕ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА FRANCISCO (2001)**

© 2013 г. **Е. А. Шарков***, **Я. Н. Шрамков**, **И. В. Покровская**

Институт космических исследований РАН, Москва

*E-mail: e.sharkov@mail.ru

Поступила в редакцию 01.02.2013 г.

С помощью принципиально усовершенствованной комплексной базы данных EVA-01 (пространственно-временная эволюция тропического циклона и поля водяного пара) с элементами объектно-реляционного типа выполнен детальный анализ поля интегральной концентрации водяного пара (по данным микроволновых спутниковых систем комплекса DMSP) на всех этапах временной эволюции тропического циклона (ТЦ) Francisco (2001) в акватории северо-западной части Тихого океана. В работе показано, что при использовании технологии сетчатых 3-D поверхностей были впервые экспериментально получены отдельные детализированные фрагменты поля водяного пара, в которых на фоне среднего значения его интегрального содержания, превышающего критическое значение, формируются своего рода “купола” повышенных значений содержания водяного пара достаточно сложной пространственной формы и с очень высокой временной изменчивостью. Возможным физическим механизмом формирования повышенного значения интегрального содержания водяного пара могут служить известные высотные конвективные колонны в облачном поле ТЦ на каждый временной эволюционный этап преобразования ТЦ.

Ключевые слова: тропические циклоны, интегральное поле водяного пара, критические геофизические параметры генезиса

DOI: 10.7868/S0205961413050096

ВВЕДЕНИЕ

С самого начала активного использования спутниковых методов в метеорологии были потрачены значительные усилия исследователей по наблюдению и регистрации отдельных (и фрагментарных) оптических и ИК-изображений тропических вихревых возмущений в различных фазах, и на их базе сформирован целый спектр оптических и ИК-сигнатур облачных систем, образующих крупномасштабную структуру атмосферной катастрофы – тропического циклона (ТЦ). Эти оптические сигнатуры облачных систем легли в основу распознавания признаков зрелости ТЦ и его динамических характеристик и используются в оперативном анализе по настоящее время (см., например, Минина, 1970, 1982; Шарков, 2010; Dvorak, 1984; Sharkov, 1998, 2000, 2012; Velden et al., 1998). Однако, с точки зрения общей энергетики атмосферной катастрофы, эти признаки являются по существу вторичными и не могут претендовать на ранг первичных признаков “близости” геофизической среды к генезису индивидуального тропического возмущения или к кризисному моменту перехода “слабой”, размы-

той формы в резко интенсивную и развитую форму (т.н. процесс интенсификации ТЦ). В полной мере таких признаков пока не существует, поскольку не ясен источник “быстрой” и мощной энергии, которая позволит интенсифицировать (или диссипировать за счет отбора энергии) ТЦ за сравнительно короткий промежуток времени (5–8 ч). Принципиально новым шагом в изучении дистанционных критериев генезиса ТЦ следует считать результаты комплексных многочастотных оптико-ИК-микроволновых спутниковых исследований эволюции оптического образа ТЦ в поле экваториального интегрального водяного пара, при анализе которых обнаружен фундаментальный вклад малоинерционного источника энергии – поля водяного пара повышенной концентрации, – за счет энергии которого и происходят генезис первичных форм ТЦ и затем формирование зрелых форм ТЦ, и горизонтального переноса водяного пара глобальной циркуляцией и джетовыми потоками для поддержания функционирования зрелых форм ТЦ (Шарков, 2010; Шарков и др., 2010, 2011а, б).

Важно отметить, что при рассмотрении классической концепции генезиса ТЦ (Emanuel, 2003) в вопросах термодинамического баланса (типа “цикла Карно”) взаимодействия тропических возмущений с полями водяного пара вообще не рассматриваются, и по существу уходит из рассмотрения значительная (и может быть и решающая) часть термо-массообмена. Сложность исследуемой проблемы заключается в том, что необходимо провести синхронный анализ дистанционной спутниковой информации двух стохастических процессов, обладающих принципиально различными пространственно-временными масштабными и структурными характеристиками. Первый процесс – эволюция ТЦ как системы облачных масс (Sharkov, 2000, 2012), второй – как особенности пространственного поля интегрального водяного пара со значительной пространственно-временной вариабельностью (Шарков и др., 2010). Сочленение двух указанных баз данных должно быть произведено на минимальном временном интервале (в данном случае – на суточном временном пикселе). В случае же увеличения временного интервала сочленения двух процессов эффективность предлагаемого метода резко падает из-за сравнительно небольшого времени жизни ТЦ и очень высокой пространственно-временной вариабельности поля водяного пара. Анализ методологии построения необходимых для исследуемой задачи баз данных показал (Шрамков и др., 2010), что необходимое временное сочетание параметров двух стохастических процессов возможно при использовании активно развивающейся в настоящее время объектно-реляционной технологии построения сложных комплексных баз данных.

Цель настоящей работы – на основе преимуществ объектно-реляционной базы данных сформировать усовершенствованный вариант базы данных (БД) EVA-01 с элементами объектно-реляционной технологии, которая включает в себя дистанционную спутниковую информацию о двух упомянутых выше стохастических процессах. На основе строго синхронного анализа этих стохастических полей удастся показать, что на фоне среднего значения интегрального содержания поля водяного пара (далее – поля W) образуются своего рода “купола” повышенных значений интенсивностей полей W достаточно сложной пространственной формы. Фиксация по дистанционным микроволновым данным этой особенности поля водяного пара соответствует временным срокам, более ранним, чем появление зрелой эволюционной формы ТЦ по оптическим и ИК-данным (определенная сигнатура облачных систем вихревой структуры ТЦ).

ДАнные НАБЛЮДЕНИЙ, МЕТОДИКА И АЛГОРИТМ ИХ ОБРАБОТКИ

Блок-схема первого варианта БД EVA-00 с элементами объектно-реляционной технологии, которая включает в себя дистанционную спутниковую информацию о двух упомянутых выше стохастических процессах, впервые представлена в работе (Шрамков и др., 2010).

БД EVA-00 использует информацию от своих предшественниц – БД GLOBAL-TC и GLOBAL-RT-FIELDS (Институт космических исследований (ИКИ РАН)). Первая представляет собой хранилище систематизированных дистанционных данных о глобальном тропическом циклогенезе, т.е. содержит информацию о физическом процессе, рассматриваемом на всех акваториях Мирового океана (Покровская, Шарков, 2006, 2011). Каждый вновь образующийся тропический циклон или тропическое возмущение, в дальнейшем не перешедшее в развитую форму ТЦ, составляет в базе данных отдельный файл информации.

БД GLOBAL-RT-FIELDS содержит информацию о глобальных полях радиояркостных температур (Ермаков и др., 2007), полученных с помощью комплекса SSM/I – семиканального радиотеплового прибора, принимающего линейно поляризованное излучение на частотах 19.35; 22.235; 37.0; 85.5 ГГц. На всех частотах, кроме 22.235 ГГц, измеряется как вертикальное, так и горизонтальное поляризованное излучение. На частоте 22.235 ГГц – только вертикальное. Пространственное поле зрения измерений на поверхности Земли составляет 12.5 км для канала 85.5 ГГц и 25 км для других каналов. Для получения информации о содержании водяного пара необходимы данные о радиояркостных температурах на двух каналах 22.235 и 37.0 ГГц. БД EVA-00 представляет собой комплекс программ, который выполняет все необходимые, на данный момент, функции обработки глобальных полей водяного пара и информацию о ТЦ. Прежде всего, происходит последовательная обработка данных из БД GLOBAL-TC с помощью языка программирования Microsoft Visual Studio. Поля радиояркостных температур, полученные на двух частотах – 22.235 и 37.0 ГГц – и заимствованные из БД GLOBAL-RT-FIELDS, обрабатываются на языке программирования IDL с помощью линейного алгоритма обратных задач, представленного в работе (Ruprecht, 1996), по формуле

$$W = 131.95 - 39.50 \ln(280 - T_{22V}) + 12.49 \ln(280 - T_{37V}),$$

где W – значение интегрального водяного пара, в кг/м² (или в мм), в пространственном пикселе разрешения прибора SSM/I; T_{22V} и T_{37V} – значения радиояркостных температур по каналам

22.235 и 37.0 ГГц (вертикальная поляризация) в пространственном пикселе разрешения прибора SSM/I.

В основу обработки и устройства полей водяного пара положен принцип рассмотрения глобальных дистанционных данных как достаточно длинных рядов пространственно-временных наблюдений. Выходные данные могут быть записаны в один или несколько файлов. Наиболее естественный – метод визуализации полученных данных – представляется как формирование серий изображений в виде видеоклипа. Развитие этой методики лежит в русле принятого ранее сотрудниками ИКИ РАН анимационного подхода (Ермаков и др., 2007) к анализу спутниковых дистанционных данных для исследования быстропротекающих атмосферных процессов.

На основе полученной комплексной БД сформирован демонстрационный анимационный ролик, представленный на сайте отдела исследования Земли из космоса ИКИ РАН (http://www.iki.rssi.ru/asp/dep_coll.htm) и наглядно демонстрирующий связь областей повышенной концентрации водяного пара и генезиса тропических циклонов (Шарков и др., 2012).

Однако в связи с тем, что при отображении глобальных участков земной поверхности требуется сбалансированная цветовая схема, отображение высокочастотных (мелкомасштабных) деталей этих изображений в формате “ложных цветов” представляется крайне затруднительным. Для исследования регионов, где требуется более тщательное исследование деталей поля водяного пара, в работе предлагается уменьшение области отображения, с одной стороны, и, с другой, представление его в виде 3D-поверхности. Анализ, проведенный авторами, показал, что наиболее представительными и наглядными для исследуемых проблем оказались сетчатые функции с заданной функциональной закраской ячеек. Также, для более точных количественных данных в точке исследования, каждая поверхность строилась с добавлением каркаса. Это позволяет обнаружить мелкомасштабные структуры в поле интегрального водяного пара и более детально рассмотреть и проанализировать сложную топологию поля. Данные поверхности строились с помощью библиотек фирмы MathSoft, которая известна разработкой своего программного обеспечения MathLab. Стандартная функция mesh, принимающая в качестве входящей последовательности двумерный массив данных, выдает дескриптор для объекта класса Surface. Шаг сетки для построения сетчатой 3D-поверхности соответствует уровню разрешения исходных данных и составляет 0.5° . В качестве рассматриваемого участка брался квадрат со сторонами 45° (по широте и долготе) с

изображений, содержащих значения полей интегрального водяного пара. Во время прохождения высокочастотного возмущения типа тропического циклона сетчатые 3D-поверхности наглядно демонстрируют области действия ТЦ и зону его влияния на поля водяного пара.

Для распознавания структур в области глобального поля водяного пара использовался модифицированный алгоритм “вращения из семян”. Отличительной особенностью данного алгоритма является предварительное задание точки отсчета для распознавания и объединения структуры. В качестве таких точек отсчета (семян) брались координаты центра ТЦ, на соответствующий момент времени, и создавалась область влияния площадью в один пиксел. Далее происходит последовательное сравнение значений в центральном пикселе с пикселями по всем восьми направлениям, и если разница по модулю не превосходит заранее заданное значение, в зависимости от положения циклона, то происходит присоединение пиксела к выделенной зоне. Также для более точного определения использовалось условие удаленности от центра – оно не должно превышать определенного значения. Далее происходит сравнение незадействованных соседних пикселов с вновь присоединенными пикселями, тем самым расширяется область выделения. При разнице значений больше заданной величины пространство по данному направлению прекращалось, тем самым создавалась граница области влияния. Как только возникает ситуация невозможности присоединения ни одного пиксела, происходит остановка алгоритма.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

В качестве примера продукта анимации локальных полей и использованного авторами алгоритма распознавания детализированных фрагментов на рис. 1, 2 (см. на цветн. вклейке) приведена эволюция поля водяного пара в северо-западной части Тихого океана в присутствии ТЦ Francisco (2001) на различных стадиях его развития и диссипации. Однако, как мы уже отмечали, процедура представления исследуемых полей на этих рисунках принципиально различна. Если на рис. 1 наблюдатель рассматривает ситуацию, находясь строго на условно-восстановленном перпендикуляре к исследуемой двумерной поверхности (т.е. наблюдения в режиме “надир”), то на рис. 2 ситуация принципиально иная: наблюдатель находится под практически настильным углом (около 20°) к наблюдаемой трехмерной картине интенсивности поля W и, таким образом, все особенности рельефа трехмерного поля (холмы, купола, углубления) будут в максимальной степени подчеркиваться (“настильный режим”). Авторы работы

провели предварительные исследования с целью поиска оптимального косоугольного наблюдения, который и представлен на рис. 2.

Основные характеристики ТЦ Francisco (TC Number NWP 0117), функционировавшего в северо-западной части Тихого океана в сентябре 2001 г., представлены в таблице, которая была заимствована из электронной БД GLOBAL-TC и сформирована с использованием методик препроцессинга (Покровская, Шарков, 2006) для исходных (“сырых”) данных, представленных на сайте <http://www.solar.ifa.hawaii.edu>. Систематика ТЦ Francisco представлена в соответствии с методологией, предложенной в работе (Покровская, Шарков, 2006).

Первичное тропическое возмущение ТЦ Francisco было зафиксировано 15 сентября 2001 г. в районе Маршалловых о-вов с координатами 10° с.ш., 171° в.д. и представляло собой размытую, плохо организованную облачную систему. Давление в центре составляло 1007 мбар, скорость приземного ветра колебалась около 5–7 м/с. В течение четырех дней с 15 по 18 сентября 2001 г. возмущение оставалось в первоначальной стадии развития, смещаясь в западно-северо-западном направлении. С течением времени облачный массив постепенно обособлялся, края его оставались размытыми. В течение 19 сентября, достигнув 15° с.ш., возмущение быстро интенсифицировалось и перешло в стадию тропической депрессии, скорость ветра усилилась до 15 м/с, а к 12 ч дня перешло уже в стадию тропического шторма. Давление в центре продолжало падать и достигло 996 мбар, скорость ветра усилилась до 23 м/с (см. рис. 1а). Отметим, что переход от стадии TL (первичное тропическое возмущение) в стадию TS (тропический шторм) осуществился в поле водяного пара значением более 60 кг/м^2 (эта интенсивность соответствует темно-бордовому цвету на рис. 1). Более детальную структуру поля водяного пара в исследуемом режиме наблюдения (“в надири”) не удается получить.

20 сентября 2001 г. к 18:00 ТЦ перешел в стадию сильного тропического шторма, давление в центре упало до 992 мбар, скорость ветра возросла до 31 м/с (см. таблицу). Глубокая конвекция в центре шторма приобрела четкие очертания с характерным изгибом облачных хвостовых полос в южном секторе, к северу хвостовые полосы были выражены слабее. 21 сентября к 12 ч сильный тропический шторм перешел в стадию тайфуна, этот переход произошел в поле водяного пара со значением, превышающим 70 кг/м^2 (см. рис. 1б, в).

В течение 21–24 сентября тайфун усиливался, скорость ветра достигла 51 м/с, давление упало до 945 мбар. По данным оптических спутниковых наблюдений, облачный массив ТЦ представлял собой характерный вид — компактное, небольшое

по размерам центральное ядро и хорошо развитые хвостовые изогнутые облачные полосы в южном и юго-восточном секторах. Отметим, что именно в этот промежуток времени ТЦ формирует собственное (дочернее) поле интегрального водяного пара в виде компактного центрального ядра (соответствующего оптическому образу) с джетовым спиральным мостом между дочерним ядром и материнским полем водяного пара зоны ВЗК (см. рис. 1г, д). Особенно рельефно это видно на рис. 1е. Именно в этот момент (23 сентября), достигнув 27° с.ш. в стадии Т (тайфун), система циркуляции шторма попала под влияние стационарного фронтального раздела, расположенного к востоку от Японии. Скорость смещения шторма возросла до 35 узлов в северном, северо-восточном направлении. Южные хвостовые облачные полосы почти полностью исчезли, но центральное ядро оставалось компактным. Именно в этот момент происходит резкое уменьшение интенсивности водяного пара в джетовой спиральной структуре и практический ее распад (см. рис. 1ж) при сохранении центрального ядра дочернего поля. Продолжая смещаться в северном направлении, 24 сентября в 18:00 тропический шторм трансформировался в систему умеренных широт к востоку от Курильских о-вов (стадия L) (таблица). Рассмотренная эволюция основных стадий ТЦ Francisco полностью соответствует качественной модели “верблюда” при эволюции ТЦ, предложенной в работах (Шарков и др., 2008, 2011а, б, в).

Значительно более детализированная структура поля водяного пара выявляется при уменьшении общей области отображения зоны эволюции ТЦ Francisco и представлении этой зоны в виде 3D-поверхности в качестве сетчатых функций (рис. 2). Рисунок 2 состоит из 11-ти временных фрагментов (с 15.09.2001 г. по 25.09.2001 г.) поля интегрального содержания (далее поля W в мм осажденной воды) водяного пара с суточным временным усреднением и пространственным пикселем 0.5° (около 50 км) в северо-западной части Тихого океана с координатами от 0° до 45° с.ш. и от 135° до 180° в.д. Для большей наглядности и удобства интерпретации интегральное содержание водяного пара представлено, кроме рельефного вида, еще и в виде цветовой гаммы, значения которой показаны на шкале справа сверху полной диаграммы (в количественных значениях от 0 до 80 мм). На каждом фрагменте слева сверху в виде черного провала дугообразной формы представлен о-в Хонсю (Япония), что является артефактом настоящей тематической обработки.

Общий анализ рельефного представления поля W за указанный промежуток времени показывает, что за короткие временные сроки (меньше суток) формируется целая серия высокоэнергетических образований типа своего рода “куполов” и

Эволюция ТЦ Francisco (2001 г.)

TC Number = NWP 0117

TC Name = Francisco

All Points = 35

№	Стадия развития возмущения**	Дата, ММ_ДД	Время, УТ	Широта, град	Долгота, град	Давление, мбар	Скорость ветра в центре возмущения, м/с	Направление смещения возмущения, румбы	Скорость смещения, узлы***
1	TL	09_15	6	10.0	171.0	1007	5	W	10
2	TL	09_16	6	10.0	169.0	1008	5	W	12
3	TL	09_16	15	10.0	169.0	1008	5	0	0
4	TL	09_16	23	12.9	166.8	1004	7	NW	16
5	TL	09_17	6	14.6	167.8	1004	7	NNE	18
6	TL	09_18	6	14.8	163.5	1004	9	WNW	16
7	TL	09_18	12	14.8	163.5	1004	9	0	0
8	TD	09_19	0	15.1	161.5	1006	15	W	10
9	TD	09_19	6	15.0	162.0	1006	15	E	4
10	TS	09_19	12	14.6	161.5	1004	18	SW	7
11	TS	09_19	18	14.9	160.6	998	18	WNW	6
12	TS	09_20	0	15.1	159.8	996	18	WNW	8
13	TS	09_20	6	15.7	158.6	996	18	WNW	11
14	TS	09_20	12	16.7	157.2	996	23	NW	15
15	STS	09_20	18	17.3	155.6	992	28	WNW	9
16	STS	09_21	0	18.4	154.0	992	28	NW	11
17	STS	09_21	6	18.5	152.6	992	31	WNW	13
18	T	09_21	12	19.2	151.6	990	33	NW	12
19	T	09_21	18	20.1	151.6	990	38	NNW	10
20	T	09_22	0	20.9	149.9	985	41	NW	12
21	T	09_22	6	21.4	149.3	975	44	NW	9
22	T	09_22	12	22.6	148.9	970	46	NNW	13
23	T	09_22	18	23.5	148.4	970	46	NNW	10
24	T	09_23	0	24.5	148.1	960	46	NNW	10
25	T	09_23	6	25.5	147.6	950	46	NNW	11
26	T	09_23	12	26.3	147.5	950	51	N	8
27	T	09_23	18	27.2	147.6	950	51	N	9
28	T	09_24	0	28.4	147.8	945	51	N	12
29	T	09_24	6	29.9	148.1	950	49	N	15
30	T	09_24	12	31.4	148.7	955	46	NNE	16
31	L	09_24	18	33.4	148.0	965	36	N	19
32	L	09_25	0	35.3	148.1	970	33	N	19
33	L	09_25	6	37.2	149.4	975	31	NNE	22
34	L	09_25	12	39.6	152.7	980	28	NE	35
35	L	09_25	18	41.9	156.4	984	21	NE	36

Примечание. ТЦ трансформировался в систему умеренных широт.

** Стадии развития возмущения по классификации (Покровская, Шарков, 2006): TL – первичное тропическое возмущение (замкнутая область низкого приземного давления тропической зоны); TD – тропическая депрессия; TS – тропический шторм; STS – сильный тропический шторм; T – тайфун (ураган); L – область низкого приземного давления умеренных широт. *** 1 узел = 0.51 м/с = 1.85 км/ч.

“дуг” повышенных значений (80–85 мм) интенсивностей водяного пара достаточно сложной пространственной формы и очень быстро эволюционирующих во времени. Кроме того, анализ поля *W* показывает, что рассматриваемый регион является своего рода переходной зоной между сухими (около 10–20 мм) и холодными воздушными массами выше 45° с.ш. и влажными (55–60 мм) массами материнского поля южнее 25°–30° с.ш. Эти зоны и их пространственно-временное взаимодействие хорошо идентифицируются в рельефном представлении на каждом временном фрагменте рис. 2. Так, на фрагменте рис. 2 от 15.09.2001 г., наряду с большим количеством мелкомасштабных куполов, идентифицируется большая купольная дуга поля *W* с координатами 25° с.ш. и 135° в.д. (западная оконечность дуги) и 30° с.ш. и 145° в.д. (северо-восточная оконечность дуги). Скорее всего, эта дуга представляет собой конечный этап тропического возмущения (ТВ) в стадии TL (NWP 01-54), существовавшего в этой зоне с 13.09.2001 г. по 15.09.2001 г. (по данным работы (Покровская, Шарков, 2006)). В следующие сутки (16.09.2001–17.09.2001 г.) это возмущение окончательно рассыпалось на целый ряд мелкомасштабных куполов, из одного из которых и образуется (17.09.2001–18.09.2001 г.) первичная форма ТЦ Francisco в стадии TL с координатами 15° с.ш. и 169° в.д. К концу суток 18.09.2001 г. ТВ набирает силу и в течение суток 19.09.2001 г. переходит в стадию TD и затем стадии TS (таблица). В течение следующих суток 20.09.2001 г. ТЦ Francisco резко интенсифицируется и достигает стадии STS со скоростью ветра 28 м/с и падением давления до 992 мбар. В следующие сутки 21.09.2001 г. процесс интенсификации ТЦ Francisco продолжается. При этом формируется целая серия джетов. Они идентифицируются на рис. 2 (фрагмент за 21.09.2001 г.) в виде циклонических дуг, исходящих из материнского поля. Скорее всего, благодаря этому механизму ТЦ Francisco переходит в стадию T менее чем за 6 ч со скоростью ветра 33 м/с и давлением 990 мбар. При этом серия джетов объединяется (22.09.2001 г.) в один мощный джет, который и обеспечивает закачку скрытой теплоты и дальнейший быстрый рост интенсивности ТЦ до скорости ветра 51 м/с и давления 945 мбар (23.09.2001 г.). Однако в эти же сутки происходит сложная перестройка структуры джета: дуговая его структура утончается, и величина купола уменьшается (рис. 2 за 23.09.2001 г.). И, следовательно, накачка скрытой энергии уменьшается, и ТЦ функционирует за счет энергии внутреннего собственного дочернего поля водяного пара. В течение 24.09.2001 г. и 25.09.2001 г. массы сухого воздуха начинают активно вторгаться в зону действия ТЦ, окружая его и разрывая остаточный джет с материнским полем, тем самым резкое уменьшение его интенсивности за

12 ч до скорости ветра 21 м/с и повышения давления до 984 мбар. Все эти процессы хорошо идентифицируются на рельефных изображениях рис. 2 на фрагментах за 23.09.2001 г.–25.09.2001 г.

Результаты анализа рельефного представления поля водяного пара, выполненного авторами, позволяют сделать еще один серьезный шаг по направлению выявления скрытой (и по существу запасенной) энергии в куполообразных структурах ТЦ, которая будет практически незамедлительно затрачена на поддержание кинематической структуры ТЦ и на выброс энергии при конденсации водяного пара в жидких и твердых осадках ТЦ. Оценка скрытой в куполообразных структурах ТЦ энергии была выполнена следующим образом: был выбран критерий выделения куполообразных структур ТЦ, которым послужило пороговое значение водяного пара, ниже которого интересующее нас образование долгоживущих ТЦ не происходит (в соответствии с экспериментальными данными (Шарков и др., 2012)). Таким образом, на основании этого критерия выбиралась область интегрирования, по которой производился расчет значения общего содержания пара в зоне выделенного купола. Перевод полученных значений количества влаги в величину скрытой энергии проводился, исходя из следующих предположений: осажденный водяной пар с толщиной в 1 мм (по исходным данным) соответствует, с учетом плотности воды в 1 г/см³, массе воды в 10⁶ кг на площади в 1 км². С другой стороны, известно, что удельная теплота фазового перехода пар–вода составляет 2.5 × 10⁶ Дж/кг. Таким образом, при толщине осажденного пара в 1 мм величина скрытой теплоты конденсации составит 2.5 × 10¹² Дж на площади в 1 км². Площадь зоны интегрирования из пикселей, в которых она была представлена в исходном массиве данных, была переведена в квадратные километры, для чего был рассчитан массив перевода площади. В результате всех этих шагов были получены значения энергии скрытой теплоты зоны купола (Дж) на всех стадиях эволюции ТЦ Francisco и представлены на рис. 3.

Эволюция скрытой теплоты куполообразных структур с точки зрения формирования стадий развития ТЦ представляет несомненный интерес. Так, с 15.09.2001 г. по 17.09.2001 г., когда ТЦ находился в стадии TL (первичное тропическое возмущение), купола в зоне действия ТЦ практически не содержали значимого количества скрытого тепла. Однако 18.09.2001 г., в момент, предшествующий переходу ТЦ из стадии TL в стадию TD (тропической депрессии) сроком на 6 ч и затем в стадию TS (тропический шторм) (таблица), скрытое тепло купола резко возросло до значения 2 × 10¹⁹ Дж, что, по-видимому, и послужило энергетическим резервуаром для формирования и устойчивого функционирова-

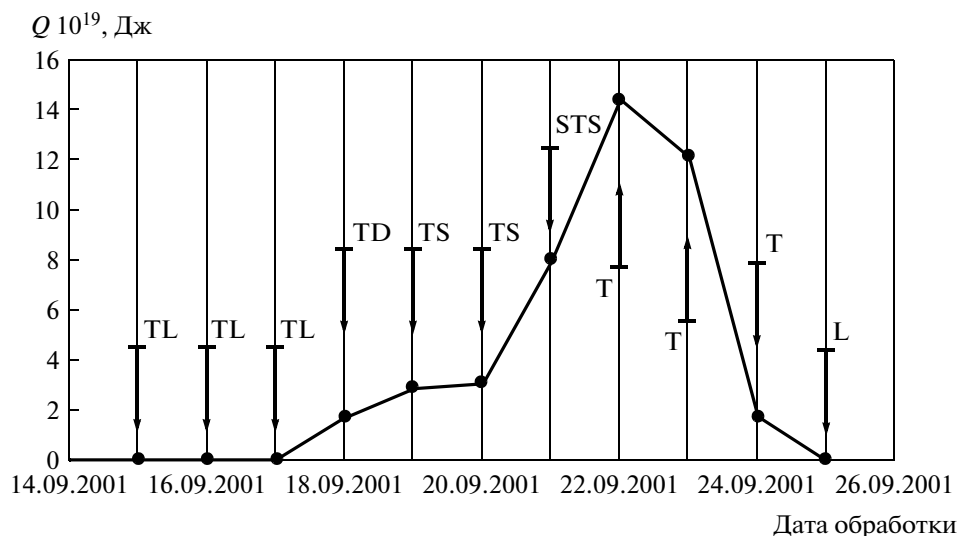


Рис. 3. Временная эволюция скрытой (запасенной) энергии Q ТЦ Francisco в высокоэнергетических куполах по мере трансформации стадий его развития TL, TD, TS, STS, T, L.

ния 19.09.2001 г. и 20.09.2001 г. ТЦ в стадии TS со скоростью ветра 15–18 м/с и давлением 996 мбар. С середины суток 20.09.2001 г. началось резкая интенсификация ТЦ Francisco через стадию STS (сильный тропический шторм) со скоростью ветра 28–31 м/с и давлением 992 мбар до стадии Т (тайфун) в середине дня 21.09.2001 г. Скорость ветра достигла 33 м/с, и давление упало до 990 мбар. Со второй половины суток 21.09.2001 г. и весь период суток 22.09.2001 г. интенсивность ТЦ продолжала усиливаться, достигнув скорости ветра в 46 м/с и давления в 970 мбар. В этот же промежуток времени (21.09.2001–22.09.2001 г.) скрытая энергия купольной структуры продолжала резко увеличиваться, достигнув максимума в $1,4 \times 10^{20}$ Дж (рис. 3). Резкое насыщение водяным паром купольной структуры связано, скорее всего, с тем обстоятельством, что основное тело ТЦ и дочернее поле ТЦ находились непосредственно в зоне действия материнского поля, что давало возможность осуществления своего рода обратной связи между кинематической интенсификацией воздушных масс ТЦ и соответственно падения давления, так и между затоком водяного пара в центральную область ТЦ и соответствующим увеличением водяного пара в купольной структуре. Однако с 23.09.2001 г. начинается новый этап в существовании ТЦ Francisco: его основное тело ТЦ выходит из непосредственного контакта с материнским полем (рис. 1д) и его связь при дальнейшей эволюции осуществляется через достаточно узкую джетовую компоненту, которая по мере движения ТЦ на север становится все более узкой (рис. 1е) и, наконец, достигнув 35° с.ш., начинает стремительно рваться (рис. 1ж). Именно с этим сценарием и происходит диссипационная

эволюция скрытой энергии купольной структуры: достигнув своего максимума 22.09.2001 г., ТЦ выходит из зоны действия материнского поля и вынужден использовать запасенную в купольной структуре энергию на поддержание и даже (временно) на развитие кинематической интенсификации (конец суток 23.09.2001 г. и начало суток 24.09.2001 г.). Скорость ветра достигает 51 м/с, и давление падает до 945 мбар. За 23.09.2001 и 24.09.2001 г. купольная структура “потеряла” около 10^{20} Дж и тем самым исчерпала практически все свои запасы (рис. 3). С начала суток 25.09.2001 г. интенсивность ТЦ Francisco резко падает до стадии L (область низкого приземного давления умеренных широт). За сутки скорость ветра падает с 36 до 21 м/с, и давление увеличивается до 984 мбар. Остатки водяного пара центральной области поглощаются фронтальным потоком с резким увеличением скорости смещения в северо-восточном направлении. На этом ТЦ Francisco прекратил свое существование.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Возможным физическим механизмом формирования повышенного значения интенсивности водяного пара могут служить известные высотные конвективные колонны (“печные трубы”) в облачном поле ТЦ. По мере эволюции ТЦ пространственная форма купола претерпевает серьезные искажения и при диссипации ТЦ перестает существовать. Фиксация по дистанционным микроволновым данным этой особенности поля водяного пара соответствует временным срокам более ранним, чем появление зрелой эволюционной формы ТЦ по данным гидрометеорологиче-

ских наблюдений и наблюдения состояния облачных масс. Таким образом, речь идет, скорее всего, о выявлении принципиально нового критического параметра генезиса ТЦ, а именно, образования куполообразной интенсивности поля W в экваториальном (“материнском”) поле.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью принципиально усовершенствованной комплексной БД EVA-01 (пространственно-временная эволюция тропического циклогенеза и поля водяного пара) с элементами объектно-реляционного типа выполнен детальный анализ поля интегральной концентрации водяного пара (по данным микроволновых спутниковых систем комплекса DMSR) на всех этапах временной эволюции ТЦ Francisco (2001) в акватории Северо-западной части Тихого океана. В работе экспериментально обнаружено, что на фоне среднего значения интенсивности поля водяного пара, превышающего критическое значения (60 мм) интегрального водяного пара (своего рода, это необходимое условие генезиса любого ТЦ, при котором формируется зрелая форма тропического циклона), формируется своего рода “купол” в поле водяного пара. Выявленные связи областей водяного пара повышенной концентрации (купола) и генезиса тропических циклонов стали очевидными только при применении объектно-реляционных компьютерных технологий и библиотек программы MatLab. При использовании технологии сетчатых 3D-поверхностей были получены отдельные детализированные фрагменты поля водяного пара на каждый временной эволюционный этап преобразования ТЦ, начиная с его генезиса — до полного распада и поглощения крупномасштабной фронтальной зоной в Тихом океане. Фиксация по дистанционным микроволновым данным этой особенности поля водяного пара соответствует временным срокам, более ранним (за 1–2 сут), чем появление зрелой эволюционной формы ТЦ по данным гидрометеорологических наблюдений и наблюдения состояния облачных масс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ермаков Д.М., Раев М.Д., Сулов А.И., Шарков Е.А.* Электронная база многолетних данных глобального радиотеплового поля Земли в контексте многомасштабного исследования системы океан-атмосфера // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 1. С. 7–13.
- Минина Л.С.* Практика нефанализа. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 335 с.
- Минина Л.С.* Тропические циклоны: Руководство по использованию спутниковых данных в анализе и прогнозе погоды / Под ред. И.П. Ветлова, Н.Ф. Вельтишева. Л.: Гидрометеиздат, 1982. С. 253–285.
- Покровская И.В., Шарков Е.А.* Тропические циклоны и тропические возмущения Мирового океана: хронология и эволюция. Версия 3.1. (1983–2005). М.: Полиграф-сервис, 2006. 728 с.
- Шарков Е.А.* Дистанционные исследования атмосферных катастроф // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 1. С. 52–68.
- Шарков Е.А., Ким Г.А., Покровская И.В.* Эволюция тропического циклона Goni и его связь с полем интегрального водяного пара в экваториальной области // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 6. С. 25–30.
- Шарков Е.А., Ким Г.А., Покровская И.В.* Множественная генерация тропического циклогенеза в Южном Индийском океане // Совр. пробл. дист. зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 75–85.
- Шарков Е.А., Ким Г.А., Покровская И.В.* Эволюция тропического циклона Hondo в поле экваториального водяного пара с использованием мультиспектрального подхода // Исслед. Земли из космоса. 2011а. № 1. С. 22–29.
- Шарков Е.А., Ким Г.А., Покровская И.В.* Энергетические особенности множественного тропического циклогенеза по мультиспектральным спутниковым наблюдениям // Исслед. Земли из космоса. 2011б. № 2. С. 18–25.
- Шарков Е.А., Шрамков Я.Н., Покровская И.В.* Особенности экваториального поля водяного пара при эволюции тропического циклона (ТЦ) на примере ТЦ Francisco (2001) // Совр. пробл. дист. зонд. Земли из космоса. 2011в. Т. 8. № 3. С. 310–316.
- Шарков Е.А., Шрамков Я.Н., Покровская И.В.* Повышенное содержание водяного пара в атмосфере тропических широт как необходимое условие генезиса тропических циклонов // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 2. С. 73–82.
- Шрамков Я.Н., Шарков Е.А., Покровская И.В., Раев М.Д.* База данных тропического циклогенеза и глобального поля водяного пара с использованием объектно-реляционных технологий // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 6. С. 52–58.
- Dvorak V.F.* Tropical cyclone intensity analysis using satellite data. NOAA Tech. Report NESDIS 11, 1984. NOAA/NESDIS, Washington, DC. 47 p.
- Ruprecht E.* Atmospheric water vapor and cloud water: an overview // Adv. Space Res. 1996. V. 18. № 7. P. 5–16.
- Sharkov E.A.* Remote sensing of tropical regions. Chichester, N.Y. etc.: John Wiley and Sons/PRAXIS, 1998. 310 p.
- Sharkov E.A.* Global Tropical Cyclogenesis. Berlin, Heidelberg, L., N.Y. etc.: Springer/PRAXIS, 2000. 361 p.
- Sharkov E.A.* Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations. Berlin, Heidelberg, L., N.Y. etc.: Springer/PRAXIS, 2003. 613 p.
- Sharkov E.A.* Global Tropical Cyclogenesis. 2nd Ed. Berlin, Heidelberg, L., N.Y. etc.: Springer/PRAXIS, 2012. 650 p.
- Velden Ch.S., Olander T.L., Zehr R.M.* Development of an Objective to Estimate Tropical Cyclone Intensity from Digital Geostationary Infrared Imagery // Weather and Forecasting. 1998. V. 13. № 13. P. 172–186.

The Detection of High-Energy Domes in the Water Vapor Equatorial Field Under the Tropical Cyclone Francisco (2001) Genesis

E. A. Sharkov, Ya. N. Shramkov, I. V. Pokrovskaya

Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

The detailed analysis of the interaction between the integral concentration of equatorial water vapor field and Francisco (2001) tropical cyclone in basin of the North-western Pacific Ocean during all stages of TC life using radically advanced data base EVA-01 with elements of the object-relation type. It was experimentally shown that the individual fragment fields of integral water vapor have been obtained using the grid 3D surfaces technology. In this case it was experimentally shown that the “domes” of heightened intensity of water vapor with the intricate space shapes. The possible physical mechanism for forming water vapor domes may be convective columns in TC cloud fields.

Keywords: tropical cyclones, integral water vapor field, boundary geophysical genesis parameters

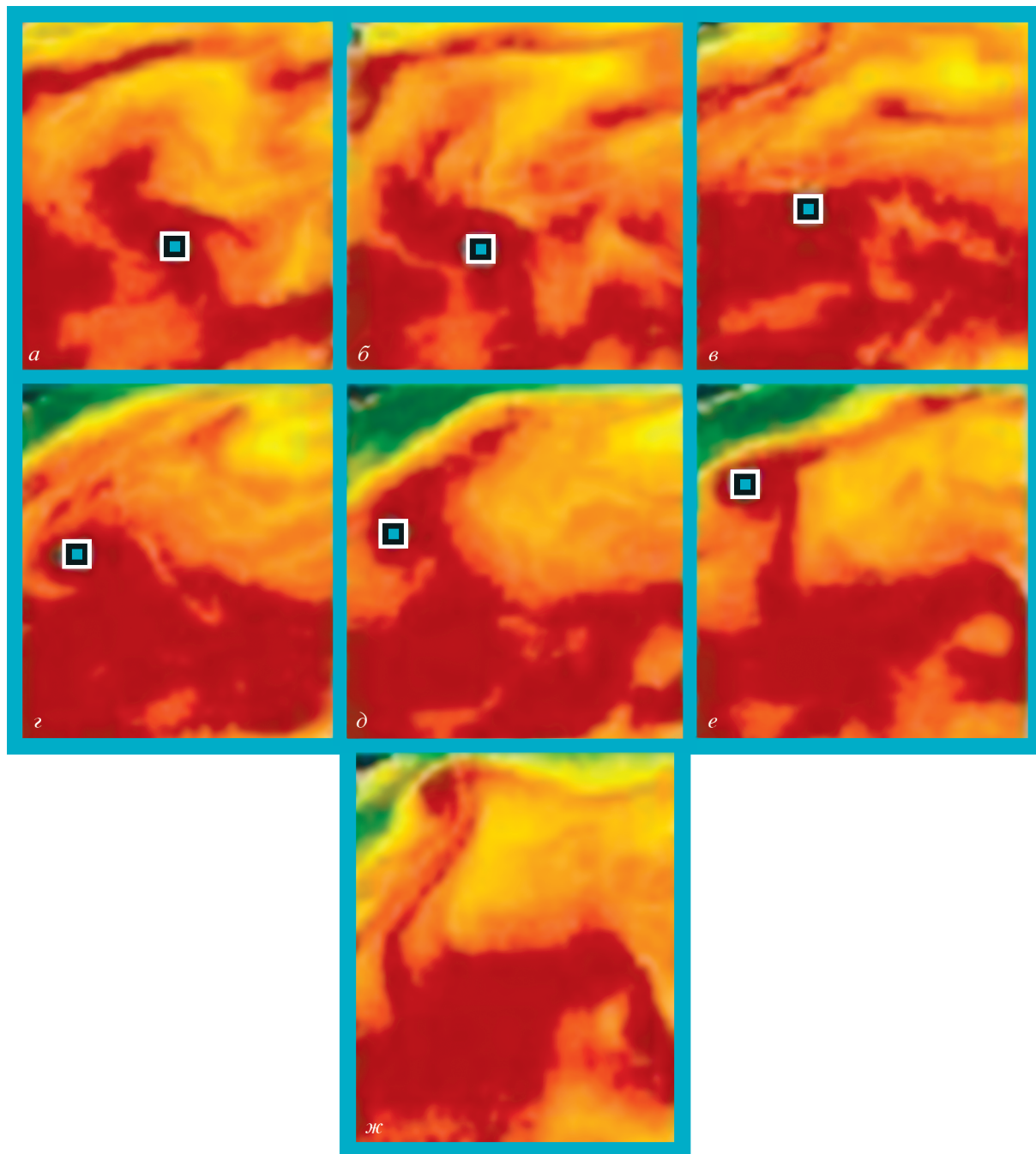


Рис. 1. Временная эволюция поля интегрального водяного пара в северо-западной части Тихого океана в присутствии ТЦ Francisco за 19–25 сентября 2001 г. Центр облачных структур ТЦ обозначается белым квадратом: *a* – 19.09.2001 г.; *б* – 20.09.2001 г.; *в* – 21.09.2001 г.; *г* – 22.09.2001 г.; *д* – 23.09.2001 г.; *е* – 24.09.2001 г.; *ж* – 25.09.2001 г.

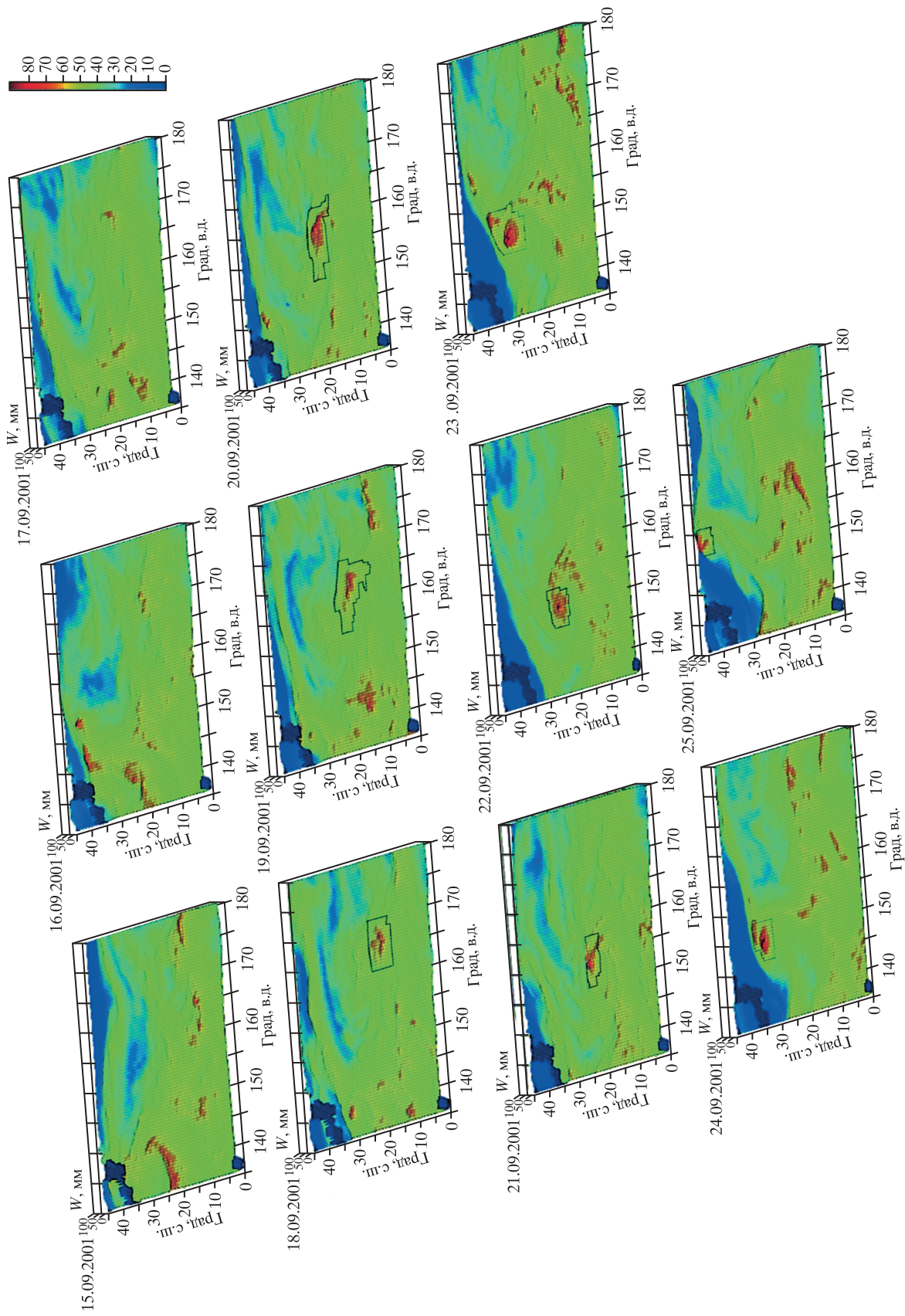


Рис. 2. Временная эволюция поля интегрального водяного пара в северо-западной части Тихого океана в присутствии ТЦ Франсиско за 15–25 сентября 2001 г. в режиме рельефного наблюдения по ежесуточным фрагментам.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ АНТИЦИКЛОНИЧЕСКОГО ВИХРЯ
В САХАЛИНСКОМ ЗАЛИВЕ ПО СПУТНИКОВЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ

© 2013 г. К. А. Рогачев*, Н. В. Шлык

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток

**E-mail: rogachev@poi.dvo.ru*

Поступила в редакцию 14.01.2013 г.

Данные радиометра AVHRR с пространственным разрешением 1.1 км (спутники серии NOAA), а также радиометра MODIS с разрешением 250 м (спутники Aqua и Terra) использованы для определения характеристик антициклонического вихря в Сахалинском заливе. Спутниковые наблюдения указывают на регулярное формирование антициклонического вихря в Сахалинском заливе в теплое время года. Вместе с тем механизм формирования такого вихря до сих пор не был определен. В настоящей работе рассмотрен новый механизм формирования антициклонического вихря в заливе. Наша гипотеза предполагает, что особенность батиметрии залива создает асимметрию в динамике вод. Простая аналитическая модель прибрежных течений на шельфе, учитывающая реальную батиметрию, позволяет определить реакцию прибрежных вод на воздействие ветра. Батиметрия залива включает ложбину с глубиной до 50 м в его восточной части и широкий шельф с глубинами около 20 м у западного берега. Поперечная компонента скорости при южном ветре в этой ложбине направлена в залив и в противоположную сторону в его мелкой части. Тем самым показано, что антициклонический вихрь формируется под действием южного ветра, характерного для региона в теплое время года.

Ключевые слова: эстуарная циркуляция, антициклонические вихри на шельфе Охотского моря, Сахалинский залив, Охотское море

DOI: 10.7868/S0205961413050059

ВВЕДЕНИЕ

Сахалинский залив, расположенный в северо-западной части Охотского моря, ограничен материком на западе и о. Сахалин на востоке. Глубина моря в заливе растет с юга на север и меняется от нескольких метров в Амурском лимане до 100 м на его северной границе. Важной чертой батиметрии залива является ложбина с глубиной до 50 м в его восточной части и широкий шельф с глубиной около 20 м в западной (рис. 1а). Эта ложбина создает асимметрию, которая, как показано в настоящей работе, является существенной для динамики вод. Гидрологические условия самого залива и Амурского лимана находятся под влиянием сильных приливных течений, однако их характеристики до сих пор слабо изучены. Кроме того, сезонная изменчивость прибрежных течений и термохалинных характеристик в Охотском море очень велика из-за смены муссона в мае-июне. Например, Восточно-сахалинское течение усилено зимой и почти исчезает летом (Ebuchi, 2006). Сильная сезонная изменчивость прибрежного потока Восточно-сахалинского течения была показана также Mizuta et al. (2003). Скорость

южного потока этого течения на глубине 200 м достигает максимума около 40 см/с в январе и минимума около 10 см/с в июле. При этом перенос массы превышает 12 Свердрупов в феврале и падает в 10 раз в октябре. Поток массы Восточно-сахалинского течения зимой определяется экмановским переносом к берегу из-за преобладающего северо-западного ветра зимой (Simizu, Ohshima, 2002). Летом (май–июнь) ветер меняет направление на южное (рис. 1б). Благодаря сезонной смене ветра, аномалия уровня Охотского моря у побережья Сахалина растет зимой и падает летом. Сезонные колебания уровня, связанные со сменой ветра, отмечены также в работах Романова и др. (2004) и Шевченко и др. (2007).

Сезонный ход стока р. Амур в Сахалинский залив также вносит значительный вклад в изменчивость солености залива. Вода низкой солености, стекающая в Сахалинский залив, формирует антициклонический вихрь (рис. 2). Эффективное время нахождения воды в вихре может составлять несколько дней, что связано с изменением циркуляции окружающих вод. Как следствие, это приводит к ослаблению речного потока прибреж-

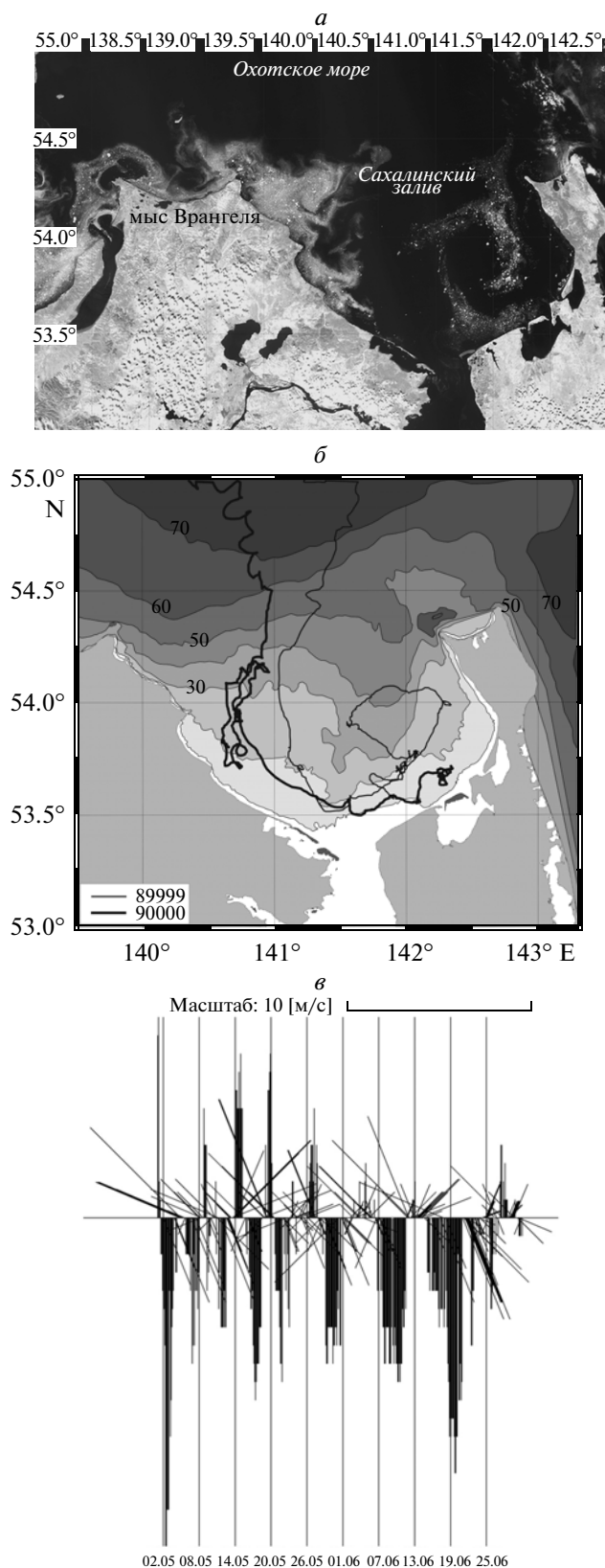


Рис. 1. Район исследований: *a* – изображение MODIS Aqua за 15.06.2003 г. в видимом диапазоне (хорошо видна антициклоническая спираль таящего льда в Сахалинском заливе); *б* – батиметрия залива и траектория дрейфтеров Argos в антициклоническом вихре в мае–июне 2009 г.; *в* – ветер (м/с) на метеостанции Погиби в мае–июне 2009 г. (данные сайта www.rp5.ru).

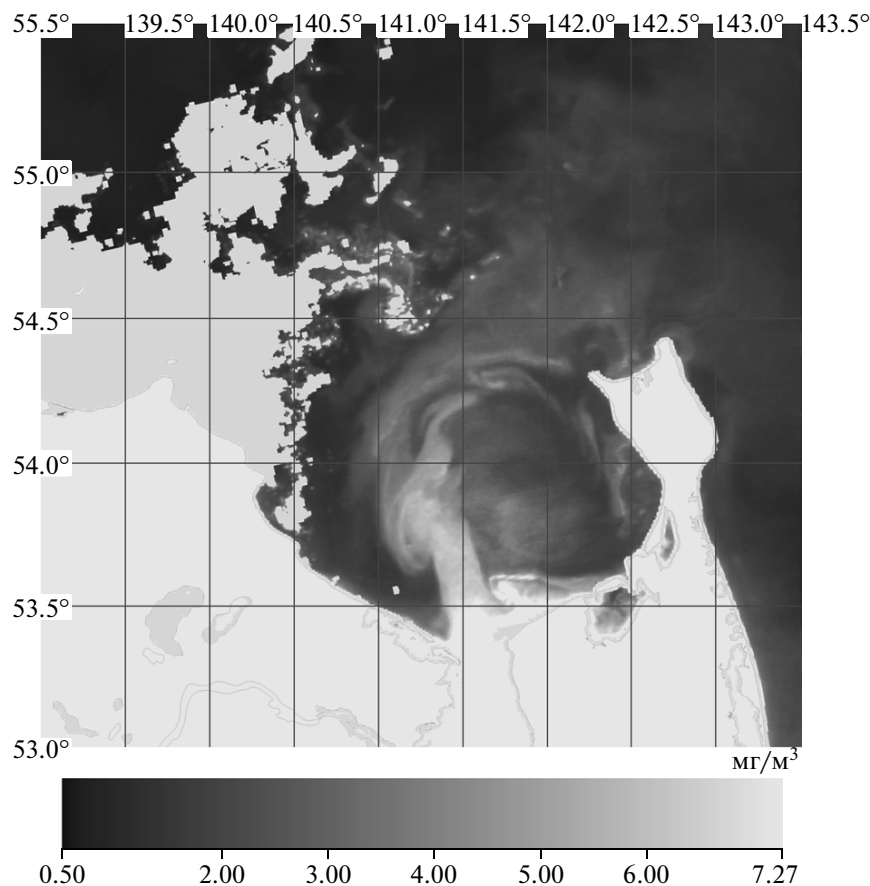


Рис. 2. Концентрация Chla по данным спутника Aqua от 15.06.2009 г.

ным течением. Кроме того, от этого зависит вынос загрязняющих, взвешенных и растворимых веществ в Охотское море. Вихрь содержит воду с относительно высокой температурой и низкой соленостью и плотностью (Рогачев, Шлык, 2011). Спутниковые изображения дают представление о размерах такого вихря, однако они не раскрывают его внутреннюю структуру и скорость потока. Особенно, если эта скорость потока меняется с глубиной, поскольку это имеет место в случае гравитационной циркуляции. Механизм формирования такого вихря до сих пор оставался неясным. Спутниковые наблюдения в других районах показывают, что поток вод на шельф прямо связан с присутствием вихрей на континентальном склоне. Известно, что антициклонические вихри существенно меняют циркуляцию и термохалинную структуру вод (Okkonen, 1996; Rogachev et al., 2007; Rogachev et al., 2008; Рогачев, Шлык, 2009; Рогачев, Шлык, 2011).

Течения на шельфе Охотского моря определяются различными силами, включающими ветер, приливы, градиент давления, инерционные вол-

ны. Ветер является доминирующим источником энергии для течений в прибрежной зоне Охотского моря. Залив и его сложная батиметрия под действием ветра создает горизонтальный градиент давления и трение. Поэтому течения зависят от наклона уровня. Прибрежная циркуляция контролирует обмен залива с глубоким морем. В заливе со сложной батиметрией (например, глубокий канал по оси залива и мелководье на его границах) местный ветер генерирует поток по ветру на мелководье и противоположный поток в канале (Wong, 1994; Winant, 2004; Narvaez, Valle-Levinson, 2008). В случае сильного перемешивания оба потока достигают либо дна, либо поверхности. Различие в направлении потока связано с балансом между напряжением ветра и градиентом давления, который становится важным в глубоком канале. В настоящей работе на основе спутниковых наблюдений мы раскрываем механизм формирования антициклонического вихря в Сахалинском заливе.

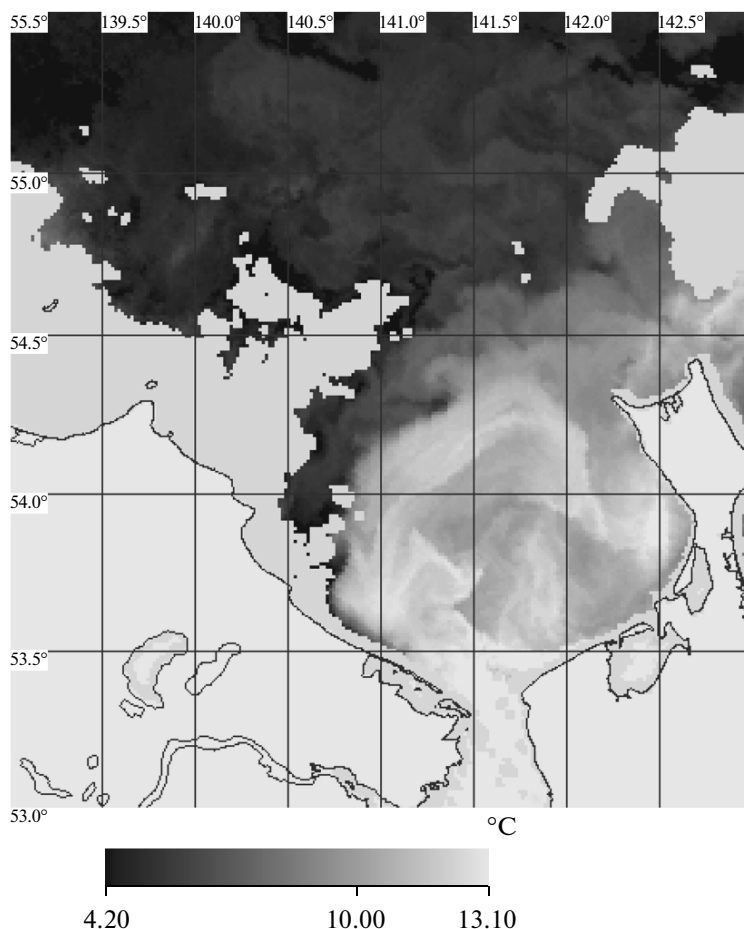


Рис. 3. Поле поверхностной температуры по данным спутника NOAA от 01.06.2012 г. (темный цвет соответствует холодной воде).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Спутниковые наблюдения включают изображения радиометра AVHRR и данные канала 1 радиометра MODIS (пространственное разрешение 250 м), предоставленные Центром коллективного пользования регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН (www.satellite.dvo.ru).

Для определения циркуляции вод использовались траектории дрейфтеров Argos, выставленных в заливе в апреле 2009 г. на припайный лед сотрудниками Экологической компании Сахалина, и предоставленные Е.Н. Морозовым. Для построения траектории дрейфтеров мы располагали их ежечасным положением. Анализ этих данных сделан нами ранее (Рогачев, Шлык, 2011). Три дрейфтера Argos, установленные на припайный лед в Сахалинском заливе в апреле 2009 г., были вовлечены в антициклоническую циркуляцию диаметром около 50 км (рис. 1б). Внутренний дрейфтер находился в пределах вихря в течение одного месяца.

Среднесуточная скорость дрейфтера 89998 достигла 70 см/с 1 июня 2009 г., а двух других буев — около 60 см/с. Все три буй покинули антициклонический вихрь во время усиления южного ветра.

Гидрологические данные включают наблюдения, сделанные ТОИ в разные годы. Батиметрия, использованная для расчета скорости потока, взята из российских навигационных карт.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Спутниковые данные указывают на регулярное формирование вихря в Сахалинском заливе. Диаметр антициклонического вихря составил около 50 км, что меньше, чем диаметр вихрей у Курильских о-вов (рис. 3–5). В заливе наблюдается относительно высокая стратификация, вызванная потоком теплой воды низкой солености на поверхности и холодной соленой водой из глубокой части моря (рис. 6). Толщина слоя низкой солености составляет несколько метров (рис. 6а–в). Струя теплых и мутных вод хорошо выделяется на спутни-

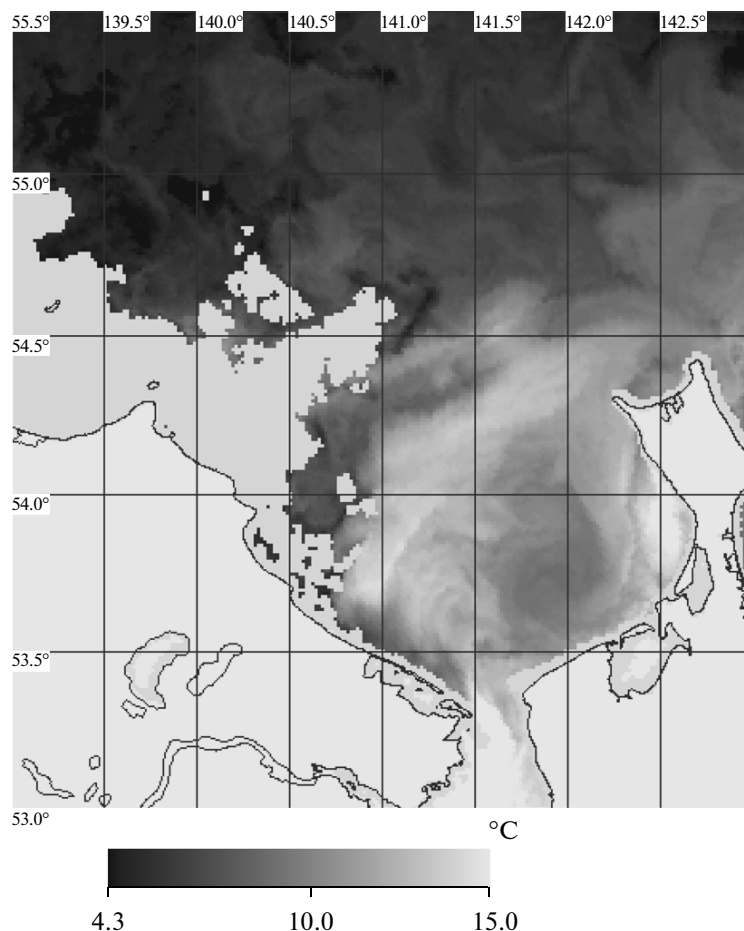


Рис. 4. Поле поверхностной температуры по данным спутника NOAA от 02.06.2012 г. (темный цвет соответствует холодной воде).

ковых изображениях (рис. 5б). Вынос амурской воды хорошо виден у южной границе спирали из тающего льда (рис. 5). На изображении видимого канала спутника Aqua, видна узкая полоса тающего льда шириной 5–10 км, которая формирует антициклонический вихрь в заливе непосредственно до стока мутной воды Амура. Это означает, что формирование вихря не связано со стоком пресной воды.

ОБСУЖДЕНИЕ

Формирование антициклонического вихря в заливе под действием южного ветра

Эстуарная, или гравитационная, циркуляция — это устойчивая средняя циркуляция, и она представляет собой концепцию идеальной циркуляции. В реальности южный ветер создает дрейфовое течение и сгон воды, что приводит к формированию наклона уровня и тем самым создает поток воды в промежуточном слое. Чтобы объяснить формирование антициклонического вихря в пери-

од действия южного ветра в заливе, мы рассмотрели простую аналитическую модель циркуляции вод и адаптировали ее для реальной батиметрии. Следуя работам Winant (2004) и Narvaez, Valle-Levinson (2008), баланс момента импульса в направлении вдоль залива будем полагать между градиентом давления и трением, что в безразмерном виде можно записать

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial \eta}{\partial x}, \quad (1)$$

где u , η , x , z — безразмерная скорость потока вдоль эстуария, аномалия уровня, координата вдоль эстуария и вертикальная координата соответственно. Размерные масштабы этих переменных заданы в виде

$$u = \frac{\rho A_z}{\tau H} u_d, \quad \eta = \frac{\rho g H}{\tau L} \eta_d, \quad x = \frac{x_d}{L}, \quad z = \frac{z_d}{H}. \quad (2)$$

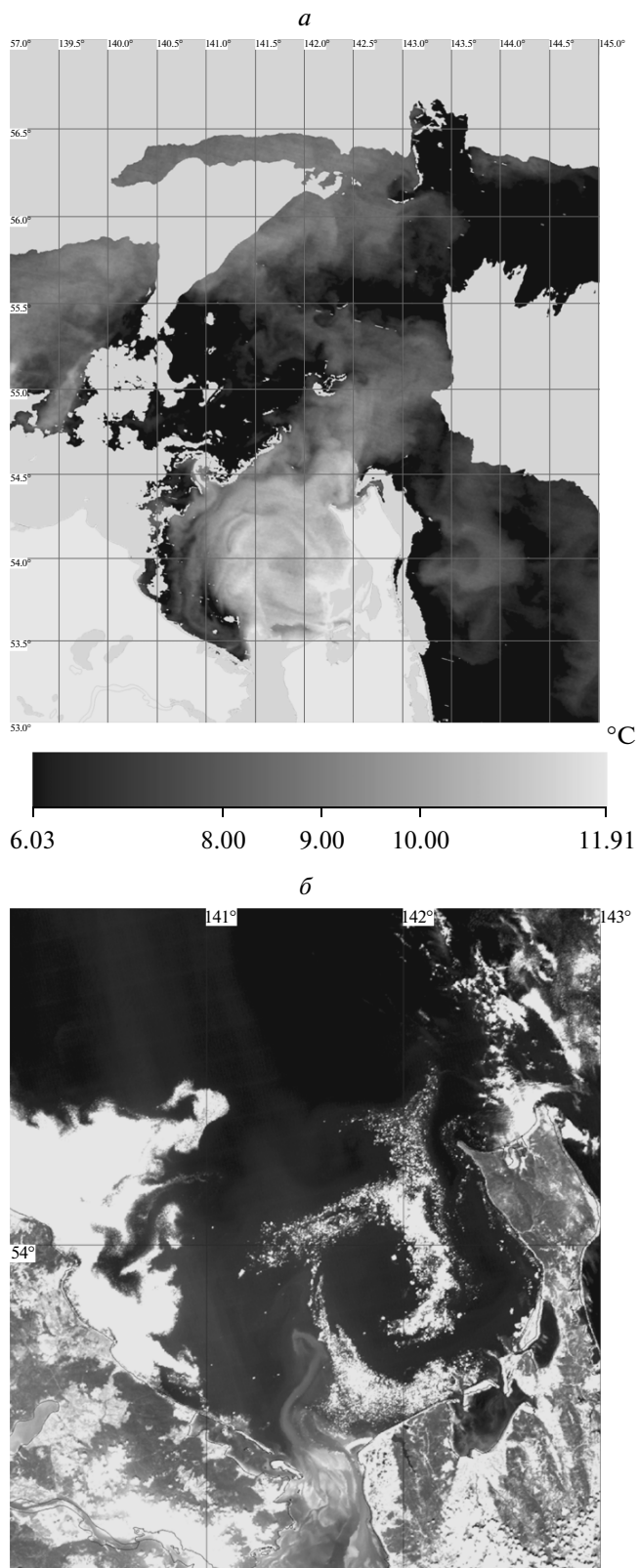


Рис. 5. *a* – Поле поверхностной температуры по данным MODIS Terra от 15.06.2009 г. (темный цвет соответствует холодной воде); *b* – изображение MODIS Aqua (видимый диапазон) (мутная вода р. Амур распространяется в западной части Сахалинского залива).

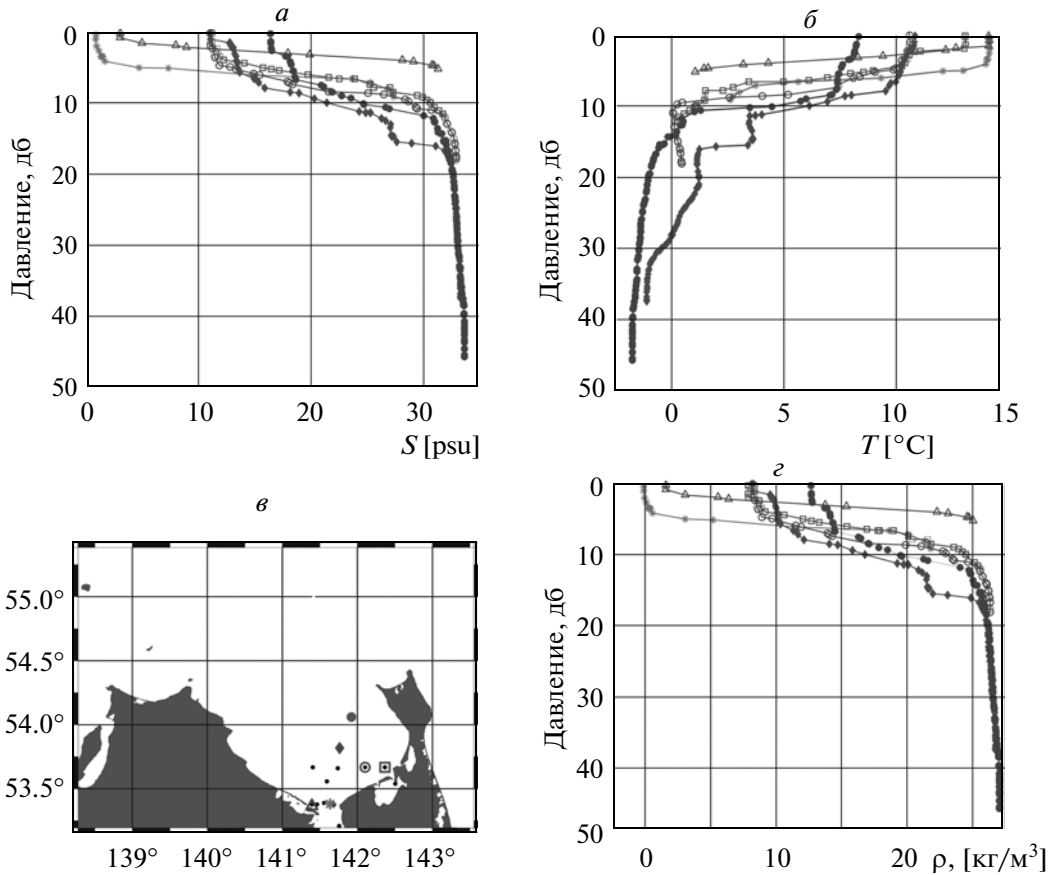


Рис. 6. Вертикальные профили солёности, температуры и условной плотности в заливе.

В уравнении (2) ρ – плотность морской воды (кг/м^3); τ – напряжение ветра (Па); A_z – коэффициент вертикальной вязкости ($\text{м}^2/\text{с}$); H – глубина моря (м); g – ускорение силы тяжести (м/с^2); L – продольный размер эстуария (м), индекс d означает размерную переменную. Преимущество использования безразмерных переменных в том, что решение не зависит от ρ , τ , A_z , H , L , g .

Граничными условиями для решения уравнения (1) являются прилипание на дне и заданное напряжение ветра на поверхности

$$u = 0, \quad z = -h, \quad \frac{\partial u}{\partial z} = 1, \quad z = 0, \quad (3)$$

где h – безразмерная глубина. Интегрируя уравнение (1) дважды и подставляя граничные условия (3), получим распределение скорости, которое сильно зависит от глубины места и градиента аномалии уровня

$$u = \frac{\partial \eta}{\partial x} \left(\frac{z^2 - h^2}{2} \right) + (z + h). \quad (4)$$

Это решение описывает поток, вызываемый ветром на поперечном разрезе, для реального распределения глубины. Первый член правой части уравнения (4) отражает поток, вызываемый наклоном уровня. Он представляет собой параболический профиль скорости потока, направленный против наклона уровня. Второй член правой части представляет собой поток, вызванный ветром, и направленный по ветру. Он ослабевает линейно с глубиной. Величину наклона уровня можно определить, интегрируя уравнение (4), чтобы получить полный поток на разрезе. Полагая отсутствие полного потока на поперечном разрезе с реальной батиметрией $h(y)$, можно получить соотношение для наклона уровня. Тем самым можно использовать уравнение (4) для расчета распределения скорости на поперечном разрезе через залив. Результаты расчета скорости потока для реального профиля глубины через залив показывают, что продольная компонента скорости направлена в залив в глубоком канале и в противоположную сторону в самом верхнем слое (рис. 7). Благодаря такому асимметричному распределению скорости формируется антициклонический вихрь. Тем самым поток в залив при южном ветре связан с форми-

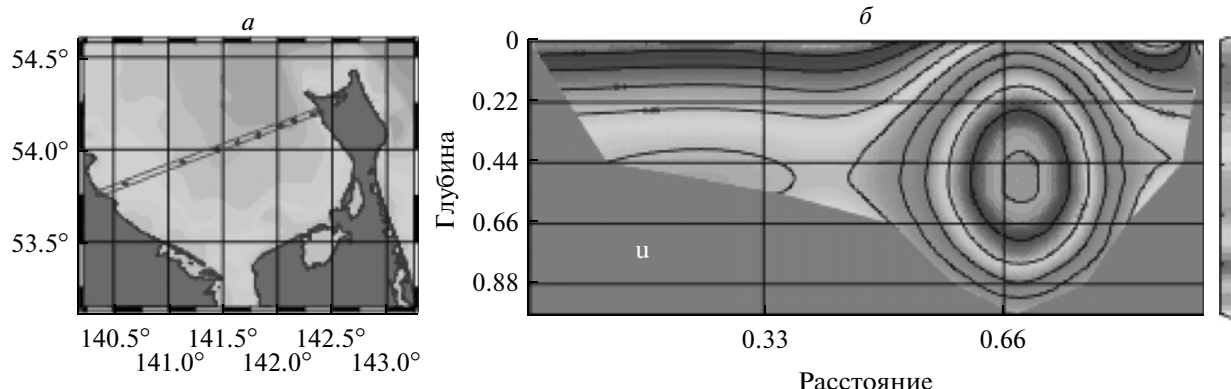


Рис. 7. Поперечная компонента скорости на разрезе через залив, полученная с использованием аналитической модели во время действия южного ветра. Все переменные безразмерные. Поток в глубокой части направлен в залив.

рованием наклона уровня и его определяющей роли для течения в промежуточном слое.

ВЫВОДЫ

Ложбина в восточной части залива и широкий шельф в его западной половине являются важными особенностями батиметрии для динамики вод. Эта ложбина создает асимметрию в распределении потока вод. Рассмотренная модель динамики вод показала, что поток в ложбине залива на его восточной стороне вызван действием отжимного (сгонного) ветра. Апвеллинг и адвекция холодной воды происходят в глубокой части у восточного берега залива под действием южного ветра. Механизм циркуляции вод в заливе связан с формированием наклона уровня под действием ветра. Наклон уровня вызывает поток на шельф и подъем вод. На мелководье в западной половине залива поток направлен по ветру на север, что убедительно отражено спутниковыми наблюдениями. Смена ветра на южный в теплый период года является существенной для формирования антициклонического вихря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Рогачев К.А., Шлык Н.В. Антициклоническая циркуляция вод Амура в Сахалинском заливе по спутниковым и морским наблюдениям // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 6. С. 73–79.

Рогачев К.А., Шлык Н.В. Изменение характеристик халоклина и рост температуры в Камчатском течении и Ойясио // Океанология. 2009. Т. 49. № 6. С. 814–819.

Романов А.А., Шевченко Г.В., Седаева О.С. Сезонные колебания уровня Охотского моря по данным береговых мареографных станций и спутниковой альтиметрии // Исслед. Земли из космоса. 2004. № 6. С. 59–72.

Шевченко Г.В., Седаева О.С., Романов А.А., Вилянская Е.А. Сезонные колебания уровня Охотского моря в Татарском проливе по данным спутниковой альтиметрии // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 3. С. 59–72.

Ebuchi N. Seasonal and interannual variations of the East Sakhalin Current observed by the TOPEX/POSEIDON altimeter // J. Oceanogr. 2006. V. 62. P. 171–183.

Mizuta G., Ohshima K.I., Fukamachi Y., Wakatsuchi M. Structure and seasonal variability of the East Sakhalin Current // J. Phys. Oceanogr. 2003. V. 33. № 11. P. 2430–2445.

Шевченко Г.В., Седаева О.С., Романов А.А., Вилянская Е.А. Сезонные колебания уровня Охотского моря в Татарском проливе по данным спутниковой альтиметрии // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 3. С. 59–72.

Narvaez D.A., Valle-Levinson A. Transverse structure of wind-driven flow at the entrance to an estuary: Nansmond River // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. № C09004. doi: 10.1029/2008JC004770.2008.

Okkonen S. The influence of an Alaskan Stream eddy on flow through Amchitka Pass // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. № C4. P. 8839–8851.

Rogachev K.A., Carmack E.C., Foreman M.G.G. Bowhead whales feed on plankton concentrated by estuarine and tidal currents in Academy Bay, Sea of Okhotsk // Cont. Shelf Res. 2008. V. 28. P. 1811–1826.

Rogachev K.A., Shlyk N.V., Carmack E.C. The shedding of mesoscale anticyclonic eddies from the Alaskan Stream and westward transport of warm water // Deep-Sea Res. P. II: Topical Stud. Oceanogr. 2007. V. 54. № 23–26. P. 2643–2656.

Simizu D., Ohshima K.I. Barotropic response of the Sea of Okhotsk to wind forcing // J. Oceanogr. 2002. V. 58. P. 851–860.

Winant C.D. Three dimensional wind-driven flow in an elongated rotating basin // J. Phys. Oceanogr. 2004. V. 34. P. 462–476.

Wong K.-C. On the nature of transverse variability in a coastal plain estuary // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. № C7. P. 14209–14222.

Wind-Driven Anticyclonic Circulation in Sakhalin Bay, Sea of Okhotsk

K. A. Rogachev, N. V. Shlyk

Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok

Winds and buoyancy drive the circulation in small bays and estuaries. That circulation controls the exchange with the adjacent waters in deep sea. In bays with complex bathymetry local wind produces downwind flows over shoal and upwind flow in deep channel. Observations with adequate spatial resolution are rarely obtained to resolve the lateral structure of wind-induced exchange flows. The main purpose of this study is to investigate the wind-driven structure of the flow in the Sakhalin Bay, Sea of Okhotsk. The upwelling, observed in the bay, is driven by the meridional pressure gradient generated by the set down of sea level. The analytical solution of wind-driven flow is applied to the cross-section. The wind-driven circulation consisted of downward flow in the surface layer and upwind flow in the deep channel.

Keywords: wind-driven, anticyclonic circulation, Sakhalin Bay, Sea of Okhotsk

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ОЦЕНКА КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА В КАРСКОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО СКАНЕРА MODIS-AQUA

© 2013 г. О. А. Кузнецова^{2,3}, О. В. Копелевич^{1,3,*}, С. В. Шеберстов^{1,3}, В. И. Буренков^{1,3},
С. А. Мошаров¹, А. Б. Демидов¹

¹Институт океанологии им. П.П. Шириова РАН, Москва

²Московский государственный университет

³Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

*E-mail: oleg@ocean.ru

Поступила в редакцию 12.03.2013 г.

Предложен и реализован новый подход к разработке регионального алгоритма оценки концентрации хлорофилла в Карском море по данным спутниковых сканеров цвета, учитывающий трудности получения регулярных качественных спутниковых данных в Арктическом регионе из-за плохих условий для спутниковых наблюдений. Разработка алгоритма основана на данных судовых измерений, проведенных в Карском море в двух рейсах НИС “Академик Мстислав Келдыш” в сентябре 2007 и 2011 гг. С помощью нового алгоритма рассчитаны карты среднемесячных пространственных распределений концентрации хлорофилла в сентябре 2007 и 2011 гг., сравнительные графики изменения концентрации хлорофилла по маршруту экспедиций (прямые определения, расчеты посредством нового и стандартного алгоритма MODIS), гистограммы среднемесячных распределений концентрации хлорофилла по занимаемым площадям в июне–октябре обоих годов. Результаты показывают непригодность использования стандартного алгоритма MODIS для Карского моря, которое находится под сильным влиянием речного стока, и приемлемое согласие данных расчетов по новому алгоритму с данными судовых исследований.

Ключевые слова: спутниковые сканеры цвета, концентрация хлорофилла, судовые измерения, региональный алгоритм, пространственные распределения, сезонные изменения, Карское море

DOI: 10.7868/S0205961413050023

ВВЕДЕНИЕ

Цель данной работы – разработка регионального алгоритма оценки концентрации хлорофилла в Карском море по спутниковым данным. Концентрация хлорофилла – важнейший параметр для характеристики биомассы фитопланктона и расчета первичной продуктивности океанов и морей, чувствительный индикатор изменений, происходящих с морскими экосистемами. Это единственная характеристика морских экосистем, изменчивость которой, благодаря спутниковым наблюдениям, может быть изучена в широком диапазоне пространственных и временных масштабов.

Концентрация хлорофилла входит в число стандартных продуктов обработки данных спутниковых сканеров цвета, и ее значения, рассчитанные по стандартным алгоритмам, доступны на сайтах NASA и Европейского космического агентства (см., например, <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>). Однако стандартные алгоритмы для большинства морей России, находящиеся под сильным влиянием речного стока, могут давать большие ошибки, и для

них требуются региональные алгоритмы, учитывающие специфические особенности рассматриваемого бассейна. Такие алгоритмы могут быть разработаны только на основе данных натуральных измерений в исследуемом регионе (<http://optics.ocean.ru>).

Для Карского моря алгоритмы, существующие в настоящее время, дают результаты, неадекватные имеющимся данным судовых измерений. Проведенные нами расчеты показали, что стандартный алгоритм обработки данных сканера MODIS существенно завышает концентрацию хлорофилла по сравнению с данными прямых определений, а алгоритм для Баренцева моря, разработанный ранее в Институте океанологии РАН (ИО РАН) (<http://optics.ocean.ru>), занижает. Для Карского моря необходим свой региональный алгоритм, учитывающий его специфику.

Попытка разработки такого алгоритма уже предпринималась ранее по данным 54-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш”, проведенного в Карском море в сентябре 2007 г. (Флинт, 2010), причем не только для концентрации хлоро-

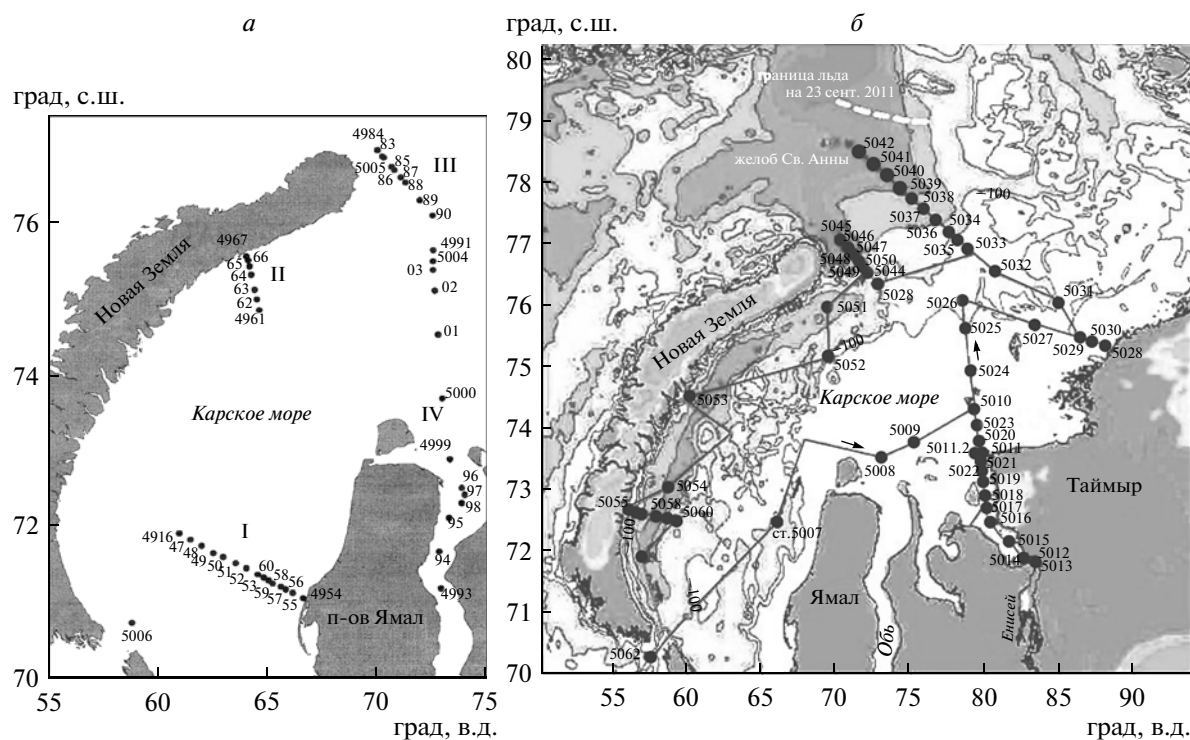


Рис. 1. Расположение станций в 54-м (а) и 59-м (б) рейсах НИС “Академик Мстислав Келдыш” в Карском море в 2007 и 2011 гг.

филла (Буренков и др., 2010а), но и для концентрации взвеси (Буренков и др., 2010б). В настоящей работе региональный алгоритм определения концентрации хлорофилла в Карском море разрабатывается на более обширном массиве данных.

Использование спутниковых данных в арктических морях связано со многими ограничениями, главное из которых — облачность, существенно лимитирующая количество доступной спутниковой информации. Долгая арктическая зима с ледовым покрытием, низкое Солнце затрудняют расчет биооптических характеристик по спутниковым данным. Если говорить о Карском море, то количество судовых измерений здесь также невелико, поэтому разработка регионального алгоритма для этого моря потребовала специального подхода, цель которого заключалась в максимально возможном использовании всей совокупности имеющихся данных.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ, МЕТОДЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ

Данные натурных измерений, на которых основывается разработка алгоритма, получены в двух рейсах НИС “Академик Мстислав Келдыш”, проведенных в Карском море в 2007 и 2011 гг.: 54-й рейс — 05.09–07.10.2007 г. (Флинт, 2010), 59-й — 12.09–07.10.2011 г. Расположение станций, выполненных в этих рейсах, показано на рис. 1.

Особенность Карского моря заключается в том, что оно принимает крупнейший в Арктическом бассейне пресноводный речной сток, из которого около 90% приходится на Обь и Енисей. Влияние этого стока распространяется практически на все море, и эта особенность имеет важное значение для разработки алгоритма определения концентрации хлорофилла по данным спутниковых сканеров цвета, поскольку речной сток непосредственно влияет на оптические свойства морской воды и формирование спектральных величин светового излучения, выходящего из водной толщи и определяющего исходную информацию для решения рассматриваемой задачи.

На рис. 1 видно, что районы исследований, проведенных в указанных выше рейсах, различаются: в 2007 г. исследования проводились в западной части моря, и одна из главных задач 54-го рейса заключалась в изучении трансформации речного стока Оби (Флинт, 2010); в 2011 г. — основным объектом исследований были восточная часть Карского моря и пресноводный сток Енисея.

В обоих рейсах выполнялся широкий комплекс гидрофизических, гидрохимических, биологических и геологических исследований; разработка алгоритма основывалась в первую очередь на данных прямых определений концентрации хлорофилла и измерений спектрального коэффициента яркости водной толщи посредством плавающего

спектрорадиометра, которые использовались для сопоставления со спутниковыми данными.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА

Определение хлорофилла-*a* в морской воде проводилось стандартным флуорометрическим методом (Holm-Hansen et al., 1978; Ocean optics protocols, 2003) с помощью флуорометра МЕГА-25 (производство кафедры биофизики МГУ им. М.В. Ломоносова). Флуорометр откалиброван с использованием аутентичного хлорофиллового стандарта фирмы Sigma Chemical Co. (США).

Пробы воды (0.5 л) отбирались батометрами с выбранных горизонтов, фильтровались через стекловолоконистые фильтры GF/F фирмы Whatman под вакуумом 0.2 атм. Фильтры подсушивали и помещали в 90%-ный ацетон для проведения экстракции хлорофилла-*a* при температуре +4°C в темноте в течение 24 ч. Полученные экстракты помещали в измерительную кювету флуорометра и определяли интенсивность флуоресценции. Для коррекции концентрации хлорофилла-*a* с учетом феофитина экстракт подкисляли 1 н HCl и снова определяли интенсивность флуоресценции. Расчет концентраций хлорофилла-*a* и феофитина по данным флуоресценции проводился по формулам (EPA Method, 1997; UNESCO, 1994).

В 2007 г. в период с 9 по 30 сентября, были выполнены измерения концентрации хлорофилла на 38 станциях, в 2011 г. — на 37 станциях, в период 15.09–01.10. Пробы отбирались с разных горизонтов, но для разработки спутникового алгоритма использовались данные только для подповерхностного слоя 0–3 м — если отбирались пробы с нескольких горизонтов в этом слое, то бралась средняя концентрация.

ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ЯРКОСТИ ВОДНОЙ ТОЛЩИ

Для верификации данных спутниковых измерений и разработки региональных биооптических алгоритмов в обоих рейсах использовался плавающий спектрорадиометр (Артемьев и др., 2000). Этот прибор измеряет спектральную яркость выходящего из водной толщи излучения непосредственно под поверхностью $L_u(0^-, \lambda)$ и спектральную облученность поверхности моря $E_d(0^+, \lambda)$, что позволяет рассчитать спектральный коэффициент яркости водной толщи, который используется для разработки биооптических алгоритмов и верификации алгоритмов атмосферной коррекции. Определяемый коэффициент яркости $\rho(\lambda)$ выражается формулой $\rho(\lambda) = L_u(0^-, \lambda)/E_d(0^+, \lambda)$, где $E_d(0^+, \lambda)$ — спектральная облученность, создаваемая нисходя-

щим потоком солнечного излучения (прямого и рассеянного) непосредственно под поверхностью моря. Величины $E_d(0^-, \lambda)$ и $E_d(0^+, \lambda)$ связаны формулой $E_d(0^-, \lambda) = tE_d(0^+, \lambda)$, где t — коэффициент пропускания поверхности, который зависит от условий освещения (высота Солнца, облачность) и состояния поверхности. В зависимости от этих факторов значение t принималось 0.85–0.95 (Иванов, 1978).

Коэффициент яркости водной толщи $\rho(\lambda)$ и коэффициент яркости моря $R_{RS}(\lambda)$, определяемый по спутниковым данным (см. следующий раздел), связаны формулой Lee et al. (1998)

$$R_{RS}(\lambda) = 0.165\rho(\lambda)/[1 - 0.497\rho(\lambda)].$$

Измерения плавающим спектрорадиометром выполнялись на дрейфовых станциях. Прибор отводился от борта судна с помощью плавучего якоря на расстояние 30–50 м, чтобы избежать влияния корпуса судна на измерения. В зависимости от погодных условий выполнялись 20–50 сканирований по спектру. При обработке результаты измерений осреднялись по специально разработанному алгоритму.

Спектральный диапазон измерений — 390–700 нм, разрешение — 2.5 нм, время сканирования по спектру — 15 с. Точность измерения яркости и облученности — 5%. Перед рейсами прибор был откалиброван в лабораторных условиях в ИО РАН с помощью вторичного эталона спектральной облученности.

Проведение световых измерений в Карском море было затруднено погодными условиями, прежде всего почти постоянной облачностью. В первую очередь из-за нее, а также из-за низкого солнца почти все измерения проводились при невысоком уровне освещенности. Три примера спектров коэффициента яркости водной толщи $\rho(\lambda)$, измеренных в разных районах Карского моря (см. рис. 1), представлены на рис. 2.

На рис. 2 видно, что значения коэффициента яркости излучения, выходящего из водной толщи, на станциях 5021 и 5025, где проявлялось влияние речного стока, невелики. Причина — сильное поглощение, связанное с высоким содержанием окрашенного органического вещества. Интересно отметить, что спектр коэффициента яркости на станции 5025 практически совпадал со спектром, измеренным в Каспийском море недалеко от устья Волги в июле 2008 г. (Копелевич и др., 2010 — рис. 3а), однако поверхностная облученность во время измерений в Карском море была примерно в 7 раз ниже, чем в Каспийском.

Оптические характеристики воды на представленных станциях различны; спектры коэффициента яркости, как видно на рис. 2, также заметно различаются. Спектральный коэффициент яркости водной толщи дает количественную характе-

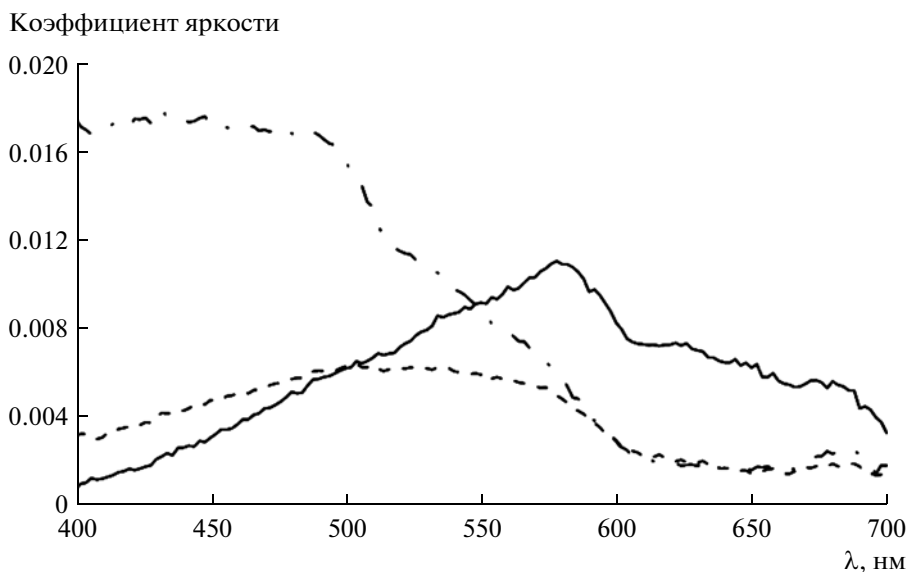


Рис. 2. Спектральные коэффициенты яркости излучения, выходящего из водной толщи, на разных станциях. Сплошная линия – ст. 5021 вблизи устья Енисея (соленость на горизонте 3 м $S = 15.9$ PSU, концентрация хлорофилла Chl в поверхностном слое 0–3 м $= 0.94$ мг m^{-3}); пунктир – ст. 5025 в центральной части моря (22.9 PSU, 0.99 мг m^{-3}); штрихпунктирная линия – ст. 5046 вблизи северной оконечности Новой Земли (33.9 PSU, 0.63 мг m^{-3}).

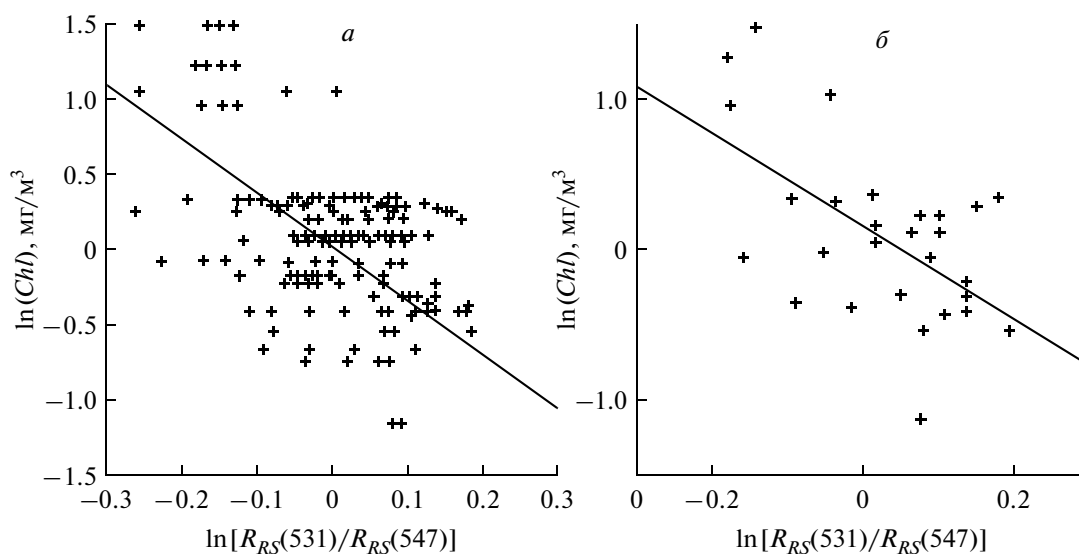


Рис. 3. Линии регрессии $\ln Chl$ vs $\ln[R_{RS}(531)/R_{RS}(547)]$, рассчитанные для двух выборок данных спутниковых измерений R_{RS} и прямых определений концентрации хлорофилла Chl в сентябре 2007 г.: а – 185 спутниковых изображений (выборка 2007_185); б – 29 спутниковых изображений (выборка 2007_29).

ристку истинного цвета моря, и именно эту характеристику рассчитывают по данным измерений спутниковыми сканерами цвета после атмосферной коррекции и затем используют для расчета биооптических характеристик вод, в частности, концентрации хлорофилла.

К сожалению, общее число измерений плавающим спектро радиометром в Карском море было невелико (прежде всего, из-за погодных условий) – в 2007 г. вообще не удалось провести качественные измерения, в 2011 г. приемлемые измерения

были выполнены лишь на шести станциях. На трех из них выполнялись повторные серии измерений (при разных погодных условиях), поэтому всего в 2011 г. после отбраковки отобраны восемь серий измерений.

СПУТНИКОВЫЕ ДАННЫЕ

Использовались данные спутникового сканера цвета MODIS-Aqua 2-го уровня с разрешением 1.1×1.1 км, доступные на сайте NASA (<http://ocean->

color.gsfc.nasa.gov/). Данные включают значения коэффициента яркости моря $R_{RS}(\lambda_i)$ для 10 спектральных каналов с эффективными длинами волн от 412 до 869 нм, концентрацию хлорофилла, рассчитанную по стандартному алгоритму MODIS, аэрозольную оптическую толщину, а также так называемые “флаги”, показывающие качество изображения и отдельные его характеристики (суша, облака). Дальнейшая обработка спутниковых данных проводилась с помощью программного обеспечения SMCS, разработанного в ИО РАН (Sheberstov, Lukyanova, 2007), которое, наряду со стандартными, позволяет использовать новые и модифицированные алгоритмы обработки и получать продукты 3-го уровня.

Границы исследуемого региона были выбраны в соответствии с официальными границами Карского моря (Залогин, Косарев, 1999), за исключением северной границы, которая проходила от о-ва Пионер архипелага Северная Земля по 80° с.ш. до 67° в.д., дальше — по 67° в.д. до о-ва Северный архипелага Новая Земля. Если в контур Карского моря не попадал ни один пиксел с положительными величинами $R_{RS}(531)$, $R_{RS}(547)$, $R_{RS}(488)$, изображение исключалось из дальнейшей обработки.

Подход к разработке регионального алгоритма расчета концентрации хлорофилла в Карском море и соответствующая методика обработки данных описаны ниже. Среднемесячные распределения рассчитывались с помощью программного обеспечения SMCS. При этом использовались значения R_{RS} , положительные для всех каналов, и учитывались флаги облаков и суши. Среднемесячные значения 3-го уровня рассчитывались на стандартной сетке 3×3 км путем осреднения значений 2-го уровня. Осреднение проводилось в следующих границах: по 80° с.ш. на севере, 66° с.ш. — на юге, 40° в.д. — на западе и 115° в.д. — на востоке.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА

Из-за неблагоприятных условий, как для спутниковых наблюдений, так и для судовых измерений, не было возможности использовать для разработки алгоритма совпадающие во времени данные прямых определений концентрации хлорофилла и спутниковые данные — “совпадающими” (“much up”) принято считать данные спутниковых и натурных измерений, различающиеся во времени в пределах ± 3 ч (Bailey, Werdell, 2006). Нам пришлось резко смягчить эти требования и тестировать возможность использования спутниковых данных с гораздо большей разницей во времени.

Исследования по данным 2007 г.

На первом этапе анализировалась выборка спутниковых данных 2007 г., составленная следующим образом. Для каждой станции отбирались спутниковые данные, соответствующие ее координатам. Рассматривался квадрат 3×3 пиксел, в который попадала точка отбора пробы для определения концентрации хлорофилла; требование по качеству спутникового изображения — в рассматриваемом квадрате должно быть не менее пяти “хороших” пикселов (с положительными значениями R_{RS}); требование по времени — разница между спутниковым и судовым измерением не превышает 480 ч (20 сут). Объем такой выборки составил 310 пар измерений; эта выборка включала все 38 станций — и в открытом море, и в устье Оби.

Тестировались различные алгоритмы расчета концентрации хлорофилла по спутниковым данным: линейные — $y = bx + a$ и логарифмические — $\ln(y) = b \ln(x) + a$, где $y = Chl$ — концентрация хлорофилла. В качестве параметра x , рассчитываемого по спутниковым данным, использовалось отношение коэффициентов яркости R_{RS} для двух спектральных каналов сканера MODIS; тестировались два варианта этого отношения — $R_{RS}(488)/R_{RS}(547)$ и $R_{RS}(531)/R_{RS}(547)$. Для всех анализируемых выборок (первой 2007_310 и всех последующих) использование второго отношения давало лучшие результаты, поэтому далее в качестве параметра x везде берется отношение $R_{RS}(531)/R_{RS}(547)$.

Отметим, что в стандартном алгоритме определения концентрации хлорофилла по данным сканера MODIS (OC3M) используется более сложное выражение для расчета концентрации хлорофилла через отношения $R_{RS}(443)/R_{RS}(551)$ и $R_{RS}(488)/R_{RS}(551)$. В нашем случае, из-за неудовлетворительного качества используемой спутниковой информации и соответственно большого разброса данных, использование более сложных формул не дает никакого улучшения точности алгоритма.

Для упомянутой выше выборки 2007_310 корреляция между $R_{RS}(531)/R_{RS}(547)$ и Chl оказалась слабой, и вторая выборка была сформирована, исходя из более жестких требований к спутниковым данным: вместо пяти “хороших” пикселов — семь, разница во времени — не более 360 ч (15 сут). Объем второй выборки составил 185 пар значений. Наилучшая корреляция между $R_{RS}(531)/R_{RS}(547)$ и Chl получилась при использовании логарифмического уравнения регрессии

$$\ln(Chl) = -3.66 \ln[R_{RS}(531)/R_{RS}(547)] + 0.116. \quad (1)$$

Линия регрессии $\ln Chl$ через $\ln[R_{RS}(531)/R_{RS}(547)]$, соответствующая уравнению (1), и разброс точек измерений представлены на рис. 3а. Коэффициент детерминации R^2

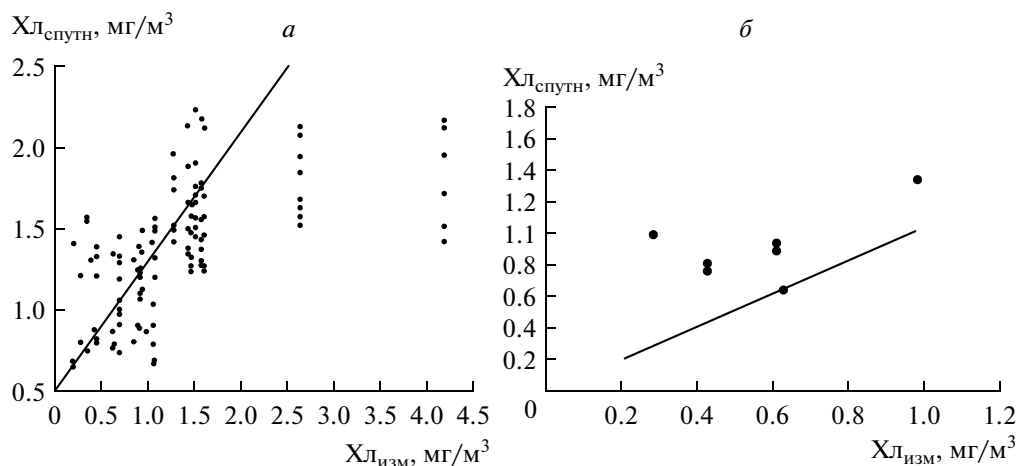


Рис. 4. Результаты применения алгоритма, полученного для выборки 2007_185, к данным 2011 г.: *a* – расчет по спутниковым данным ($N = 111$); *б* – по данным плавающего спектрорадиометра ($N = 8$). Прямые линии соответствуют точному совпадению рассчитанных и измеренных значений.

оказался равным 0.47, ошибка регрессии $s_{\text{рег}}$ для $\ln(\text{Chl})$ равна 0.56. Разброс точек относительно линии регрессии на рис. 3*a* большой, что в первую очередь связано с качеством использованных спутниковых данных.

Видно, что для одного и того же значения измеренной концентрации хлорофилла величины отношения $R_{RS}(531)/R_{RS}(547)$ могут значительно отличаться, – это может объясняться как ошибками определения значений R_{RS} , так и большим расхождением во времени между спутниковыми измерениями для каждой из станций, где выполнялись прямые определения концентрации хлорофилла.

Для оценки влияния последнего фактора была построена еще одна выборка данных с еще более жесткими требованиями: для каждой станции с измеренной концентрацией хлорофилла отбиралось спутниковое изображение, удовлетворяющее условию ± 48 ч разницы во времени между отбором пробы и спутниковой съемкой, а также требованию девяти “хороших” пикселей из девяти в квадрате 3×3 . Объем этой выборки составил 29 пар значений. Наилучшая корреляция между $R_{RS}(531)/R_{RS}(547)$ и Chl , как и для предыдущей выборки, получилась при использовании логарифмического уравнения регрессии

$$\ln(\text{Chl}) = -3.07 \ln[R_{RS}(531)/R_{RS}(547)] + 0.148. \quad (2)$$

Линия регрессии $\ln \text{Chl}$ через $\ln[R_{RS}(531)/R_{RS}(547)]$, соответствующая уравнению (2), и разброс точек представлены на рис. 3*б*. Коэффициент детерминации R^2 оказался равным 0.34, ошибка регрессии $s_{\text{рег}}$ для $\ln(\text{Chl})$ равна 0.45. Уменьшение ошибки регрессии при одновременном уменьшении R^2 объясняется уменьшением

количества точек в этой выборке и уменьшением суммарной дисперсии $\ln \text{Chl}$.

Как видно на рис. 3*б*, разброс точек и в этом случае достаточно большой, – уравнение регрессии (1) учитывает лишь 34% суммарной дисперсии концентрации хлорофилла. Однако важно отметить то, что полученные уравнения (1) и (2) близки друг к другу: различия значений концентрации хлорофилла, рассчитанных по этим уравнениям, составляют лишь несколько процентов для значения отношения $\ln[R_{RS}(531)/R_{RS}(547)]$, близкого к 0, и 10–15% для значений ± 0.2 . Этот результат показывает, что соотношение между концентрацией хлорофилла и величиной отношения $R_{RS}(531)/R_{RS}(547)$ устойчиво во времени – можно предполагать, что выраженного тренда в рассматриваемый период времени не наблюдалось.

Данные, полученные в рейсе 2011 г., дают возможность проверить устойчивость полученного соотношения в разные годы.

Исследования по данным 2011 г.

Для проверки возможности использования алгоритма 2007_185 для данных 2011 г. была составлена выборка из 111 пар значений, аналогичная по предъявляемым требованиям выборке 2007_185. Результаты тестирования представлены на рис. 4*a*.

Значения $X_{\text{лспутн}}$ на рис. 4*a* рассчитаны по уравнению (1), и мы видим, что рассчитанные значения вполне удовлетворительно соответствуют измеренным, за исключением 14 точек, для которых значения $X_{\text{лизм}}$ превышают 2.5 мг/м^3 . Эти значения измерены на станциях 5013–5015, которые находятся в пресных водах Енисея (см. рис. 1). Очевидно, что такие воды требуют

специального алгоритма, и эти точки целесообразно исключить из рассмотрения.

Для совокупности оставшихся 97 точек среднеквадратичная ошибка оценки концентрации хлорофилла с помощью алгоритма 2007_185 оказалась равной 0.54 мг/м^3 ; при среднем значении концентрации хлорофилла для этой выборки, равном 1.05 мг/м^3 , коэффициент вариации составляет примерно 51%, что можно признать вполне приемлемым.

В 2011 г. мы располагали также данными одно-временных измерений коэффициента яркости водной толщи плавающим спектрорадиометром и концентрации хлорофилла на шести станциях (восемь пар измерений). Результаты тестирования алгоритма 2007_185 для этих данных представлены на рис. 4б. На этом рисунке видно некоторое завышение рассчитанных концентраций хлорофилла по сравнению с измеренными (среднее рассчитанное значение равно 0.99 мг/м^3 , среднее измеренное — 0.61 мг/м^3), однако среднеквадратичное отклонение рассчитанных значений от измеренных составляет 0.49 мг/м^3 , что, учитывая ошибки измерений спектральных коэффициентов яркости плавающим спектрорадиометром в плохих погодных условиях, можно считать вполне приемлемым.

Полученные результаты указывают на возможность использования алгоритма 2007_185 (уравнение (1)) для расчета пространственных распределений концентрации хлорофилла как для сентября 2007 г., так и 2011 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Среднемесячные пространственные распределения концентрации хлорофилла для сентября 2007 и 2011 гг., построенные по спутниковым данным, представлены на рис. 5а, б (цветн. вклейка). Отметим сходство этих распределений, но следует упомянуть, что оба года относятся к числу “теплых” — вместе с 2012 г. они входят в тройку лет с наименьшим ледовым покрытием в Арктическом бассейне в сентябре (nsdic.org/arctic-seaicenews/ — сайт National Snow and Ice Data Center). Однако главные особенности распределений проявляются независимо от межгодовых изменений — и это, в первую очередь, влияние речного стока.

Представленные распределения концентрации хлорофилла в поверхностном слое указывают на то, что речной сток играет основную роль в их формировании, что связано, по-видимому, с поставкой питательных биогенных элементов, необходимых для развития фитопланктона, и, возможно, с непосредственным увеличением концентрации за счет “речного” хлорофилла. На рис. 5 видно, что воды с наиболее высокими концентрациями хлорофилла ($>2 \text{ мг/м}^3$) находятся в Оби и Енисее и затем в

эстуарной зоне обеих рек ($>2 \text{ мг/м}^3$). В этой зоне происходит смешение морских и речных вод и формирование поверхностного опресненного слоя — ПОС (Зацепин и др., 2010). В зависимости от ветровых условий, распространение опресненных вод может происходить как на восток вдоль Таймыра, так и на запад и северо-запад. Область вод с концентрацией хлорофилла более 1 мг/м^3 у восточного берега Новой Земли севернее 74° с.ш. связана с квазиизолированной линзой опресненных вод, которая четко прослеживалась по данным измерений солёности как в 2007 г. (Зацепин и др., 2010), так и в 2011 г. Судовые измерения солёности и других характеристик в поверхностном слое в 2007 г. показали, что распространение опресненных вод по акватории Карского моря имеет не монотонный, а скачкообразный (фронтальный) характер (Зацепин и др., 2010; Буренков и др., 2010а); то же наблюдалось и в экспедиции 2011 г. К сожалению, на рис. 5 хорошо видна только фронтальная зона на северной границе эстуарной зоны, а другие “размыты” из-за пространственного (размер бина $3 \times 3 \text{ км}^2$) и временного осреднения (представлены среднемесячные значения).

На рис. 6 показаны изменения концентрации хлорофилла по маршруту НИС “Академик Мстислав Келдыш” в 2007 и 2011 г. (см. рис. 1) — по данным прямых определений и расчета по спутниковым данным. На этих рисунках представлены следующие основные разрезы, выполненные в рейсах 2007 и 2011 гг.:

2007 г. — Ямальский (ст. 4946–4960), Новоземельский (ст. 4961–4967), разрез через желоб Св. Анны (ст. 4983–4992), Обский (ст. 5000–5004) — рис. 1а (ст. 4993–4999 в Обской Губе были исключены);

2011 г. — юго-западная часть Карского моря (ст. 5007–5010), Енисейский залив и прилегающие морские воды (ст. 5010–5026); Таймырский разрез (ст. 5026–5030); разрез “желоб Св. Анны—Восток” (ст. 5032–5042); разрез “желоб Св. Анны—Запад” (ст. 5043–5050); Новоземельская впадина и примыкающий шельф Новой Земли (ст. 5052–5062) — рис. 1б (ст. 5013–5015 в водах Енисея были исключены).

Расчет концентрации хлорофилла по спутниковым данным выполнялся как посредством разработанного регионального алгоритма, так и посредством стандартного алгоритма MODIS. Рисунок 6 четко показывает, что региональный алгоритм обеспечивает достаточно хорошую сходимость рассчитанных значений с измеренными, тогда как стандартный алгоритм MODIS на большей части маршрута значительно завышает рассчитанные значения концентрации. Это также иллюстрирует табл. 1, в которой даны средние значения концентрации хлорофилла по данным прямых определе-

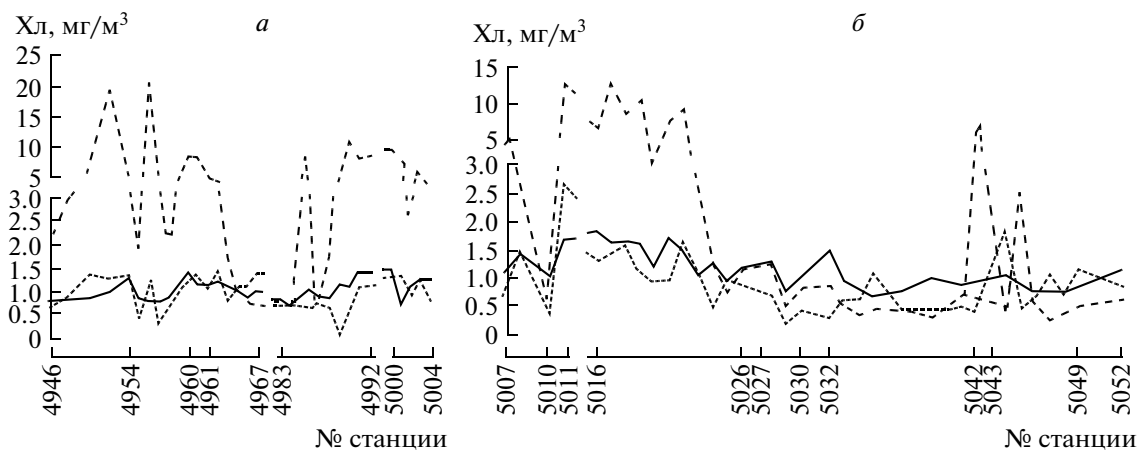


Рис. 6. Изменения концентрации хлорофилла по маршруту НИС “Академик Мстислав Келдыш”: *а* – в 2007 г. и *б* – 2011 г. Точечная линия – данные прямых определений; сплошная – расчет по спутниковым данным посредством нового регионального алгоритма; пунктир – посредством стандартного алгоритма MODIS.

ний и расчетов по спутниковым данным в 2007 и 2011 гг.

Как видно из табл. 1, совпадение средних, рассчитанных посредством регионального алгоритма и измеренных, очень хорошее: меньше 4% для 2007 г. и порядка 20% для 2011 г. Стандартный алгоритм дает средние значения, которые превышают измеренные в разы: почти в 5 раз в 2007 г. и почти в 3 раза в 2011 г.

Объяснение полученным результатам следующее.

Стандартный алгоритм основан на регрессионном соотношении, полученном по данным измерений, главным образом, для вод открытого океана. Для таких вод характерно определенное отношение между двумя поглощающими компонентами – пигментами фитопланктона и окрашенным органическим (“желтым”) веществом. Для речного стока характерны высокая концентрация желтого вещества и соответственно повышенное поглощение. Алгоритм относит это поглощение на счет пигментов фитопланктона и завышает концентрацию хлорофилла.

Рассмотрим для сравнения, как оба алгоритма отображают сезонные изменения пространствен-

ных распределений концентрации хлорофилла в подповерхностном слое. На рис. 7 и 8 представлены гистограммы распределения значений концентрации хлорофилла по занятой площади в Карском море, рассчитанные в разные месяцы по спутниковым данным MODIS-Aqua в 2007 и 2011 гг. с помощью нового регионального алгоритма и стандартного алгоритма MODIS. Рассматривается акватория Карского моря без Обской Губы и Енисейского залива (северная граница “отсекаемой” области проведена по 73° с.ш. от о-ва Белый на западе до п-ова Таймыр на востоке). Видно, что гистограммы, построенные с помощью регионального алгоритма, гораздо более узкие, чем по стандартному алгоритму MODIS. На гистограммах MODIS видны “хвосты” в сторону больших значений, которых не существует по данным прямых определений и расчета по региональному алгоритму (см. рис. 6).

В табл. 2 даны средние по площади Карского моря концентрации хлорофилла, рассчитанные по построенным гистограммам в различные месяцы в 2007 и 2011 гг. по разным алгоритмам.

Из табл. 2 видно, что стандартный алгоритм дает значения концентрации в 2–4 раза выше, чем региональный; а в некоторые месяцы также показывает отличный от регионального сезонный ход (например, в 2007 г. от июня к июлю – увеличение в 1.8 раза). Региональный алгоритм показывает очень небольшие отличия по концентрации в рассматриваемые месяцы, исключая октябрь, но для него надежность оценок уменьшается из-за сокращения площади покрытия акватории спутниковыми данными (см. подписи к рис. 7 и 8).

Региональный алгоритм показывает небольшие отличия между средними значениями в 2007 и 2011 гг. – в пределах 2% (исключая октябрь). У

Таблица 1. Средние концентрации хлорофилла ($\text{мг}/\text{м}^3$) по маршрутам рейсов 2007 и 2011 гг., измеренные на пробах в подповерхностном слое 0–3 м и рассчитанные по спутниковым данным посредством разработанного регионального алгоритма и стандартного алгоритма MODIS

Год	Прямые определения	Региональный алгоритм	Стандартный алгоритм
2007	1.05	1.01	4.99
2011	1.13	0.90	3.23

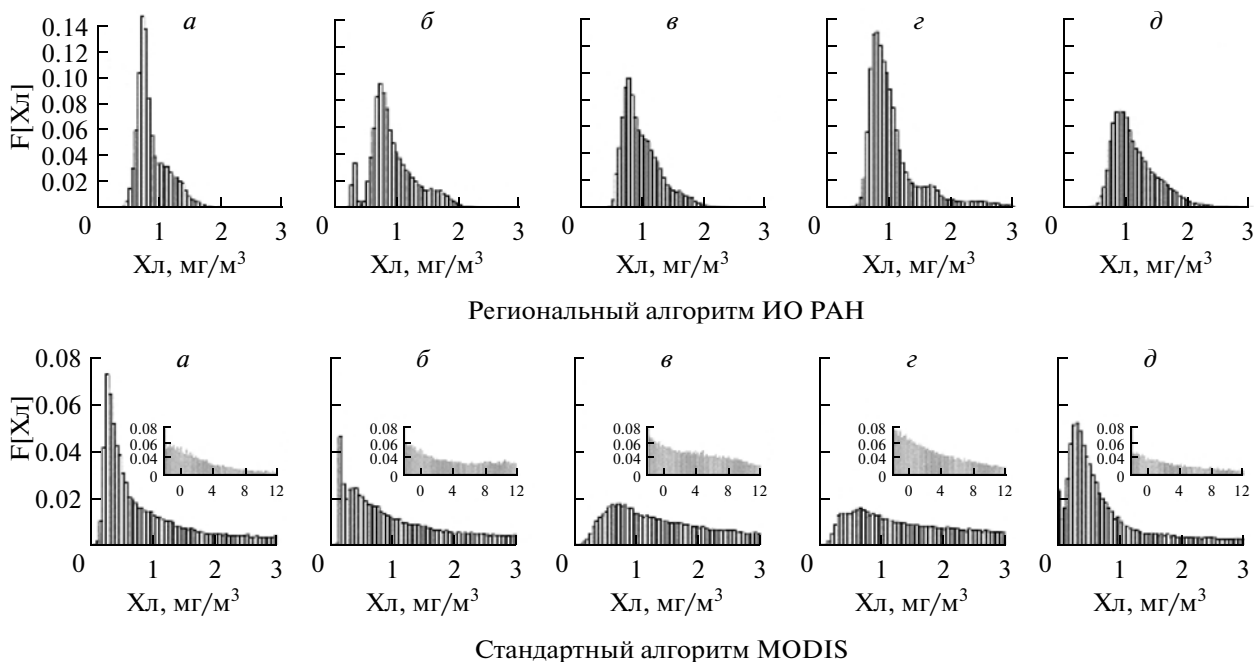


Рис. 7. Сравнение гистограмм распределения значений концентрации хлорофилла по занятой площади в Каспийском море, рассчитанных в разные месяцы по спутниковым данным MODIS-Aqua в 2007 г. с помощью нового регионального алгоритма и стандартного алгоритма MODIS: *a* – июнь (общая площадь покрытия спутниковыми данными = 4.0×10^5 км²); *б* – июль (6.7×10^5 км²); *в* – август (7.4×10^5 км²); *z* – сентябрь (7.4×10^5 км²); *д* – октябрь (5.5×10^5 км²).

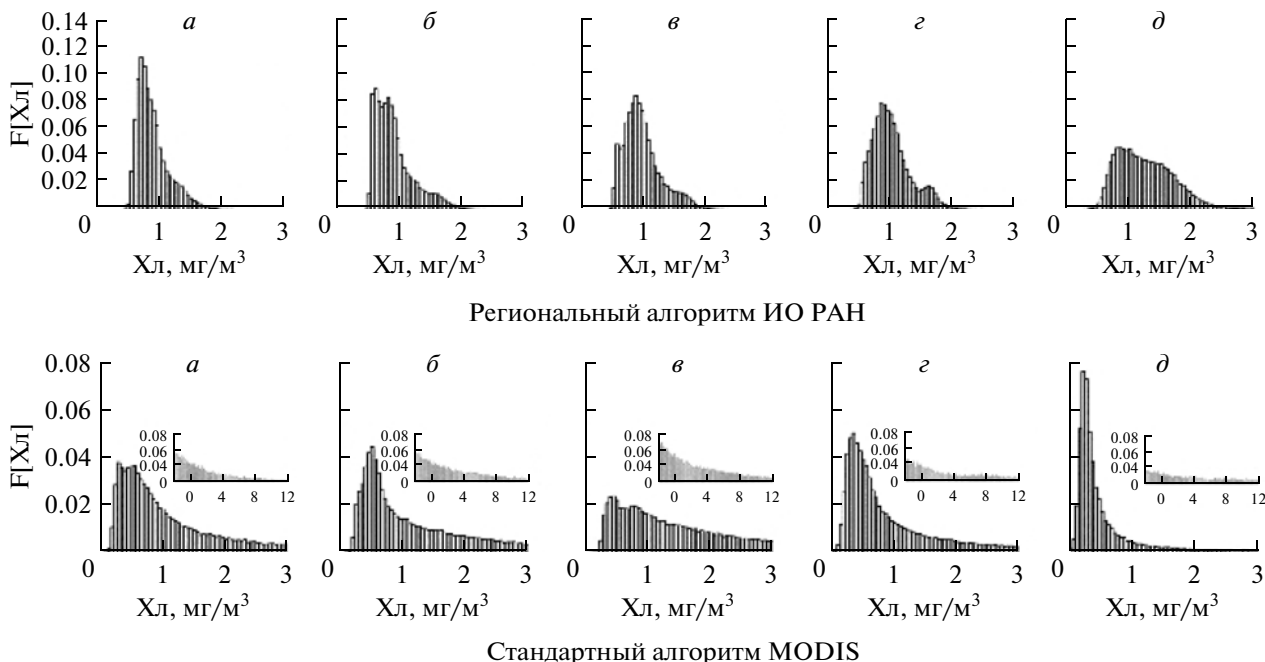


Рис. 8. Сравнение гистограмм распределения значений концентрации хлорофилла по занятой площади в Каспийском море, рассчитанных в разные месяцы по спутниковым данным MODIS-Aqua в 2011 г. с помощью нового регионального алгоритма ИО РАН и стандартного алгоритма MODIS: *a* – июнь (5.8×10^5 км²); *б* – июль (7.1×10^5 км²); *в* – август (7.3×10^5 км²); *z* – сентябрь (7.3×10^5 км²); *д* – октябрь (4.8×10^5 км²).

Таблица 2. Средние по площади Карского моря концентрации хлорофилла (мг/м^3), рассчитанные по построенным гистограммам в разные месяцы в 2007 и 2011 гг. по разным алгоритмам

Месяц	2007 г.		2011 г.	
	региональный алгоритм	стандартный алгоритм	региональный алгоритм	стандартный алгоритм
июнь	0.90	2.1	0.91	2.15
июль	0.93	3.8	0.92	2.65
август	0.99	3.9	0.98	3.2
сентябрь	1.03	4.2	1.05	2.6
октябрь	1.15	3.3	1.30	4.35

стандартного алгоритма отличия могут быть до 60% (для сентября).

Средние значения по площади, рассчитанные по региональному алгоритму для сентября (табл. 2), хорошо согласуются со средними, рассчитанными по маршрутам рейсов 2007 и 2011 гг. (табл. 1). Для 2007 г. различие в пределах 2%, для 2011 г. – в пределах 17%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе реализован новый подход к разработке региональных алгоритмов для расчета биооптических параметров вод Карского моря по данным спутниковых сканеров цвета. Суть подхода заключается в максимально возможном использовании всей совокупности имеющихся данных. Этот подход перспективен для Арктического бассейна, где спутниковые наблюдения ограничены часто повторяющейся облачностью и другими неблагоприятными для наблюдений условиями.

Разработка алгоритма основывалась на данных судовых измерений, проведенных в двух комплексных рейсах НИС “Академик Мстислав Келдыш” в сентябре 2007 и 2011 гг., в которых был выполнен большой объем биогеохимических и оптических исследований. По данным 2007 г. удалось вывести регрессионный алгоритм для определения концентрации хлорофилла и подтвердить возможность его использования для данных 2011 г. Показана непригодность использования стандартного алгоритма MODIS для определения концентрации хлорофилла в Карском море, находящемся под сильным влиянием речного стока. Применение разработанного регионального алгоритма для расчета среднемесячных пространственных распределений концентрации хлорофилла в 2007 и 2011 г. и их сезонной изменчивости дало результаты, хорошо согласующиеся с данными прямых определений концентрации хлорофилла и другими данными судовых исследований.

Разработанный алгоритм является на данный момент оптимальным с точки зрения соответствия имеющимся данным прямым определениям концен-

трации хлорофилла. Перспектива дальнейшей верификации и усовершенствования спутникового алгоритма оценки концентрации хлорофилла и других биогеохимических параметров целиком и полностью зависит от проведения новых экспедиционных исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН “Фундаментальные проблемы океанологии: физика, геология, биология, экология”, гранта Правительства РФ (Договор РГГМУ № 11.G34.31.0078) для поддержки исследований под руководством ведущих ученых и при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 8767.

Данные сканера MODIS-Aqua были получены с сайта NASA (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>).

Авторы выражают признательность сотрудникам ИО РАН Артемьеву В.А., Гольдину Ю.А. и Шатравину А.В. за помощь в проведении судовых измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Артемьев В.А., Буренков В.И., Вортман М.И., Григорьев А.В., Копелевич О.В., Храпко А.Н. Подспутниковые измерения цвета океана: новый плавающий спектрорадиометр и его метрология // *Океанология*. 2000. Т. 40. № 1. С. 148–155.
- Буренков В.И., Гольдин Ю.А., Артемьев В.А., Шеберстов С.В. Оптические характеристики вод Карского моря по судовым и спутниковым наблюдениям // *Океанология*. 2010а. Т. 50. № 5. С. 716–729.
- Буренков В.И., Гольдин Ю.А., Кравчишина М.Д. Распределение концентрации взвеси в Карском море в сентябре 2007 г. по судовым и спутниковым данным // *Океанология*. 2010б. Т. 50. № 5. С. 842–849.
- Залогин Б.С., Косарев А.Н. Моря. М.: Мысль, 1999. 400 с.
- Зацепин А.Г., Завьялов П.О., Кременецкий В.В., Пояров С.Г., Соловьев Д.М. Поверхностный опресненный слой в Карском море // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 5. С. 698–708.
- Иванов А.Ю. Введение в океанографию. М.: Мир, 1978. 574 с.

- Копелевич О.В., Буренков В.И., Вазюля С.В., Шеберстов С.В.* Региональные алгоритмы расчета по спутниковым данным биооптических характеристик поверхностного слоя моря // Физические, геологические, и биологические исследования океанов и морей / Под ред. С.М. Шаповалова. М.: Научный мир, 2010. С. 115–135.
- Флинт М.В.* 54-й экспедиционный рейс научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш” в Карское море // Океанология. 2010. № 5. С. 677–682.
- Bailey S.W., Werdell P.J.* A multi-sensor approach for the on-orbit validation of ocean color satellite data products // Rem. Sens. Environ. 2006. V. 102. P. 12–23.
- EPA Method 445.0. In vitro determination of chlorophyll-a and pheophytin-a in marine and freshwater algae by fluorescence. National Exposure Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Revision 1.2. September 1997.
- Holm-Hansen O., Riemann B.* Chlorophyll-a determination: improvements in methodology // Oikos. 1978. V. 30. P. 438–447.
- Lee Z., Carder K.L., Mobley C.D., Steward R.G., Patch J.S.* Hyperspectral remote sensing for shallow waters. 1. A semi-analytical model // Appl. Opt. 1998. V. 37. P. 6329–6338.
- Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation: Biogeochemical and bio-optical measurement and data analysis protocols // NASA Goddard Space Flight Center. NASA/TM-2003-211621. Rev. 4. V. 5. 2003.
- Sheberstov S.V., Lukyanova E.A.* A system for acquisition, processing, and storage of satellite and field biooptical data // Proc. IV Int. Conf. “Current problems in optics of natural waters”. Nizhny Novgorod. 2007. P. 179–183.
- UNESCO, 1994, Protocols for the Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS) core measurements, IOC/SCOR manual and guides. Paris: UNESCO Publ., 1994. № 29. P. 128–134.

Estimation of Chlorophyll Concentration in the Kara Sea from Data of MODIS-Aqua Satellite Scanner

O. A. Kuznetsova^{2, 3}, O. V. Kopelevich^{1, 3}, S. V. Sheberstov^{1, 3}, V. I. Burenkov^{1, 3},
A. B. Demidov¹, S. A. Mocharov¹

¹*P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Science, Moscow*

²*Moscow State University*

³*Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg*

A new approach is proposed and implemented to development of the regional algorithm for estimation of chlorophyll concentration in the Kara Sea by using satellite color scanner data. The approach takes into account the difficulty of obtaining regular satellite data of acceptable quality in the Arctic region due to poor conditions for satellite observations. Development of the algorithm is based on the data measured in the Kara Sea in two cruises of RV *Akademik Mstislav Keldysh* in September 2007 and 2011. By using the developed algorithm, the mean monthly distributions of chlorophyll concentration in the Kara Sea in September 2007 and 2011 were computed; comparative graphs, showing the changeability of chlorophyll concentration along the ship route, were drawn (from direct determination and calculated by the new and standard MODIS algorithms) as well as histograms of the mean monthly distribution of the areas with different chlorophyll concentration in June–October of both years. The results obtained indicate inapplicability of the MODIS standard algorithm for the Kara Sea, influenced strongly by river run-off. The reasonable agreement between the concentrations derived by the new regional algorithm and the measured ones is observed.

Keywords: satellite ocean color, chlorophyll concentration, ship measurements, regional algorithm, spatial distribution, seasonal changes, Kara Sea

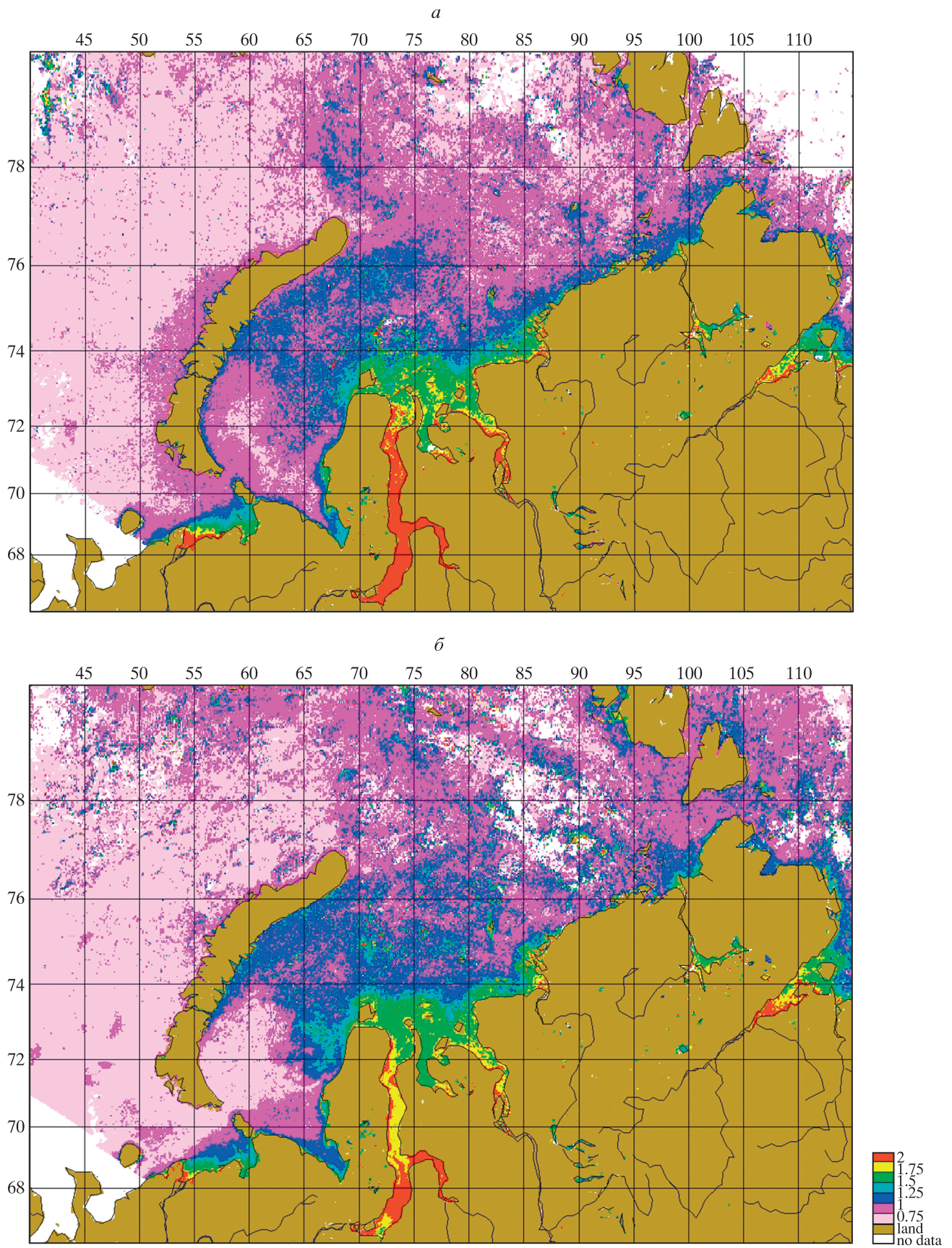


Рис. 5. Среднемесячные пространственные распределения концентрации хлорофилла-*a* в Карском море в сентябре: *a* – 2007 г. и *б* – 2011 г., – рассчитанные по данным сканера MODIS-Aqua посредством нового регионального алгоритма.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

КЛИМАТИЧЕСКИ ИНДУЦИРОВАННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ЭКОТОНЕ АЛЬПИЙСКОЙ ЛЕСОТУНДРЫ ПЛАТО ПУТОРАНА

© 2013 г. С. Т. Им*, В. И. Харук

Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск

**E-mail: stim@ksc.krasn.ru*

Поступила в редакцию 14.01.2013 г.

Исследована пространственно-временная динамика экотона горной лесотундры плато Путорана за последние 36 лет на основе космических съемок Landsat (1973, 2009 гг.), Hexagon (1976 г.), Quickbird (2005 г.) и Terra MODIS (2002–2009 гг.). Выделены три основные категории наземного покрова: редколесья с сомкнутостью >0.2 ; редины с сомкнутостью <0.2 и кустарники; фоновые территории. Площадь редколесий увеличилась на 60%. Этому способствовало увеличение сомкнутости в реди-нах. Наблюдаемое явление в основном отмечено вдоль долины реки. В зонах роста сомкнутости наблюдается увеличение вегетационного индекса NDVI на 0.14. Рост среднегодовой температуры в течение трех деkad конца 20 в. способствовал продвижению древесной растительности по высоте не более чем на 15 м над уровнем моря, и появлению трех новых деревьев на гектар. С ростом высоты над уровнем моря деревья предпочитают локальные депрессии на юго-восточных склонах с крутиз-ной до 30° .

Ключевые слова: плато Путорана, динамика экотона лесотундры, Landsat, Quickbird, MODIS, Hexa-
gon, NDVI

DOI: 10.7868/S0205961413040052

ВВЕДЕНИЕ

Климатические модели предсказывают рост температур в Северном полушарии (IPCC, 2007). Отклик древесной растительности на изменения климата наиболее выражен в зонах, где температура лимитирует их рост (Holtmeier, 2009; ASIA, 2005).

Предполагается, что предсказываемое потепление приведет к продвижению древесной растительности как на север, так и по высоте над уровнем моря (ASIA, 2005). Последние исследования указывают на рост сомкнутости древостоев в экотонах горной лесотундры и расширение зон обитания древесной растительности в последние десятилетия 20 в. на севере Канады (Szeicz, Macdonald, 1995; Danby, Hik, 2007), в Северной Америке (Munroe, 2003; Lloyd, Fastie, 2003), в Шведских Скандиях (Kullman, 2002, 2005; Kullman, Oberg, 2009), в России (Esper, Schweingruber, 2004; Shiyatov et al., 2005, 2007; Kharuk et al., 2006, 2010; Macdonald et al., 2008), в Финляндии (Middleton et al., 2008), в горах Китая (Zhang et al., 2009).

Дистанционное зондирование (ДЗ) позволяет проводить анализ динамики растительного покрова для труднодоступных районов, где полевые работы сильно затруднены или невозможны. Ряд исследователей использовали аэрокосмические снимки для анализа динамики экотона лесотундры. Напри-

мер, Миддлтон и др. (Middleton et al., 2008) проанализировали аэрофотографии гор Финской Лапландии. Они обнаружили рост сомкнутости древостоев и продвижение деревьев по высоте над уровнем моря: ели – на 100 м и березы – на 40–60 м в течение 1947–2003 гг.

Мазек (Masek, 2001), проанализировав изменения вегетационного индекса NDVI в экотоне Северной Канады за период 1974–1999 гг. на основе съемки Landsat, заключил, что граница древостоев является стабильной либо изменения произошли в пределах пространственного разрешения съемки Landsat (менее чем 2–3 м/год).

Жанг и др. (Zhang et al., 2009) исследовал динамику экотона горной лесотундры в горах Чангбай (Китай) на основе съемки Landsat. Они не нашли очевидных изменений в положении границы леса. Но наблюдали значительный рост вегетационного индекса NDVI на 0.1–0.3 в течение 1977–1999 гг. Рост NDVI был обусловлен увеличением сомкнутости, что подтвердили полевые исследования (сомкнутость увеличилась на 35%).

Анализ аэрофотоснимков сверхвысокого разрешения за 1947–1989 гг. позволил Данби и Хику (Danby, Hik, 2007) сделать количественные оценки изменений, произошедшие в экотоне лесотундры на юго-западе Юкона (Канада). Обнаружен значимый рост площади покрытой елью. За

40-летний период в еловых древостоях появились 9 ± 3 молодых дерева на га. В среднем количество возросло с 21 до 30 деревьев на га.

Олтоф и Пуолиот (Olthof, Pouliot, 2010) исследовали динамику AVHRR-NDVI за 1985–2006 гг. на территории Северной Канады. Обнаружили экспансию хвойных деревьев и кустарников в зону тундры.

Шиятов и др. (Shiyatov et al., 2005) проанализировали аэрофотографии на Полярный Урал. Установили, что в период 1910–1960 гг. площадь редколесья увеличилась в 10 раз и к 2000 г. — еще в 2 раза.

Также орография местности важна для выживания и роста деревьев в суровых условиях экотона (Holtmeier, 2009; Kullman, Oberg, 2009). В настоящее время доступны цифровые модели рельефа SRTM (Farr et al., 2007) и AsterGDEM (<http://demex.cr.usgs.gov>), которые могут быть использованы для анализа связи изменений в экотоне лесотундры с элементами рельефа местности (Kharuk et al., 2010).

Исследований по изменению экотона горной лесотундры в России немного (Shiyatov et al., 2005, 2007; Knorre, 2006; Devi et al., 2008; Kharuk et al., 2006, 2010).

Цель данной работы заключалась в анализе изменения границы лиственных древостоев в горах плато Путорана, чтобы найти ответы на вопросы: 1) как повлияло изменение климата за последние 40 лет на положение границы леса и сомкнутость древостоев в горах плато Путорана? 2) как связаны изменения положения границы леса и рост сомкнутости древостоев с топографией местности?

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Объект исследования

Площадь плато Путорана составляет 218 000 км². Основная часть плато расположена в подзоне северной тайги на стыке Западной и Восточной Сибири (Гвоздецкий, 1968). Обширность Путорана определяет большое разнообразие растительного покрова. Выделяют четыре высотных пояса: лесной, субальпийский, альпийский и каменистые пустыни (Куваев, 1961).

В южной части плато лесами покрыто 60–70% территории. Остальная часть в основном представлена субальпийской и альпийской тундрами. Незначительная часть покрыта каменистыми тундрами. Альпийская растительность широко распространена по водоразделам. Лес приурочен к долинам рек и озер.

На юго-западе плато граница леса достигает 600–700 м над у.м., в северо-западной части — 200–400 м. В восточной части, где климат более

континентален, граница леса достигает 750–800 м на юге и 500–550 м на севере. На сухих южных склонах деревья распространяются еще выше. В местах аллювиальных залежей, скал и каменистой почвы граница леса расположена значительно ниже (на 100 м), чем климатическая граница.

Лесная растительность избирательна к местам обитания. Растения зависят от состояния окружающей среды и ветров. Деревья располагаются в низинах (Пармузин, 1964).

Преобладающей породой является лиственница Гмелина. Высота деревьев составляет 10–15 м (максимум 25 м), dbh = 10–15 см (редко 30–40 см) (Флора Путорана, 1976). Максимальный возраст деревьев 350–400 лет. Возобновление редкое. В западной части плато леса сформированы чистой лиственницей, либо с примесью березы и ели; в восточной — только лиственницей (Пармузин, 1964).

Леса западной и юго-западной частей плато характеризуются высокой сомкнутостью (0.3–0.6). В восточной части доминируют редколесья (сомкнутостью 0.2–0.3).

В субальпийской зоне граница леса определяется расположением редин. Некоторые лиственницы стланиковой формы с флаговой формой кроны произрастают в зоне альпийской тундры.

Редины состоят только из лиственницы Гмелина. Высота деревьев составляет 2–8 м, dbh = 5–16 см (изредка тоньше), деревья приземистые (Флора Путорана, 1976). Редины расположены на вершинах базальтовых террас, на холмах древних аллювиальных террас, на крутых склонах, часто среди аллювиальных отложений. На склонах средней крутизны редины и кустарники формируют два различных пояса, идущих последовательно. На крутых склонах расположены кустарники с примесью деревьев лиственницы. С увеличением высоты они замещаются ольховниками. Пояс ольховников четко выделяется в западной части плато и прерывается в восточной части Путорана.

Альпийский пояс начинается с 750–800 м над у.м. в южной части плато и на 400–600 м — в северной. В основном он покрыт тундровой растительностью. Есть одиночные кустарники. На подветренных склонах кустарники объединяются в компактные группы. Пояс каменистых тундр расположен выше, чем 1350–1400 м над у.м. В нем преобладает лишайник.

Объект исследования расположен в центральной части плато Путорана (68°19' с.ш., 94°33' в.д.). Площадь анализируемого участка составила 193 км². Он характеризуется большим перепадом высот — от 465 до 1410 м (рис. 1). В соответствии с геоботаническим районированием (Флора Путорана, 1976) расположен исследуемый участок в восточной части северной тайги. Леса в основном

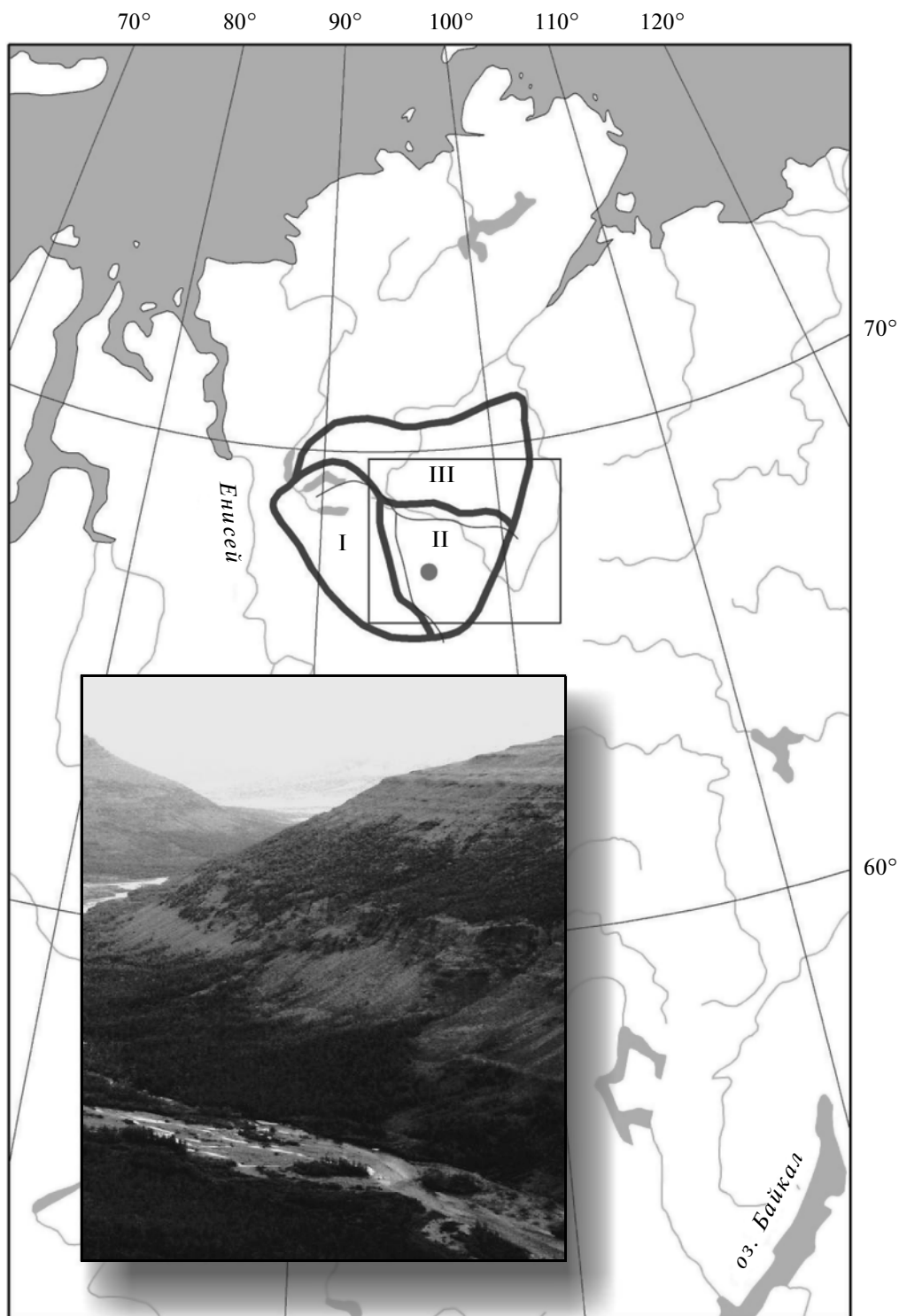


Рис. 1. Объект исследования и фото типичного ландшафта плато Путорана на исследуемой территории (ист: Google Maps, Panoramia). Геоботанические районы: I – западная подзона северной тайги; II – восточная подзона северной тайги; III – субарктическая зона. Кружком показан район основных исследований, прямоугольником – зона покрытия снимками Terra/MODIS.

сформированы рединами лиственницы Гмелина с сомкнутостью 0.3). Граница леса достигает 750–800 м над у.м. В кустарничково-травяном ярусе

доминируют *Vaccinium uliginosum*, *Ledum palustre*, *Empetrum nigrum* s. l. Лишайники произрастают на всех участках.

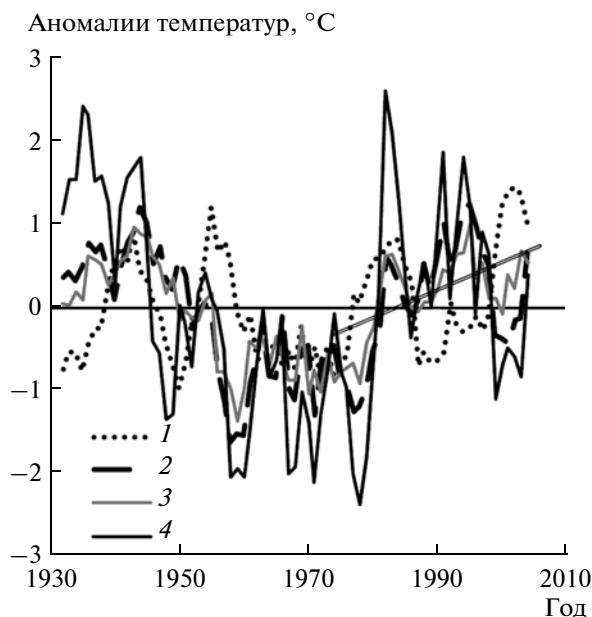


Рис. 2. Аномалии среднегодовых температур (усредненные пятилетним окном): 1 – летние (июнь–август); 2 – “холодного периода” (сентябрь–май); 3 – годовые; 4 – зимние (декабрь–февраль).

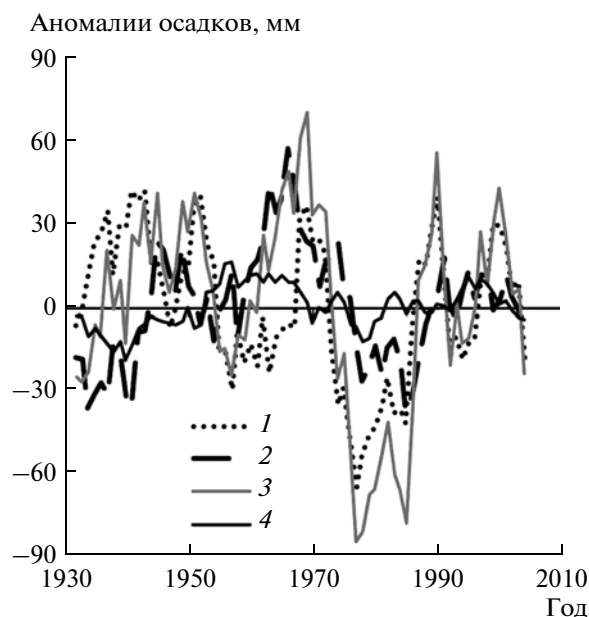


Рис. 3. Аномалии суммарных осадков (усредненные пятилетним окном): 1 – летние (июнь–август); 2 – “холодного периода” (сентябрь–май); 3 – годовые; 4 – зимние (декабрь–февраль).

Климат является сурово-континентальным: в период 1976–2005 гг. среднегодовая температура составляла $\text{минус } 14 \pm 1^\circ\text{C}$ (рис. 2), средние зимние (декабрь–февраль) температуры – $\text{минус } 35 \pm 3^\circ\text{C}$, средние летние (июнь–август) температуры – $\text{плюс } 8 \pm 1^\circ\text{C}$; средняя температура “холодного периода” (сентябрь–май) – $\text{минус } 21 \pm 1^\circ\text{C}$. Среднегодовое количество осадков равно 440 ± 75 мм (рис. 3). В период сентябрь–май выпадает 250 ± 35 мм, в летний период – 188 ± 53 мм (Mitchell, Jones, 2005). В зимнее время плоские вершины слегка покрыты, либо не имеют снежного покрова, тогда как подветренные трапы аккумулируют снег, где высота снежного покрова может достигать нескольких метров (Румянцев, 1976). Преобладающая порода – лиственница Гмелина. Верхняя граница леса представлена стланиковыми формами и расположена на высотах 750–800 м (Флора Путорана, 1976). Исследуемая территория плато Путорана находится в списке мирового наследия UNESCO как полный набор субарктических и арктических экосистем в изолированном горном массиве, включая тайгу, экотон лесотундры, тундру и арктические пустыни, а также нетронутые озерные и речные системы (UNESCO, <http://whc.unesco.org/en/list/1234>).

Материалы

Исследование проводилось на основе анализа временного ряда космических снимков, цифровой модели рельефа и топографических карт. Исполь-

зовались снимки Landsat-1/MSS (15.08.1973 г.) и Landsat-5/TM (10.07.2009 г.) с пространственным разрешением 60 и 30 м соответственно. Также использованы снимки Hexagon (19.07.1976 г., пространственное разрешение 6 м; <http://edcsns17.cr.usgs.gov>) и Quickbird (31.07.2005 г., пространственное разрешение 0.6 м; <http://maps.google.com>). Hexagon является американским военным спутником, работавшим в 1970-е годы (Richelson, 2001; Surazakov, Aizen, 2010). Для анализа динамики состояния растительного покрова использованы данные MODIS (144 снимка, продукт MYD13Q1, пространственное разрешение 250 м, 2002–2009 гг.). Данный продукт MODIS представляет 16-дневные композиты вегетационных индексов NDVI и EVI (<http://glovis.usgs.gov>).

Для анализа связи изменений в экотоне лесотундры с топографией местности использована цифровая модель рельефа (ЦМР) Aster GDEM (пространственное разрешение 30 м, разрешение по высоте 14 м; <http://demex.cr.usgs.gov>). Aster GDEM была проверена и уточнена по данным топографических карт М 1 : 200000 (по состоянию на 1973–1976 гг.).

Помимо указанных материалов в анализе использованы 20 наземных фотографий в качестве опорных данных для генерации классификационных картосхем. Фотографии получены из Google Maps Panoramia.

Данные по климату извлечены из набора CRU TS3.1 (<http://badc.nerc.ac.uk/data/cru>, <http://>



Рис. 4. Аномалии гидротермического индекса (усредненные пятилетним окном): 1 – годовые; 2 – летние (июнь–август); 3 – “холодного периода” (сентябрь–май).

www.knmi.nl). Набор данных CRU TS3.1 состоит из сеточных помесечных данных о температурах и осадках за период 1901–2009 гг. с пространственным разрешением 0.5° (рис. 2–4) (Mitchell, Jones, 2005).

Данные ДЗ анализировались с помощью программного пакета ERDAS Imagine. Статистический анализ проводился средствами Microsoft Excel.

МЕТОДИКА

Анализ снимков Landsat

Снимок Landsat-MSS (1973 г.) был привязан к снимку Landsat-TM (2009 г.). К снимкам применена топографическая нормализация методом С-коррекции для уменьшения вариации яркостей из-за неравномерного освещения склонов Солнцем (Riano et al., 2003). Затем рассчитан вегетационный индекс NDVI для 1973 и 2009 гг. Значения NDVI 1973 г. прокалиброваны к значениям NDVI 2009 г. для уменьшения различий в параметрах съемочной аппаратуры. Для этого, по участкам со стабильными значениями NDVI (например, каменистые и глубоководные поверхности), получена регрессионная зависимость ($R^2 = 0.75$)

$$\text{NDVI}_{1973} = 0.896 \text{NDVI}_{2009} + 0.117,$$

которая далее была использована для калибровки.

Классификационные картосхемы сгенерированы методом максимального правдоподобия. Обучающие выборки составлялись на основе сцен Quickbird, наземным фотографиям и экспер-

ным знаниям. Всего сформированы 18 выборок (в среднем по 45 пикселей на выборку) для Landsat-MSS и 34 выборки (в среднем по 48 пикселей на выборку) для Landsat-TM.

Для выделения классов древостоев нами использован тот же критерий расстояний, который использовался Шиятовым и др. в исследованиях Полярного Урала (Shiyatov et al., 2007). Шиятов и др. сомкнутыми древостоями считали группы деревьев с расстоянием между ними не более 7 м, низкосомкнутыми – группы с деревьями, стоящими друг от друга на расстоянии более 7 м. Однако в нашем случае кроны деревьев имели меньше 3 м, и соответственно сомкнутость для групп с деревьями, расположенными на расстоянии 7 м, меньше и соответствует 0.1–0.25. В итоге выделено пять классов наземной поверхности: 1) редколесья с сомкнутостью >0.2 ; 2) редины с сомкнутостью <0.2 и кустарники; 3) тундры; 4) минерализованные поверхности; 5) водные поверхности.

Точность классификаций по методу каппа-статистики соответствует удовлетворительному уровню ($\kappa_{1973} = 0.61$, $\kappa_{2009} = 0.62$).

Анализ снимков Hexagon и Quickbird

Снимок Hexagon был привязан к снимку Quickbird методом резиновой поверхности (использовано 6605 точек привязки, ERDAS, 2010). Известно, что пространственное слияние панхроматического снимка высокого разрешения с многоспектральным снимком низкого разрешения может существенно увеличить точность классификации (Phol, Genderen, 1998). Нами применен метод главных компонент для пространственного слияния снимков Hexagon (1976 г.) и Landsat-MSS (1973 г.). Метод главных компонент сохраняет высокое пространственное разрешение из панхроматического снимка и добавляет псевдо-спектральные характеристики из многоспектрального (Phol, Genderen, 1998; Welch, Ehlers, 1987; ERDAS, 2010). Далее были применены несколько масок для устранения из анализа следующих фоновых участков: 1) водные поверхности; 2) глубокие тени; 3) участки, расположенные значительно выше границы леса (>930 м над уровнем моря; определено экспертно по цифровой модели рельефа и снимку Quickbird). Снимок Quickbird преобразован к пространственному разрешению снимка Hexagon (6 м) методом билинейной интерполяции. Для классификации использован метод кластеризации ISODATA вместо метода максимального правдоподобия – из-за сложности формирования мелко-контурных обучающих выборок для деревьев. Кластеризация сделана с разбиением на 200 классов с пороговым параметром равным 0.99. Идентифицировано четыре класса: 1) редколесья с сомкнутостью >0.2 (*Lrch_s*); 2) редины с сомкнутостью <0.2 и кустарники

Таблица 1. Оценка точности классификаций Hexagon + MSS и Quickbird

Класс	Опорные данные				Ошибка пропуска, %	Ошибка включения, %	Каппа
	<i>Lrch_s</i>	<i>Lrch_vs</i>	<i>Lchn</i>	<i>Tndr</i>			
<i>Lrch_s</i>	132/154	16/6	0/0	0/0	9/3	11/4	0.86/0.95
<i>Lrch_vs</i>	13/4	65/97	0/0	5/0	38/11	22/4	0.74/0.95
<i>Lchn</i>	0/0	0/0	47/51	20/3	10/2	30/6	0.67/0.94
<i>Tndr</i>	0/0	23/6	5/1	285/285	8/1	9/2	0.82/0.95
Общая точность классификации, %						87/97	
Общая каппа-статистика						0.79/0.95	

В колонках: Hexagon + MSS (1976)/Quickbird (2005).

(*Lrch_vs*); 3) лишайниковая тундра (*Lchn*); 4) каменистая тундра (*Tndr*). Точность классификации оценена методом каппа-статистики (табл. 1).

Анализ топографии

Исследована связь изменений в распределении растительного покрова с элементами рельефа (высотой над уровнем моря, азимутальным направлением и крутизной склонов). Предварительно цифровая модель рельефа Aster GDEM была отфильтрована от артефактов. Выделены высотные срезы по 50 м и 100 м (с 400 до 930 м над у.м.). Диапазон азимутов направлений склонов был разбит на 16 групп по 22.5°: северный (С, 348.75°–11.25°), северо-северо-восточный (ССВ, 11.25°–33.75°) и т.д. Крутизна склонов была разбита по одному градусу.

Распределение элементов рельефа с заданными высотами, азимутальным направлением и крутизной является неоднородным и поэтому может привести к невозможности проведения сравнительного анализа. Чтобы убрать неоднородность, данные были нормализованы методом, описанным в предыдущих работах (Khaug et al., 2006, 2010). Для нормализации покрытые участки леса с заданными азимутальным направлением и крутизной склона и высотой соотносились со всей анализируемой территорией с идентичными параметрами

$$K_{c(i)} = A_{c(i)}/B_{c(i)},$$

где $c(i)$ – индекс, соответствующей i -й категории элемента рельефа c (высота над у.м., азимутальное направление и крутизна склона); $K_{c(i)}$ – нормализованная площадь для данного класса наземной поверхности для i -й категории элемента рельефа c ; $A_{c(i)}$ – абсолютная площадь данного класса наземной поверхности для i -й категории элемента рельефа c ; $B_{c(i)}$ – абсолютная площадь данной поверхности для i -й категории элемента рельефа c на всей территории исследования.

Построены диаграммы распределения классов наземного покрова по различным элементам рельефа для различных высотных срезов.

Прямые измерения скорости распространения деревьев по градиенту высоты сильно затруднены из-за малых значений измеряемых величин. Поэтому скорость распространения деревьев по градиенту высоты оценивалась косвенно. Алгоритм расчетов был следующим. Известно, что с ростом высоты над у.м. количество пикселей, соответствующих классам лиственничников, уменьшается. На первом шаге создана таблица, в которую были выписаны все значения высот и соответствующие им количества пикселей лиственничников. Далее в таблице происходил поиск значений высот, начиная с наибольшей высоты, который соответствовало критическое количество пикселей лиственничников (100 = 0.36 га, 200 и 300 пикселей). Далее рассчитывалась разность между значениями найденных высот для 2005 г. и 1976 г. Например, по критерию 100 пикселей для классификации 2005 г. (Quickbird) найдена максимальная высота в 858 м над у.м., а для 1976 г. (Hexagon + MSS) соответствующая высота равна 841 м над у.м. Разность составляет 17 м, что соответствует 0.6 м/год.

Анализ данных Terra/MODIS

Проанализирована динамика индекса NDVI по данным Terra/MODIS. Из имеющегося набора слоев NDVI за 2002–2009 гг. синтезированы изображения с максимальными значениями NDVI за летний период для каждого года, которые далее объединялись в композит. Для каждого пикселя композитного изображения NDVI вычислены линейные тренды и рассчитаны значимости коэффициентов. Слой значимых коэффициентов наклонов линий трендов использовался для обнаружения зон со статистически значимым ростом или падением индекса NDVI в течение 2002–2009 гг.

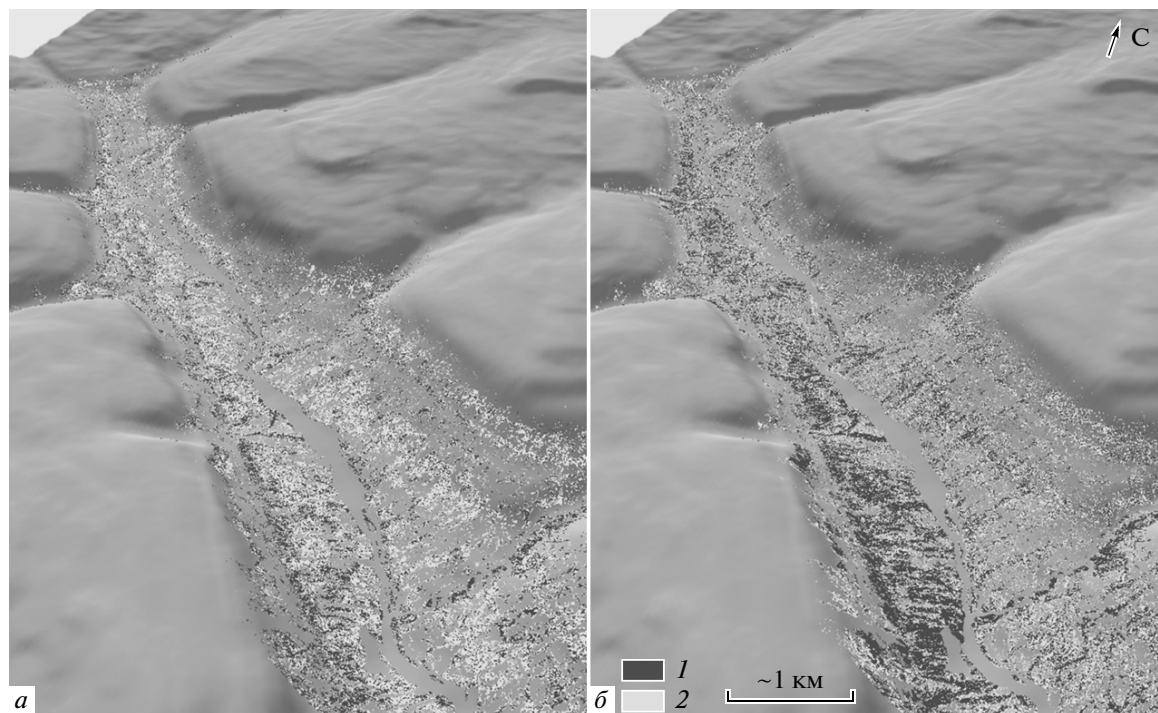


Рис. 5. Перспективное отображение классификационных картосхем исследуемой территории: *a* – 1976 г.; *б* – 2005 г., где: 1 – лиственные редколесья; 2 – лиственные редины и кустарники.

Анализ климатических данных

На исследуемую территорию проанализированы динамики температур, осадков и гидротермического индекса. Построены диаграммы и вычислены периоды со статистически достоверными трендами. Дополнительно использовался гидротермический индекс, который вычислялся как соотношение количества осадков в мм к суммарным температурам в К за анализируемый период. Выявлены косвенные связи между динамикой климата и изменениями в растительном покрове.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Пространственно-временные изменения в растительном покрове

Точность сгенерированных классификационных картосхем соответствует высокому уровню

($\kappa_{1976} = 0.79$, $\kappa_{2005} = 0.95$, табл. 1, рис. 5). Из картосхем вычислены изменения площадей классов и матрица переходов классов (табл. 2, 3).

Построена диаграмма изменения площадей классов (рис. 6, 7). Площади были нормализованы методом, описанным выше. Ошибки площадей оценены по вычисленным ошибкам пропуска и включения для соответствующих классификаций (табл. 1). Например, пусть площадь редколесий для 2005 г. равна A , при этом ошибка пропуска равна 3% и ошибка включения равна 4% (табл. 1). А для 1976 г. площадь редколесий равна B , при этом ошибка пропуска равна 9% и ошибка включения равна 11% (табл. 1). Тогда разность $C = A - B$ и ее оценочные границы будут [$C - C(0.04 + 0.11)$; $C + C(0.03 + 0.09)$].

Анализ съемок Landsat 1973 и 2009 гг. показал прирост площади редколесий в 40% за 37 лет. То-

Таблица 2. Изменения площадей классов за период 1976–2005 гг.

Класс	Площадь, га		Разность (2005–1976 гг.)	
	1976	2005	Площадь, га	% от 1976 г.
<i>Lrch_s</i>	348.5	562.5	214.0	61
<i>Lrch_vs</i>	707.3	609.7	–97.6	–14
<i>Lchn</i>	296.8	363.3	66.5	22
<i>Tndr</i>	1586.6	1403.8	–182.9	–12

Таблица 3. Матрица трансформации классов за период 1976–2005 гг.

Классы с картосхемы 2005 г.	Классы с картосхемы 1976 г. Площадь, га			
	<i>Lrch_s</i>	<i>Lrch_vs</i>	<i>Lchn</i>	<i>Tndr</i>
<i>Lrch_s</i>	242.0	314.7	5.8	0.0
<i>Lrch_vs</i>	105.4	267.2	16.9	220.2
<i>Lchn</i>	1.1	3.6	140.6	218.0
<i>Tndr</i>	0.0	121.8	133.5	1148.4

гда как анализ Hexagon + MSS (1976 г.) и Quickbird (2005 г.) указывает на 60% рост площади в течение 30 лет.

казано распределение разности в площадях классов между 2005 и 1976 гг.

Связь динамики растительного покрова с элементами рельефа

Оценены изменения классов наземного покрова в зависимости от высоты над у.м., азимутальным направлением и крутизны склонов. Вычислено распределение площадей классов по высотному градиенту. На рис. 6 представлено распределение площадей для 1976 г. На рис. 7 по-

За период 1976–2005 гг. площадь лиственных редколесий увеличилась на 60% (табл. 2). Основная часть прироста площади произошла за счет трансформации редин в редколесья (табл. 3, рис. 7). Эти изменения в основном отмечаются на высотах, где преобладали лиственные редины в 1976 г. (рис. 6). Тогда как увеличение площади редин соответствует более высоким поясам (площадь приросла на 10% на высотах 700–930 м над у.м.), и она удвоилась в низинах (450–500 м над у.м.). Трансформация редин в редколесья происходила

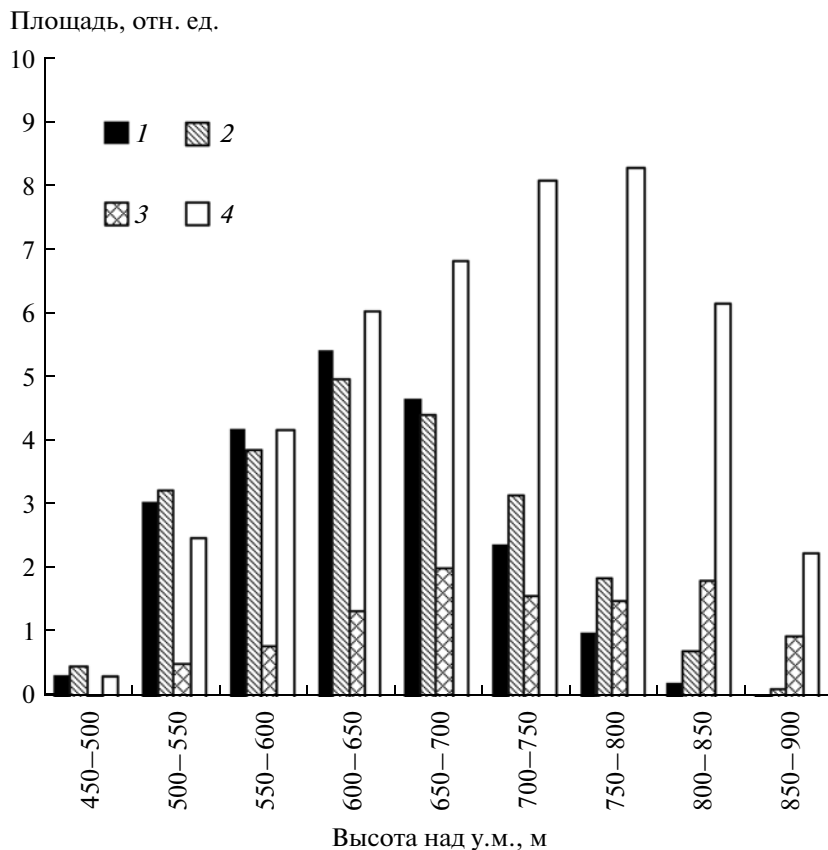


Рис. 6. Распределение нормализованных площадей классов наземного покрова по состоянию на 2005 г.: 1 – лиственные редколесья; 2 – лиственные редины и кустарники; 3 – лишайниковая тундра; 4 – каменистая тундра.

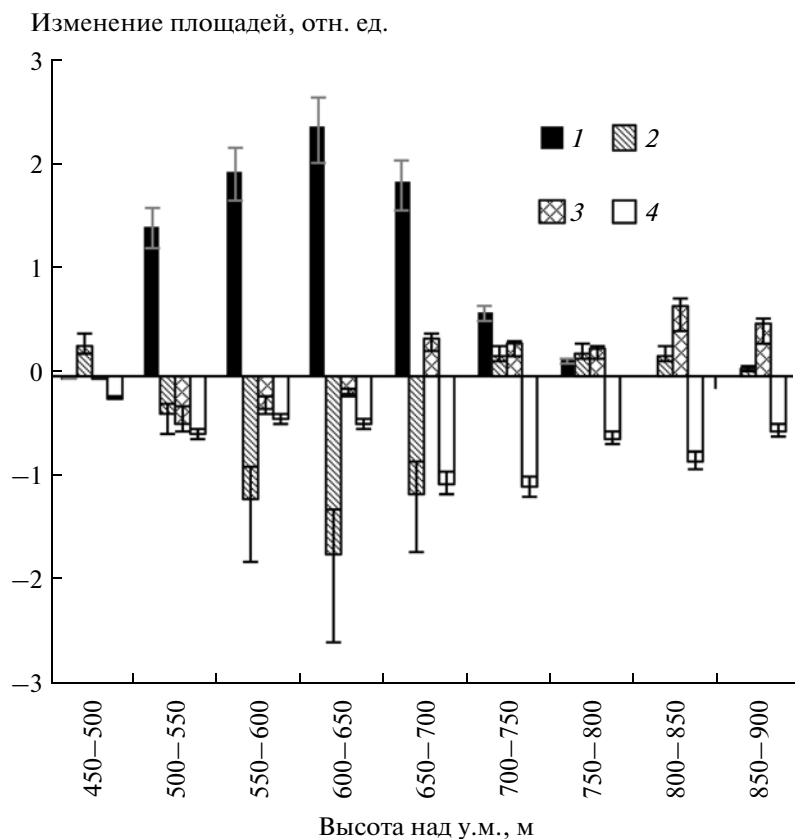


Рис. 7. Изменения нормализованных площадей за период 1976 (Quickbird) – 2005 (Hexagon + MSS): 1 – лиственничные редколесья; 2 – лиственничные редины и кустарники; 3 – лишайниковая тундра; 4 – каменистая тундра.

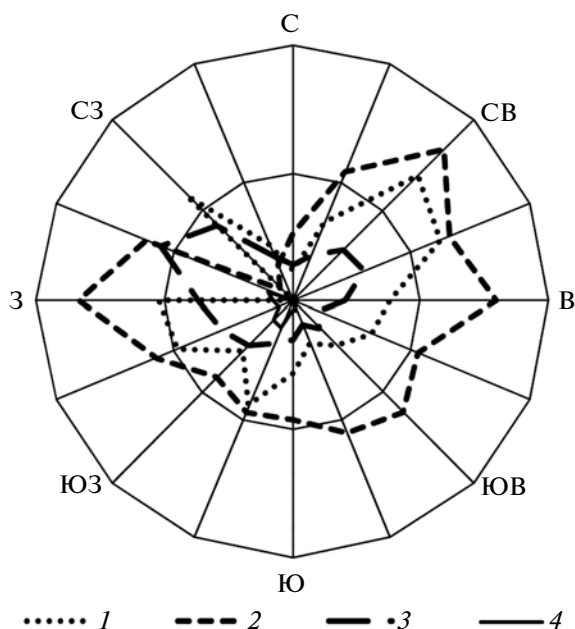


Рис. 8. Распределение площадей редколесий по азимутальным направлениям склонов по состоянию на 2005 г. Площади нормализованы и представлены для высотных срезов: 1 – 500–600 м над у.м.; 2 – 600–700 м над у.м.; 3 – 700–800 м над у.м.; 4 – 800–900 м над у.м.

главным образом на малых высотах; на 500–700 м над у.м. площадь редколесий возросла на 75%.

Большая часть лиственничных редколесий сосредоточена на южной и юго-западной экспозиции.

На высотах меньше 600 м над у.м. деревья предпочитают пологие склоны (до 13°) северо-восточного (23° – 67°) и юго-западного (203° – 270°) направлений (рис. 8). На больших высотах, где характерны суровые ветра, деревья прячутся в складках рельефа (в локальных депрессиях, на склонах с крутизной более 25° , рис. 9) и предпочитают западные склоны (225° – 315° , рис. 8).

Динамика NDVI

Анализ снимков Landsat показал, что в зонах трансформации редин в редколесья в период 1973–2009 гг. значения индекса NDVI возросли на 0.14 ± 0.09 (уровень значимости <0.1). Из анализа данных MODIS в период 2002–2009 гг. изменения NDVI были незначительными на плато Путорана. Вероятно, это связано с уменьшением гидротермического индекса в этот период (рис. 4). Для растительного покрова коэффициенты наклонов линий трендов варьируются незначительно в пределах 0.038–0.116. Наиболее высокие значения

индексов NDVI соответствуют долинам рек, где типично присутствие кустарников и деревьев.

Появление новых деревьев

Сравнительный анализ космических снимков Quickbird и Hexagon позволил оценить появление новых деревьев. С учетом положения Солнца и пространственного разрешения снимка Quickbird, определены минимальные размеры детектируемого дерева (высота >2.5 м, с шириной кроной >1 м). На локальном участке площадью 16.4 га в зоне перехода редколесий в лишайниковую тундру, на высотах 670 ± 40 м над у.м., на склоне юго-западной экспозиции сделано экспертное дешифрирование и подсчитано количество новых деревьев за период с 1976 по 2005 гг. Установлено, что за 30-летний период появилось примерно три новых дерева на гектар.

Положение границы леса

Анализ снимка Quickbird и цифровой модели рельефа местности показал, что наибольшая высота расположения границы леса соответствует 930 м над у.м. При этом минимальный размер детектируемой кроны дерева составляет 1 м.

В общем случае обнаружено незначительное продвижение деревьев в зону тундры. В высокогорье линия леса нечеткая и прерывистая, расположена кусками. Ширина переходной зоны между тундрой и рединами варьируется от 50 до 400 м, а по высоте — от 30 до 200 м над у.м.

Косвенные оценки по данным ЦМР Aster GDEM, и снимкам Quickbird и Hexagon показали, что максимально границы редины сдвинулись по высоте с 841 до 858 м над у.м., а редколесий с 815 до 820 м над у.м. Соответственно оценочные скорости для редины <1.4 м/год, для редколесий — <0.3 м/год. Редины расположены на 10–30 м выше редколесий.

Медианы распределений площадей лиственныхников для низких (<600 м над у.м.) и высоких (>700 м над у.м.) участков сдвинулись на 3–4 м за 30 лет. Вычисленные оценки являются примерными, так как ограничены вертикальным пространственным разрешением имеющейся цифровой модели рельефа.

ОБСУЖДЕНИЕ

Пространственно-временная динамика лиственныхников

Анализ снимков высокого и сверхвысокого пространственного разрешений показал различные оценки роста площадей редколесий: 40% из анализа снимков Landsat за 37-летний период (примерно 1% в год) и 60% из анализа Hexagon +

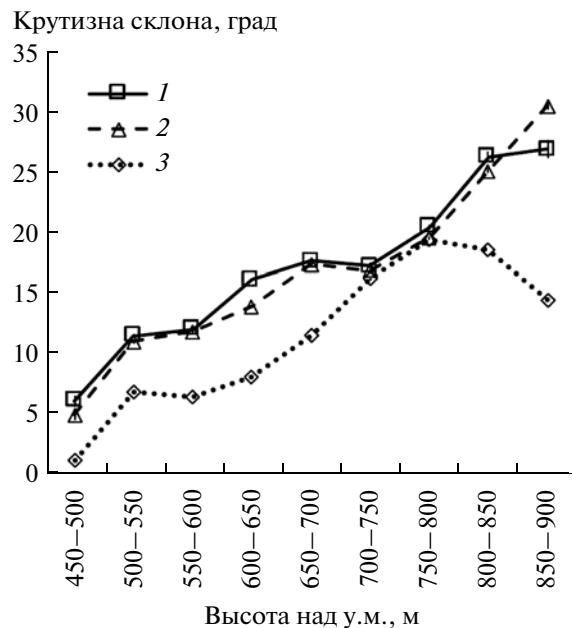


Рис. 9. Распределение средних значений крутизны склонов, соответствующих редколесьям для различных высотных срезов по состоянию на 2005 г.: 1 — лиственные редколесья; 2 — лиственные редины и кустарники; 3 — средняя крутизна склонов по всей территории заданного высотного среза.

+ MSS и Quickbird за 30-лет (около 2% в год). Вероятно, это вызвано более низкой точностью классификаций Landsat. Каппа-статистика для классификаций по Landsat равна 0.62 и 0.63, тогда как для классификаций Hexagon + MSS и Quickbird — 0.79 и 0.95.

К 2005 г. редколесья покрыли 5.6% исследуемой территории, это на 0.6% больше, чем в 1976 г.

Значительный рост NDVI на 0.14 ± 0.09 (уровень значимости <0.1) подтверждает рост сомкнутости. Аналогичное наблюдение сделано Жангом и др. (Zhang et al., 2009), которые фиксировали рост NDVI на 0.1–0.3 в зонах увеличения сомкнутости на 35% (с 19 до 25 м²/га) хвойных и лиственных лесов в экотоне лесотундры в горах Китая в период 1977–1999 гг.

Известно, что изменения наблюдаются и в других экотонах северной лесотундры Сибири. Например, известно, что в горах Полярного Урала (66° с.ш., 65.5° в.д.) площадь сомкнутых древостоев значительно увеличилась, за 41 год (1960–2002 гг.) их площадь возросла в 2.2 раза (Shiyatov et al., 2005). Авторы предположили, что причиной этому явлению служат рост температур и осадков в конце 20 в. (Shiyatov et al., 2007; Devi et al., 2009). Также в зоне самого северного участка древостоев Ары-Мас (72° с.ш., 101.5° в.д.) наблюдался рост сомкнутых древостоев на 65% в течение 36 лет, с 1965 по 2000 гг. (Kharuk et al., 2006).

Орография и динамика лиственничных древостоев

Наибольшие изменения произошли на высотах 500–750 м над у.м., где происходила трансформация редин в редколесья (рис. 7). Примерно 40% редин увеличили сомкнутость (табл. 2).

Прирост площади лиственничных редколесий на небольших высотах (ниже 500 м над у.м.) и высоких участках (более 700 м над у.м.) указывает на распространение древесной растительности как вниз, так и вверх по градиенту высоты (рис. 7).

В общем установлено сокращение площадей тундр по всей наблюдаемой территории (рис. 7).

Вычисленная оценка скорости распространения деревьев вверх по градиенту высоты составила менее 14 м в декаду для редин и менее 2.6 м в декаду для редколесий. В горах Полярного Урала скорость распространения сравнима с указанной оценкой: сомкнутые деревья продвигались по высоте на 4 м в декаду, а редколесья на 3 м в декаду (Shiyatov et al., 2007). В Шведских Скандиях в течение прошлого столетия граница леса поднялась на 70–90 м (Kullman, Oberg, 2009). За последние 50 лет побеги ели (*Picea abies*) продвинулись по высоте на 240 м (5 м/год), сосны (*Pinus sylvestris*) — на 340 м (7 м/год) (Kullman, 2002). В горах Финской Лапландии высотная граница ели сместилась вверх на 100 м и березы на 40–60 м в течение 1947–2003 гг. (Middleton et al., 2008). Менее драматичные оценки скорости распространения деревьев в зону тундры установлены для наиболее северного древостоя Ары-Мас, где проективная скорость составила 3 м/год (Kharuk et al., 2006).

На малых высотах выделяются два доминирующих сектора в распределении площадей лиственничников по азимутальным направлениям склонов — это северо-восточные и западные склоны (рис. 8). Вероятно, этот эффект связан с ветрами и локальной топографией — туннель вдоль речной долины с северо-запада на юго-восток (рис. 8). На больших высотах лиственничники и кустарники преобладают на прогреваемых западных и юго-западных склонах.

Также с ростом высоты над уровнем моря деревья предпочитают укрытые участки с крутизной более 12° (рис. 9), и их пространственное распределение становится кластерным.

Климатические изменения и динамика лиственничных древостоев

Для исследуемой территории характерен значительный рост среднегодовой температуры на 0.6°C (уровень значимости <0.06) в период 1976–2006 гг., по сравнению с предыдущим периодом (1945–1975 гг.), и относительно столетнего периода (1901–2000 гг.) среднегодовая температура возросла на 0.6°C (уровень значимости <0.05, рис. 2). Наблюдаются положительные тренды

летних температур в период 1974–1985 гг. (наклон тренда 0.63, уровень значимости <0.05, рис. 2) и в 1989–2006 гг. (наклон тренда 0.53, уровень значимости <0.05). Также выявлен положительный тренд зимних температур в период 1977–1998 гг. (наклон тренда 0.51, уровень значимости <0.05). В течение 1976–2006 гг. средние летние температуры увеличились на 0.5°C (уровень значимости <0.13) относительно предыдущего периода (1945–1975 гг.) и возросли на 0.4°C (уровень значимости <0.11) относительно столетнего периода (1901–2000 гг., рис. 2). Таким образом, рост среднегодовых температур на 0.6°C привел к продвижению древесной растительности не более чем на 15 м по высоте за последние 30 лет в конце 20 в. Для сравнения, в Шведских Скандиях рост среднегодовой температуры на 1°C привел к продвижению деревьев на 140 м вверх в течение 20 в. (Kullman, 2005). В горах Полярного Урала с ростом летних (на 0.7°C) и зимних (на 1.1°C) температур в течение 1920–2004 гг. (относительно 1883–1919 гг.) сомкнутые древостои продвинулись на 35 м, а редколесья на 26 м по высоте (Shiyatov et al., 2007).

В 1980-е годы наблюдается интенсивный рост возобновления в северо-восточной части плато Путорана (в течение 1980–1989 гг. появилось 28 подростов на га, (Knogge et al., 2006)). Гипотетически, такое явление происходило на исследуемой территории в связи с тем, что наблюдались значительный рост летних температур и позитивные тренды зимних температур. Наиболее теплыми периодами были 1978–1985 гг., когда летняя температура возросла на 0.9°C (уровень значимости <0.01, рис. 2), и 1998–2006 гг., когда летняя температура возросла на 1.1°C (уровень значимости <0.01, рис. 2) относительно среднего за столетний период (1901–2000 гг.). В нашем случае наблюдалось появление трех деревьев на га, обнаруженных из анализа сцен Quickbird и Hexagon. Для сравнения, на севере Канады в период 1947–1989 гг. зафиксировано появление 9 ± 3 новых деревьев на га в еловых древостоях (Danby, Hik, 2007).

В целом в период 1979–2002 гг. наблюдается положительный тренд гидротермического индекса (наклон тренда 0.47, уровень значимости <0.05, рис. 4); после 2002 г. индекс идет вниз. В то же время в 1980-е годы гидротермический индекс был значительно ниже среднего за столетний период (1901–2000 гг., рис. 4), что связано с малым количеством осадков (рис. 3). В 1982–1987 гг. среднее количество осадков было 385 мм, что меньше такового за столетие на 70 мм (уровень значимости <0.05, рис. 3). Недостаток влажности в летний период, вероятно, привел к замедлению роста деревьев, но вызвал рост количества подростов. Связи с изменениями зимних осадков не найдено.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В конце 20 в. на плато Путорана наблюдаются значительный рост деревьев и увеличение сомкнутости древостоев, индуцированные потеплением климата. Площадь редколесий увеличилась на 60% в течение 30 лет за счет увеличения сомкнутости деревьев в редирах. Это явление главным образом проявляется на низких высотах вдоль речной долины. Также наблюдается значительный рост индекса NDVI (на 0.14) в зонах увеличения сомкнутости.

В исследуемой зоне антропогенное воздействие минимально. Наблюдаемые явления в основном связаны с климатическими изменениями. Рост среднегодовой температуры на 0.6°C в течение последних трех деkad 20 в. привел к продвижению границы леса по градиенту высоты не более чем на 15 м вверх, и появлению трех новых деревьев на га. Оценки скоростей распространения деревьев в зону тундры затруднено из-за небольших измеряемых параметров и ограничений в пространственном разрешении данных ДЗ.

Выживаемость и рост деревьев, а также их реакция на изменения климата значительно зависят от топографии местности. С ростом высоты над у.м. деревья прячутся в локальных депрессиях на крутых прогреваемых склонах (до 30°) юго-западной экспозиции.

Работа поддержана грантом МК-2497.2009.5 (грант Президента РФ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вопросы физической географии СССР / Под ред. Гвоздецкого Н.А., Глазковской М.А. Москва: Издательство Московский университет, 1959. 183 с.
- Гвоздецкий Н.А.* Физическо-географическое районирование СССР. М.: МГУ, 1968. 576 с.
- Куваев В.Б.* К выделению пояса холодных каменных пустынь в горах севера Евразии // Ботанический журнал АН СССР. 1961. Т. 3. С. 337–347.
- Пармузин Ю.П.* Средняя Сибирь. Очерк природы. М.: Мысль, 1964. 313 с.
- Румянцев В.И.* Ландшафтные различия озерных котловин южной, центральной и северо-восточной частей гор Путорана. Природно-ландшафтные условия озер Путорана // Тр. Лимнологического института СО АН СССР. Новосибирск: Наука, 1976. Т. 22. № 42. С. 163–175.
- Флора Путорана / Под ред. Л.И. Малышева. Новосибирск: Наука, 1976. 248 с.
- ACIA, Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge Univ. Press, 2005. 1042 p. <http://www.acia.uaf.edu>.
- Danby R.K., Hik D.S.* Evidence of recent treeline dynamics in southwest Yukon from aerial photographs // Arctic. 2007. V. 60. № 4. P. 411–420.
- Devi N., Hagedorn F., Moiseev P., Bugmann H., Shiyatov S., Mazepa V., Rigling A.* Expanding forests and changing growth forms of Siberian larch at the Polar Urals treeline

- during the 20th century // Global Change Biol. 2008. V. 14. P. 1581–1591. doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01583.x
- ERDAS Field Guide. 2010. USA: ERDAS, Inc. 842 p.
- Esper J., Schweingruber F.H.* Large-scale treeline changes recorded in Siberia // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. № L06202. doi: 10.1029/2003GL019178.
- Farr T.G., Rosen P.A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M. et al.* The Shuttle radar topography mission // Rev. Geophys. 2007. V. 45. № 2. doi:10.1029/2005RG000183.
- Holtmeie F.* Mountain Timberlines: Ecology, Patchiness, and Dynamics. N.Y.: Springer, 2009. 438 p.
- Huemmerich K.F.* The GeoSail model: A simple addition to the SAIL model to describe discontinuous canopy reflectance // Rem. Sens. Env. 2001. V. 75. P. 423–431.
- IPCC, 2007: Climate change: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team / Eds. R.K. Pachauri, A. Reisinger. Geneva: IPCC, 2007. 104 p. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_spm.pdf.
- Kharuk V.I., Ranson K.J., Im, S.T., Naurzbaev M.M.* Forest-tundra larch forests and climatic trends // Russ. J. Ecol. 2006. V. 37. № 5. P. 291–298. doi: 10.1134/S1067413606050018.
- Kharuk V.I., Ranson K.J., Im S.T., Vdovin A.S.* Spatial distribution and temporal dynamics of high-elevation forest stands in southern Siberia // Global Ecol. Biogeogr. 2010. V. 19. № 6. P. 822–830. doi: 10.1111/j.1466-8238.2010.00555.x.
- Knorre A.A., Kirilyanov A.V., Fedotova E.V., Naurzbaev M.M.* Variation of species diversity and above ground biomass along the altitudinal transect in north-western boundary of the Putorana Mountains // Geogr. Nat. Resources. 2006. P. 75–81.
- Kullman L., Oberg L.* Post-Little Ice Age tree line rise and climate warming in the Swedish Scandes: a landscape ecological perspective // J. Ecol. 2009. V. 97. № 3. P. 415–429.
- Kullman L.* Rapid recent range-margin rise of tree and shrub species in the Swedish Scandes // J. Ecol. 2002. V. 90. P. 68–77. doi:10.1046/j.0022-0477.2001.00630.x.
- Kullman L.* Pine (*Pinus sylvestris*) treeline dynamics during the past millennium – a population study in west-central Sweden // Ann. Bot. Fennici. 2005. V. 42. P. 95–106.
- Lloyd A.H., Fastie C.L.* Recent changes in treeline forest distribution and structure in interior Alaska // Ecoscience. 2003. V. 10. № 2. P. 176–185.
- MacDonald G.M., Kremenetski K.V., Beilman D.W.* Climate change and the northern Russian treeline zone // Phil. Trans. R. Soc. 2008. V. B 363. P. 2285–2299.
- Masek J.G.* Stability of boreal forest stands during recent climate change: evidence from Landsat satellite imagery // J. Biogeogr. 2001. V. 28. P. 967–976.
- Middleton M., Narhi P., Sutinen M.-L., Sutinen R.* Object based change detection of historical aerial photographs reveals altitudinal forest expansion // GEOBIA 2008. Pixels, objects, intelligence: GEOgraphic Object Based Image Analysis for the 21st century. Calgary, Alberta, Canada. August 05–08, 2008. ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVIII-4/C1. Calgary: Univ. of Calgary. 6 p.

- Mitchell T.D., Jones P.D.* An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high resolution grids // *Int. J. Clim.* 2005. V. 25. № 6. P. 693–712.
- Munroe J.S.* Estimates of Little Ice Age climate inferred through historical rephotography, Northern Uinta Mountains, U.S.A. // *Arctic Antarctic Alpine Res.* 2003. V. 35. P. 489–498.
- Natural resources and environment Victoria's statewide forest resource inventory. Forests service technical report 99-2. Dep. Nat. Res. Env. East Melbourne, Victoria. 1999. 76 p.
- Olthof I., Pouliot D.* Treeline vegetation composition and change in Canada's Western Subarctic from AVHRR and canopy reflectance modeling // *Rem. Sens. Env.* 2010. V. 114. P. 805–815. doi: 10.1016/j.rse.2009.11.017.
- Phol C., Van Genderen J.L.* Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications // *Int. J. Rem. Sens.* 1998. V. 19. № 5. P. 823–854. doi: 10.1080/014311698215748.
- Riano D., Chuvieco E., Salas J., Aguado I.* Assessment of different topographic corrections in Landsat-TM data for mapping vegetation types // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2003. V. 41. № 5. P. 1056–1061. doi: 10.1109/TGRS.2003.811693.
- Richelson J.T.* The wizards of Langley: inside the CIA's directorate of science and technology. Boulder, Colorado: Westview Press, 2001. 416 p.
- Shiyatov S.G., Terent'ev M.M., Fomin V.V.* Spatiotemporal dynamics of forest-tundra communities in the Polar Urals // *Russ. J. Ecol.* 2005. V. 36. № 2. P. 69–75.
- Shiyatov S.G., Terent'ev M.M., Fomin V.V., Zimmermann N.E.* Altitudinal and horizontal shifts of the upper boundaries of open and closed forests in the Polar Urals in the 20th century // *Russ. J. Ecol.* V. 2007. V. 4. № 38. P. 223–227.
- Surazakov A.B., Aizen V.B.* Positional accuracy evaluation of declassified Hexagon KH-9 mapping camera imagery // *Photogram. Eng. Rem. Sens.* 2010. V.76. № 5. P. 603–608.
- Szeicz J.M., Macdonald G.M.* Recent white spruce dynamics at the sub-Arctic alpine treeline of North-Western Canada // *J. Ecol.* 1995. V. 83. № 5. P. 873–885.
- Welch R., Ehlers W.* Merging multiresolution SPOT HRV and Landsat TM data // *Photogram. Eng. Rem. Sens.* 1987. V. 53. № 3. P. 301–303.
- Zhang Y., Xu M., Adams J., Wang X.* Can Landsat imagery detect tree line dynamics? // *Int. J. Rem. Sens.* 2009. V. 30. № 5. P. 1327–1340.

Climate Induced Changes in Alpine Forest-Tundra Ecotone, Siberian Arctic Mountains

S. T. Im, V. I. Kharuk

Forest-tundra ecotone spatial and temporal dynamics in the Putorana Mountains (Northern Siberia) was analyzed for 36 years period based on Landsat (1973, 2009), Hexagon (1976), Quickbird (2005) and Terra/MODIS (2002–2009) satellite scenes. Three land cover categories were selected: sparse larch stands (with crown closure (cc) ≥ 0.2); very sparse stands (cc < 0.2) and shrubs; background. The area of sparse stands increased on 60%; it was due to transformation caused by increase of density in very sparse stands. This phenomenon mainly takes place at low (450–550 m) elevations along the river valley. Additionally increase of NDVI (on 0.14) was observed indicating densification of stands. Rise of mean annual temperature by 0.6°C during the last three decades of the 20-th century resulted in upward treeline shift on <15 m a.s.l and growth of three new trees per ha. With increasing of elevation, trees prefer sheltered local depressions with southeastern slopes up to 30 degrees.

Keywords: Putorana Mountains, forest-tundra, ecotone spatial and temporal dynamics, Landsat, Quickbird, MODIS, Hexagon, NDVI

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ХАРАКТЕРИСТИКИ КАТЕГОРИЙ ПОЖАРОВ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В СИБИРИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ И ДРУГИХ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2013 г. Е. И. Пономарев*, Е. Г. Швецов

Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск

**E-mail: evg@ksc.krasn.ru*

Поступила в редакцию 21.02.2013 г.

Представлены результаты обработки базы данных о пожарах растительности за период 1996–2012 гг., созданной на основе спутникового детектирования в тепловом диапазоне термически активных зон. Обсуждаются результаты анализа характеристик пожаров на территории Сибири. Выделена категория “короткоживущих” объектов – однократные наблюдения термически активных зон, а также категория крупноразмерных пожаров. Исследован вклад выделенных категорий пожаров в итоговые статистики горимости. Получены картосхемы пространственного распределения пожаров растительности в Сибири и оценки уровня их воздействия на лесные территории.

Ключевые слова: спутниковая съемка, база данных, термически активная зона, пожар растительности, геопрограммный анализ

DOI: 10.7868/S0205961413050035

ВВЕДЕНИЕ

Детектирование термически активных зон – одно из важнейших применений данных съемки со спутников, выполняемой в инфракрасном ($\lambda = 3–12$ мкм) тепловом диапазоне для целей мониторинга за пожарами растительности. Данное направление активно развивается с середины 90-ых годов прошлого века как за рубежом, так и в России. В частности, исследования в этом направлении проводятся в Институте леса им. В.Н. Сукачева СО РАН для территории Сибири и всей азиатской части России. Регулярные наблюдения за пожарами с использованием спутникового оборудования были начаты в 1995 г. с установкой в Красноярске станции приема информации в канале HRPT (High Resolution Picture Transmissions) со спутников серии NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) и, позже, с установкой станции приема информации со спутников Terra, Aqua (Sukhinin et al.; 1999, Lourean et al., 2006). На сегодняшний день существует возможность оперировать банком данных термически активных зон, зафиксированных со спутников в течение периода 1996–2012 гг.

Термически активные зоны после предварительной обработки интерпретируются как пожары растительности. В частности, проводится анализ и исключаются “ложные тревоги”, сигналы от техногенных или антропогенных источников, солнечные блики на поверхностях с высоким ко-

эффициентом отражения и т.д. Спутниковые данные, таким образом, являются важной составляющей системы мониторинга пожаров, наряду с результатами авиационного и наземного обнаружения пожаров. При этом спутниковые методы позволяют получить большую детализацию при наблюдении за наиболее крупными пожарами, так как обеспечивают необходимую периодичность съемки и охват зоны развития и распространения пожара.

Многолетние базы данных спутникового мониторинга пожаров неоднократно сравнивались с лесопожарной статистикой, получаемой как дистанционными, так и наземными и авиационными средствами. Во многих работах отмечается высокая корреляция между результатами альтернативных методик наблюдений за многолетней динамикой пожаров, но количественные характеристики площадей, пройденных огнем, могут существенно отличаться и требуют дополнительных калибровок (Petkov et al., 2012; Барталев и др., 2012). Таким образом, актуальными являются вопросы анализа достоверности итоговых баз данных о пожарах, фиксируемых спутниковыми средствами, а также необходимой калибровки количественных показателей горимости и оценки уровня воздействия пожаров на лесные территории Сибири.

Основная цель данной работы – провести классификацию пожаров растительности на тер-

ритории Сибири и исследовать характеристики выделяемых категорий пожаров.

ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В последние десятилетия проблема лесных пожаров является актуальной и остро стоит во многих странах мира, включая и Россию. Высокие показатели числа пожаров и площадей, пройденных огнем, регистрируются ежегодно в различных районах на территории Сибири. В 2010 г., наряду с экстремальной горимостью европейской части России (Бондур, 2011), зафиксировано более 18 тыс. пожаров в лесной и лесостепной зонах юга Сибири. В 2011 г. число пожаров превышало 24 тыс. Экстремальная ситуация сложилась в 2012 г., в течение пожароопасного сезона (март–сентябрь) на территории Сибири произошло более 23 тыс. пожаров. При этом было зафиксировано более 2200 крупных и экстремально крупных пожаров, площадь которых превышает 2000 га. Отмечено, что пожары в Сибири в 2012 г. обусловили экстремальный вклад в эмиссию атмосферы (Panov et al., 2012), что определялось показателями горимости, существенно превышающими значения предыдущего периода спутниковых наблюдений 1999–2010 гг. (Sukhinin, 2008; Швиденко и др., 2011). Наиболее крупные пожары в последние годы повторялись на территории Якутии, в Прибайкалье, на севере Красноярского края, в Томской обл. и республике Тыва.

По нашим оценкам, отражающим ситуацию последнего десятилетия, на территории Сибири до 90% общих площадей, пройденных огнем, приходится на экстремально крупные пожары. Из общего числа пожаров до 45% распространяются на площадях менее 100–200 га, около 50% пожаров, детектируемых спутниковыми методами, имеют площади до 1000 га, а 5% составляют пожары, относимые к крупноразмерным, площади которых превышают 2000 га.

По оценкам, на территории Сибири в начале двухтысячных годов ежегодно пожарам растительности различной интенсивности подвергалась территория 2–17 млн га (Conard et al. 2002; Soja et al., 2004; Швиденко и др., 2011). Наши данные для последних лет согласуются с этими оценками, причем суммарные площади пожаров остаются на уровне многолетних максимумов. В течение последних 17 лет наблюдается тренд увеличения числа регистрируемых пожаров растительности и повреждаемых огнем площадей. Такая динамика определяется как повышением уровня антропогенного влияния и изменением режима ведения лесного и сельского хозяйства (Ivanov, Ponomarev, 2012), так и возможными климатическими изменениями. В частности, отмеча-

ется, что при сравнении долговременных метеорологических параметров и количества пожаров на территории Сибири наблюдается высокая корреляция с ходом температурной кривой (Швиденко и др., 2011; Ponomarev et al., 2012).

МЕТОДЫ

В настоящей работе объектами исследования были пожары растительности, детектируемые со спутников как термически активные зоны. Используемый банк данных содержит информацию за пожароопасные периоды 1996–2012 гг. Материалы были получены при непосредственной ежедневной обработке данных спутниковых съемок с NOAA/AVHRR (с 1996 г.) и Terra/MODIS (с 2007 г.), выполняемых в Центре коллективного пользования Красноярского научного центра СО РАН Институтом леса СО РАН.

Рассматриваемый район исследований охватывает большую часть азиатской России и ограничен на западе Уральскими горами, а на востоке в зону мониторинга не входят только Чукотка и Камчатка. В широтном направлении – вся территория от южной границы до побережья Северного ледовитого океана.

Используемая в работе база данных содержит порядка 2×10^4 записей за год, за весь период наблюдений анализируются 3.4×10^5 записей. К атрибутивным параметрам, на основе которых был проведен анализ, отнесены данные о площади термически активной зоны, площади полигона пожара, вычисленной средствами географических информационных систем (ГИС), координаты центров полигонов, кратность регистрации, а также совокупная длительность детектирования объекта (от момента обнаружения до момента последней регистрации термически активной зоны). Таким образом, используемый массив выборки удовлетворяет условиям проведения статистического анализа, а длительность рассмотренного ряда (17-летний период) позволяет характеризовать общие закономерности пожарных режимов и их повторяемости на территории Сибири.

Алгоритм обнаружения термически активных зон основан на определении соотношения между значениями радиационной температуры участка поверхности (пиксела), измеренной спутниковым радиометром, и заданного порогового значения. Величина порога рассчитывается на основании средней температуры фона и ее среднеквадратичного отклонения в окрестности потенциального очага пожара с учетом эмпирически определенных числовых коэффициентов. Подобный подход к обнаружению термически активных зон широко применяется во многих альтернативных алгоритмах обнаружения пожаров, например в алгоритме

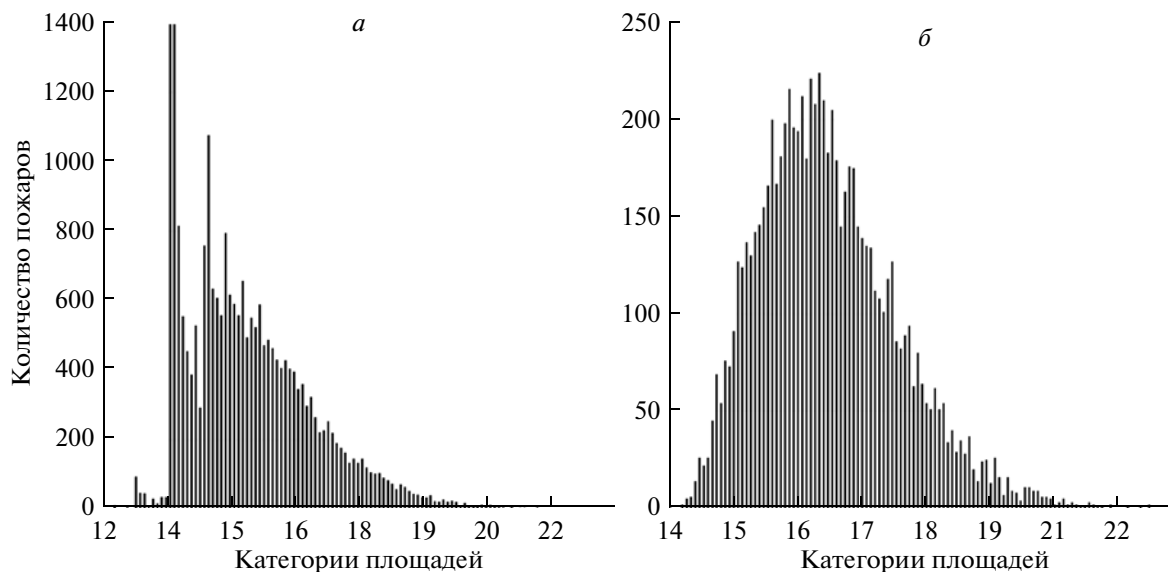


Рис. 1. Пример гистограммы распределения событий лесных пожаров по площадям в 2012 г.: *a* – с учетом всех термически активных зон (23707 записей); *б* – при исключении “короткоживущих” объектов, зафиксированных спутниковыми средствами однократно в весенний период (7894 записей).

FIRMS/NASA (Fire Information for Resource Management System) (Kaufman, Justice, 1998; Giglio et al., 2003).

Основной инструмент проведения исследований – геопространственный, временной и гистограммный анализы распределения термически активных зон и сопряженный анализ этой информации с материалами многоспектральной спутниковой съемки. Дополнительная калибровка и валидация данных проводится с использованием съемки среднего пространственного разрешения Landsat и SPOT.

Данные спутникового мониторинга после проведения процедуры обработки сравнивались с материалами альтернативных ресурсов (таких, как данные Рослесхоза, NASA) посредством корреляционного анализа.

На основе анализа вариограмм с использованием подхода геопространственной интерполяции (метод кригинга) (Матерон, 1968) получены данные о пространственном распределении уровня воздействия крупных и экстремально крупных пожаров на лесные территории. Результат получен в формате векторных полигональных ГИС-покрытий, калиброванных по уровню воздействия на рассматриваемую территорию.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

“Короткоживущие” объекты в базе данных пожаров

Статистический анализ экспериментальных данных, включая геопространственный, может

быть выполнен для распределения, имеющего случайный характер и подчиняющегося закону распределения Гаусса (Отнес, Эноксон, 1982). В работе анализировались экспериментальные данные о количественных характеристиках пожаров, представляющие собой, в частности, двумодальные распределения (рис. 1*a*), которые требуют дополнительной предобработки перед применением статистических методов.

В общей базе данных был реализован запрос, исключающий обработку выделенных нами “короткоживущих” объектов. Такие объекты были внесены в базу данных, при этом фиксировались однократно и не были отмечены в результате первого анализа исключая “ложные тревоги”. Данная процедура позволила получить распределение оставшейся части данных близкое к нормальному (рис. 1*б*), что обосновало использование статистических методов в анализе.

Выделенная из базы данных категория “короткоживущих” объектов представляет собой записи о пожарах, зафиксированных на нелесных территориях. После дополнительного обследования с привлечением съемки среднего пространственного разрешения эти территории классифицированы как земли с.-х. назначения, а пожары на этих землях отнесены к с.-х. палам. Идентификация этой категории пожаров подтверждается сроками регистрации, продолжительностью горения, а также пространственной приуроченностью.

Выделенный класс “короткоживущих” объектов встречается ежегодно за период 1996–2012 гг. Установлено, что количество таких объектов в ба-

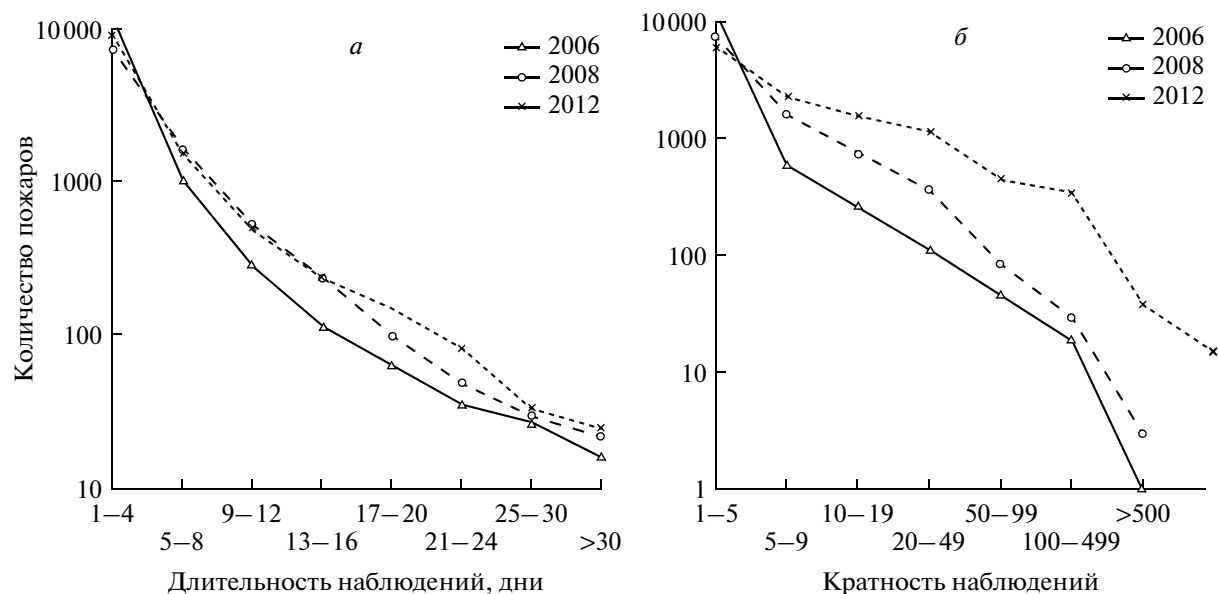


Рис. 2. Гистограмма распределения событий пожаров за разные годы: а – по длительности наблюдения; б – кратности наблюдения без учета категории пожаров, отнесенных к “короткоживущим” объектам.

зе данных за указанный период варьирует на уровне 45–65% по числу регистрируемых пожаров, а площадь может составлять до 30%. Например, в 2012 г. более 50% пожаров были зафиксированы спутниковыми методами однократно, так что статистика площадей пожаров на с.-х. землях составила 15% от итоговых значений за год. Срок регистрации объектов данной категории – весенний период (март–вторая декада мая). На основе сопряженного анализа, проведенного для выборочных объектов указанной категории, с данными спутниковой съемки среднего пространственного разрешения (SPOT и Landsat) подтверждено, что большая часть таких возгораний располагается в степной и лесостепной зонах, на территориях с.-х. назначения, а также в долинных природных комплексах лесостепной зоны.

Характерный размер “короткоживущих” объектов составляет 280 га, а варьирование площади наблюдается в диапазоне от 25 до 800 га. Эти величины согласуются с характерными размерами с.-х. угодий. Ограничения технического плана, в частности, пространственное разрешение (1000 м) аппаратуры, работающей в тепловом диапазоне, не позволяет достоверно фиксировать площадь малоразмерных термически активных зон. Это ограничение особенно значимо при детектировании малоразмерных пожаров в лесах. В рассматриваемом случае калибровка итоговой статистики с учетом выявленной категории пожаров существенно повышает достоверность результатов спутникового мониторинга.

Проведена оценка уровня завышения итоговых площадей (рис. 3) на основе результатов классификации пожарной базы данных. Полученный показатель варьирует в диапазоне 3.8–5.9 млн га, составляя в среднем за 17-летний интервал наблюдений величину более 4 млн га/год. При этом необходимо учесть, что используемый алгоритм и оборудование могут приводить к пятикратному завышению фиксируемой площади горящего полигона в отдельных случаях.

Крупные и экстремально крупные лесные пожары

Противоположный класс объектов в базе данных спутникового мониторинга составляют пожары, развивающиеся на площадях 2000 га и более, которые согласно современной классификации относятся к крупным или экстремально крупным пожарам (Валендик, 1990; Иванов и др., 2011; Андреев, Брюханов, 2011). Пожары этой категории возникают и развиваются в труднодоступных районах, на лесных территориях, мониторинг которых ведется в основном с привлечением спутниковых средств.

В соответствии с результатами долговременного спутникового мониторинга установлено, что до 90% площадей всех пожаров в год есть результат воздействия экстремально крупных лесных пожаров. Анализируя варьирование числа крупноразмерных пожаров на территории Сибири, можно отметить, что в первом приближении присутствует линейный тренд увеличения количества таких пожаров. Если рассматривать количество крупноразмерных пожаров как характери-

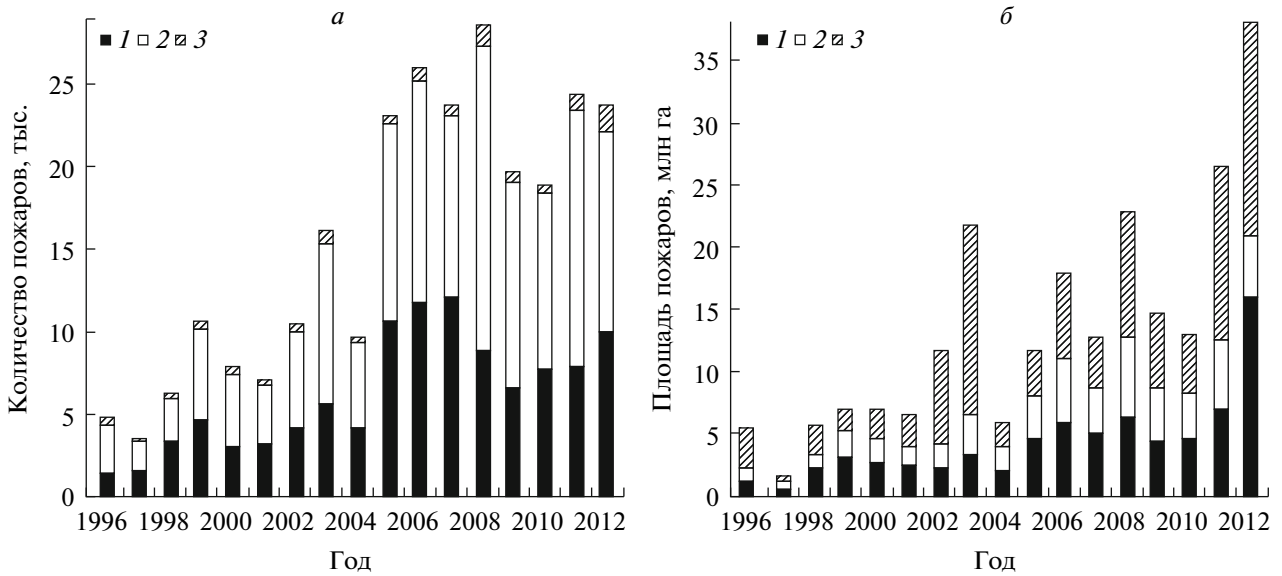


Рис. 3. Соотношение зарегистрированных пожаров по категориям: 1 – пожары промежуточных категорий; 2 – “короткоживущие” объекты; 3 – крупные пожары: а – количество пожаров, б – суммарные площади пожаров.

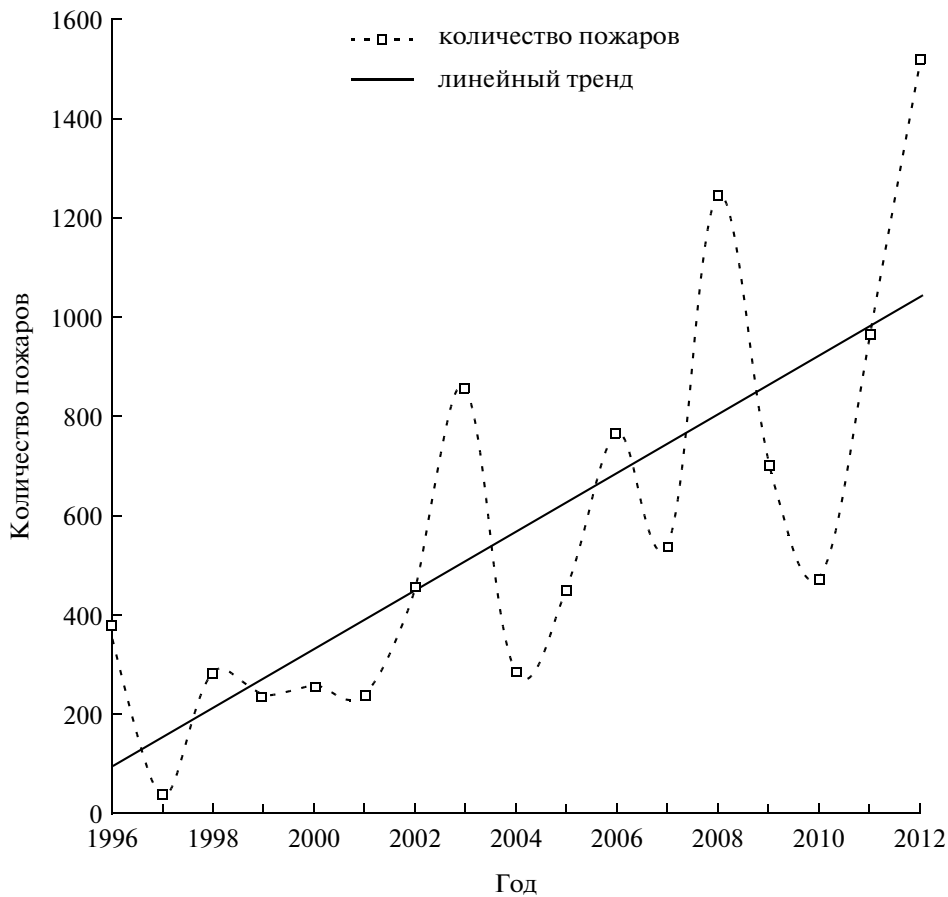


Рис. 4. Вариация числа экстремально крупных пожаров (итоговая площадь гарей более 2000 га) на территории азиатской части России за период 1996–2012 гг.

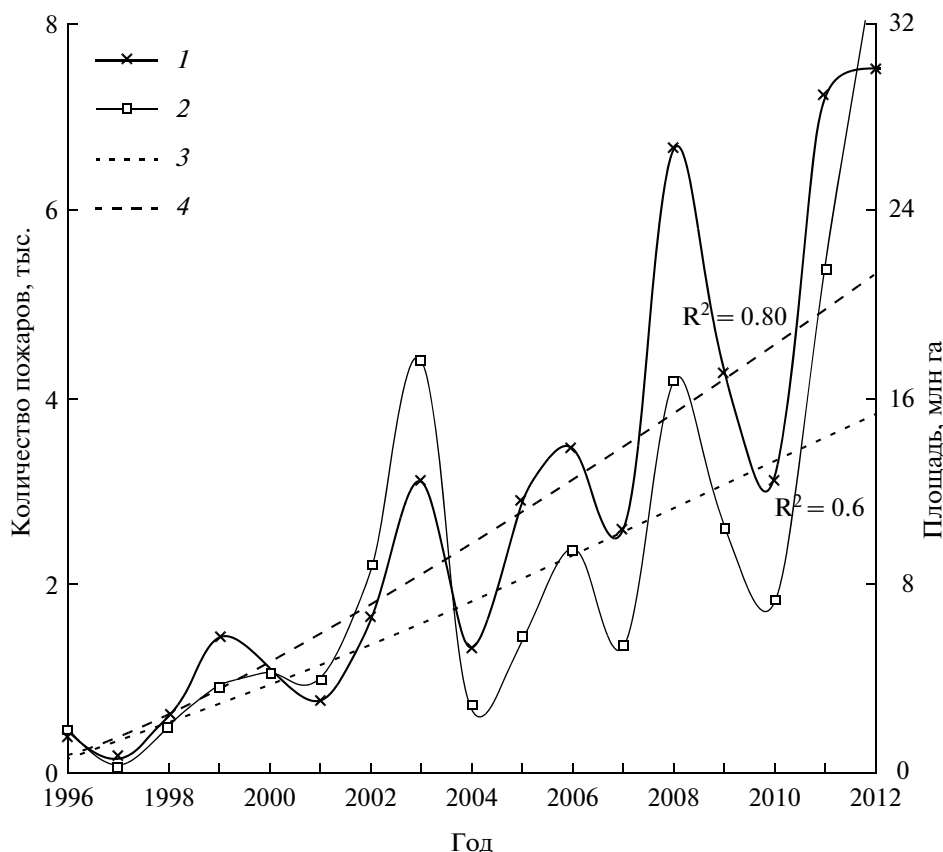


Рис. 5. Статистика природных пожаров, зафиксированных спутниковыми методами на территории азиатской части РФ: 1 – количество пожаров; 2 – общая площадь; 3, 4 – степенные тренды для площади и количества соответственно.

стику напряженности пожарных сезонов, то можно сделать вывод о периодичности их повторения на территории Сибири каждые 3–5 лет (рис. 4).

Можно выделить два периода: 1996–2001 гг. с количеством экстремально крупных пожаров 40–378, и период 2002–2012 гг., когда данный показатель составил 285–1500 пожаров в год.

На основе данных о вариации числа крупных и экстремально крупных пожаров можно отметить, что после пожароопасного сезона 2001 г. наблюдается скачкообразное увеличение количества таких пожаров, при этом среднее за год число возросло с 200 до 750. Данный факт, по нашему мнению, не может быть отнесен к техническим или методическим особенностям проведения спутниковой регистрации пожаров, так как речь идет об объектах, детектируемых с высокой вероятностью, многократно и с достаточной точностью оценки площади.

Ранее нами были получены оценки скоростей распространения тактических элементов пожара (скорости фронта, фланга и тыла) для выборки наиболее крупных пожаров в Сибири (Пономарев, Иванов, 2012). При этом установлена экстремаль-

но высокая (до 300 м/ч) скорость продвижения фронта пожара. По порядку величины это может соответствовать предельному случаю развития верхового пожара (Доррер, 2008; Валендик, 1990). Согласно анализу базы данных спутникового мониторинга пожаров в ГИС, крупные пожары детектируются как серия полигонов, соответствующих термически активным зонам, которые в свою очередь являются результатами возникновения новых очагов горения предположительно от перебросов горящих частиц. Итоговый полигон пожара в среднем формируется из 50–100 отдельных наблюдений, а кратность наблюдений спутниковыми методами крупных пожаров составляет от 30 до 900 раз. Этот факт объясняет присутствие на гистограмме (рис. 2) пожаров соответствующих категорий, а также длительность наблюдения за отдельными случаями пожаров более 30 дней.

Таким образом, основная проблема при обработке данных о крупных и экстремально крупных пожарах заключается в анализе пространственно-временных характеристик серии наблюдений за объектами, развивающимися на больших площадях, сопровождающихся размыканием горячей кромки, возникновением новых очагов в зоне

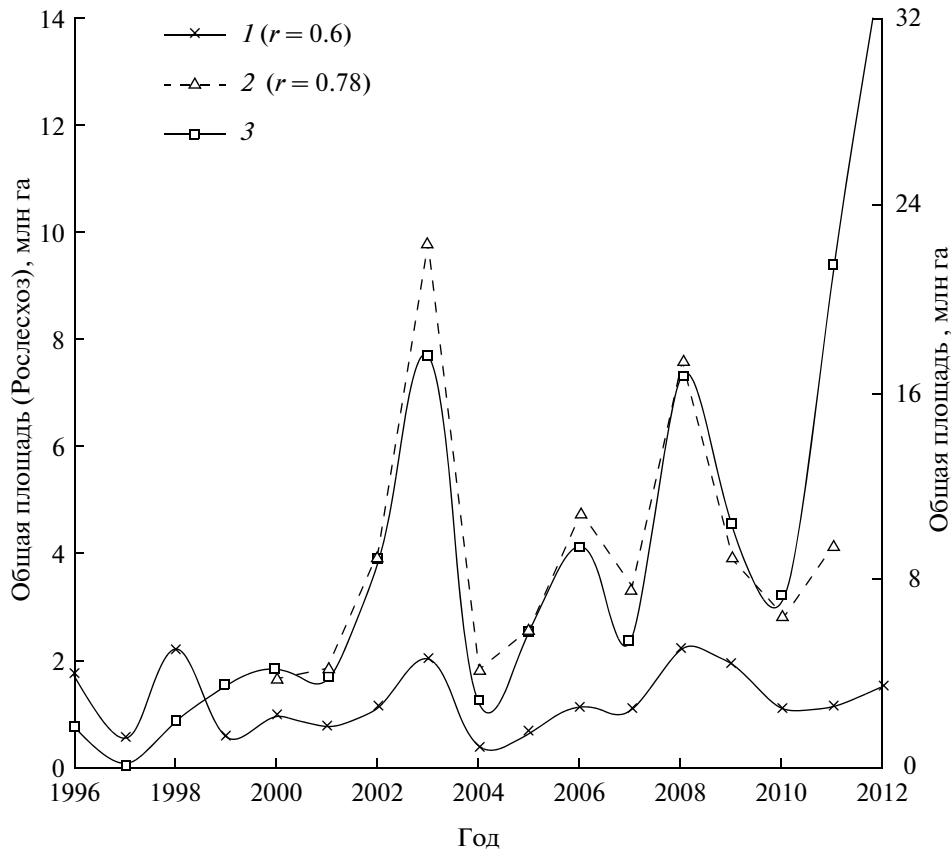


Рис. 6. Корреляционный анализ данных о фиксируемых природных пожарах: 1 – по информации Рослесхоза; 2 – по информации FIRMS/NASA; 3 – по данным Института леса СО РАН. Уровни корреляции (r) приведены в сравнении с результатами Института леса СО РАН.

функционирования пожара или объединением отдельных зон горения в единый полигон. Данная задача решается путем введения временной (время варьируется в диапазоне 3–5 дней) и пространственной (радиус невязки варьируется в диапазоне 250–500 м) буферных зон, на основании которых ведется дополнительная обработка и агрегация полигонов термически активных зон средствами ГИС.

Геопространственный анализ воздействия пожаров

Адаптация метода детектирования спутниковых данных позволила повысить уровень достоверности итоговой статистики площадей пожаров, что подтверждается уровнем корреляции с данными альтернативных источников информации. В финальной статистике (рис. 5) были учтены поправки, связанные с исключением пожаров на землях с.-х. назначения, а также введены некоторые корректировки после дополнительной обработки категории объектов в базе данных, связанных с крупными и экстремально крупными пожарами. Уравнения трендов (рис. 5) в первом

приближении имеют степенной вид ($ax^{1.2}$), величина достоверности аппроксимации 0.62 и 0.80 для числа пожаров и общей площади соответственно. По нашим оценкам, ошибка определения площади крупных пожаров составляет не выше 15%, в то время как для малоразмерных источников (в основном пожаров на землях с.-х. назначения) ошибка может быть пятикратной.

Результат сравнительной характеристики, проведенной на основе статистических данных о пожарах, зафиксированных спутниковыми, авиационными и наземными методами (Рослесхоз), а также альтернативными спутниковыми методиками (NASA) на сопоставимых территориях, включающих субъекты Уральского, Сибирского и Дальневосточного Федеральных округов, представлен на рис. 6. Уровень корреляции между представленными данными ($r = 0.60$ и $r = 0.78$) следует отнести к значимому, что характеризует достоверность оценки динамики горимости территории исследования. В то же время причины различий абсолютных значений требуют серьезного самостоятельного анализа и определяются, по нашему мнению, особенностями формирования итоговой статистики, в частности, включением/не

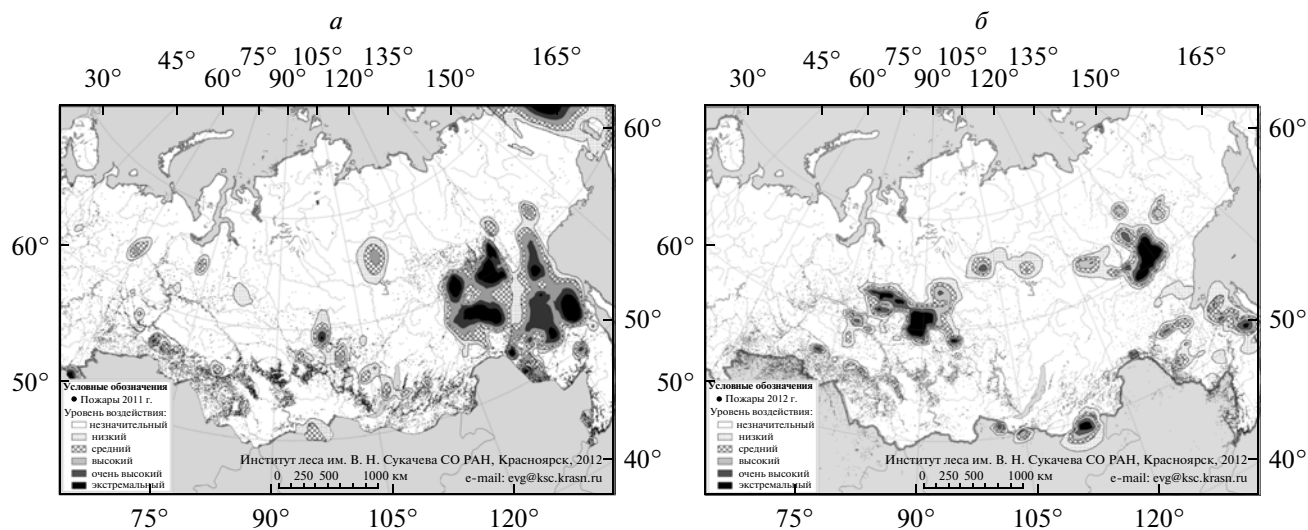


Рис. 7. Сравнение уровней воздействия пожаров растительности в: *а* – 2011 г., *б* – 2012 г. Зафиксированные пожары отмечены точками, заливка полигонов соответствует уровню воздействия крупных пожаров.

включением нелесных или малоразмерных пожаров, возгораний на с.-х. землях, ограничениями технического плана, особым статусом территорий, относимых к зоне спутникового мониторинга и т.д.

Таким образом, среднее значение площади, пройденной пожарами в год за период наблюдений на территории азиатской части России, по данным спутникового мониторинга, составляет до 9 млн га.

Проведен геопространственный анализ приуроченности и повторяемости пожаров различных категорий на территории азиатской части России, согласно описанной выше методике кригинг-интерполяции. Опосредовано данное распределение позволяет характеризовать уровень воздействия пожаров на территорию.

Полученные для отдельных годов периода 2006–2012 гг. пространственные вариации уровня воздействия пожаров растительности на территории представлены в формате векторных полигональных покрытий (рис. 7).

До 70% пожаров, фиксируемых в начале пожароопасного периода, относятся к степной и лесостепной зоне юга Сибири, длительность таких пожаров не превышает 24–48 ч, а площади не превышают 100–200 га. Данная величина площади – порог, определяемый техническими возможностями спутниковой аппаратуры. При этом воздействие от пожаров данной категории по примененной шкале отнесено к наименьшему классу (рис. 7). Основной вклад в статистику пожаров и их влияния следует относить на долю крупных и экстремально крупных пожаров растительности. Пожары данной категории объективно характе-

ризуют напряженность пожароопасного сезона, а уровень воздействия пожаров на территорию может характеризоваться концентрацией наиболее крупных пожаров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе спутникового мониторинга проведен анализ статистических данных о пожарах в Сибири в современных условиях. Результаты проведенного анализа и процедура классификации базы данных спутникового детектирования пожаров растительности позволили адаптировать итоговую статистику о пожарах на территории Сибири и азиатской части России. Процедура такого рода, выполняемая в оперативном режиме, существенно повышает информативность и достоверность результатов обработки спутниковых данных на этапе, когда техническое усовершенствование средств мониторинга еще не реализовано либо не вошло в оперативную практику.

В современных условиях на территории Сибири до 90% общих площадей, пройденных огнем, приходится на экстремально крупные пожары, которые составляют около 5% общего числа пожаров растительности.

В общей базе данных спутникового мониторинга за период 1996–2012 гг. выделена категория “короткоживущих” объектов, фиксируемых спутниковыми методами однократно, которые отнесены к с.-х. палам. Суммарная площадь таких пожаров составляет от 15 до 30% территорий, пройденных огнем в отдельные годы. Эта категория критически важна при подсчете итоговых статистик горимости. Категория пожаров, относящиеся к крупным или

экстремально крупным, определяет уровень напряженности пожароопасного сезона.

Построенный долговременный ряд (2006–2012 гг.) пространственной вариации зон концентрации крупных пожаров позволяет оценить фактическую лесопожарную ситуацию в течение сезона. Кроме того, могут быть прослежены закономерности повторяемости крупных пожаров, а вместе с тем возможен прогноз развития пожароопасной ситуации с учетом метеорологических факторов. Формирование условий для возникновения крупных и катастрофических пожаров определяется антициклоническими процессами континентального масштаба, а основой для мониторинга в таких масштабах безальтернативно является система спутникового наблюдения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности, а также проектов NASA (№10-05-043) и USDA Forest Service (№ 10-IC-11132762-208).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреев Ю.А., Брюханов А.В.* Профилактика, мониторинг и борьба с природными пожарами (на примере Алтае-Саянского экорегиона). Красноярск, 2011. 272 с.
- Барталев С.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Лурия Е.А., Стыценок Ф.В., Флитман Е.В.* Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-ТМ/ЕТМ+ // Современ. пробл. дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 9–26.
- Бондур В.Г.* Космический мониторинг природных пожаров в России в условиях аномальной жары 2010 г. // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 3. С. 3–13.
- Валендик Э.Н.* Борьба с крупными пожарами. М.: Наука, 1990. 193 с.
- Доррер Г.А.* Динамика лесных пожаров. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 404 с.
- Иванов В.А., Иванова Г.А., Москальченко С.А.* Справочник по тушению природных пожаров. Проект ПРООН/МКИ. Красноярск, 2011. 130 с.
- Матерон Ж.* Основы прикладной геостатистики. М.: Мир, 1968. 407 с.
- Отнес Р., Энксон Л.* Прикладной анализ временных рядов. Основные методы. М.: Мир, 1982. 428 с.
- Пономарев Е.И., Иванов В.А.* Спутниковый мониторинг динамики экстремальных пожаров // Хвойные бореальной зоны. 2012. Т. XXXI. № 3–4. С. 307–311.
- Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г., Ваганов Е.А., Сухинин А.И., Максюттов Ш.Ш., МкКаллум И., Лакида И.П.* Влияние природных пожаров в России 1998–2010 гг. на экосистемы и глобальный углеродный бюджет // Докл. РАН. 2011. Т. 441. № 4. С. 544–548.
- Conard S.G., Sukhinin A.I., Stocks B.J., Cahoon D.R., Davidenko E.P., Ivanova G.A.* Determining effects of area burned and fire severity on carbon cycling and emissions in Siberia // Clim. Change. 2002. V. 55. № 1–2. P. 197–211.
- Giglio L., Descloitres J., Justice C.O., Kaufman Y.J.* An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS // Rem. Sens. Environ. 2003. V. 87. P. 273–282.
- Ivanov V.A., Ponomarev E.I.* Analysis of actual fire occurrence in the Altai-Sayan ecoregion and its protected areas // Fire danger mitigation: a strategy for protected areas of the Altai-Sayan ecoregion / Eds. A.A. Onuchin, A.S. Shishikin. Krasnoyarsk, 2012. P. 4–25.
- Kaufman Y.J., Justice C.O.* MODIS ATBD: Fire Products (Ver. 2.2. Nov. 10, 1998) // EOS ID#2741. 1998. 77 p.
- Loupian E.A., Mazurov A.A., Flitman E.V., Ershov D.V., Korovin G.N., Novik V.P., Abushenko N.A., Altyntsev D.A., Koshchelev V.V., Tashchilin S.A., Tatarnikov A.V., Csiszar I., Sukhinin A.I., Ponomarev E.I., Afonin S.V., Belov V.V., Matvienko G.G., Loboda T.* Satellite monitoring of forest fires in Russia at federal and regional levels // Mitigat. and Adapt. Strat. Glob. Change. 2006. V. 11. № 1. P. 113–145.
- Panov A., Chi X., Winderlich J., Birmili W., Lavrič J., Ponomarev E., Andreae M.* Assessment of biomass burning emissions to the atmosphere from the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO) in Central Siberia // Int. Workshop on Impact of Climate Change on Forest and Agricultural Ecosystems and Adaptation Strategies. Krasnoyarsk: Siber. St. Univ., 2012. P. 41.
- Petkov A., Wei Min Hao, Nordgren B., Corley R., Urbanski S.P., Ponomarev E.I.* Evaluating the accuracy of a MODIS direct broadcast algorithm for mapping burned areas over Russia // AGU Ann. Meet.: NEESPI Session. Vienna, 2012.
- Ponomarev E.I., Valendik E.N., Kisilyakhov Y.K.* Satellite monitoring of large scale wildfires in Siberia // Int. Workshop on Impact of Climate Change on Forest and Agricultural Ecosystems and Adaptation Strategies. Krasnoyarsk: Siber. St. Univ., 2012. P. 24.
- Soja A.J., Sukhinin A.I., Cahoon Jr. D.R., Shugart H.H., Stackhouse P.W.* AVHRR-derived fire frequency, distribution and area burned in Siberia // Int. J. Rem. Sens. 2004. V. 25. № 10. P. 1939–1960. doi:10.1080/01431160310001609725.
- Sukhinin A.I., Kashkin V.B., Ponomarev E.I.* Monitoring of forest fires in Eastern Siberia from space // Proc. SPIE. 1999. V. 3983. P. 206–214.
- Sukhinin A.I.* Space monitoring and analysis of catastrophic fires in Central Siberia and Far East // North-East Asia, A la Carte. Center for North-East Asian Studies. Tohoku Univ., 2008. V. 19. P. 19–23.

Characteristics of Vegetation Fire Categories in Siberia, According to Satellite-Based and other Observations

E. I. Ponomarev, E. G. Shvetsov

V.N. Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk

The results of pre-processing of satellite detected wildfires database are presented for 1996–2012. The results of wildfire characteristics analysis over Siberia are discussed. “Short-living” wildfires objects have been classified as well as large-scale wildfires category. The contribution of selected categories of fires into the summary statistics was estimated. Analysis of the spatial distribution and the impact of large-scale fires on forest vegetation were produced for the territories of Siberia.

Keywords: satellite remote sensing, database, hot spot, wildfire, geospatial analysis

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ
КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ЭКРАНОЗЕМОВ МОСКОВСКОЙ
АГЛОМЕРАЦИИ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ LANDSAT

© 2013 г. И. Ю. Савин

*Почвенный институт им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, Москва
Аграрный факультет Российского университета дружбы народов, Москва*

E-mail: savigory@gmail.com

Поступила в редакцию 10.03.2013 г.

Использование метода последовательной классификации с обучением позволило осуществить дешифрирование экраноземов по спутниковым данным Landsat. Оказалось, что площадь данных почв в некоторых районах Подмосковья достигает 10–20%. Анализ изменений площади экраноземов в районе г. Москва по спутниковым данным Landsat за период с 1986 по 2011 гг. позволил выявить регионы, где почвенный покров претерпел наиболее значительные изменения за счет увеличения площади экраноземов. Полученные результаты могут служить основой для корректировки и обновления почвенных карт, а также для моделирования антропогенного воздействия на почвенный покров и его последствий для окружающей среды.

Ключевые слова: Landsat, городские почвы, экраноземы, Московская агломерация

DOI: 10.7868/S0205961413050084

ВВЕДЕНИЕ

Почвенный покров Земли в значительной мере изменен человеком. Насчитывается 12 видов деградации почв, которая провоцируется антропогенным воздействием (Oldeman et al., 1991). По данным международного проекта изучения антропогенной деградации земель мира GLASOD, около 15% всех почв в настоящее время в той или иной степени деградировано. По данным Государственной почвенно-географической базы данных России деградированные почвы занимают около 14.5% всей территории страны (Столбовой и др., 1999).

Деградация почв ведет к изменению или полному уничтожению многих важных функций почв, среди которых наиболее существенное значение имеют функции почвенного плодородия и поддержания экологического равновесия в биосфере. Значительная нарушенность этих функций ведет к проблемам с производством с.-х. продукции и ухудшением экологической обстановки.

В наибольшей степени нарушены почвы городов. Причем нарушения носят разный характер. Одним из наиболее распространенных типов нарушенности городских почв является их “запечатанность” (Прокофьева, 1998). Под “запечатанностью” почв понимают срезание их верхних горизонтов и покрытие оставшейся части профиля почв асфальтом или строениями. В результате

почвы теряют как свое плодородие, так и экологические функции, поскольку в этом случае нарушаются процессы энерго- и массообмена почвы с атмосферой. Подобные запечатанные почвы называют экраноземами. Площади этих почв в городах могут достигать десятки процентов (Синцов, Бармин, 2011).

Для картографирования и мониторинга подобных почв наиболее оптимальным выглядит использование данных дистанционного зондирования (ДЗ) Земли, так как теоретически застроенные территории обычно достаточно легко выделяются на космических изображениях визуально. Предложено достаточно много спектральных индексов, на основе которых предлагается выделять урбанизированные территории (в большой степени аналог экраноземов) (Stathakis, 2011; Статакис и др., 2012). Но практически все предложенные подходы региональны, или же не дают точности, достаточной для организации многолетнего спутникового мониторинга площадей подобных почв.

Целью данной статьи было картографирование экраноземов самой большой городской агломерации России – Московской, – на основе анализа изображений, полученных со спутника Landsat (<http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/landsat5.html>).

Таблица 1. Основные характеристики сканера Landsat TM

Номер канала	Спектральный диапазон, мкм	Пространственное разрешение, м	Полоса обзора, км	Повторяемость съемки одной территории, сут
1	0.45–0.515	30	185	16
2	0.525–0.605	30		
3	0.63–0.690	30		
4	0.75–0.90	30		
5	1.55–1.75	30		
6	10.40–12.5	120		
7	2.09–2.35	30		

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ

В настоящее время в Московскую агломерацию входит более 70 городов. Некоторые из них имеют население более 100 тыс. человек и имеют свои микроагломерации. Население территории Московской агломерации (в зоне в радиусе 70 км от московской кольцевой автодороги (МКАД)) оценивается в 14.5–17.4 млн чел. (Лаппо и др., 2010), а плотность населения превышает 1000 чел. на км² (Глушкова, 1992).

Московская агломерация сформировалась достаточно давно. В советское время процесс ее развития был сильно зарегулирован административными барьерами. Но после распада СССР многие барьеры для развития были устранены и за последние 20–30 лет в развитии Московской агломерации произошли достаточно большие изменения. В настоящее время зонами сплошной застройки или строительства по некоторым направлениям от Москвы почти непрерывно покрыты десятки километров. Реализуется ряд проектов, связанных с формированием городов-спутников Москвы (Домодедово, Константиново). Планируется, что количество вновь построенных городов в Московской агломерации может достигнуть 12. Знаковым стало решение правительства Московской области (МО) о строительстве в Подмоскovie линий метрополитена, вписанное в генеральный план развития области. Наиболее сильный толчок развитию агломерации должны дать присоединение к Москве новых территорий и их развитие в ближайшие десятилетия. Москва является мировым городом второго порядка в качестве центра культуры, науки, банковской деятельности (Саломаткин, 1995). Благодаря этому Московская агломерация имеет дальнейшие большие перспективы для своего развития в отличие от многих агломераций страны, возникновение которых было в

основном связано с развитием исключительно промышленного производства.

Картографирование экраноземов Московской агломерации было осуществлено на основе анализа изображений, полученных со спутника Landsat TM 5. Основные характеристики съемочной аппаратуры данного спутника представлены в табл. 1.

Анализ архива спутниковых данных на сайте <http://glovis.usgs.gov/> показал, что на территорию Московской агломерации за все время съемок данным спутником доступно лишь шесть–семь полностью безоблачных сцен. Для анализа были выбраны сцены, полученные 28.08.2011 г. и 07.08.1986 г. Таким образом, территория исследований была ограничена одной сценой Landsat (рис. 1).

Для решения задач дешифрирования экраноземов в данной географической зоне более оптимальными могли бы быть сцены, полученные в октябре, но практически все сцены этого периода съемки оказались с облаками.

Атмосферная коррекция отобранных изображений для исключения влияния дымки и запыленности атмосферы была проведена по методу SMAC (Rahman, Didieu, 1994).

Точность географической привязки сцен Landsat оценивается на основе набора реперных точек (около 2000 точек на сцену). Для сцены 28.08.2011 г. стандартное отклонение составило 0.162 пиксела при RMSE = 0.234, для сцены 07.08.1986 г. соответственно стандартное отклонение 0.171 и RMSE = 0.239.

Для выделения экраноземов использовался метод пошаговой классификации с обучением. Обучающие выборки формировались с использованием трех каналов съемки (1, 3 и 7), использование которых оказалось наиболее информативным. В

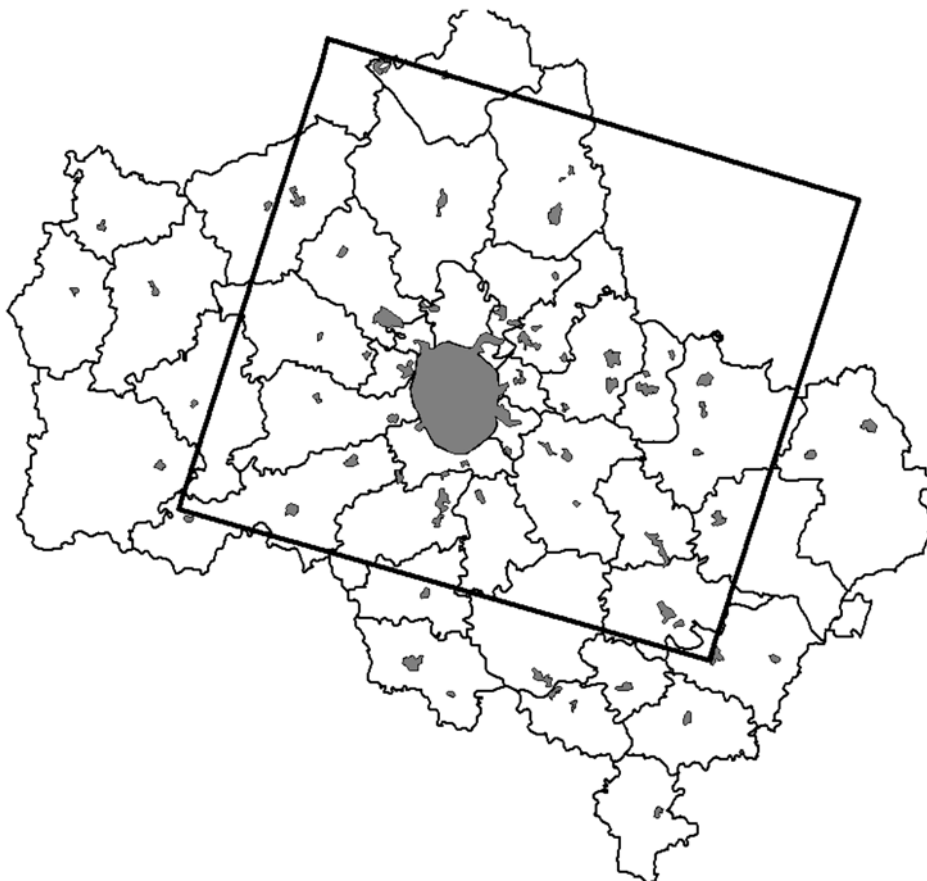


Рис. 1. Регион исследований (серым цветом обозначены основные населенные пункты, тонкие черные линии – границы административных районов (до расширения Москвы), толстая черная линия – регион исследований).

качестве решающего правила использовался метод максимального сходства. Обучающая выборка для класса экраноземов на первом этапе анализа создавалась с большим припуском, – таким образом, чтобы в этот класс попали все экраноземы, а также другие объекты, схожие с ними по спектральным характеристикам (в основном открытая поверхность почв). После этого все другие выделяемые классы наземного покрова (вода, леса, кустарники, луга, болота, с.-х. культуры) маскировались, и на втором этапе строилась новая обучающая выборка для классификации внутри “грязного” класса экраноземов, полученного на первом этапе классификации. Затем данная процедура повторялась несколько раз с целью пошаговой ректификации дешифрируемого класса экраноземов. В результате подобного подхода была получена бинарная карта экраноземов для изображения 2011 г.

Для проверки точности классификации случайным образом была создана выборка точек на территорию исследований, для которых по данным космической съемки высокого разрешения определялся объект, на который они попадают (экрanoземы или другие классы наземного покрова). Для этого были использованы фрагменты

изображений Quickbird за 2009–2010 гг. на отдельные участки территории исследований, после чего эти точки были наложены на результат классификации экраноземов 2011 г. и была оценена точность проведенной классификации.

Далее подобная же процедура была осуществлена для спутниковой сцены 1986 г. После наложения результатов дешифрирования для этих двух сроков была получена карта изменений, произошедших в распространении экраноземов за период с 1986 по 2011 г.

Результаты анализа изменений были интегрированы на уровень административных районов МО с использованием ГИС “Почвы Московской области” (Савин и др., 2002).

Весь анализ был осуществлен с использованием пакета прикладных программ ILWIS v.3.3 (<http://www.ilwis.org/>).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты классификации экраноземов по изображению 2011 г. представлены на рис. 2. Матрица ошибок классификации приведена в табл. 2.

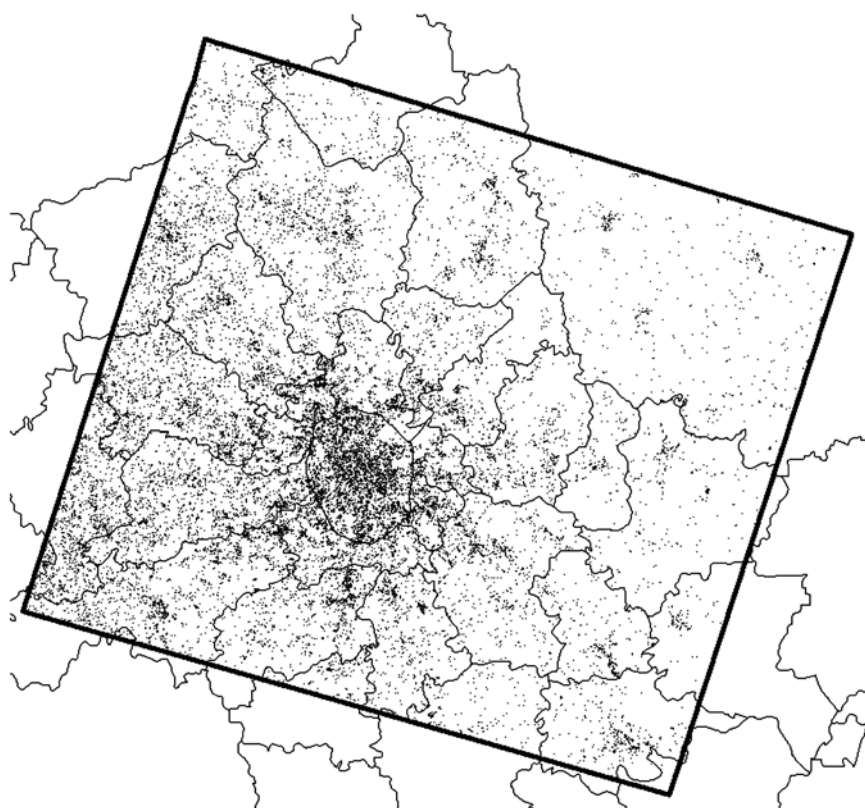


Рис. 2. Результат дешифрирования экраноземов (черные пиксели) по спутниковому изображению 28.08.2011 г.

В соответствии с данными табл. 2 общая точность классификации составляет около 97%. В этой оценке, конечно же, решающая роль принадлежит большому объему точек других классов. Однако точность пользователя также близка к этой величине (97%), а точность продюсера составляет 90%, т.е. величина ошибки пропуска данных для класса экраноземов составляют около 10%, а ошибки переклассификации – около 3%. Таким образом, результаты классификации можно признать вполне удовлетворительными.

Распределение площадей экраноземов в разрезе некоторых административных районов МО и Москвы (в пределах МКАД), которые целиком или частично находятся в пределах региона исследований, показано в табл. 3.

Из табл. 3 следует, что доля площади экраноземов в некоторых районах области от общей площади района превышает 10%, а в Москве, в пределах МКАД, она в 2011 г. превышала 30%.

Достаточно большие площади экраноземов в Московской агломерации требуют их отражения на почвенных картах. Традиционно на почвенных картах среднего масштаба отражаются преобладающие почвы, а сопутствующие показываются (условными знаками или индексом) в случае, когда их площадь в почвенно-картографическом выделе превышает 10% (Составление..., 1990). Иными словами, в случае с экраноземами, если они не образуют ареалов, которые могут быть показаны на карте в виде отдельного контура, их присутствие должно быть отражено на карте, если их площадь в почвенно-кар-

Таблица 2. Матрица ошибок классификации экраноземов

Выборка точек по данным высокого разрешения	Landsat			
	—	экрanoземы	другой класс	сумма
экрanoземы		144	16	160
другой класс		5	561	566
сумма		149	577	726

Таблица 3. Доля площади экраноземов от площади административного района МО (в границах до расширения Москвы) по изображениям 1986 и 2011 гг.

Район	1986 г.	2011.	Прирост
Балашихинский	8.70	12.68	3.98
Воскресенский	2.30	2.98	0.68
Дмитровский	3.08	5.00	1.92
Домодедовский	3.82	6.06	2.24
Егорьевский	0.39	0.47	0.07
Истринский	5.66	9.69	4.03
Клинский	2.11	3.60	1.49
Коломенский	1.79	2.43	0.64
Красногорский	9.34	15.37	6.03
Ленинский	8.68	14.96	6.28
Люберецкий	12.91	18.69	5.78
Можайский	0.83	1.47	0.65
Москва (в пределах МКАД)	20.53	31.04	10.51
Мытищинский	6.35	9.66	3.32
Наро-Фоминский	3.45	5.97	2.53
Ногинский	2.99	4.24	1.25
Одинцовский	6.42	10.47	4.05
Орехово-Зуевский	0.91	1.21	0.30
Павлово-Посадский	1.41	1.84	0.43
Подольский	4.09	6.65	2.55
Пушкинский	3.61	5.47	1.86
Раменский	3.17	4.73	1.57
Рузский	3.71	6.57	2.87
Сергиев-Посадский	1.59	2.40	0.81
Солнечногорский	4.93	7.88	2.95
Ступинский	0.61	0.96	0.35
Талдомский	1.02	1.59	0.56
Химкинский	15.32	23.59	8.27
Чеховский	0.71	1.19	0.48
Щелковский	2.95	4.02	1.07

тографическом выделе более 10%. Наложение на результаты дешифрирования выделов почвенной карты Московской области (Савин и др., 2002) (рис. 3) показывает, что для 22% всех выделов почвенной карты экраноземы, как минимум, должны быть указаны в качестве сопутствующих почв.

Дешифрирование экраноземов по изображению 1986 г. дает возможность проследить изменения, которые произошли в распространении экраноземов за последние 25 лет. Дешифрирование было осуществлено по данным одного сенсора и с использованием аналогичного подхода. Ре-

зультаты показаны на рис. 4 и в табл. 2. Согласно полученным данным, доля экраноземов с 1986 г. увеличилась практически во всех районах МО. В наибольшей степени произошло увеличение в районах, непосредственно прилегающих к МКАД. В пределах МКАД доля экраноземов за период с 1986 по 2011 г. возросла на треть и превысила 31%. Конечно же, при подобном анализе изменений необходимо учитывать точность дешифрирования экраноземов. Поэтому указанная разница в площадях последних, полученная для большинства районов области, остается статистически не

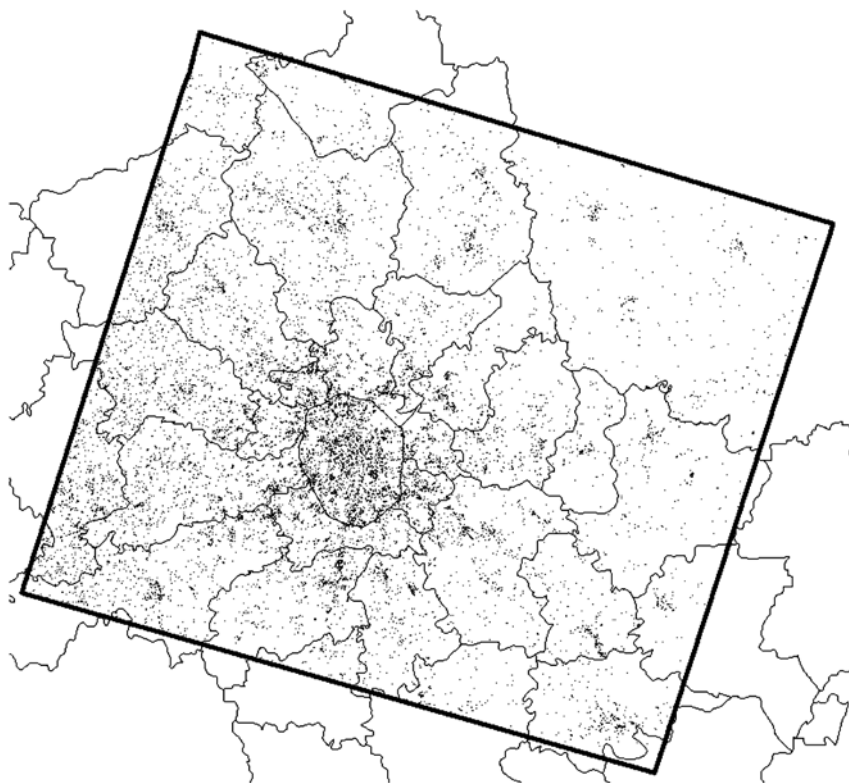


Рис. 3. Результат дешифрирования экраноземов (черные пиксели) по спутниковому изображению 07.08.1986 г.



Рис. 4. Пиксели экраноземов (черные) и выделы традиционно составленной почвенной карты (черные линии) (пример для одного из участков территории исследований).

доказанной. Тем не менее, для выявления территорий, где площади экраноземов увеличиваются более чем на 10%, разработанный подход вполне может быть применим.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получаемая информация может и должна быть использована для обновления почвенных карт региона. Новая классификация почв (Классификация ..., 2004) предполагает отражение на почвенных картах антропогенно-преобразованных почв, но до настоящего времени отсутствуют надежные подходы к картографированию этих почв. Предложенный подход позволяет дешифрировать ареалы одной из разновидностей этих почв — экраноземов.

Использование спутниковых данных Landsat позволяет дешифрировать экраноземы в условиях Московской агломерации с ошибкой, не превышающей 10%.

Результаты дешифрирования показали, что в отдельных районах МО доля экраноземов достигает 10% и более, а около 22 выделов почвенной карты области нуждается в обновлении в плане отражения экраноземов и их локализации.

Существующий архив спутниковых данных Landsat с 1984 г. открывает возможности не только для картографирования экраноземов, но и для слежения за изменением их площадей во времени.

Предложенные подходы могут быть использованы для картографирования экраноземов и для других городских агломераций, расположенных в схожих природно-географических условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Глушкова В.Г. Московская агломерация. М.: Большая российская энциклопедия. 1992.

Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 343 с.

Лаппо Г., Полян П., Селиванова Т. Городские агломерации России // Бюл. Население и общество. 25 января–7 февраля 2010. № 407–408.

Почвы в городе: мифы и реальность / Под ред. Т.В. Прокофьева, М.Н. Строганова // Биология в школе. 2002. № 6. С. 4–9.

Прокофьева Т.В. Городские почвы, запечатанные дорожными покрытиями (на примере г. Москвы). МГУ, 1998. 218 с.

Савин И.Ю., Овечкин С.В., Федорова Е.Г. ГИС “Земельные ресурсы Московской области” и ее использование для анализа ресурсного потенциала земель для сельскохозяйственных целей // Почвы Московской области и их использование. М.: Изд-во Почв. ин-та им. В.В. Докучаева, 2002. Т. 1. С. 416–439.

Саломаткин А.С. Административно-территориальное устройство Российской Федерации (вопросы теории и практики). М.: Манускрипт, 1995. 204 с.

Синцов А.В., Бармин А.Н. Современная классификация почвенного покрова городских территорий // Геология, география и глобальная энергия. 2011. Т. 3. № 42. С. 149–155.

Составление областных среднemasштабных почвенных карт Нечерноземья с показом структуры почвенного покрова (рекомендации). М.: Агропромиздат, 1990. 80 с.

Статакис Д., Перакис К., Савин И.Ю. Дешифрирование урбанизированных территории по спутниковым данным Landsat // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 5. С. 22–28.

Столбовой В.С., Савин И.Ю., Шеремет Б.В., Сизов В.В., Овечкин С.В. Геоинформационная система деградации почв России // Почвоведение. № 5. 1999. С. 646–651.

Oldeman L.R., Hakkeling R.T.A., Sombroek W.G. World map of the status of human-induced soil degradation: an explanatory note. Wageningen: ISRIC: UNEP, 1991. 35 p.

Rahman H., Dedieu G. SMAC: a simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum // Int. J. Rem. Sens. 1994. V. 15. № 1. P. 123–143.

Stathakis D., Perakis K., Savin I. Efficient segmentation of urban areas by the VIBI // Int. J. Rem. Sens. 2011. V. 33. № 20. P. 6361–6377.

Sealed Soils (Ecranozems) Mapping in Moscow Agglomeration Based on Landsat Images

I. Yu. Savin

V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow
Agrarian Faculty, Peoples' Friendship University of Russia, Moscow

Ecranozems were recognized based on Landsat images using step-by-step controlled classification. It was found that ecranozems acreage in some regions near Moscow is near 10–20%. Based on analysis of Landsat data acquired in 1986 and 2011 regions with maximal increase of ecranozems acreage were delineated. The results of the study can be used for soil maps correction and updating, as well as for the modeling of the anthropogenic impact on soil patterns and related consequences for the environment.

Keywords: Landsat images, urban soils, ecranozems, Moscow agglomeration

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ
КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

СПОСОБ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕНЕНИЙ
В ЛЕСАХ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПО РЯДАМ РАЗНОВРЕМЕННЫХ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

© 2013 г. Э. А. Терехин

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Федерально-региональный центр аэрокосмического и наземного мониторинга объектов
и природных ресурсов, Белгород*

E-mail: terekhin@bsu.edu.ru

Поступила в редакцию 14.01.2013 г.

На основе анализа серий многозональных снимков Landsat TM предложен способ картографирования многолетних изменений, происходящих в лесах. Оценку изменений, связанных со сплошнолесосечными вырубками, предполагается проводить на уровне таксационных выделов лесных массивов. В основу способа положено изучение динамики значений спектральной яркости среднего инфракрасного (ИК) диапазона (1.55–1.75 мкм), связанное с изменениями, происходящими в лесах. На примере лесных массивов Белгородской обл. выполнена апробация предложенного способа для картографирования сплошных лесосечных рубок, проводившихся в период с 1986 по 2009 г.

Ключевые слова: лесные насаждения, спутниковые снимки, спектральные яркости, многолетние изменения, Белгородская область

DOI: 10.7868/S0205961413050102

ВВЕДЕНИЕ

Изменения, происходящие в лесах, могут быть связаны с динамикой площадей и структуры лесопокрытых земель территории, в том числе со сплошнолесосечными рубками, лесными пожарами, гибелью древостоев от негативных природных и антропогенных факторов. По данным Рослесхоза, в России в 2011 г. государственными лесными инспекторами было выявлено 21.3 тыс. случаев незаконной рубки лесных насаждений с объемом 1.2×10^6 м³. Площадь лесных пожаров в 2012 г. на 20% превысила показатель прошлого года. В связи с этим приобретает актуальность разработка эффективных способов контроля изменений, происходящих в лесах. При этом ключевым моментом является разработка способов, характеризующихся максимальной степенью автоматизации. Перечисленные выше типы изменений, происходящих в лесах, могут быть успешно дешифрованы визуальным способом по многозональным снимкам высокого пространственного разрешения (Boyd, 2005). Однако визуальный способ в значительной степени субъективен, трудоемок и во многих случаях не позволяет проводить оценку на количественном уровне, что

определяет необходимость разработки автоматизированных способов детектирования изменений.

К настоящему времени по проблеме анализа многолетней динамики в лесах выполнен ряд исследований, связанных с новыми подходами использования классификаций спектральных признаков изображений (Барталев, 2005; Virk, 2006; Karia, 2006; Jupiter, 2008), применения анализа спектральных смесей (Lu, 2004), разностных значений спектральных индексов (Панова, 2005; Kozak, 2007; Барталев, 2010). Для анализа динамики в лесах исследованы также возможности линейных спектральных преобразований каналов спутниковых данных (Franklin, 2002, 2005). Институтом космических исследований (ИКИ РАН) разработан веб-сервис, позволяющий на основе данных MODIS идентифицировать очаги пожаров на региональном уровне. В то же время с лесоэксплуатационной точки зрения актуальной остается необходимость разработки высокодетальных способов, позволяющих оценивать разноплановые изменения, происходящие в лесах, на уровне отдельных лесных массивов, их кварталов и выделов.

В настоящей работе приводятся описание и результаты применения нового способа, основанного на анализе динамики значений спектральной ярко-



Рис. 1. Схема способа автоматизированной оценки многолетних изменений в лесах.

сти среднего ИК-диапазона (1.55–1.75 мкм). Указанный диапазон является информативным для изучения группы биофизических параметров лесных насаждений, что было установлено на основе оценки лесных массивов, типичных для лесостепной провинции Среднерусской возвышенности (Терехин, 2012).

Актуальность подобных исследований обусловлена также тем, что в России, обладающей значительными лесными ресурсами, основное внимание уделяется контролю лесов таежной зоны и зоны смешанных лесов, в которых ведутся основные лесозаготовки. Дистанционному изучению лесов лесостепной зоны уделяется значительно меньшее внимание, несмотря на то, что они играют огромную экологическую роль.

В связи с этим на основе анализа и обработки изображений Landsat TM предложен автоматизированный способ, позволяющий с помощью оценки спектральных яркостей лесных массивов по разновременным сериям спутниковых изображений выявлять и количественно оценивать изменения, происходящие в лесных насаждениях.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Способ предполагает совместное использование спутниковых материалов и геоинформационных технологий, интеграция которых поз-

воляет проводить детальную оценку изменений, происходящих в лесах на уровне отдельных лесотаксационных выделов.

Для выполнения исследований была проанализирована информация с 1551 лесотаксационного выдела лесных массивов, расположенных на территории Белгородской обл. (Борисовский, Шебекинский, Чернянский районы). Исследования проводились в лесах, наиболее широко представленных в лесостепной зоне Центрального Черноземья. Они характеризуются преобладанием дуба обыкновенного в качестве основной лесообразующей породы. На все лесные массивы были получены, отсканированы, географически привязаны и оцифрованы карты лесоустройства, что обеспечило точность и достоверность получения конечного результата.

В предложенном способе детектирование изменений, происходящих в лесах, предлагается анализировать на оценочном уровне в рамках регионов, или субъектов Российской Федерации, либо на более детальном уровне в рамках отдельных лесных массивов и их лесотаксационных выделов (рис. 1). В связи с этим необходимо создание векторного слоя лесов региона либо оцифрованной карты лесоустройства, если речь идет о конкретном лесном массиве.

Блок получения и анализа спутниковой информации (центральная часть схемы) играет в

предложенном способе ключевую роль. Корректную количественную оценку изменений спектральных признаков лесов по снимкам можно проводить только при использовании данных с одного сенсора, например Landsat TM. Причем необходимо, чтобы пространственное и спектральное разрешение снимков позволяло анализировать интересующие изменения. Спутниковые данные должны пройти атмосферную и радиометрическую коррекцию.

Когда речь идет о сопоставлении разновременных данных и извлечении количественных спектральных характеристик из спутниковых изображений, важнейшими этапами их предварительной обработки являются атмосферная и радиометрическая коррекция (Song, 2001). Радиометрическая коррекция (калибровка) – основная предпосылка получения достоверных научных результатов, извлекаемых из обработки данных дистанционного зондирования (ДЗ). Следует отметить, что в ряде операций (например, при классификации спектральных признаков изображения, его визуальном дешифрировании) проведение атмосферной и радиометрической калибровки не обязательно. Вполне достаточно масштабированных значений яркостей снимка – Digital Number (DN). В настоящее время для снимков серии Landsat разработаны и проверены на практике различные методы атмосферной и радиометрической калибровок. Обобщенное описание процедуры для перевода “сырых” значений яркостей снимков серии Landsat–AlI в коэффициенты отражения приведено в статье (Chander, 2009). Для выполнения процедур радиометрической и атмосферной коррекции снимков применяли калибровочные константы для снимков Landsat, приведенные в указанной статье. Это наиболее современная технология, использующая обновленные калибровочные коэффициенты и константы. Атмосферная и радиометрическая коррекция были совмещены и заключались в выполнении следующих двух основных этапов:

1. Перевод исходных “сырых” значений яркостей спутниковых изображений в показатели излучения на сенсоре (radiance). Операцию осуществляли по формуле

$$L_{\lambda} = [(L_{\max} - L_{\min}) / (Q_{cal\max} - Q_{cal\min})] \times (Q_{cal} - Q_{cal\min}) + L_{\min}, \quad (1)$$

где, L_{λ} – количество приходящего излучения; L_{\min} – количество приходящего излучения, масштабируемое в Q_{\min} ; L_{\max} – количество приходящего излучения, масштабируемое в Q_{\max} ; $Q_{cal\min}$ – минимальное калиброванное значение DN (0 или 1); $Q_{cal\max}$ – мак-

симальное калиброванное значение DN (255); Q_{cal} – калиброванное значение (DN).

2. Конвертация показателей излучения на сенсоре в значения коэффициентов отражения, которые скорректированы на угол падения солнечных лучей, среднюю солнечную внеатмосферную энергетическую освещенность. Процедура вычисления безразмерного коэффициента отражения выполнялась по формуле

$$P_p = (\pi L_{\lambda} d^2) / ESUN_{\lambda} \cos \theta_s, \quad (2)$$

где P_p – коэффициент спектральной яркости природного объекта; π – константа, равная приближенно 3.14; L_{λ} – показатели спектрального излучения на сенсоре; d – расстояние от Земли до Солнца в точке получения снимка на момент съемки, в астрономических единицах; $ESUN_{\lambda}$ – средняя солнечная внеатмосферная энергетическая освещенность (Mean Solar Exoatmospheric Spectral Irradiance) в мВт/(см² мкм), или спектральная плотность потока излучения на внешней границе атмосферы; θ_s – зенитный угол Солнца.

Таким образом, все анализируемые снимки пересчитали в атмосферно-откорректированные значения коэффициентов спектральной яркости (TOA Reflectance).

После этапа атмосферной и радиометрической коррекции снимков пользователь получает откалиброванные значения каналов снимка (спектральных диапазонов), которые можно использовать для анализа разновременной динамики и для расчета спектральных индексов.

Этап геоинформационной обработки данных, выполняемый в программном обеспечении ArcGIS, включает создание векторных карт кварталов и лесотаксационных выделов лесных массивов, заполнение их информацией о породном составе, возрасте, бонитете и других таксационных характеристиках насаждений, автоматический анализ спектральных признаков внутривыделов и оценку их динамики.

Ключевым этапом геоинформационной обработки данных является получение усредненных значений спектральных показателей (в нашем случае – значений среднего ИК-диапазона) для лесных массивов либо для их конкретных лесотаксационных выделов и установление пороговых значений, выше или ниже которых произошедшие изменения в спектральных признаках будут соответствовать реально произошедшим изменениям в лесах. На данном этапе необходима верификация значений спектральных показателей с результатами визуального дешифрирования снимка и полевых обследований, по которым устанавливаются произошедшие изменения. Заключительным этапом предложенного способа

Динамика значений коэффициентов отражения среднего ИК-диапазона (1.55–1.75 мкм) в соответствии с происходящими в лесах изменениями

Диапазон и направление изменения значений	Тип изменений
увеличение от 0.019 до 0.051	новые сплошнолесосечные вырубki
снижение от –0.012 до –0.066	имеющиеся зарастающие вырубki
изменение от –0.011 до 0.018	без существенных изменений

является автоматический поиск вырубok, гарей, высохших древостоев по значениям спектральных показателей (среднего ИК-канала).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенный способ был апробирован на примере дубравных лесных массивов, типичных для Белгородской обл. Проверка способа предполагала исследование спектральных характеристик лесных массивов за три временных среза по изображениям Landsat TM (13.06.1986 г., 24.06.1996 г. и 28.06.2009 г.), установление связи между значениями среднего ИК-диапазона, поиск лесотаксационных выделов, в которых проводились сплошнолесосечные рубки между анализируемыми датами.

В Белгородской обл. с 1991 г. все леса отнесены к группе 1, в связи с этим промышленные сплошнолесосечные рубки в лесах запрещены, за исключением санитарных рубок. По этой причине контроль рубок на территории лесов региона представляет особый интерес. При сплошнолесосечных рубках происходит кардинальное изменение спектрального отклика лесного массива, обусловленное сменой фитоценозов и появлением более молодых деревьев, высаживаемых на месте рубки. Аналогичные изменения спектра отражения происходят при гибели древостоев.

В соответствии с предложенным способом все обрабатываемые изображения прошли этап атмосферной и радиометрической коррекции, после чего их можно было использовать для анализа разновременной динамики в лесах. В качестве спектрального показателя для поиска изменений было использовано изображение в среднем ИК-канале, как наиболее чувствительном к изменениям в возрасте насаждений. Поскольку проверка способа проходила по схеме, предполагающей детальный анализ изменений в рамках отдельных лесотаксационных выделов, были использованы созданные нами векторные карты лесоустройства на анализируемые лесные участки. Площадь исследуемых лесов составила свыше 7000 га. Цифровые карты лесоустройства были привязаны к спутниковым изображениям, что позволило выполнить корректную оценку изменений спек-

тральных характеристик в пределах каждого лесотаксационного выдела.

Значения коэффициентов отражения в канале 5 (среднем ИК), полученные для каждого выдела по каждому временному срезу, послужили основой для оценки произошедших изменений.

Ключевым этапом исследования было установление соотношения между происходящими в лесах изменениями, например, вновь появляющимися сплошнолесосечными вырубками, гибелью древостоев от пожаров и соответствующей им динамикой значений среднего ИК-диапазона. На основе анализа лесов, расположенных в Борисовском районе, было установлено соотношение изменений значений коэффициентов отражения с происходящими изменениями в лесном покрове (таблица).

Полученное соотношение было проверено на примере лесов Шебекинского и Чернянского районов. Оно может применяться для анализа изменений в лесах, имеющий породный состав, близкий к лесам, в которых проводились исследования.

Результаты автоматизированного картографирования новых вырубok за периоды 1986–1996 и 1996–2009 гг. в лесном массиве “Мелкий лес” на основе полученного соотношения значений спектральной яркости среднего ИК-диапазона и происходящими в лесах изменениями представлены на рис. 2, на котором четко видно уменьшение интенсивности рубок после 1991 г.

Результаты картографирования новых рубок на Чернянском и Шебекинском участках (рис. 3, 4) подтвердили универсальность выявленного соотношения и эффективность предложенного способа, также с учетом того, что лесные массивы расположены на расстоянии не менее 100 км друг от друга.

Необходимо отметить, что полученный способ позволяет автоматически выявлять не только новые рубки, но и детектировать уже имеющиеся вырубki разных возрастов.

Сопоставление результатов автоматизированного поиска вырубok с результатами их идентификации путем визуального дешифрирования показало высокую точность способа.

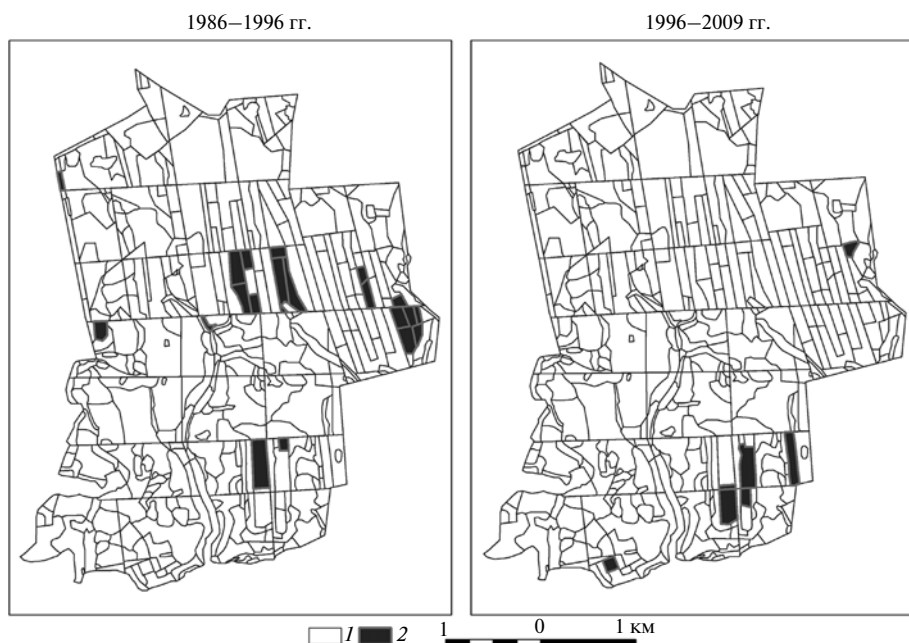


Рис. 2. Сплошнолесосечные рубки лесного массива «Мелкий Лес»: 1 – границы лесотаксационных выделов, 2 – выделов, в которых проводились сплошнолесосечные рубки.

Достоверно определены 95% лесотаксационных выделов, где проводились новые сплошнолесосечные рубки. Ограничения предложенного способа в первую очередь связаны с тем, что снижается вероятность автоматической идентификации сплошной вырубке, если она охватывает не весь лесотаксационный выдел. Это обусловлено тем, что в предложенном способе изменение спектральных характеристик усредняется в границах лесотаксационных выделов.

Усыхание и гибель древостоев также сопровождаются существенными изменениями в спектральном отклике, поэтому его динамика может быть положена в основу для поиска участков гибели насаждений. Однако применение данного способа в этом случае будет ограничено тем, что, как правило, контуры ареалов усыхания не соответствуют сети лесоустройства, и достоверное определение участков погибших древостоев будет выполняться только в том случае, если ареалы усыхания охватывают весь таксационный выдел либо практически всю территорию.

Таким образом, предложенный способ автоматизированного поиска изменений, происходящих в лесах, на основе динамики значений спектральной яркости среднего ИК-диапазона (1.55–1.75 мкм) оказался эффективен для контроля изменений на уровне отдельных лесотаксационных выделов лесных массивов (на приме-

ре дубовых лесных насаждений, типичных для Белгородской обл.).

Необходимо отметить преимущества предложенного способа и его недостатки.

К преимуществам относятся:

- автоматический и быстрый поиск сплошнолесосечных вырубок;
- высокая достоверность обнаружения изменений;
- использование бесплатных спутниковых данных;
- универсальность применения для всех типов лесов, где древостой составляют дубовые и близкие к ним по спектру отражения насаждения;
- использование среднего ИК-канала, прозрачного для дыма, и позволяющего автоматически выявлять изменения при наличии на снимке негустого дымового слоя.

Недостатками способа являются:

- необходимость атмосферной и радиометрической калибровки снимков;
- необходимость применения векторных масок лесотаксационных выделов (для детальных исследований);
- необходимость использования данных, имеющих средний ИК-канал;
- невозможность выявления очень малых рубок, размером менее 0.2–0.4 га.

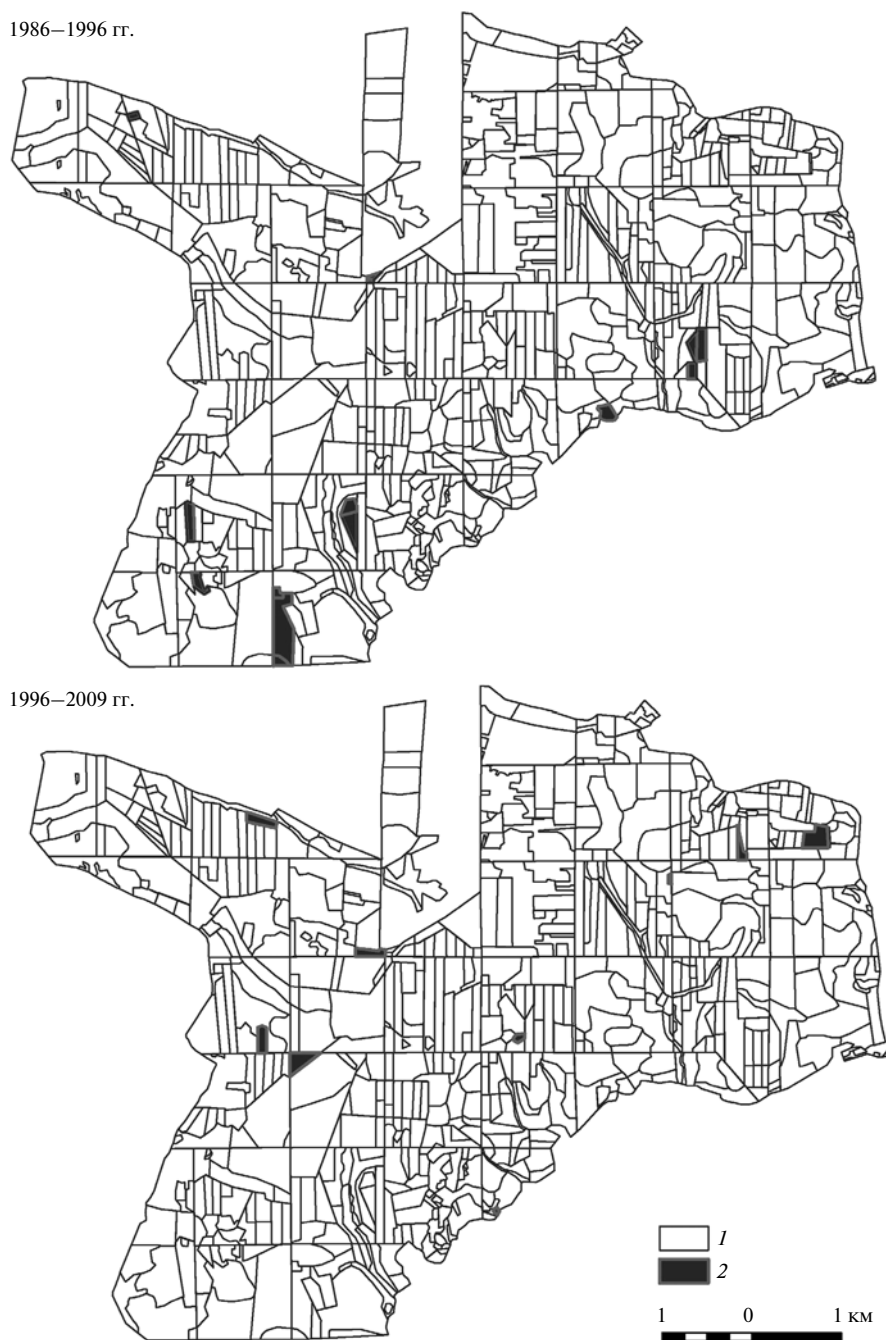


Рис. 3. Сплошнолесосечные рубки лесного массива “Урочище Белянское”: 1 – границы лесотаксационных выделов, 2 – выделы, в которых проводились сплошнолесосечные рубки.

ВЫВОДЫ

Предложен способ геоинформационного картографирования многолетних изменений в лесах на основе анализа их спектральных характеристик по рядам разновременных спутниковых данных. Способ предполагает совместное использование

спутниковых материалов и геоинформационных технологий, интеграция которых позволяет проводить как предварительную оценку изменений в лесах между определенными датами, так и детальную оценку изменений на уровне отдельных таксационных выделов лесных массивов. Способ апробирован на примере лесных насаждений с преоблада-



Рис. 4. Сплошнолесосечные рубки лесного массива “Ездоченская Дача”: 1 – границы лесотаксационных выделов, 2 – выделы, в которых проводились сплошнолесосечные рубки.

нием дуба в качестве основной лесообразующей породы (нагорные дубравы). На тестовых лесных массивах изучена динамика появления и зарастания сплошных лесосечных рубок за период с 1986 по 2009 гг.

Предложенный способ автоматизированного поиска изменений, происходящих в лесах, на основе динамики значений спектральной яркости среднего ИК-диапазона (1.55–1.75 мкм) успешно зарекомендовал себя для контроля изменений на уровне отдельных лесотаксационных выделов (на примере дубовых лесных насаждений, типичных для Белгородской обл.).

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение № 14.A18.21.1151 от 14.09.2012 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Барталев С.А., Курятникова Т.С., Стибиг Х.Ю. Методы использования временных серий спутниковых изоб-

ражений высокого пространственного разрешения для оценки масштабов и динамики вырубок таежных лесов // Совр. пробл. дист. зонд. Земли из космоса. 2005. Т. 2. № 2. С. 217–227.

Барталев С.А., Егоров В.А., Крылов А.М., Стыценко Ф.В., Ховратович Т.С. Исследование возможностей оценки состояния поврежденных пожарами лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений // Совр. пробл. дист. зонд. Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 215–225.

Панова О.В., Ершов Д.В. Использование данных спектро радиометра MODIS для регистрации и учета лесных гарей // Совр. пробл. дист. зонд. Земли из космоса. 2005. Т. 2. № 2. С. 388–394.

Терехин Э.А. Анализ каналов спутниковых данных LANDSAT TM для оценки характеристик лесных насаждений Лесостепной провинции Среднерусской возвышенности // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 2. С. 53–61.

Boyd D.S., Danson F.M. Satellite remote sensing of forest resources: three decades of research development // Progr. Phys. Geogr. 2005. V. 29. № 1. P. 1–26.

- Chander G., Markham B., Helder D.L.* Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors // *Rem. Sens. Env.* 2009. V. 113. P. 893–903.
- Franklin S., Lavigne M.B., Wulder M.A., McCaffrey T.M.* Large-area forest structure change detection: An example // *Canad. J. Rem. Sens.* 2002. V. 28. № 4. P. 588–592.
- Franklin S., Jagielko C.B., Lavigne M.B.* Sensitivity of the Landsat enhanced wetness difference index (EWDI) to temporal resolution // *Canad. J. Rem. Sens.* 2005. V. 32. № 2. P. 149–152.
- Jupiter S.D., Marion G.S.* Changes in forest area along stream networks in an agricultural catchment of the Great Barrier Reef Lagoon // *J. Env. Manag.* 2008. V. 42. № 1. P. 66–79.
- Karia J.P., Porwal M.C., Roy P.S., Sandhya G.* Forest change detection in Kalarani Round, Vadodara, Gujarat: A remote sensing and GIS approach // *J. Indian Soc. Rem. Sens.* 2006. V. 29. № 3. P. 129–135.
- King D.J., Olthof I., Pellikka K.E., Seed E.D., Butson C.* Modelling and mapping damage to forests from an ice storm using remote sensing and environmental data // *Natural Hazards.* 2005. V. 35. № 3. P. 321–342.
- Lu D., Mausel P., Batistella M., Moran E.* Multitemporal spectral mixture analysis for Amazonian land-cover change detection // *Canad. J. Rem. Sens.* 2004. V. 30. № 1. P. 87–100.
- Sader S.A., Sever J.C., Smoot M., Richards T.* Forest change estimates for the Northern Peten Region of Guatemala 1986–1990 // *Human Ecol.* 1994. V. 22. № 3. P. 317–332.
- Song C., Woodcock C.E., Seto K.C., Lenney M.P., Macomber S.A.* Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects? // *Rem. Sens. Env.* 2001. V. 75. № 2. P. 230–479.
- Virk R., King D.* Comparison of techniques for forest change mapping using Landsat data in Karnataka, India // *Geocar-to Int.* 2006. V. 21. № 4. P. 49–57.

Process Mapping Long-Term Changes in the Forests on the Basis of Their Spectral Responses in Rows of Perennial Remote Sensing Data

E. A. Terekhin

Belgorod State University, Federal and Regional Centre for Aerospace Monitoring of Natural Resources, Belgorod

Based on the analysis of series multi-spectral Landsat TM imagery a method of mapping the long-term changes in the forests has been provided. The basis of the method is necessary to study the dynamics of values of the mid-IR range (1.55–1.75 μm), associated with the changes in the forests. On the example of forests of the Belgorod region has been carried testing of the proposed method for mapping the continuous harvesting cuttings produced in the period from 1986 to 2009.

Keywords: forest stands parameters, remote sensing data, spectral ranges, long-term changes, Belgorod region

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ
КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ГЕОВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ В ПРОЕКТИРОВАНИИ
МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

© 2013 г. А. И. Рюмкин*, Е. С. Тябаев

Томский национальный исследовательский государственный университет, Томск

ООО НПО “Сибгеоинформатика”, Томск

**E-mail: airyumkin@mail.ru*

Поступила в редакцию 30.10.2012 г.

Исследуется применимость метода визуализации в создании трехмерных геоинформационных систем (ГИС) на базе моделей рельефа и данных дистанционного зондирования Земли для обоснования проектных решений ранних стадий проектирования магистральных трубопроводов. В практических задачах выполнения работ предпроектной стадии для сибирских трубопроводов проведена разработка цифровых моделей рельефа (ЦМР), определены варианты покрытий трассы снимками разного масштаба, разрешения и особенности построения триангуляции для ЦМР. Проведен пространственный анализ трассировки трубопровода с учетом существующего описания природных ресурсов, объектов застройки, инженерных коммуникаций и ограничений в виде границ памятников природы и культурного наследия. Показано, что важнейшее значение при уточнении вариантов трассирования на ответственных участках имеют методы геовизуализации, позволяющие интегрировать при компьютерной поддержке сильнейшие способности специалистов и возможности ГИС в обработке геоизображений. На реальных примерах показана существенная полезность методов геовизуализации при создании информационных технологий поддержки проектных решений по проектированию магистральных трубопроводов. Создаваемые при этом системы, ЦМР и базы данных пригодны для организации в последующем мониторинга процессов строительства и эксплуатации трубопровода.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, геовизуализация, магистральные трубопроводы, модели рельефа, проектирование

DOI: 10.7868/S0205961413050060

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность данной статьи определяется недостаточной разработанностью нефтегазовых приложений дистанционного зондирования (ДЗ) (Бондур, 2010; Земля из космоса, 2011; Аэрокосмический мониторинг объектов..., 2012). В ряде задач мониторинга и развития нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса достаточно очевидна перспективность применения аэрокосмических методов. Особенно эффективны они на ранних стадиях проектирования (Коршак, Нечваль, 2008) и в процессе эксплуатации (Кутуков, 2002), в условиях информационной недостаточности при минимальном объеме полевых инженерных изысканий, производимых лишь для особо сложных условий трассы. Необходимы тщательное исследование различных аспектов их применения для реальных ситуаций и возможность их доведения до практических технологий. В данной работе приведено описание соответствующего

исследования применимости геоинформационных систем (ГИС) и ДЗ для ранних стадий разработки проектной документации, проведенных нами ранее в интересах ООО “Газпром-трансгаз-Томск” и ведущих проектных институтов ОАО “Газпром” для новых трасс в Сибири. Изложение иллюстрируется реальными примерами из практики проектирования магистральных трубопроводов (МТП).

Работ с описанием применения ГИС и ДЗ для проектирования газо- и нефтепроводов довольно много (Артемов, Артемова, 2001; Коршак, Нечваль, 2008; Корсей и др., 2003; Ишук 2005; Balogun et al., 2012; Delevar, Naghibi, 2003; Yildirim, 2006). Большая их часть посвящена приложениям ГИС для картирования трассы на основе построения цифровых моделей местности (ЦММ), цифровых моделей рельефа (ЦМР), пространственного анализа и геокомпьютинга. В ряде случаев проводится оптимизация решений, вычисляются области последствий разливов и т.п.

В то же время известно, что в реальности проектная документация (и карты, в нее входящие) являются результатом довольно сложного коллективного процесса, многоуровневого, с взаимодействием представителей различных специальностей (по инженерной геологии, геологии углеводородов, землеустроителей, трубопроводчиков и др.), с неоднократным возвратом на сложные участки и пр. В нем, конечно, используются результаты вычислений на основе ГИС, но необходимо применение технологий, интегрирующих возможности опытных специалистов и специфические возможности компьютеров. По нашему мнению, в качестве такой интегрирующей технологии следует использовать трехмерные ГИС с развитыми средствами визуализации пространственных данных, или гео-визуализации (Andrienko, 2010; Balogun et al., 2011, Vodum, 2005; Kjems, 2004; Nielsen, 2004).

РЕШАЕМЫЕ ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Проектирование трубопроводов сейчас производится в две основных стадии – предпроектной и разработки проектной документации. Вначале выполняются предпроектные работы, ранее относившиеся к технико-экономическому обоснованию (ТЭО) (Дерцакян и др., 1977), в состав которых входят этапы подготовки декларации о намерениях (ДОН) и обоснование инвестиций (ОИ) (Коршак, Нечваль, 2008).

ДОН содержит предварительные проектные решения по выбору конкурирующих вариантов трассы и площадок размещения оборудования в рамках существующих природных и техногенных условий и выявленных ограничений для предварительного согласования органами государственной власти РФ и ее субъектов. При этом определяются также ориентировочная потребность в основных ресурсах (прежде всего земельных, водных, энергетических) и стоимость строительства по аналогам и укрупненным показателям с учетом возможных затрат на инженерную защиту объекта от опасных природных и техноприродных процессов.

При положительном заключении на ДОН осуществляется переход к этапу обоснования инвестиций с некоторой детализацией условий реализации, включая технические решения по выбору генерального направления трассы, переходов через естественные и искусственные преграды, разработке раздела “Оценка воздействия на окружающую среду” (ОВОС). Уточняется стоимость строительства нефтепровода в выбранном районе с учетом стоимости сооружений по трассе и производится согласование его местоположения на общественных слушаниях с местными органами власти, где ГИС и данные ДЗ очень выигрышны.

Предпроектная документация разрабатывается с учетом решений, принятых в программах пространственного планирования и схемах раз-

вития регионов с целью оценки возможностей инвестирования в выбранном районе, и передается на госэкспертизу.

Проектирование осуществляется на основе информационных материалов, характеризующих регион проектирования и представленных камеральными данными и данными полевых изысканий. При этом важнейшее значение для характеристики реальных условий окружающей среды имеют данные инженерных изысканий. Задачей инженерных изысканий являются комплексное изучение природных и техногенных условий территории (региона, района, трассы, площадки, участка) объектов строительства, составление прогнозов взаимодействия этих объектов с окружающей средой, обоснование их инженерной защиты и безопасных условий жизни населения (СНиП 11-02-96, п. 4.1). В их структуре выделяются геодезические, инженерно-геологические, инженерно-гидрометеорологические, инженерно-экологические изыскания. Состав и объем изысканий детализируется соответственно стадиям проектного процесса и регламентируется соответствующими нормативными документами (СНиП 11-02-96; РД, 2002; СП, 2011).

В составе изысканий значительное место занимают картографические материалы в виде топографических карт нужных масштабов, тематических карт, материалы аэро- и космосъемки. Практически все они требуют пространственной привязки, совмещения разномасштабных геоизображений, их обработки (общей, первичной и специальной, включая классификацию и создание векторных ЦММ для последующего ГИС-анализа).

Отметим, что нормативами на этапах ДОН и ОИ предусматриваются сбор и анализ картографических материалов и других геоизображений, в том числе аэро- и космоснимков, сбор сведений о месторождениях полезных ископаемых, границах застройки, в т.ч. проектируемых или перспективных трасс инженерных коммуникаций, участках сельхозугодий, орошаемых и осушаемых землях, границах заповедников, территориях с особым статусом. На особо сложные участки обычно выполняется детализированная топографическая съемка. Это участки в горной местности, переходы через автомобильные и железные дороги, болота, речные переходы. Для инженерно-экологические изысканий предполагаются сбор и анализ мелко- и среднемасштабных карт и схем ландшафтного районирования, кадастровых, почвенных, геоботанических, материалов Госгеолфонда. При этом рекомендации по обработке и детальность исходных данных регламентированы только для выполнения инженерно-экологических работ (дешифрирование разномасштабных аэро- и космоснимков (АКС) М 1 : 200 000–1 : 125 000, с увеличением до М 1 : 20 000–1 : 25 000 (РД, 2002)).

Практически все эти данные могут быть введены в ЭВМ и обработаны программно на ГИС и системах обработки аэрокосмических изображений.

С учетом данных изысканий принимаются проектные решения по выбору трассы, размещению промежуточного оборудования, проводятся предварительные гидравлические расчеты. Общая оценка качества проекта осуществляется по значениям критериев. В качестве общих критериев рассматриваются обычно (Коршак, Нечваль, 2008) объем металлоложений, длительность проекта, объем затрат на строительство и последующую эксплуатацию трубопровода (ТП), как основной. Оптимизация достигается при минимуме значений критериев, которым соответствуют кратчайший вариант трассы (минимум металлоложений), минимальный срок выполнения, минимум затрат. В реальности наиболее адекватен вариант многокритериальности, как и в большинстве других задач проектирования (САПР).

На стоимость единицы длины трубопровода влияют такие факторы, как диаметр труб, давление, природные условия, экономико-географические факторы (местоположение, относительное размещение (обжитые районы, наличие ж.д. и автодорог), тяготение к коридорам коммуникаций, выбор схем укладки и сооружения, расстановка и выбор мест для оборудования. Резкое удорожание происходит в горах. Для учета влияния местности на характеристики трасс вводится набор категорий местности. Так, в (Коршак, Нечваль, 2008) указано на 79 категорий, различающихся условиями строительства и стоимостью (грунт песчаный, плавунный, переходы, орошаемые земли и др.). Каждой из категорий соответствует набор полигонов, пересечение которых коридором трассы определяет длину соответствующего участка и площадь использованных земель. Например, из опасных геологических процессов и явлений по трассе газопровода в республики Алтай, длиной в 589 км, присутствуют: обвалы и осыпи (67 км, 11.4% всей длины), заболоченность (27 км, 4.6%), участки морозного пучения (33 км, 5.6%), овражно-балочная эрозия (42.5 км, 7.2%), наледи (30 км, 5.1%), оползни (26 км, 4.4%), лавины (21 км, 3.6%), термокарст (13.5 км, 2.3%), курумы (12 км, 2%).

Оптимальная трасса при этом определяется программно при вычислении возможных вариантов трасс и сравнении их стоимостей и значений других критериев.

Исторически компьютеризация проектных решений развивалась, начиная с попыток оптимизации выбора трассы на основе специальных моделей местности и рельефа (Бородавкин, 1974; Дерцакян, 1977) с постепенным усложнением модели местности за счет учета разнообразных удорожающих факторов, — таких, как наличие мерзлоты, заболоченности, крепости грунтов, лавиноопасно-

сти и пр. (Коршак, Нечваль, 2008). Позднее, в связи с распространением импортных ГИС, в обиход вошли зарубежные методы оптимизации трассирования на основе критериев типа *least cost pathway* (Delevar et al., 2003; Yildirim, 2006; Корсей и др., 2003; Рыльский, 2004; Ишук, 2005). Пожалуй, наиболее полно такой подход реализован в работе (Корсей и др., 2003), в которой удорожание по каждому фактору для всей территории региона отражено с помощью модели GRID, заданной на целочисленной решетке (i, j) , которая позволяет наглядно представить поля их значений для территории в виде

$$X^k = \{x_{i,j}^k\},$$

где X^k — множество значений k -го фактора, $x_{i,j}^k$ — значение k -го фактора в позиции (i, j) .

С помощью весовых коэффициентов b_k локальное влияние таких факторов на однородных GRID моделях территории может быть приведено к значению общей стоимости

$$S = \sum_k S^k = \sum_{i,j \in A} b_k^* x_{i,j}^k,$$

где A — область определения значений факторов, представленная целочисленной решеткой GRID моделей. Оптимальная трасса вычисляется средствами CostPath модуля Spatial Analyst ГИС ArcView, обеспечивая $l^s = \min \arg S(l)$, где $l = (p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_n)$ — последовательность точек, задающих трассу трубопровода на целочисленной решетке, $p_i = p_i(i, j)$, где $(i, j) \in A$.

Развитие ГИС и систем обработки данных ДЗ приводит к отходу от пакетного режима в сторону интерактивных программ, создания картографической поддержки на базе ГИС, пространственного анализа данных, к интерактивному выбору трасс с учетом расчетов на ЦММ с ограничениями, оптимизации трассы по стоимости с учетом удорожающих факторов (Корсей и др., 2003; Ишук, 2005), минимизации рисков (Balogun et al., 2012), подбору вариантов на локальных участках. При этом промежуточные и полные расчеты сопоставляются по значениям локальных характеристик расчетных трасс, — таких, как углы наклона, крепость грунтов, транспортная доступность и т.п.

В современных системах пространственного планирования широко используется машинная графика и геовизуализация для повышения адекватности проектного процесса (Andrienko, 2010; Batty, 2011). Перспективно также применение систем поддержки коллективной разработки и принятия решений (Geovisualization, 2001). В недавних работах по трубопроводам (Balogun et al., 2012; He, 2011) рассматриваются 3D-ГИС с геовизуализацией, но, однако, лишь для показа взаимного положения труб относительно других эле-

ментов окружающей среды. В работе (Артемов, Артемова, 2001) визуализация используется для выбора трассы при сложном рельефе, но без описания смежных задач, решаемых при проектировании. Почти не описаны ключевые моменты построения ЦММ с особенностями территории. Нами ранее на основе предварительного анализа материалов изысканий, исходных геоизображений для их построения, практики проектирования представлена концепция создания качественных ГИС, пригодных для предпроектного анализа вариантов технических решений (Рюмкин, 2010).

Функции геовизуализации весьма полезны при предварительном выборе трассы на основе материалов “драпировки рельефа” космоснимками и получением наглядного представления ситуации на основе 3D GIS с организацией соответствующих виртуальных просмотров. Близкие ситуации возникают и при согласовании обходов (облетов) участков с памятниками истории, культуры, охраняемыми природными объектами.

В заключение отметим, что задачи проектирования магистральных трубопроводов оказывают существенное влияние на региональную инфраструктуру и должны выполняться с учетом программ территориального (пространственного) планирования и схем развития регионов. Такое сопоставление и согласование также может быть эффективно выполнено с помощью ГИС и данных ДЗ (Рюмкин, Чумичев, 1998; Рюмкин, Кравченко, 2007) за счет обмена ЦММ принятых форматов, что дает возможность реализации схем электронного правительства.

АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ

Как было показано ранее, при проектировании магистральных трубопроводов в сложных природных условиях большое значение для эффективной организации проектирования, анализа вариантов проектных решений и проведения проектных расчетов имеет адекватное представление пространственных данных о территории, рельефе, визуальная информация о свойствах ландшафтов и характеристиках окружающей среды.

Исходя из анализа содержательных задач проектирования и потребностей проектного процесса, как в данных изысканий, так и в наличии программного обеспечения необходимой функциональности можно определить состав данных и операций их обработки.

Для информационной поддержки проектирования нормативно определены данные изысканий и результаты их обработки (СНиП 11-02-96; РД, 2002; СП, 2011), многие из которых могут быть получены с помощью данных ДЗ. На их базе попутно могут быть решены задачи актуализация фото- и картографических материалов, в т.ч. формирование ортофото, обновление карт соответ-

ствующих масштабов на основе дешифрирования, выполняемого вручную и с помощью классификации, метода распознавания образов (Земля из космоса, 2011; Протасов, Рюмкин, 2002; Kabanov et al., 1999). Для этого необходимы радиометрическая и спектральная коррекция, совмещение и пространственная привязка геоанных разного происхождения, совместная обработка разномасштабных изображений, — т.е. требуются полноценная обработка изображений (для улучшения исходных снимков) и специальная обработка аэро- и космоснимков.

Нужны также процедуры геоинформационного анализа: пространственный анализ пересечений, наложений, расстояний, анализ рельефа, раскраска, расчет буферных зон, покрытий, перекрытий, пересечений (Рюмкин, 2002). Для поддержки процедур геовизуализации нужны возможности формирования специальных аналитических методов и тематических легенд (Andrienko, 2010), осмотра объектов с разных точек, наезда, пролета, формирование демороликов.

Как известно (Брауде, 2004), стандарты проектирования программных систем предполагают обязательный свод требований к ним, предшествующий последующим этапам процесса разработки. При анализе решаемых задач естественным образом выделяется ряд таких требований, на основе которых необходимо обеспечить выполнение набора функций, организацию интерфейса, определить структуру баз данных и архитектуру системы.

Общие требования к системе по функциональности:

- возможность представления и обработки изображений для улучшения качества исходных снимков важных участков местности и последующей обработки и анализа;
- представление поверхности с помощью ЦММ и ЦМР с регулярной и нерегулярной сетью высот, наложения на ЦМР космических снимков, векторных слоев ГИС и объектов трасс;
- географическая координатная привязка моделируемых данных;
- полное интерактивное управление трехмерной визуализацией, включая задание маршрута перемещения (пролета) над местностью, выбор произвольных точек обзора;
- пространственный анализ (расчет буферных зон, покрытий, перекрытий, пересечений);
- возможность работы с непрерывным географическим пространством с динамической подкачкой необходимых листов ЦМР, ЦММ, изображений;
- развитые возможности обмена (импорт, экспорт) геоанных.

Организация интерфейса и навигации:

- управление операциями панорамирования, масштабирования, выбора и изменения траектории пролета должно осуществляться с помощью мыши;

- организация вращения, поворотов;

- организация “проезда” по поверхности и движения на заданной высоте;

- возможность отображения параметров азимута и наклона линии движения;

- динамическое управление составом слоев и легендой.

Возможность описания и проверки ограничений:

- территорий и объектов историко-культурного наследия, застройки (границ поселений, границ землепользований, границ правовых зон);

- территорий природопользования, с.-х. производства, инфраструктуры;

- природных объектов (экзогенных, сейсмоопасных участков, вечной мерзлоты и т.п.).

Архитектура системы

Ввиду специфики приложений, значительной протяженности объектов, прохождения трассы в различных природно-ландшафтных условиях, очевидна необходимость точной географической привязки всех данных, адекватное и точное представление рельефа и окружающих ландшафтов. Поэтому выбор базисной оболочки должен производиться в классе геоинформационных модулей трехмерного моделирования. Для длинных магистральных трубопроводов основным способом передачи особенностей территории и представления реального ландшафта является использование цветных космических снимков высокого разрешения и других данных ДЗ, натягиваемых на каркас трехмерной модели рельефа. Создаваемая система должна обеспечить их эффективное представление (для растров снимков больших объемов), совмещение с векторными слоями ГИС, САПР и последующее пополнение данными геодезической съемки.

Наилучшую функциональность для этих условий и требований дает система ERDAS Imagine с модулем Virtual GIS, в которой реализованы практически все технологические этапы формирования 3D ГИС, и для создания которой достаточно подготовить ЦМР и ортофото снимков. Особенности процесса их подготовки описаны в следующих разделах статьи.

При выборе системы, предназначенной для работы на достаточно ограниченной и сравнительно знакомой пользователям территории, на первый план могут выйти задачи пространственного анализа, которые эффективнее других реализуются на основе специализированных модулей векторной ГИС (например, ArcGIS 3D Analyst, AutoCAD Civil 3D

(Рюмкин, 2002). Если же центральной задачей является эффективная реализация программной системы, обеспечивающей наиболее полную информационную поддержку всего процесса проектирования, то возможно создание новой программной системы (Мирза и др., 2006).

ВОПРОСЫ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ

Для первичного наполнения системы потребуются формирование цифровых моделей местности (ЦММ) и рельефа (ЦМР) на коридор прохождения трубопровода, подбор космоснимков, их обработка и пространственная привязка. В соответствии с рекомендациями по созданию геовизуальных технологий (Andrienko, 2010; Bodum, 2005) нужно подобрать эти данные разных масштабов, обеспечив адекватность передачи свойств территории. В ряде случаев, (для преодоления сложных участков, ситуаций сложного рельефа, форсирования водных препятствий и т.п.) понадобится подготовка ЦММ и ЦМР необходимых крупных масштабов, более подробных, нежели принятых в целом для всей территории. В некоторой степени этот выбор масштабов определен из опыта проектирования и фиксирован СНиП на изыскания (но для карт на твердой основе, а для ЦММ и 3D нужны дополнительные исследования).

Для построения ЦМР на множестве высотных отметок, изолиний высот и структурных линий строится триангуляция (аппроксимация с помощью нерегулярной сети треугольников) (Иванов и др., 1999, Wang et al., 2001). Данная ЦМР потом может быть полностью использована в проектных расчетах. Для искусственных объектов (трубопровод, сооружения, застройка) и элементы ландшафта возможна их подготовка специализированными программными средствами (AutoCAD, GIS) с последующим импортом в данную систему. Сформированный растр снимков аккуратно накладывается на каркас рельефа совместно с элементами векторных слоев ГИС и искусственных объектов. Созданная система должна быть пригодна для последующего мониторинга ситуации с пополнением системы новыми данными и редактированием существующих баз данных в соответствии с изменениями текущей ситуации и проектными решениями.

Представление рельефа

Для моделирования ландшафтов и окружающей среды обеспечивается представление рельефа (Хромых, 2007; Скворцов, Мирза, 2006) с помощью сети высотных отметок на регулярных решетках (GRID) и нерегулярных систем отсчетов (TIN). При этом обычно используются все наиболее распространенные способы задания рельефа на топографических, тематических картах и планах, в проектной документации с помощью высот-

ных отметок, изолиний, структурных линий, данных радарной съемки и лазерного сканирования. Производится импорт соответствующих ЦМР. На основе собранных данных организуется управляемый режим расчетов используемой ЦМР с выбором шага отсчетов высотных отметок, способа аппроксимации поверхности и ее визуализации. Программная среда должна обеспечить базовые возможности анализа рельефа с помощью различных средств представления поверхности (расчетные изолинии, легенды высот, “отмывка” рельефа), а также построения разрезов произвольной конфигурации в плане. Для ЦМР обзорного уровня используются данные о рельефе местности с топокарт масштаба не мельче 1 : 200 000.

Обычно при формировании ЦММ и ЦМР нужно подробное представление рельефа на узкий коридор вариантов трассы, ее важнейших участков и менее точное – для более широкого коридора. Для их формирования используют данные топокарт и планов необходимых масштабов по точности, данные радарной съемки, геодезических измерений, лазерного зондирования. Процесс формирования ЦМР обычно включает сканирование топокарт, геометрическую коррекцию растра, сшивку растров в блоки (в пределах одной зоны в проекции Гаусса-Крюгера), специальную обработку растров для векторизации, векторизацию данных о рельефе, формирование таблиц атрибутов, сшивку отдельных блоков (в том числе в смежных зонах Гаусса-Крюгера), проверку топологии и корректности полученной ЦМР. Рельеф на планшетах представлен изолиниями, высотными отметками и дополнительными структурными линиями (береговыми линиями рек и озер, границами обрывов, оврагов, промышленных выработок и т.д.). Эти структурные линии – не плоские, так как принадлежащие им точки могут иметь различные высоты на участке рельефа, являясь трехмерными.

Все линии и высотные отметки рельефа необходимо оцифровать, т.е. представить их наборами узловых точек с прямоугольными координатами X , Y (положение на плоскости). Кроме того, в каждой точке должна быть известна высота (координата Z). Значения высот в узлах изолиний и высотных отметках задаются прямо при оцифровке, а в узлах трехмерной линии их можно определить с помощью интерполяции, если к линии примыкают изолинии (граница оврага, обрыва) или прямо на ней заданы высотные отметки (уровни уреза воды на береговых линиях). Для расчета цифровой модели рельефа необходимо по множеству узловых точек всех линий и высотных отметок построить интерполирующую поверхность. При этом требуется, чтобы не только узлы, но и все структурные линии рельефа целиком принадлежали данной поверхности. Наиболее простой и удобной является кусочно-линейная интерполяция поверхности рельефа. При этом по

координатам X , Y всех точек строится триангуляция Делоне (Фукс, 2000) таким образом, чтобы множество ребер треугольников включало все отрезки структурных линий. Тогда задание высоты Z во всех вершинах определяет интерполирующую поверхность как набор пространственных треугольников. Такая триангуляция носит название триангуляции с ограничениями и для ее решения созданы специальные алгоритмы (Скворцов, Мирза, 2006; Hjelle, Daehlen, 2006). Иногда полученный растр содержит много “шума”, для уменьшения которого приходится либо пересканировать изображение, меняя параметры контрастности и яркости сканерной утилиты, либо использовать какой-нибудь редактор растров, например Adobe Photoshop. Но более важным недостатком являются деформации исходного изображения, которые приводят к заметным ошибкам в определении координат узловых точек при оцифровке. Обычно это локальные деформации отдельных участков, не устраняемые линейным преобразованием всего изображения (поворотом, сдвигом, изменением масштаба по осям). Поэтому было использовано кусочно-линейное преобразование (интерполяция) растра. На любом планшете можно указать по крайней мере 36 точек-перекрестий, для которых известны реальные координаты на местности (чем больше таких точек, тем лучше).

По этим точкам в координатах исходного растра строится триангуляция Делоне. Размер нового растра выбирается таким образом, чтобы можно было легко перейти от реальных координат выбранных точек к их координатам в новом растре (например, 5000 или 10000 точек на 1000 м). Теперь для произвольной точки M исходного растра (не фонового цвета), лежащей в некотором треугольнике ABC , можно вычислить ее координаты r и p (строка и позиция) в новом растре

$$r_M = ar_A + br_B + cr_C, \quad p_M = ap_A + bp_B + pc,$$

где $a = \frac{s(BCM)}{s(ABC)}$, $b = \frac{s(CAM)}{s(ABC)}$, $c = \frac{s(ABM)}{s(ABC)}$ – барицентрические координаты M в $\triangle ABC$ (s – площадь треугольника, рис. 1). Это преобразование непрерывно на ребрах треугольников, а взаимоположение вершин в новом растре соответствует реальным координатам точек.

Полученный растр использовался в качестве подложки, необходимой для векторизации (оцифровки) изображения – отслеживания всех линий рельефа с расстановкой необходимого числа узловых точек и высотных отметок.

Векторизация является самой трудоемкой частью работы по построению модели рельефа: число линий на разных планшетах составляет от нескольких десятков до нескольких сотен (в зависимости от рельефа) соответственно, число снятых узловых точек изменяется от 5000 до 30000 и бо-

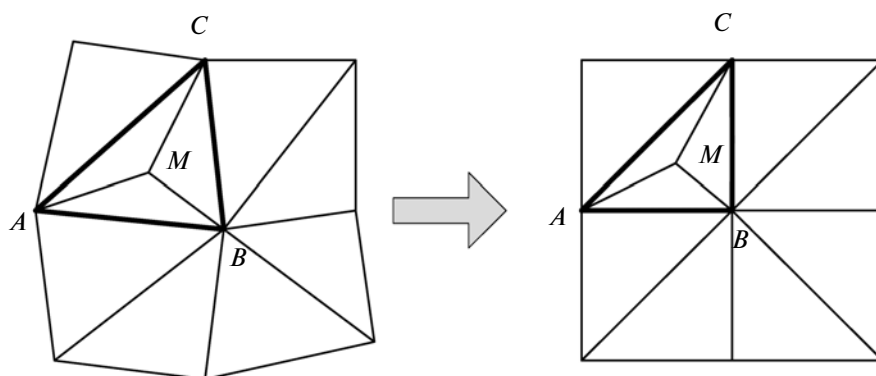


Рис. 1. Кусочно-линейное преобразование раstra.

лее. Правильность проведения линий при векторизации легко определяется визуально, однако при оцифровке возможны ошибки, которые существенно искажают рельеф, но обнаруживаются лишь спецпроверками:

- наличие частично или полностью совпадающих, а также пересекающихся объектов, имеющих разные высоты;

- недостаточное количество примыкающих к трехмерной линии изолиний и высотных отметок, что не позволяет рассчитать высоты во всех узловых точках;

- недопустимые значения высот для изолиний и высотных отметок.

В приведенном выше общем описании процесса построения ЦМР следует отметить особую важность задачи учета структурных линий, приводящую к необходимости построения триангуляций с ограничениями. В распространенных программных системах эти особенности отражаются недостаточно. При этом ошибки представления рельефа особенно явно “выпирают” при соединении со снимком, когда видимое изображение не соответствует ЦМР и грань изгиба, например, оказывается на наклонной плоскости и т.п. В САПР-задачах такие ошибки также приводят к издержкам проектных решений, но они часто не так заметны, как при визуализации.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОИЗОБРАЖЕНИЙ

Применение данных ДЗ для описания территории, анализа ситуаций, подготовке проектных и управленческих решений чрезвычайно разнообразно (Рюмкин, 2002). В рамках описываемой системы они наиболее полезны для создания реалистичных моделей ландшафтов и обновления топокарт по территории деятельности. И в том и другом случае обработка исходных геоизображений включает одинаковые этапы – предварительную обработку растров, пространственную при-

вязку, создание ортофото и т.п. Следует отметить высокую актуальность и практическую значимость задач обновления топоосновы, поскольку по многим территориям России картографический материал очень старый и нуждается в обновлении. Старые технологии дороги, трудоемки и длительны по времени. В обработке данных ДЗ наибольшее технологическое преимущество обеспечивает улучшение качества исходных снимков и автоматизации операций при дешифрировании. Здесь многого можно добиться за счет использования космосъемки высокого разрешения и новых методов дешифрирования.

Выбор конкретного сенсора зависит от характера решаемых задач и требуемых при этом точности и разрешения. Следует учитывать, что определение данных с излишними точностью и разрешением способно значительно увеличить объем привлекаемых данных по снимкам и сделать громоздким, неоправданно “утяжелить” весь проект. Таким образом, аккуратный подбор приемлемого разрешения геоизображений из соображений компромисса между их точностью и объемом соответствующей базы данных становится одним из важнейших решений по созданию системы на данном этапе (формирования прототипа системы).

В составе обычного проекта можно выделить следующие уровни описания:

- 1) обзорный уровень проекта в целом;
- 2) коридор прохождения трассы трубопровода;
- 3) участки территории с трубами существующих трубопроводов;
- 4) участки равнинной территории, где трубопроводы не прокладывались;
- 5) участки гористой территории, где предстоит сделать выбор трассы.

Очевидно, что требования к разрешению снимков растут сверху вниз по этим уровням. Существенно связанными оказываются также масштаб

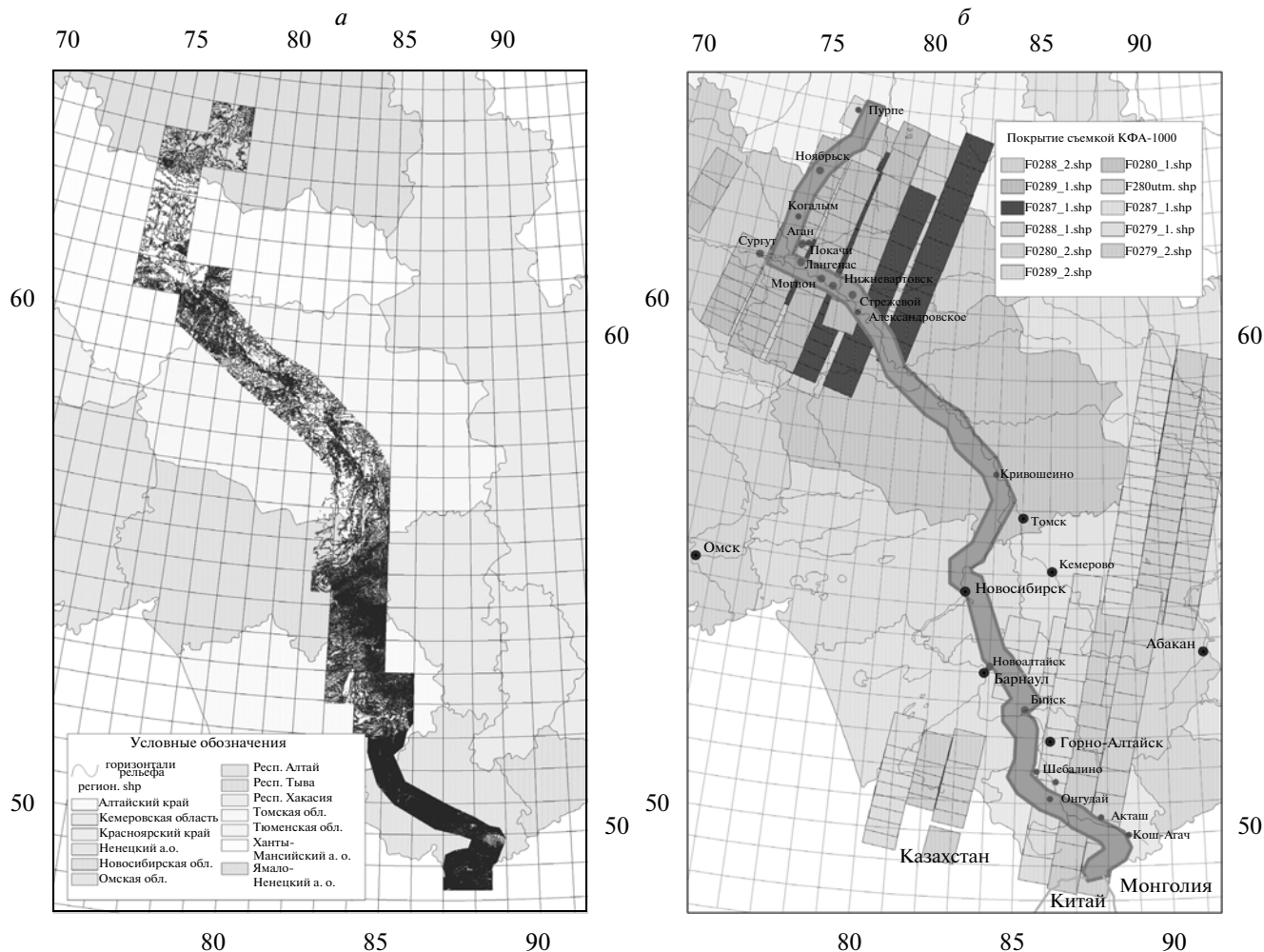


Рис. 2. Подготовленные на трассу газопровода “Алтай”: а – ЦМР; б – схема покрытия космоснимками (КФА-1000).

используемых на различных уровнях топографических карт и требуемых изображений.

На обзорном уровне проекта обычно используются топокарты М 1 : 200000, 1 : 100000. Их применение определяет и точность равномерной привязки геоизображений, которая на этом уровне минимальна. Естественно, что при этом можно использовать изображения “Ресурс Ф1” (КФА-1000), SPOT-4. На коридор прохождения трассы при общем обзорном показе нужно разрешение повыше. Это обеспечивается применением космоснимков ALOS (PRISM), IRS или RapidEye. Для ситуаций 3–5 требования по разрешению наиболее высоки, и здесь рекомендуется использовать космосъемку высокого разрешения (КВР, ДК, GeoEye, Ikonos, QuickBird). Для наиболее ответственных участков используются самая высокодетальная съемка (ДК, GeoEye, WorldView, QuickBird), аэрофотосъемка и данные лазерного зондирования, совмещенные с цифровой аэрофотосъемкой зондируемой территории. В ряде приложений также используется совмещение

космоснимков различных камер и разного разрешения.

При выполнении проектов нами были экспериментально опробованы различные варианты сочетания космических снимков разных платформ для представления конкретных ситуаций описания территории. Например, рельеф и мозаика обзорного уровня для проекта газопровода “Алтай” на основе снимков КФА-1000 приведены на рис. 2. Описание территории выхода трассы газопровода с плато Укок на перевал Канас выполнено с помощью высокодетальной съемки, уложенной на подробную модель рельефа (рис. 3–5). В ходе практической работы обычно экспериментально выявляются возможности комбинирования таких изображений в различных сочетаниях и выбираются эффективные комбинации для разных приложений и режимов просмотра. Наиболее эффективны подобные режимы при коллективном анализе и обсуждении ситуаций с участием представителей разных подразделений проект-

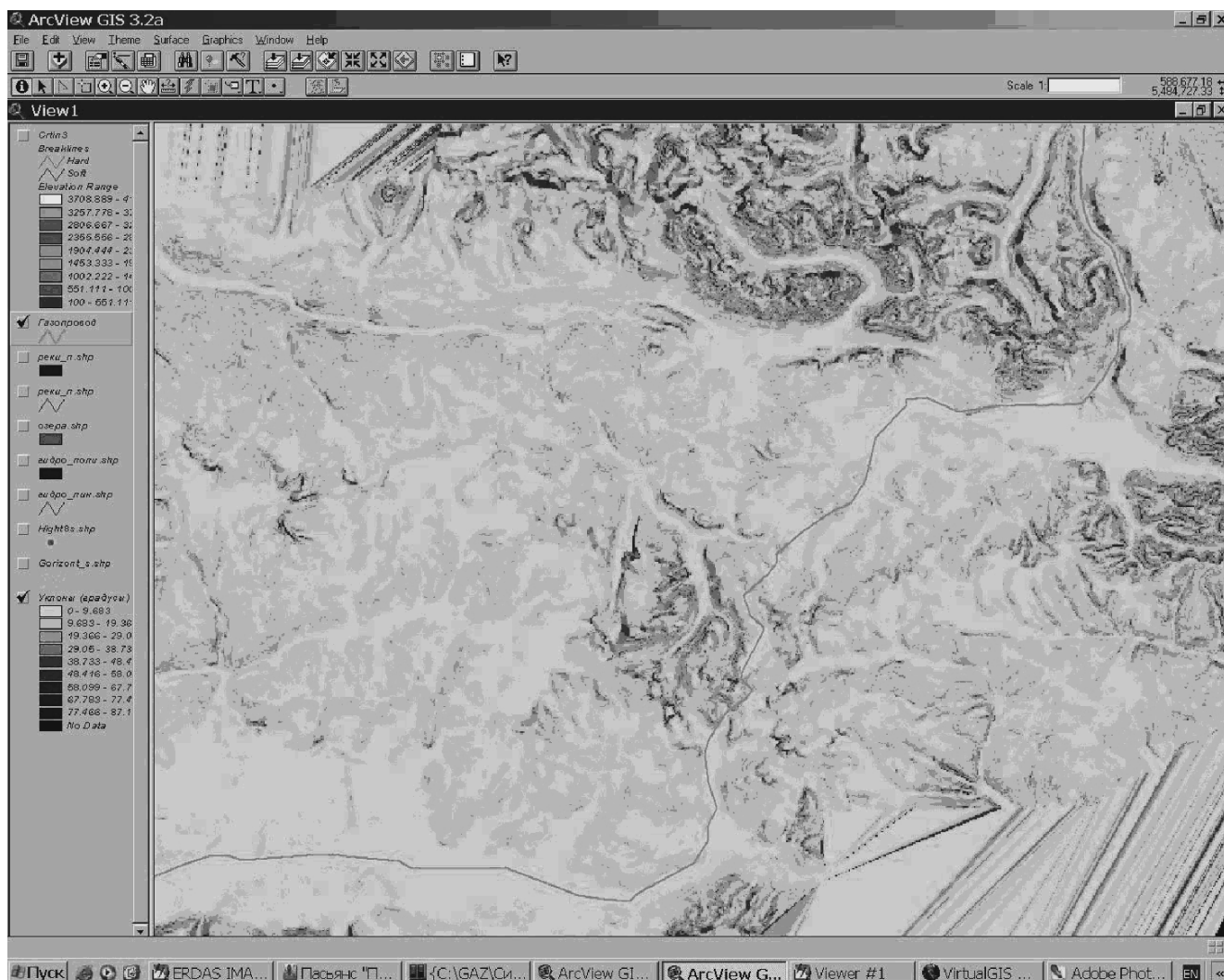


Рис. 3. Уклоны поверхности, рассчитанные по рельефу (выход на плато Укок).

ной организации – сотрудников отделов изысканий, трубопроводов, автоматизации, бюро ГИП.

ПРИМЕНЕНИЕ ВИЗУАЛИЗАЦИИ НА ОТДЕЛЬНЫХ УЧАСТКАХ

В процессе проектирования очень важны оценки и уточнения как отдельных участков трассы, так и оценки влияния отдельных факторов окружающей среды, неравномерно распределенных в области коридора трубопровода. Такие оценки удобно осуществлять и воспринимать на основе предварительного расчета и геовизуализации пространственных распределений факторов, или их совокупности. Обычно данные по отдельным факторам и соответствующие тематические карты готовятся профильными подразделениями проектного института, или сводятся ими из отчетов субподрядчиков. С помощью ГИС достаточно легко провести расчет производных материалов по этим данным,

обеспечить анализ и геовизуализацию для коллективного анализа. Например, важную информацию для выбора маршрута трубопроводов дают данные по свойствам грунтов, наличию опасных участков, ограничений, уклонам поверхности и др. На рис. 3 показано поле уклонов поверхности, представленное с помощью цветовой шкалы значений уклонов, что позволяет существенно облегчить выбор трассы на этом участке.

Уже при предварительном выборе трассы могут быть весьма полезны функции геовизуализации на основе материалов “драпировки рельефа космоснимками”. Например, при выборе трассы газопровода “Алтай” при входе в Горный Алтай с севера традиционный расчет (камеральное трассирование с предварительным выбором конкурентоспособных вариантов трассы – по (СНиП, 1996, п. 6.1.3)) был на выбор трассы по берегу р. Катунь, и лишь осмотр этих мест с вертолета убедил проектировщиков отойти от этого очень

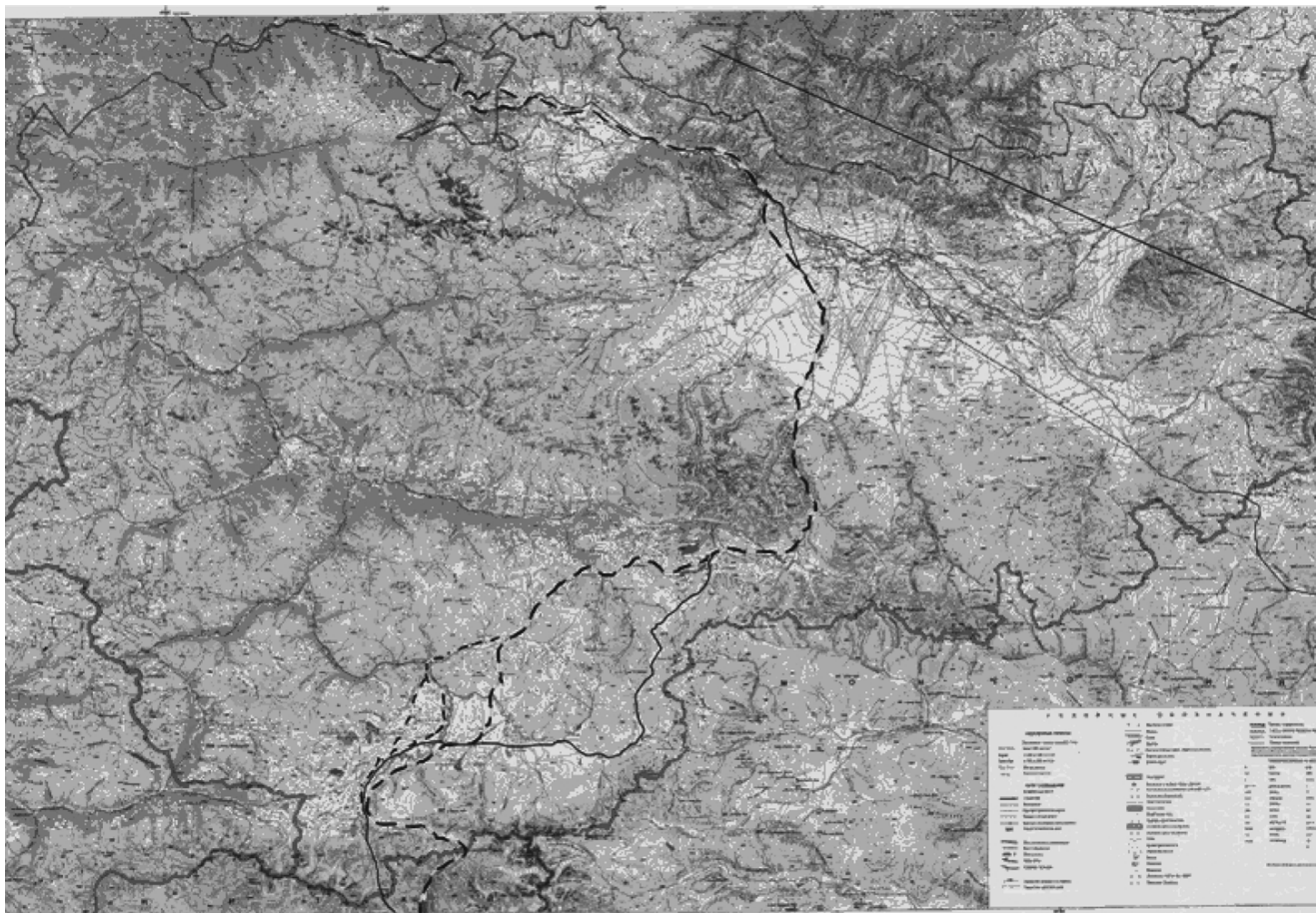


Рис. 4. Варианты трассы МТП «Алтай» на южных участках.

дорогого варианта в пользу долины р. Песчаной, лежащего западнее. Хотя вполне наглядное представление ситуации обеспечивает 3D ГИС с помощью соответствующих виртуальных пролетов. Аналогичные задачи возникают при анализе трассировки газопровода (ГП) по долине р. Чуи, переходе перевалов. Здесь также часто требуется итеративный переход от мелкого масштаба с грубым выбором трассы к ее детализации на опасных участках. Иногда лишь при детальном представлении территории очевидны невозможность прокладки трассы в ряде мест или большое удорожание, что приводит к необходимости возврата на верхний масштабный уровень и изменения трассы. Аналогичные ситуации возникали и на трассах магистрального трубопровода (МТП) «Сахалин–Владивосток» и при трассировании МТП в Южной Якутии.

Много вариантов возникает при трассировке ГП в южной части Горного Алтая (рис. 4). Здесь нами проводилось создание подробных моделей ситуации на основе представления рельефа и высокодетальной космосъемки для трех участков в районе перевала Канас на русско-китайской границе (переход по перевалу вдоль морены, выход

восточнее, с обходом по склону над озером и переход через перевал Карандыр). На рис. 5 показан виртуальный пролет с выходом трассы на перевал Канас, а на рис. 6 – на перевалы Канас (слева) и Карандыр (справа). Оба этих рисунка – кадры фильмов, синтезированных в виртуальной ГИС проекта. При этом вариант перевала Карандыр возник уже после завершения основных работ по инициативе китайской стороны. Обоснование трудоемкости (фактически невозможности) этого варианта, в связи с этим, могло выполняться лишь на основе ранее созданной 3D ГИС. Были построена более подробная ЦМР, наложены снимки высокой детальности и сформирован деморолик, показывающий наличие крупного ледника, практически исключающего здесь трассировку трубопровода. Виртуальный пролет с выходом восточного варианта трассы на приграничное озеро показан на рис. 7, где видно, насколько круты склоны гор над берегом озера на всем протяжении.

Для распространенной модели выбора при помощи функции *least cost pathway* модуля *Spatial Analyst* системы *ArcGIS* со сверткой факторов удорожания в критерии итерации удобен компьютерный расчет с визуализацией для последовательного

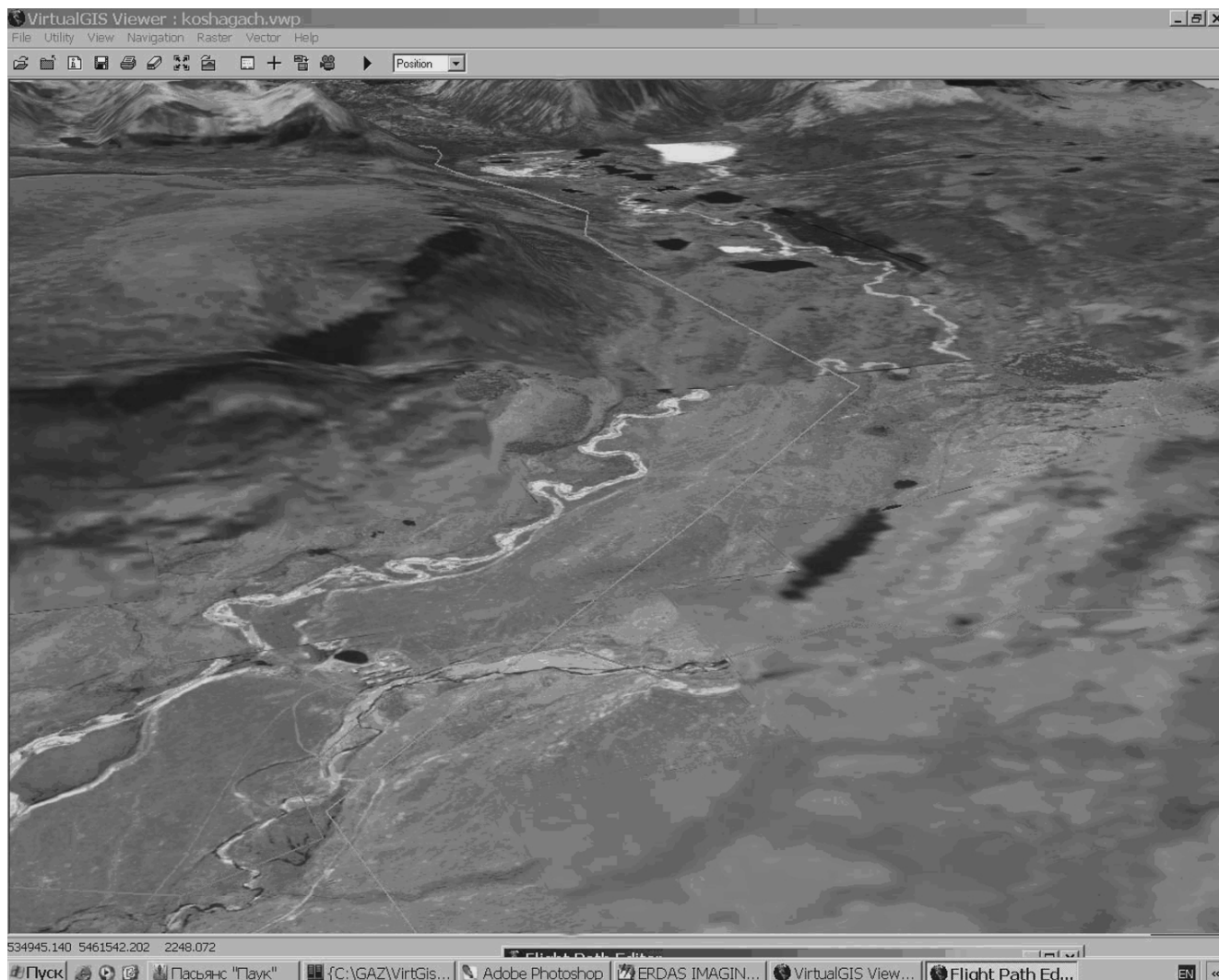


Рис. 5. Виртуальный пролет с выходом трассы на перевал Канас.

подбора значений весов факторов и их сочетаний, наиболее соответствующих представлениям экспертов. Аналогично отображаются пространственные ограничения, значения оценок рисков опасных процессов.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДЗ И ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ

Практически полезными оказались вычисления пересечений водотоков трассой МТП. Многие водные объекты со временем меняют свои характеристики, русла и контуры, которые не всегда соответствуют нанесенным на картах и требуют уточнений по данным ДЗ. Полезны, например, снимки паводковой ситуации, полученные в период разлива рек. Здесь также удобно для анализа гидрологической ситуации оперативно формировать методами геовизуализации тематические карты. Например, увязывая ширину линий водотоков с их

объемами стока, площадями водосборных бассейнов, формируя пространственно-временные базы данных и изображений.

Полезно дешифрирование данных ДЗ для земель с.-х. назначения, используемого очень широко при согласовании отводов земельных участков. На основе этих результатов и уточненных карт в дальнейшем возможна оценка компенсации за выбытие лесных и с.-х. земель, рассчитываемая с помощью буферных зон вдоль трассы МТП. Используя данные ДЗ и методы геовизуализации, можно точнее обеспечить выбор трассы, например, с учетом кадастровой оценки земель, сопоставлений вариантов трасс по стоимости и т.п. Близкие ситуации возникают и при согласовании обходов участков с памятниками истории, культуры, охраняемыми природными объектами.

При дальнейшем развитии данных технологий необходимо устранение противоречий потенциаль-

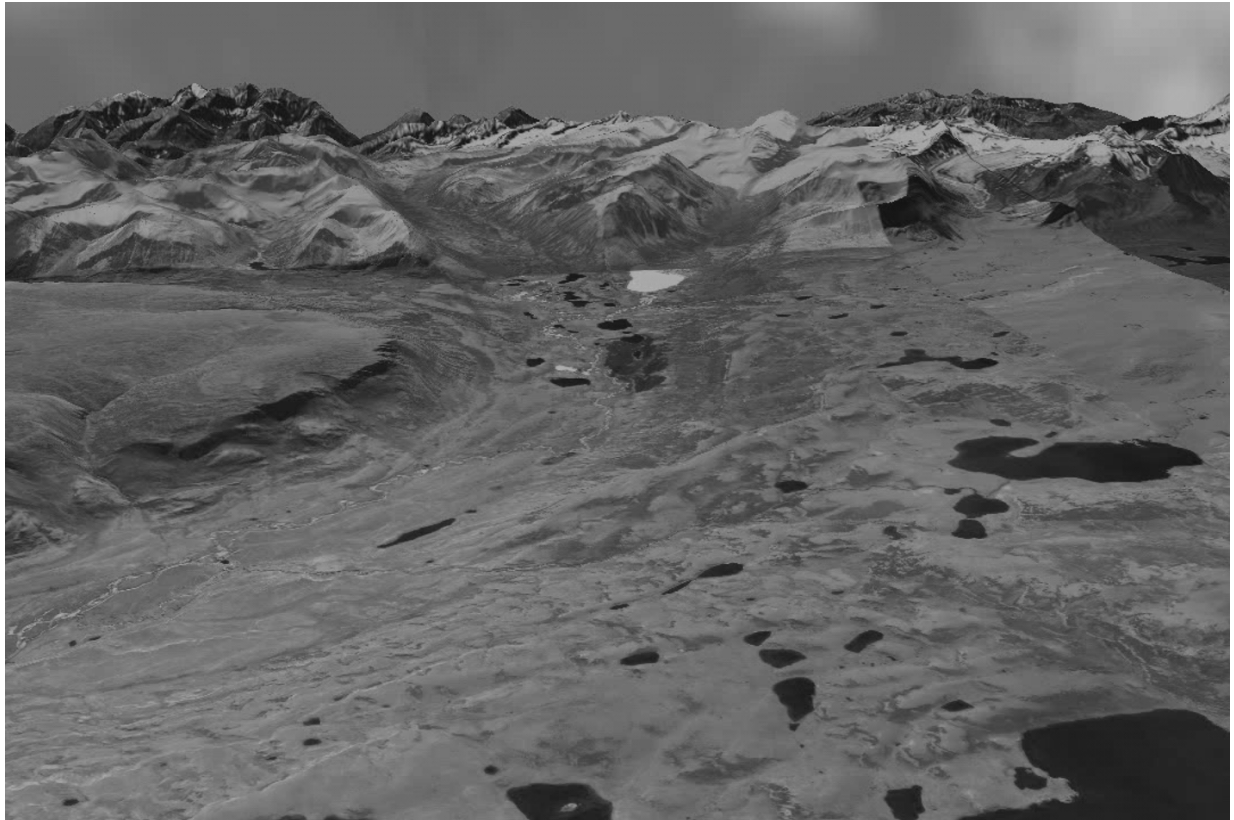


Рис. 6. Виртуальный пролет с выходом с севера на перевалы Канас и Карандыр на российско-китайской границе.



Рис. 7. Кадр фильма подлета к приграничному озеру (восточный вариант трассы).

но возможного оперативного согласования проектных карт на основе “цифрового документооборота” с действующими процедурами согласования бумажных выкопировок, часто неактуальных, неточных, но имеющих официальный статус.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ особенностей ранних стадий процесса проектирования магистральных трубопроводов и определены требования к характеристикам программных систем. Описаны основные элементы технологии построения трехмерных ГИС, поддерживающих режим геовизуализации. На реальных примерах показаны простые варианты применения этого режима, обеспечивающего интеграцию локальных компьютерных проектных решений с возможностями анализа проектных ситуаций и коллективного экспертного выбора наилучших вариантов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Артемов Ю., Артемова Е.* Новые технологии в проектировании магистральных трубопроводов // ArcReview. 2001. V. 2. № 17. С. 14.
- Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса / Под ред. В.Г. Бондура. М.: Научный мир, 2012. 558 с.
- Бондур В.Г.* Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–16.
- Бородавкин П.П., Березин В.Л., Рудерман С.Ю.* Выбор оптимальных трасс магистральных трубопроводов. Л.: Недра, 1974. 240 с.
- Брауде Э.Дж.* Технология разработки программного обеспечения. СПб.: Питер, 2004. 655 с.
- Дерцакян А.К., Шпотаковский М.Н., Волков Б.Г. и др.* Справочник по проектированию магистральных газопроводов. Л.: Недра, 1977. 519 с.
- Земля из космоса. Спецвыпуск: ДЗЗ в нефтегазовой отрасли. Вып. 8. 2011.
- Иванов В.П., Фукс А.Л., Рюмкин А.И.* Построение электронных моделей территории Томска на основе высокодетаальной космосъемки // Геоинформатика. Томск: ТГУ, 1999. С. 235–244.
- Ищук А.А., Швайко В.Г., Курбацкий А.С.* Возможности пространственного моделирования в ГИС интегрированной стоимости трасс проектируемых коммуникаций // ArcReview. 2005. № 1. С. 13–16.
- Корсей С., Прохожаев Р., Рьльский И.* Оптимизация трассы трубопровода с помощью ГИС // ArcReview. 2003. № 1. С. 20–21.
- Коршак А.А., Нечваль А.М.* Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов. СПб.: Недра, 2008. 488 с.
- Кутуков С.Е.* Информационно-аналитические системы магистральных трубопроводов. М.: СИП РИА, 2002. 324 с.
- Мирза Н.С., Петренко Д.А., Скворцов А.В.* Технология трехмерной визуализации данных ГИС и САПР Indor-Viewer 3D // Вестн. ТГУ. 2006. № 290. С. 267–270.
- Протасов К.Т., Рюмкин А.И.* Непараметрический алгоритм распознавания объектов подстилающей поверхности Земли по данным аэрокосмической съемки // Вестн. ТГУ. 2002. № 275. С. 41–46.
- РД 153-39.4Р-128-2002 (ВСН) Инженерные изыскания для строительства магистральных нефтепроводов. 2002.
- Рьльский И.А.* Оптимизация трасс трубопроводов с использованием ГИС-технологий // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 2004. № 4. С. 34–41.
- Рюмкин А.И.* Информационное обеспечение 3D-ГИС для проектирования и реконструкции магистральных трубопроводов и трасс инженерных коммуникаций // Математич. модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем / Тр. XII Всерос. науч. семинара с международ. участием. Ай-Петри, п. Корезиз, г. Ялта, Украина, 20–26 сентября 2010. Москва–Иркутск: ИСЭМ, 2010. С. 437–448.
- Рюмкин А.И.* О геоинформатике в Томском государственном университете и научно-производственном объединении “Сибгеоинформатика” // Вестн. ТГУ. 2002. № 275. С. 33–40.
- Рюмкин А.И., Кравченко Г.Г.* Организация регионального развития на основе геоинформационных технологий // Геоинформатика. 2007. № 2. С. 36–42.
- Рюмкин А.И., Чумичев И.И.* Интеграция геоинформационных технологий и данных дистанционного зондирования в задачах управления устойчивым развитием области // Мат. междунар. конф “Интеркарто-4. ГИС для оптимизации природопользования в целях устойчивого развития территорий”. Барнаул, 1998. С. 232–240.
- Скворцов А.В., Мирза Н.С.* Алгоритмы построения и анализа триангуляций. Томск: Изд-во ТГУ, 2006. 168 с.
- СНиП 11-02-96. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения.
- СП 47.13330.2011 Свод правил. Инженерные изыскания для строительства магистральных трубопроводов (Актуализированная редакция СНиП 11-02-96).
- Фукс А.Л.* Быстрый алгоритм триангуляции Делоне, основанный на предварительной обработке набора точек // Тр. Междунар. науч.-практ. конф. “Геоинформатика-2000” Томск: Изд-во ТГУ, 2000. С. 45–50.
- Хромых В.В., Хромых О.В.* Цифровые модели рельефа. Томск.: Изд-во ТМЛ, 2007. 177 с.
- Andrienko G., Andrienko N., Demšar U., Dransch D., Dykes J., Fabrikant S., Jern M., Kraak M.J., Schumann H., Tominski C.* Space, time and visual analytics // Int. J. Geogr. Inform. Sci. 2010. V. 24. № 10. P. 1577–1600.
- Balogun L.F. et al.* Optimal Oil Pipeline Route Selection using GIS: Community Participation in Weight derivation and Disaster Mitigation // Int. Conf. Future Environm. and Energy. PCBEE. 2012. P. 100–104.
- Balogun L.F., Matori A.N., Lawal D.U.* Geovisualization of Sub-surface Pipelines: A 3D Approach // Modern Appl. Sci. 2011. V. 5. № 4. P. 158–165.
- Batty M., Vargas C., Smith D.* Visually-intelligible land use transportation models for the rapid assessment of urban futures. Centre for Advanced Spatial Analysis Univ. College London. WP № 163. 2011.

- Bodum L.* Modelling virtual environments for geovisualization // *Explor. Geovisualiz.* 2005. P. 389–402.
- Delevar R.M., Naghibi F.* Pipeline routing using geospatial information system analysis // *ScanGIS'03. 9th Scandinavian Res. Conf. on Geogr. Inform. Sci. 4–6 June 2003. Espoo: Finland—Proceedings, 2003.* P. 203–213.
- He J., Zou Y., Ma Y.* Assistant Design System of Urban Underground Pipeline Based on 3D Virtual City // *Proc. Environm. Sci.* 2011. V. 11. P. 1352–1358.
- Hjelle O., Daehlen M.* *Triangulations and Applications.* Springer, 2006. 237 p.
- Kabanov M.M., Kapustin S.N., Ryumkin A.I., Fuks A.L., Chumichev I.I.* Control of the Territory Condition using the Space Survey in Optical Range // *Pattern Recogn. Image Anal.* 1999. V. 9. № 2. P. 388.
- Kjems E.* VR for decision support in urban planing // *Virtual Applications: Applications with Virtual Inhabited 3D Worlds.* L.: Springer-Verlag, 2004. P. 13–28.
- Use of High-Resolution Remote Sensing for Gas-Line Route Selection. Wisconsin Power & Light, Environmental Remote Sensing Center, Univ. of Wisconsin-Madison. Final rep. 1997.
- Nielsen A.* User-centered 3D geovisualization // *Proc. 12th. Int. Conf. on Geoinform. Univ. Gävle, Sweden, 2004.* P. 412–416.
- Wang K, Lo C.-P., Brook G.A., Arabnia H.R.* Comparison existing triangulation methods for spaced height fields // *Int. J. Geogr. Inform. Sci.* 2001. № 8. P. 743–762.
- Yildirim V., Nisançi R., Reisa S.* GIS based route determination in Linear Engineering Structures Information Management (LESIM) // *Shaping the Change. XXIII FIG Congress. Munich, Germany, October 8–13, 2006.*

Geovisualization with Remote Sensing Data in Gas Pipeline Designing

A. I. Ryumkin, E. S. Tyabaev

National Research Tomsk State University, Tomsk

NPO Sibgeoinformatica, Tomsk

Applicability of a method of geovisualisation in making of three-dimensional geoinformation systems (3D GIS) on the basis of digital elevation models (DEM) the Earth remote sensing data (RSD) for a substantiation of design decisions of early design stages of the turnpike pipelines is explored. In practical problems of performance of a predesign stage works for the Siberian pipelines development of DEM is fulfilled, variants of DEM coverings of line and pictures of different scale, the permission and feature of construction of a triangulation for DEM are spotted. The spatial analysis of the pipeline trace taking into account the existing description of natural resources, building objects, engineering communications and restrictions in the form of borders of nature sanctuaries and a cultural heritage is carried out. It is shown that at Improvement of variants of tracing on responsible sites the geovisualization methods have the major value, allowing to integrate with computer support the strongest abilities of experts and possibility GIS and of geoimages. Almost all possibilities of passing use of the spatial analysis in constructed 3D GIS with visualization of effects on resultant images are thus maintained. On real examples essential usefulness of methods of geovisualization is shown at making of information technologies of support of design decisions on designing of the turnpike pipelines. Systems created thus, DEM and databases are suitable for the organization in the subsequent monitoring of processes of building and pipeline maintenance.

Keywords: remote sensing, geovisualization, oil and gas pipeline, digital elevation models

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКИ И ДАННЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ИДЕНТИФИКАЦИИ СУДОВ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ СУДОВЫХ РАЗЛИВОВ В ЧЕРНОМ МОРЕ

© 2013 г. А. Ю. Иванов^{1,*}, А. А. Кучейко², Н. А. Филимонова², Н. В. Евтушенко^{1,2},
А. Ю. Антонюк², Н. В. Терлеева¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

²Инженерно-технологический центр «СКАНЭКС», Москва

*E-mail: ivanoff@ocean.ru

Поступила в редакцию 12.02.2013 г.

При проведении спутникового радиолокационного (РЛ) мониторинга восточной части Черного моря в 2011 и 2012 гг. были обнаружены беспрецедентно крупные пленочные загрязнения судового происхождения. Пятна имели сложную, большей частью вытянутую, форму и находились в российском секторе моря или на его границах. Повторные РЛ-съемки спутников Envisat, Radarsat-1 и Radarsat-2 и оптические съемки Terra и Aqua подтвердили наличие обширных пленочных образований. С использованием новых подходов и методов анализа впервые выявлены неопровержимые факты, подтверждающие события мойки танков в российском секторе моря. Данные автоматических систем идентификации судов помогли в определении ряда судов, причастных к загрязнениям. Приведены и анализируются сводные карты крупных судовых разливов, обнаруженных в 2011 и 2012 гг.

Ключевые слова: спутниковый мониторинг, радиолокационные изображения, данные автоматических систем идентификации судов, нелегальные судовые разливы, Черное море

DOI: 10.7868/S0205961413050011

ВВЕДЕНИЕ

Считается, что среди прочих загрязнений морской среды сырая нефть и нефтепродукты являются основным фактором, негативно воздействующим на морские экосистемы, в том числе внутренних морей (Патин, 1979, 2001; Пенно, 2001; Губанов, Иевлева, 2006). Аварии с танкерами и платформами (например, с Montara в Тиморском море (Терлеева, Иванов, 2013) и Deep Horizon в Мексиканском заливе (Иванов, Терлеева, 2011)), приводящие к гигантским нефтяным разливам, могут служить наглядной иллюстрацией проблемы антропогенного нефтяного загрязнения океанов и морей. Они в значительной степени влияют на общественное мнение, так как информация о них быстро становится доступной как средствами массовой информации, так и научному сообществу. Однако такие катастрофические события происходят достаточно редко и в целом дают незначительный вклад в общее загрязнение Мирового океана (ITOPF Handbook, 2012).

Помимо разливов, связанных с техногенными катастрофами платформ и нефтеналивных судов, существует три вида основных загрязнений, обусловленных судоходством и рутинными операци-

ями в море, а именно: балластные воды, танкерные моечные воды и льяльные воды (или отходы машинного отделения) (Kluser et al., 2006). Из-за них в морскую среду попадает большое количество нефтепродуктов, горюче-смазочных веществ (ГСМ), а также других загрязняющих веществ, образующих пленки на поверхности моря, причем на снимках из космоса они очень часто наблюдаются в зонах судоходства – на или вблизи судоходных трасс (Иванов, 2007; Лаврова, Митягина, 2012). Установлено, что количество нефтепродуктов, сбрасываемое в результате этих операций, значительно превышает количество нефти, попадающей в море в результате техногенных аварий или катастроф (European Commission, 2001; Kluser et al., 2006; Ferraro et al., 2009; ITOPF Handbook, 2012). Это один из главных и крупнейших источников загрязнения морской среды и побережий. Однако, несмотря на международное и национальное законодательство (МАРПОЛ, 1999), нелегальные сбросы с судов остаются нерешенной и неподдающейся эффективному контролю проблемой (European Commission, 2001; Kluser et al., 2006; Ferraro et al., 2009).

Для мониторинга и идентификации пленочных загрязнений моря в настоящее время повсе-

местно используют разнообразные средства дистанционного зондирования (ДЗ). В тех случаях, когда применение традиционных средств ДЗ — оптических и ИК-датчиков, как самолетных, так и спутниковых, ограничено состоянием атмосферы или освещенности, на помощь приходит космическая радиолокация. ИСЗ, оборудованные радиолокаторами с синтезированной апертурой (РСА), такие как Envisat, Radarsat-1, Radarsat-2, в настоящее время считаются наиболее эффективными средствами мониторинга нефтяных загрязнений и применяются повсеместно. На радиолокационных изображениях (РЛИ) морской поверхности разнообразные пленочные загрязнения отображаются в виде темных пятен (Alpers, Espedal, 2004; Torouzelis, 2008). Широкое покрытие поверхности Земли и высокое пространственное разрешение, сравнимое с разрешением оптических датчиков, делают РСА незаменимыми в оперативных и региональных приложениях (Brekke, Solberg, 2005; Torouzelis, 2008). Кроме того, ряд современных мультиполяризационных РСА позволяют проводить различение нефтяных пятен от прочих slickов, образованных различными сликообразующими явлениями в верхнем слое моря и приводной атмосфере (Brekke, Solberg, 2005; Иванов, 2007). РСА способны картографировать разливы и суда, дать информацию об их положении, однако не способны различить тип и измерить толщину пленок нефти и нефтепродуктов.

Широкое использование спутниковых данных в системах мониторинга реального времени обусловлено не только возможностью наблюдения за пленочными загрязнениями различного типа на морской поверхности, но и возможностью последующей их идентификации и классификации. В таких мониторинговых системах и их подсистемах для дальнейших верификации и валидации результатов обнаружения используются географические информационные системы (ГИС), а также данные автоматических систем идентификации судов (АИС). Геоинформационный подход (Ivanov, Zatyagalova, 2008; Müllenhoff et al., 2008; Morović, Ivanov, 2011) подразумевает интеграцию в ГИС физико-географических данных о водном бассейне, данных ДЗ, информации об объектах инфраструктуры топливно-энергетического комплекса и судоходстве, а также пятен, обнаруженных на РЛИ. ГИС позволяет создать конечный продукт — карты распределения пленочных/нефтяных загрязнений. В настоящее время он реализован в отечественном веб-ГИС приложении Геомиксер (<http://geomixer.ru>), позволяющем создавать такие карты он-лайн. АИС как средства мониторинга и слежения за судами служат для идентификации судов, их курса и положения относительно разлива с помощью радиоволновых передатчиков (через спутниковые или наземные системы). Одна из таких реально функционирующих в настоящее время систем для мониторинга нефтя-

ных загрязнений морей, омывающих Европу, — европейский сервис CleanSeaNet (<https://csndc.emsa.europa.eu>).

Летом—осенью 2011—2012 гг. при проведении спутникового РЛ-мониторинга в российском секторе Черного моря было обнаружено несколько беспрецедентно крупных судовых разливов. В настоящей статье анализируются их сигнатуры на трех сериях РЛИ, которые были получены спутниками Envisat, Radarsat-1 и Radarsat-2. На этих РЛИ были однозначно детектированы крупные судовые разливы, связанные с мойкой танков и нелегальными судовыми сбросами в восточной части Черного моря. Для однозначной интерпретации привлекались оптические данные спутников Terra и Aqua, а также данные АИС, покрывающих Черное море. Для того чтобы осознать уровень проблемы, приведены и анализируются сводные карты распределения крупных судовых разливов, обнаруженные в результате мониторинга Черного моря в 2011 и 2012 гг.

РАЗЛИВЫ 23—25 ИЮНЯ 2011 г.

23 июня 2011 г. на РЛИ спутника Envisat (19:29 UTC) (рис. 1) было обнаружено пленочное загрязнение общей площадью 18 км², интерпретированное как судовой разлив (СКАНЭКС, 2011а, 2011б). Разлив представлял собой длинный линейчатый, прерывистый slick, состоящий из пяти частей. На РЛИ была также обнаружена отметка судна — вероятного виновника сброса загрязненных вод. Судя по форме слика, обнаруженное судно сбрасывало порциями в воду неизвестный нефтепродукт или маслянистое вещество и, возможно, начало промывать танки в этом районе. Эта операция началась примерно в 10:00 UTC 23.06.2011, когда судно находилось в точке с координатами 42°59'46" с.ш., 37°10'09" в.д. (рис. 1) и затем продолжало идти на северо-запад со скоростью около 7 узлов.

Вторая съемка была выполнена со спутника Envisat 24.06.2011 в 07:38 UTC. Однако в кадр попало лишь восемь небольших сликовых фрагментов (площадью от 0.5 до 1.1 км²), оставшихся от первого сброса, произведенного 23.06.2011 (здесь не приводится).

Третья съемка со спутника Radarsat-1 (рис. 2а) была выполнена 24.06.2011 в 15:23 UTC, через 20 ч после первой. Она показала наличие обширного пленочного образования (320.5 км²) в том же самом районе и его существенную трансформацию во времени. Как видно из этого РЛИ, 24 июня пятно стало иметь сложную форму, простираясь на 119 км в российском секторе Черного моря и частично захватывая также турецкий и украинский секторы. На этом РЛИ также хорошо видно, что судно закончило этап (галс) мойки танков, а пятна от первых двух превратились в обширные пленочные обра-

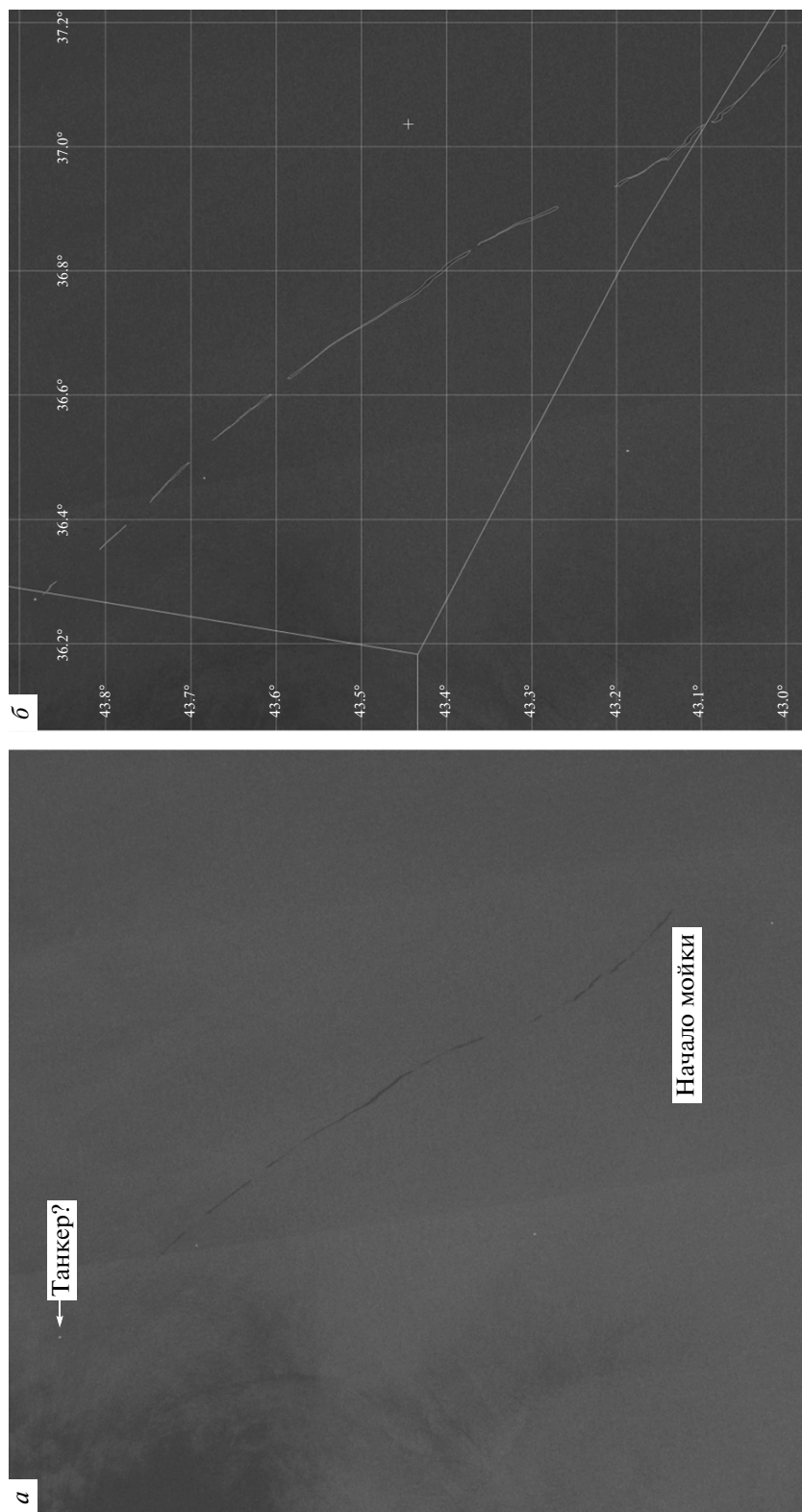


Рис. 1. а – Увеличенный фрагмент РЛИ Eupisat от 23.06.2011 (19:29 UTC); хорошо виден первый галс длиной 119 км, на котором пока еще неизвестное судно начало операции мойки танков; б – положение разлива относительно границ секторов (экономзон). © ESA, “СКАНЭКС”.

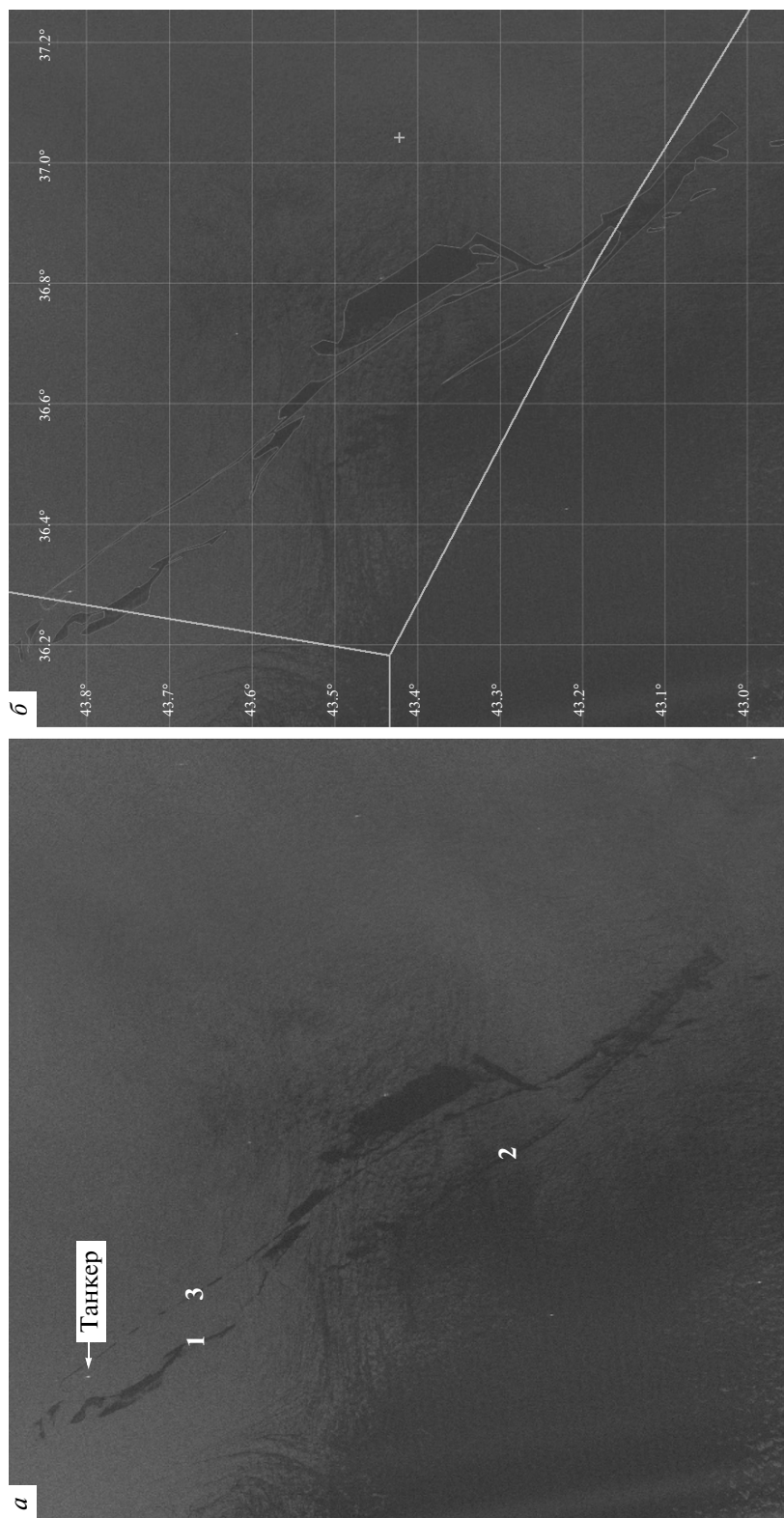


Рис. 2. а – Фрагмент РЛИ Radarsat-1 от 24.06.2011 (15:23 UTC), на котором отобразились три галса (1, 2 и 3), где проводилась мойка танков, и положение танкера в начале четвертого галса (яркая точка); б – положение разливов относительно границ секторов. © CSA/MIDA, “СКАНЭКС”.



Рис. 3. Судовые разливы на оптическом снимке Aqua MODIS от 24.06.2011 (10:34 UTC); стрелками показаны места разворота танкера. © NASA GSFC.

зования, расположенные слева и справа от текущего галса (3 на рис. 2б). Благодаря пленочной природе пятен, они были обнаружены и на оптических снимках Terra и Aqua от 24.06.2011 (09:00 и 10:34 UTC) и 25.06.2011 (08:00 UTC), которые, таким образом, независимо подтвердили наличие пленок на поверхности моря. Кроме того, на этих снимках отчетливо видны места разворота судна (рис. 3).

Съемка 25.06.2011 в 04:19 UTC со спутника Radarsat-2 (рис. 4), проведенная через 13 ч после третьей, обнаружила еще более обширное загрязнение морской поверхности (423.5 км²), которое уже представляло собой огромное многокомпонентное пленочное образование и в котором четко выделялись три галса, на которых судно, очевидно, производило операции мойки. Одной из характерных особенностей отображения пятен является “ветровая размазка” сликов (перьевидный край) (рис. 4а), что может говорить, во-первых, о том, что разлитый продукт представлял собой сложную по составу смесь, а во-вторых, о на-

правлении ветра (Alpers, Espedal, 2004; Иванов, 2007) (был северо-восточным), который трансформировал наветренные края пятен (стрелки на рис. 4а). Кроме этого, сохранение пленочных образований на поверхности моря в течение 33 ч с момента первого обнаружения может говорить о достаточно высокой концентрации маслянистого вещества в разливе.

На рис. 5а (см. также 1 на рис. 9; оба рис. на цветн. вклейке) показана интегральная карта разливов: пятна от 23 июня даны красным, от 24 июня: Envisat – фиолетовым, Radarsat-2 – синим, а от 25 июня – зеленым. На этом рисунке достаточно четко выделяются галсы, которые сделало судно для мойки танков.

Совместный анализ РЛИ и данных АИС (канадской компании exactEarth) показал, что виновником разливов является судно “Yukon Star” (рис. 6) – танкер-химовоз постройки 2009 г., приспособленный для перевозки жидких химических или пищевых продуктов. Он имеет размеры 184 × 27 м, ско-

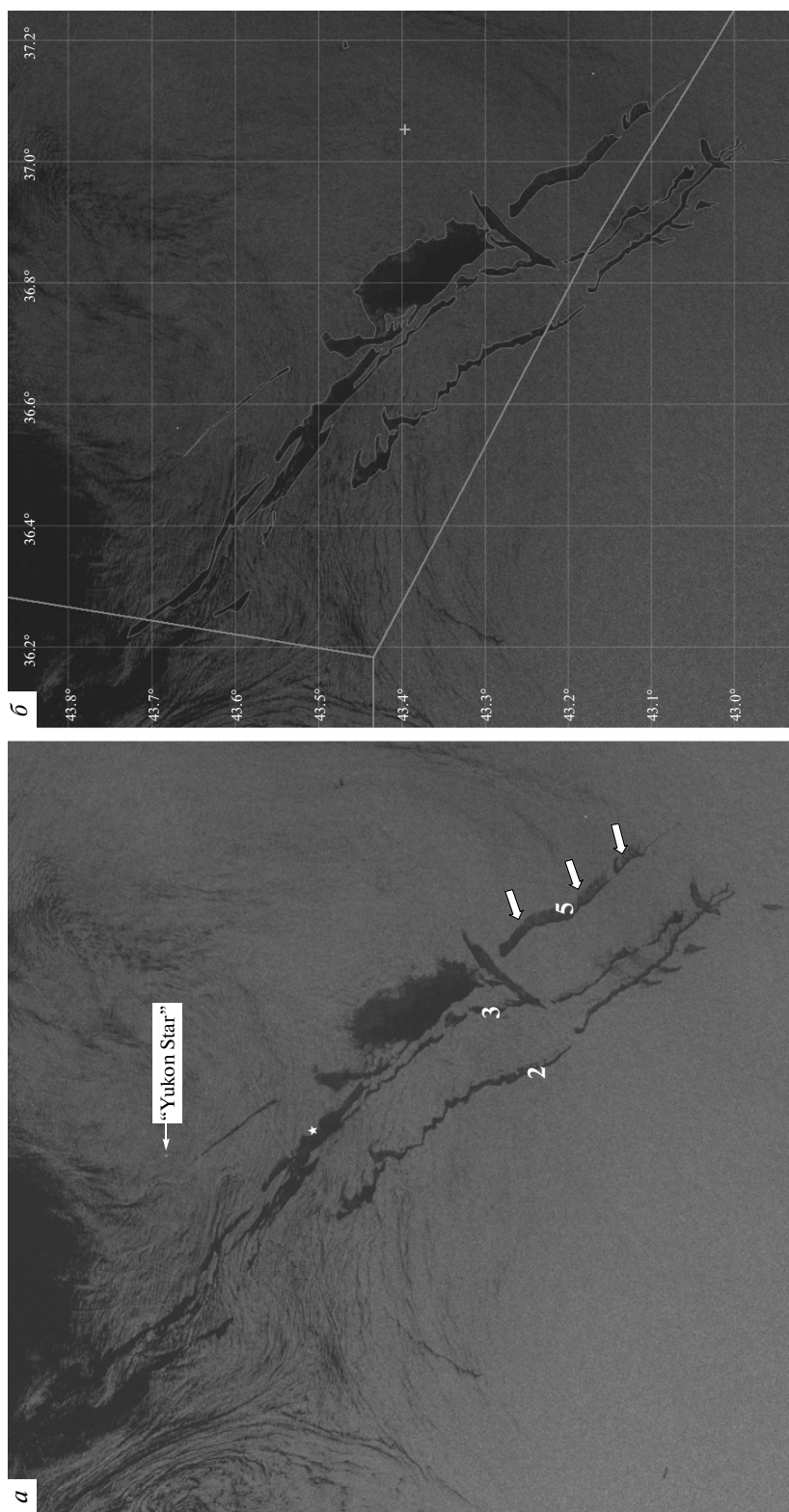


Рис. 4. *a* – Фрагмент РПИ Radarsat-2 от 25.06.2011 (04:19 UTC), на котором отобразились три галса (2, 3, 5), на которых проводилась мойка танков, и положение танкера на 17:43 UTC (звездочка) по данным сайта www.mapletraffic.com. Перьевидный край пятен указывает на направление ветра во время съемки (показано стрелками); *б* – положение разливов относительно границы секторов. © CSA/MDA, "СКАНЭКС".



Рис. 6. Танкер “Yukon Star” (источник: <http://www.marinetraffic.com>).

рость до 8 узлов, водоизмещение 37850 т, грузоподъемность 23310 т. Танкер зарегистрирован в Международной морской организации (International Maritime Organization (IMO)) под номером IMO 9411991 и ходит под флагом Великобритании.

РАЗЛИВ 5 АВГУСТА 2011 г.

На РЛИ, полученном со спутника Radarsat-1 05.08.2011 г. в 03:40 UTC (рис. 7а), было обнаружено другое крупное пленочное загрязнение (площадь 185 км²; 2 на рис. 9 на цветн. вклейке), также интерпретированное как судовой разлив. Оно представляло собой длинный (около 116 км) и достаточно широкий (2–2.5 км) линейчатый слик (рис. 7а). На РЛИ была также обнаружена отметка судна – виновника сброса загрязненных вод. Судя по форме слика, в воду сбрасывалось неизвестное маслянистое вещество, образующее пленки. Эта операция началась в точке с координатами 43°13'17" с.ш., 37°16'21" в.д. сразу после того, как судно вошло в российский сектор моря, и продолжалось до тех пор, пока оно не подошло к границе российских территориальных вод; затем судно вошло в воды Абхазии и встало там на рейд.

Совместный анализ РЛИ и данных АИС, представленных Администрацией морского порта Новороссийск (ФГУ “АМП Новороссийск”), показал, что наиболее вероятным виновником разлива является судно “Tarik Emir” (рис. 7б) – грузовое судно (постройки 1980 г.), приспособленное для

перевозки различных грузов. Оно имеет размеры 106 × 17 м, скорость до 10 узлов, тоннаж 6600 т; судно зарегистрировано под номером IMO 8001517 и ходит под флагом Панамы.

К сожалению, это судно ни в один из российских портов не заходило, в связи с чем его инспекция оказалась невозможной. Поэтому можно считать, что этот случай, скорее всего, положениям конвенции МАРПОЛ не соответствует. Разлив, судя по перьевидной размазке пятна (Alpers, Espedal, 2004; Иванов, 2007), содержал тяжелые фракции неизвестного маслянистого продукта, остатки которого продолжали наблюдаться на РЛИ Radarsat-1 от 08.08.2011 (15:11 UTC) и Envisat от 09.08.2011 (07:52 UTC) (рис. 7в, г).

РАЗЛИВЫ 2012 г.

В 2012 г. в ходе спутникового РЛ-мониторинга Черного моря, проводимого ИТЦ “СКАНЭКС”, в российском и украинском секторах в конце сентября и начале октября были также обнаружены крупноразмерные пленочные загрязнения судового происхождения (СКАНЭКС, 2012). С помощью данных АИС удалось идентифицировать ряд судов, причастных к загрязнению.

Так, последовательные съемки северо-восточной части Черного моря зафиксировали крупные разливы 19 сентября и 7 октября в территориальных водах российского сектора на подходах к Новороссийской бухте и в районе Туапсе (суммарная

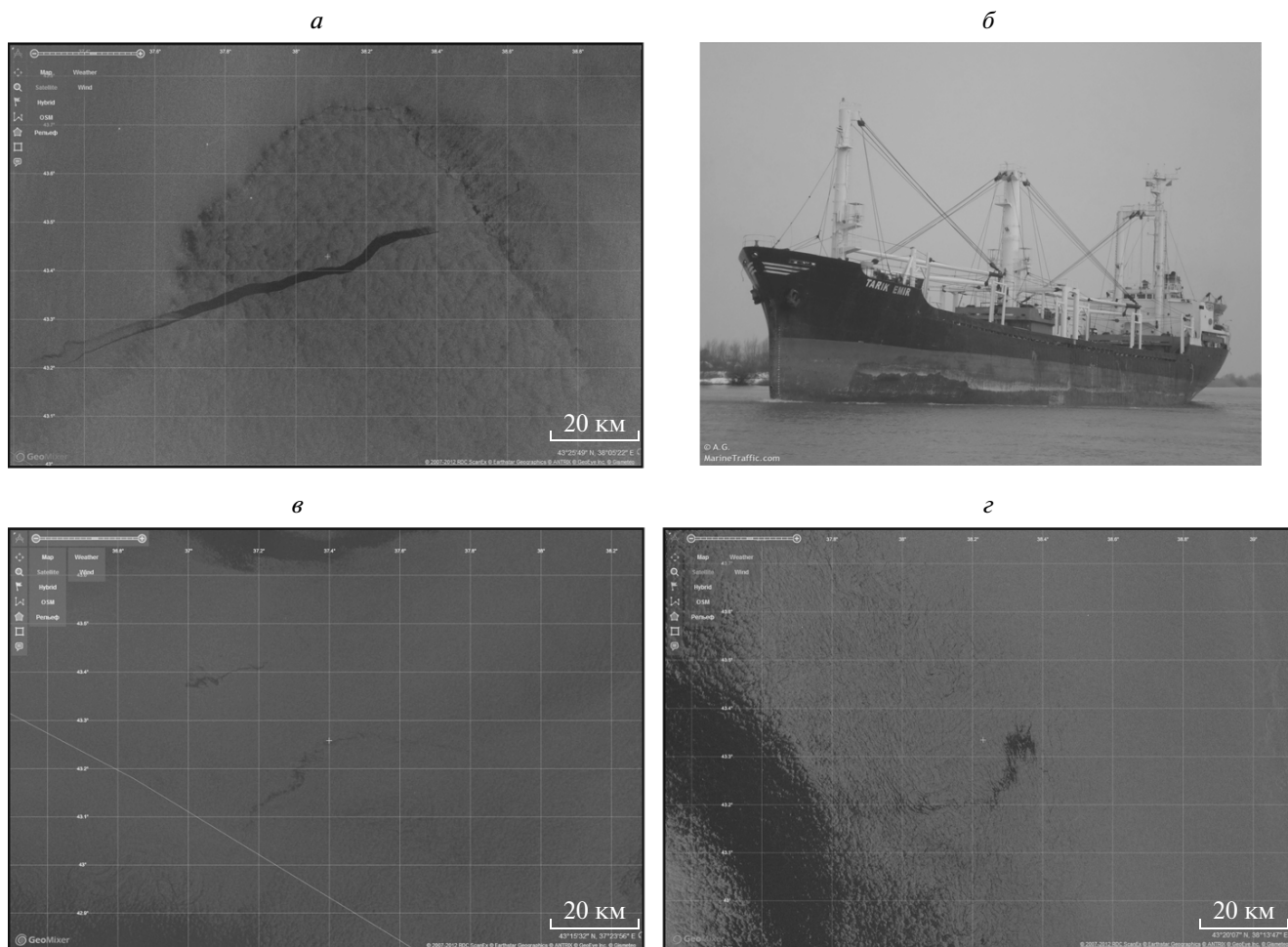


Рис. 7. *а* – Судовой разлив (площадь ~185 км²), обнаруженный на РЛИ Radarsat-1 от 05.08.2011 (03:40 UTC); *б* – грузовое судно “Tarik Emir” – судно-загрязнитель (фото: <http://www.marinetraffic.com>); и остатки разлива: *в* – на РЛИ Radarsat-1 от 08.08.2011 (15:11 UTC), *г* – на РЛИ Envisat от 09.08.2011 (07:52 UTC). © CSA/MDA, ESA, “СКАНЭКС”.

площадь 17.1 и 14.2 км²), а 26 и 29 сентября – в украинском секторе моря (суммарная площадь 59.6 и 42.5 км²).

На РЛИ Radarsat-1 от 7 октября 2012 г. в 03:27 UTC (рис. 8*а*) был обнаружен разлив (3 на рис. 10 на цветн. вклейке) в территориальных водах РФ на траверзе п. Туапсе (в 14 км от берега). Разлив имел линейчатый вид и состоял из шести фрагментов, что говорит о том, что он был сделан по ходу судна; судно находилось в 15 км от его начала. Суммарная длина пятна-слика составила 34.6 км, длина самой большей части – 17.8 км. Форма, положение (в терр. водах) и характеристики пятна позволили утверждать, что он был образован в результате нелегального сброса с проходящего судна.

По данным “АМП Новороссийск”, к инциденту 7 октября оказался причастен морской буксир “Сомери” (рис. 8*б*) под флагом России, следующий в п. Сочи курсом 132° со скоростью около 6 узлов. Инспекционной проверкой буксира в морском порту Сочи подтверждена причастность

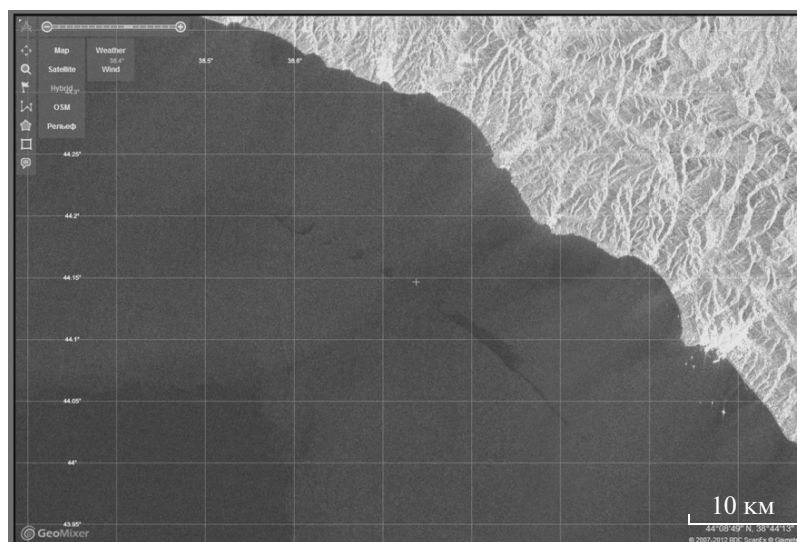
судна к несанкционированному сбросу около 1 м³ нефтешлама (смесь нефтепродуктов, воды и прочих примесей).

Инцидент 19 сентября был проанализирован более детально в “АМП Новороссийск”. По их данным, в момент времени, близкий к времени съемки, в районе обнаружения пятен находились наиболее вероятные источники загрязнений – т/х “Crystal Sun” (флаг Камбоджи, 1977 г. постройки), который убыл из порта Новороссийск после выгрузки цемента, и т/х “Dream True” (флаг Панама, 1983 г. постройки), который заходил в порт Новороссийск под погрузку леса (подробнее см. (Black Sea Commission, 2012)).

ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках данной статьи на примере случая с танкером “Yukon Star” рассмотрим проблему мек танков в Черном море.

а



б



Рис. 8. а – Судовой разлив (площадь ~14 км²), обнаруженный в российских территориальных водах на РЛИ Radarsat-1 от 07.10.2012 (03:27 UTC); б – буксир “Сомери”, идентифицированный по данным АИС (фото: <http://www.marinetraffic.com>) © CSA/MDA, “СКАНЭКС”.

Судно-виновник и его маневры

Как уже говорилось, с помощью данных АИС из “АМП Новороссийск” было установлено, что в районе обнаруженного пленочного образования находилось судно “Yukon Star” (рис. 6). Детальный анализ данных ДЗ и АИС показал, что в период 23–25 июня 2011 г. танкер действительно совершал длительное сложное маневрирование в районе обнаружения пленочного загрязнения (рис. 5а). Само судно в момент сброса продуктов с шлейфом пленочных загрязнений достоверно обнаружено на двух РЛИ от 23.06.2011 и 24.06.2011 (рис. 1а, 2а). Так, на РЛИ от 23.06.2011

(рис. 1) длина следа составляет 119 км. Судно фактически совершило пять полных галсов (рис. 5а): три – курсом 310°–320° и два обратно – курсом 130°–140°, длиной от 85 до 123 км, с целью проведения операций мойки танков. Это и было зафиксировано на снимках из космоса.

На рис. 5б (цвет. вклейка) приведено совмещение трассы танкера (данные АИС “Транзас”) с его следом, отобразившимся на РЛИ от 24.06.2011 (рис. 2) – оно полностью подтверждает предварительные выводы о сложном маневрировании судна. Наконец, по данным сайта www.marinetraffic.com, 25.06.2011 в 17:43 UTC “Yukon Star”, по-видимому,

Таблица 1. Условия сброса нефтесодержащих смесей из машинных отделений судов всех типов (МАРПОЛ, 1999)

В пределах Особых районов	Нефтяные танкеры всех размеров и др. суда 400 бр. т и более	Запрещен любой сброс , кроме тех случаев, когда соблюдаются следующие условия: (1) судно на ходу; (2) содержание нефти в сбрасываемой смеси без разбавления составляет не более 15 мг/л (1 часть в 1 млн частей воды); (3) на судне включено оборудование для фильтрации нефти с устройством, блокирующим сброс при превышении уровня содержания нефти 15 мг/л; (4) на нефтяных танкерах льяльные воды сбрасываются не из насосных грузовых помещений и не смешаны с нефтеостатками груза.
	Суда менее 400 бр. т, не являющиеся нефтяными танкерами	Запрещен любой сброс , кроме тех случаев, когда нефтесодержание в сбрасываемой смеси составляет без разбавления не более 15 мг/л.

Таблица 2. Условия сброса стоков, содержащих вредные жидкие вещества в Особых районах (МАРПОЛ, 1999)

Категория веществ/Условия сброса	<i>A</i> (сильно-токсичные)	<i>B</i> (токсичные)	<i>C</i> (слабо-токсичные)	<i>D</i> (нейтральные и нетоксичные)
Максимальная концентрация вещества в стоке	отсутствует	1 мг/л в кильватерном следе судна	1 мг/л в кильватерном следе судна	1 часть вещества в 10 частях воды в сбрасываемой смеси
Максимальное кол-во груза, сбрасываемое из каждого танка	Запрещен. После мойки, смывки сдаются на приемное устройство	Запрещен. После мойки, смывки сдаются на приемное устройство	1 м ³ или 1/3000 от вместимости танка	без ограничений
Способ сброса	ниже ватерлинии			
Минимальная глубина моря	25 м			без ограничений
Минимальное расстояние от берега	12 морских миль			
Минимальная скорость судна	самоходных: 7 узлов несамоходных: 4 узла			

закончив операции мойки, находился в точке с координатами 43°29'40" с.ш., 36°34'30" в.д. и имел скорость около 1 узла (звездочка на рис. 4а).

Что разливают?

Инспектирование, проведенное 30.06.2011 специалистами "АМП Новороссийск", подтвердило, что судно в районе обнаружения действительно осуществляло мойку танков от остатков пальмового масла после разгрузки в п. Южный (Украина) и перед погрузкой дизельного топлива в п. Туапсе (СКАНЭКС, 2011а).

Пальмовое масло – растительное масло, получаемое из плодов масличной пальмы. Оно имеет красно-оранжевый цвет, запах и вкус, свойственный плодам пальмы, его консистенция полутвердая, плотность 0.895–0.95 кг/м³ (при 20°C), вязкость 25–31 сСт (при 50°C) (Vegetable oil spills, 2004). Это масло является одним из распростра-

ненных видов растительных жиров, производимых в мире (основные экспортеры – Индонезия и Малайзия), активно используется в пищевой и косметической промышленности. В последнее десятилетие оно, также как и другие виды растительных масел (рапсовое, соевое, льняное, хлопковое и др.), стало в значительных количествах перевозиться наливными танкерами, в том числе в российские порты; известен ряд инцидентов с его разливами (Vegetable oil spills, 2004; ITOPI, 2012).

Жидкие фракции пальмового масла или его смеси с водой, попав в море, образуют на морской поверхности такие же маслянистые пленки, как нефть и нефтепродукты. Очевидно, что на РЛИ слики, образованные этим маслом, будут создавать сигнатуры, по внешнему виду неотличимые от сигнатур нефтяных и прочих пленочных загрязнений (Vegetable oil spills, 2004; ITOPI, 2012).

Легальными или нелегальными были разливы?

Согласно Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов — МАРПОЛ-73/78 (МАРПОЛ, 1999), — Черное море является Особым районом, в котором сброс нефтепродуктов и нефтесодержащих смесей запрещен, однако при определенных условиях разрешен сброс нефтесодержащих смесей из машинных отделений, льяльных вод и веществ категории *C* и *D* (табл. 1 и 2). Пальмовое масло относят к веществам категории *D*, оно не представляет угрозу морской среде и здоровью человека (Vegetable oil spills, 2004). В МАРПОЛ загрязняющие вещества категории *D* определяются как “вещества, которые практически нетоксичны для морских организмов... или только временно ухудшают состояние природной среды из-за неприятного запаха, раздражающего или др. воздействия, что может препятствовать различным видам деятельности человека на море” (МАРПОЛ, 1999).

Однако Конвенция запрещает “сброс в море веществ категории *D* либо веществ, временно определенных как относящиеся к ней, или водного балласта, промывочных вод или иных остатков или смесей, содержащих такие вещества, за исключением случаев, когда одновременно соблюдаются все условия, перечисленные в табл. 2.

Согласно CEDRE (2004) и ITOPI (2012), пальмовое масло и другие растительные масла, будучи разлиты в значительных количествах, особенно весной или летом, могут нанести значительный урон как окружающей среде, так и экономической активности в регионе, например, туристическому бизнесу.

Совместный детальный анализ РЛИ и данных АИС показал, что танкер находился вне 12-мильной зоны, его средняя скорость в период с 00:00:16 UTC 24.06.2011 по 00:00:16 UTC 25.06.2011 составляла 7–8 узлов, а суммарная площадь разливов — 423.5 км², что является рекордом для Черного моря. Однако инспекция по контролю иностранных судов порта Туапсе от 30.06.2011 нарушений Конвенции не усмотрела — процедура мойки танков из-под пищевого груза (официально: сброс остатков — 26.4 м³ масла, разбавленного 1830 м³ морской воды) соответствовала общепринятым правилам — рекомендациям руководства Tank Cleaning Guide (2010).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Таким образом, впервые в российской практике ДЗ удалось не только наблюдать из космоса пятна, связанные с мойками танков в открытом море, и нелегальные судовые разливы в прибрежной зоне, но и установить конкретных виновников разливов. Как показал мониторинг 2011–2012 гг., это особенно актуально для российской части Черного моря. Подобные пятна впервые наблюдали из кос-

моса и были верифицированы в 2011 г. (рис. 9 на цветн. вклейке) благодаря современным технологиям ДЗ. Для того чтобы однозначно идентифицировать разлив в открытом море на РЛИ, необходимо привлечь дополнительные данные, например данные АИС. Кроме того, для того чтобы определить легальным или нелегальным был разлив, необходимо проанализировать как доступную информацию об окружающей среде, так и положения соответствующих конвенций.

Форма, положение и характеристики абсолютного большинства крупных пятен на РЛИ позволяют однозначно утверждать, что они образованы в результате судовых сбросов. В частности, пятна имели линейный вид, что говорит о сбросах, производимых на ходу судна, они часто фрагментированы и/или расположены на параллельных курсах из-за выполнения операций в несколько этапов. Одной из характерных особенностей, отличающей их от обычных рутинных разливов, является то, что площади пятен достигают десятки квадратных километров и более.

Повторные РЛ и оптические спутниковые съемки подтвердили наличие маслянистых пленок на поверхности моря в данных районах. С помощью данных АИС были идентифицированы суда, причастные к загрязнению, — это танкер-химовоз “Yukon Star”, судно “Tarik Emir” и буксир “Сомери”. Данные инспектирования, проведенного в порту Туапсе, подтвердили выводы анализа данных ДЗ — танкер “Yukon Star” в районе обнаружения осуществлял мойку танков от остатков пальмового масла. Комплексный анализ всех данных в общем случае показал, что она была проведена легально, ибо формально соответствовала положениям конвенции МАРПОЛ. Тем не менее, во время мойки танков танкер слил в море достаточно большое количество водной смеси с остатками продукта в непонятной концентрации, для чего сделал в течение трех дней пять 100-км галсов. В результате этого на поверхности моря образовались огромные по площади пятна — 300–400 км², наблюдаемые оптическими и РЛ-датчиками 23, 24 и 25 июня 2011 г. Однако, согласно (MEPC, 1993; Ferraro et al., 2009), этот случай можно проинтерпретировать как нелегальный, так как водные смеси, сбрасываемые в Особых районах с концентрацией загрязняющих веществ, определенных в табл. 2, не должны быть видны ни визуально, ни дистанционно. Случаи с судами “Tarik Emir” и “Сомери” положениям конвенции МАРПОЛ не соответствовали. Их разливы неизвестной концентрации или содержали неизвестные маслянистые вещества, остатки которых продолжали наблюдаться на РЛИ через 3–4 дня после разлива (рис. 7в, г), или были обнаружены в территориальных водах РФ (рис. 10 на цветн. вклейке).

На рис. 9 и 10 приведены сводные карты судовых разливов, обнаруженных в восточной части Черного моря во время мониторинга 2011 и 2012 гг. Обращает внимание достаточно большое количество пятен в 2011 г. по сравнению с 2012 г. Это можно объяснить в том числе и тем, что в апреле 2012 г. вышел из строя спутник Envisat, данные которого составляли основу мониторинга, в связи с чем частота съемок несколько уменьшилась. Более того, ретроспективный анализ данных мониторинга, начиная с 2009 г., показал, что подобные судовые разливы в десятки и даже сотни квадратных километров в российском секторе Черного моря и на его границах с украинским и турецким секторами появляются достаточно часто (СКАНЭКС, 2011a, 2011b) и были зафиксированы на ряде других РЛИ, например, 28.10.2008, 23.05.2009, 28.05.2009, 15.05.2011 и 21.06.2011 (Иванов и др., 2012). Очевидно, наиболее вероятным источником этих крупных разливов также является мойка танков в открытом море после перевозки масел и жидких химических веществ категорий *C* и *D*, а, возможно, и нефтепродуктов. Из рис. 9 и 10 видно, что мойка танков периодически происходит на границе украинского и российского секторов с целью распыления ответственности, в то время как нелегальные сбросы с грузовых судов — большей частью до входа или сразу после выхода из российских территориальных вод. Их производят, нередко пренебрегая требованиями конвенции МАРПОЛ, т.е. нелегально, зачастую вне зоны действия береговых АИС, в том числе российских.

На основе анализа этих карт сделано заключение, что открытая часть Черного моря подвержена серьезному загрязнению, главным образом, в результате интенсивного судоходства. В частности, акватория моря в районе судоходных трасс загрязнена в результате мойки танков и нелегальных сбросов различных маслянистых продуктов. Детальный анализ этих и ряда других подобных случаев в украинском секторе моря (Black Sea Commission, 2012) показал, что район за пределами 12-мильной зоны (установленной конвенцией МАРПОЛ в качестве критичной границы) в координатах 43° – 44.5° с.ш. и 34.5° – 37.5° в.д. избран рядом судовладельцев, операторов и капитанов танкеров для нелегальной мойки танков и сброса льяльных вод.

Очевидно, что такое положение дел не сулит ничего хорошего экологии Черного моря даже при формальном соблюдении положений МАРПОЛ. А если это так, то российским природоохранным ведомствам необходимо разобраться с этой вновь обозначившейся проблемой, а также активно использовать данные космической РЛ-съемки в качестве доказательной базы.

Наконец, полученные результаты, использование современных технологий ДЗ и соответствующих методов анализа показывают, что:

1) космическая радиолокация является наиболее эффективным средством мониторинга и картографирования как нефтяных/пленочных загрязнений моря, так и навигационно-судовой обстановки;

2) возможна идентификация источников и типов загрязнения с учетом обнаруженных судов. В настоящее время не представляет никаких затруднений определять потенциальных нарушителей, используя спутниковые системы навигации и АИС, в том числе в тех случаях, когда производятся незаконные операции в открытом море;

3) возможен контроль за выполнением положений конвенций, регулирующих судоходство и охраняющих морскую среду, наблюдение за трансграничным переносом загрязнений, а также разработка мер в области охраны окружающей среды и исследования Черного моря в рамках международного сотрудничества.

В итоге, анализ собранных в ходе мониторинга РЛИ и данных АИС пролил свет на факты загрязнения одного из уникальных внутренних морей и дал новую информацию для понимания сути проблемы. Следует надеяться, что полученные данные и результаты будут способствовать охране среды Черного моря от нефти и нефтепродуктов, а на основе ДЗ, ГИС- и АИС-технологий и геопортальных решений создана эффективная система мониторинга восточной части Черного моря.

РЛ-данные Envisat, Radarsat-1 и Radarsat-2, как и данные АИС, для исследования были любезно предоставлены ИТЦ “СКАНЭКС”. Работа была частично профинансирована Правительством РФ в рамках государственной поддержки научных исследований под руководством ведущих ученых Российского государственного гидрометеорологического университета (грант № 11.G34.31.0078).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Губанов Е.П., Иевлева М.Н. Нефтяное загрязнение Черного моря и его влияние на экосистему // Мат. 2-й межд. конф. ЮгНИРО, 2006. С. 80–95. www.ceemar.org/dspace/bitstream/11099/1132/1/article-13.pdf.
- Иванов А.Ю. Стики и пленочные образования на космических радиолокационных изображениях // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 3. С. 73–96.
- Иванов А.Ю., Терлеева Н.В. Нефтяной разлив в Мексиканском заливе — вклад дистанционного зондирования в мониторинг чрезвычайной ситуации // Земля из космоса — наиболее эффективные решения. 2011. № 8. С. 72–79. http://zikj.ru/images/archive/no8/no8_ivanov-mexica_72-79.pdf.
- Иванов А.Ю., Филимонова Н.А., Евтушенко Н.В., Антонюк А.Ю. Обширные судовые разливы в Черном море — легальные рамки? // Земля из космоса — наиболее эффективные решения. 2012. № 12. С. 56–63. http://zikj.ru/images/archive/no12/no12_10_blacksea.pdf.
- Лаврова О.Ю., Митягина М.И. Спутниковый мониторинг пленочных загрязнений поверхности Черного моря // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 3. С. 48–65.

- МАРПОЛ 73/78. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 г. Кн. 1 и 2. СПб.: ЗАО ЦНИИМФ, 1999.
- Патин С.А. Влияние загрязнения на биологические ресурсы и продуктивность Мирового океана. М.: Пищевая промышленность, 1979. 304 с.
- Патин С.А. Нефть и экология континентального шельфа. М.: Изд-во ВНИРО, 2001. 248 с.
- Пенно М.В. Состояние загрязнения вод Черного моря нефтяными углеводородами // Уч. зап. ТНУ. 2001. Вып. 12 (51). № 1.
- СКАНЭКС. В Черном море обнаружено обширное пленочное загрязнение. 2011а. http://www.scanex.ru/ru/news/News_Preview.asp?id=n15313194.
- СКАНЭКС. Обширные судовые разливы в Черном море – легальные рамки? 2011б. http://www.scanex.ru/ru/news/News_Preview.asp?id=n11973179.
- СКАНЭКС. Нелегальные судовые сбросы в Черном море по данным космической съемки. 2012. <http://press.scanex.ru/index.php/ru/component/k2/item/3620-razlivi>.
- Терлеева Н.В., Иванов А.Ю. Нефтяной разлив в Тиморском море: авария буровой платформы и результаты дистанционного мониторинга // Земля из космоса – наиболее эффективные решения. 2013. № 16. С. 120–126.
- Alpers W., Espedal H.A. Oils and surfactants. In: Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual / Eds. C.R. Jackson, J.R. Apel. 2004. http://www.sarusersmanual.com/ManualPDF/NOAASARManual_CH11_pg263-276.pdf.
- Black Sea Commission. Нелегальные судовые сбросы в Черном море по данным космической съемки в сентябре-октябре 2012 // Расследование СКАНЭКС и BSNews. 2012. <http://www.blackseanews.net/read/47295>.
- Brekke C., Solberg A.H.S. Oil spill detection by satellite remote sensing in the world oceans // Rem. Sens. Environ. 2005. V. 95. P. 1–13.
- European Commission. On the monitoring illicit vessel discharges. A reconnaissance study in the Mediterranean Sea, EUR 19906 EN. 2001. <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/111111111/11092/1/EUR%2019906%20EN.pdf>.
- Ferraro G., Meyer-Roux S., Müllenhoff O. et al. Long term monitoring of oil spills in European seas // Int. J. Rem. Sens. 2009. V. 30. P. 627–645.
- ITOPF Handbook, 2012. <http://www.itopf.com/information%20services/publications/documents/ITOPFHandbook2012.pdf>.
- ITOPF. About vegetable oil spills. 2010. www.itopf.com/marine-spills/about-veg.
- Ivanov A. Yu., Zatyagalova V. V. A GIS approach to mapping of oil spills in a marine environment // Int. J. Rem. Sens. 2008. V. 29. P. 6297–6313.
- Kluser S., Richard J.P., Giuliani G., De Bono A., Peduzzi P. Illegal oil discharge in European seas // UNEP Environ. Alert Bull. 2006. V. 7. www.grid.unep.ch/products/3_Reports/ew_oildischarge.en.pdf.
- MEPC. Resolution of Marine Environment Protection Committee 61(34) on visibility limits of oil discharges. 1993. [http://www.imo.org/blast/blastData.asp?doc_id=6981&filename=61\(34\).pdf](http://www.imo.org/blast/blastData.asp?doc_id=6981&filename=61(34).pdf).
- Morović M., Ivanov A. Oil spill monitoring in the Adriatic Croatian waters: needs and possibilities // Acta Adriatica. 2011. V. 52. P. 45–56.
- Müllenhoff O., Bulgarelli B., Ferraro G., Topouzelis K. The use of ancillary metocean data for the oil spill probability assessment in SAR images // Fresenius Environ. Bull. 2008. V. 17. № 9b. P. 1383–1390.
- Tank Cleaning Guide. 2010. <http://www.tankcleaning.de>, <http://www.chemserve-marine.com>.
- Topouzelis N.K. Oil spill detection by SAR images: Dark formation detection, feature extraction and classification algorithms // Sensors. 2008. V. 8. P. 6642–6659. doi: 10.3390/s8106642.
- Vegetable oil spills at sea. CEDRE, 2004. <http://www.cedre.fr/en/publication/operational-guide/vegetable-oil/vegetable-oil.php>.

Using Satellite SAR Imagery and Automated Identification System Data for Identification of Ship-Made Oil Spills in the Black Sea

A. Yu. Ivanov¹, A. A. Kucheiko², N. A. Filimonova², N. V. Evtushenko^{1,2},
A. Yu. Antonyuk², N. V. Terleeva¹

¹*P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow*

²*Research and Development Center ScanEx, Moscow*

During routine oil spill monitoring in the Eastern Black Sea in 2011 and 2012 by RDC ScanEx unprecedented large patches of oil having ship origin have been detected on synthetic aperture radar (SAR) images acquired by Envisat, Radarsat-1 and Radarsat-2. The oil spills were detected mostly in the Russian sector of the sea or on its borders. The presence of large oil spills have been confirmed by Terra and Aqua optical images, while owing to the data of automated identification systems the vessel candidates have been identified and two of them inspected. This paper for the first time presents the results of monitoring that show that the central part of the Black Sea is chosen for tank washing operations as well as for illegal dumping of oily products. A legality of producing of these spills in the frame works of the MARPOL Convention is also discussed. These and other similar events registered during the monitoring require attention of the environmental and nature protection organizations. Summary maps of large oil spills detected in the Eastern Black Sea in 2011 and 2012 are presented and discussed.

Keywords: satellite monitoring, SAR images, automated identification systems data, illegal oil spills, Black Sea

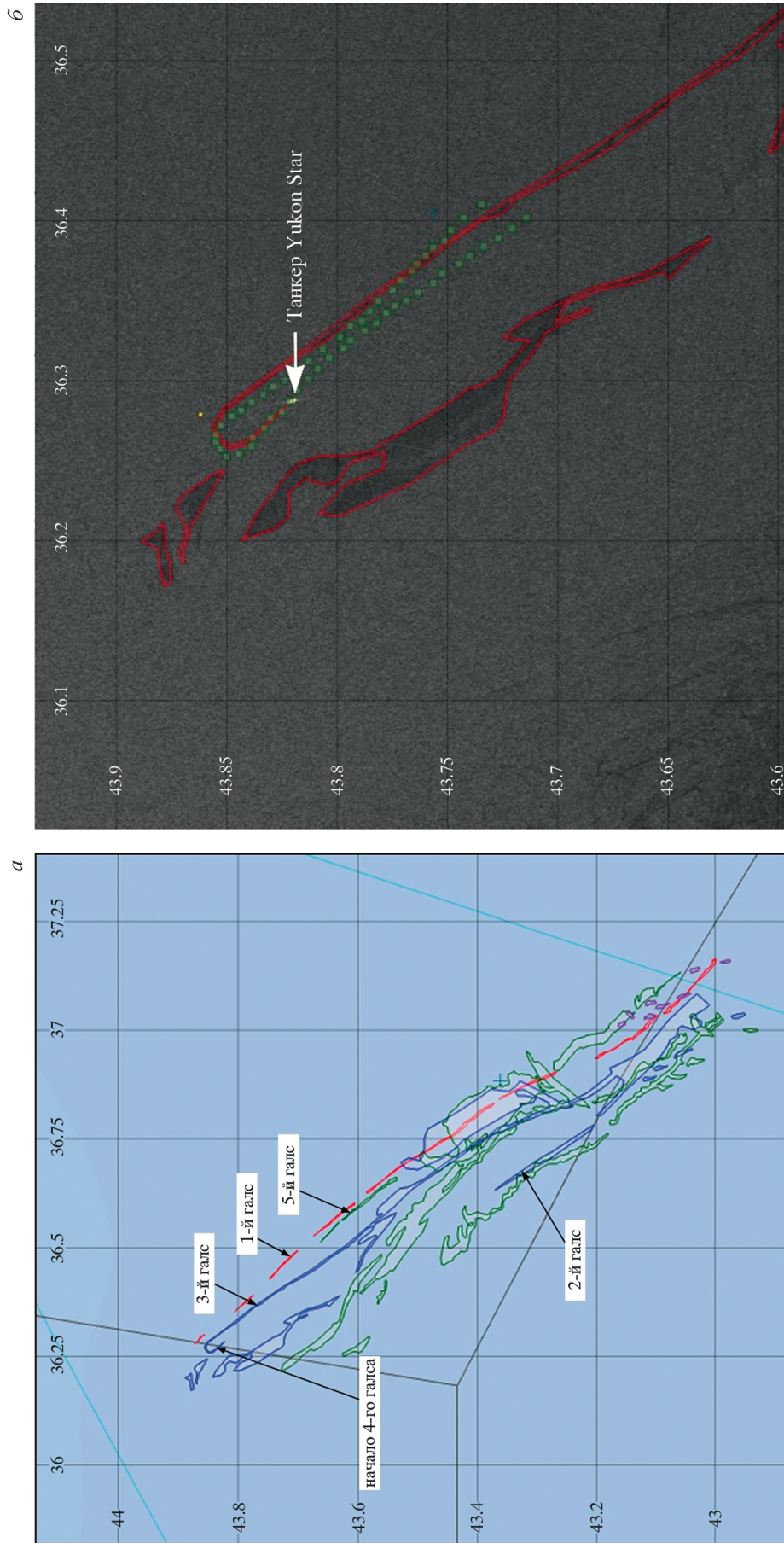


Рис. 5. *a* – Интегральная карта пятен, обусловленных мойкой танков: красным показаны пятна, обнаруженные с 23.06.2011 г. (общая площадь 18 км²); обнаруженные с 24.06.2011 г.: на РЛИ Eplisat – фиолетовым, на РЛИ Kadarsat-2 – голубым (~320,5 км²); обнаруженные с 25.06.2011 г. – зеленым (~423,5 км²); стрелки с цифрами показывают последовательность галисов; *б* – совмещение пятен на РЛИ от 24 июня (15:23 UTC) и данных АИС (зеленые квадратики), записанных с 14:01 по 15:42 UTC; в результате этой процедуры было идентифицировано судно – танкер «Yukon Star» под флагом Великобритании. © «СКАНЭКС».

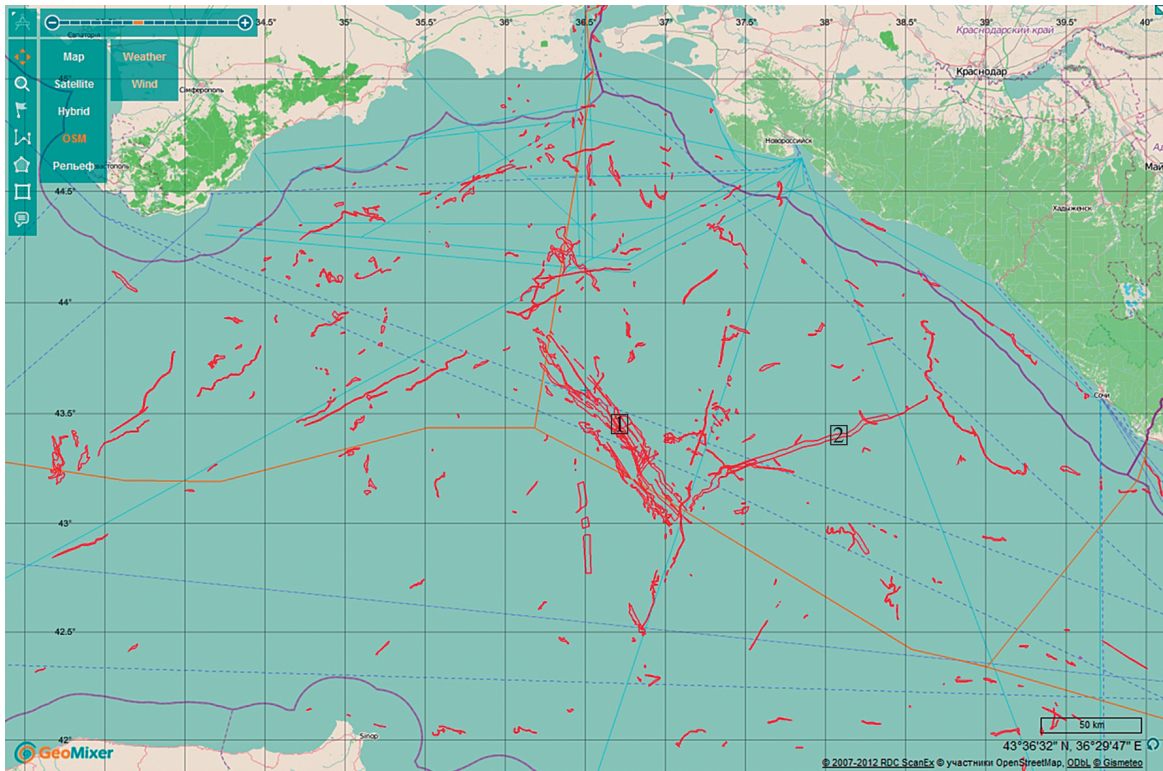


Рис. 9. Интегральная карта крупных судовых разливов, обнаруженных на РЛИ Envisat, Radarsat-1 и Radarsat-2 в восточной части Черного моря во время мониторинга в 2011 г. Разливы в территориальных водах (фиолетовая линия) России и Украины однозначно нелегальные; границы экономзон показаны светло-коричневым, территориальных вод – фиолетовым, судовые трассы – голубым (1 – разливы «Yukon Star», 2 – разлив «Tarik Emir»). © «СКАНЭКС».

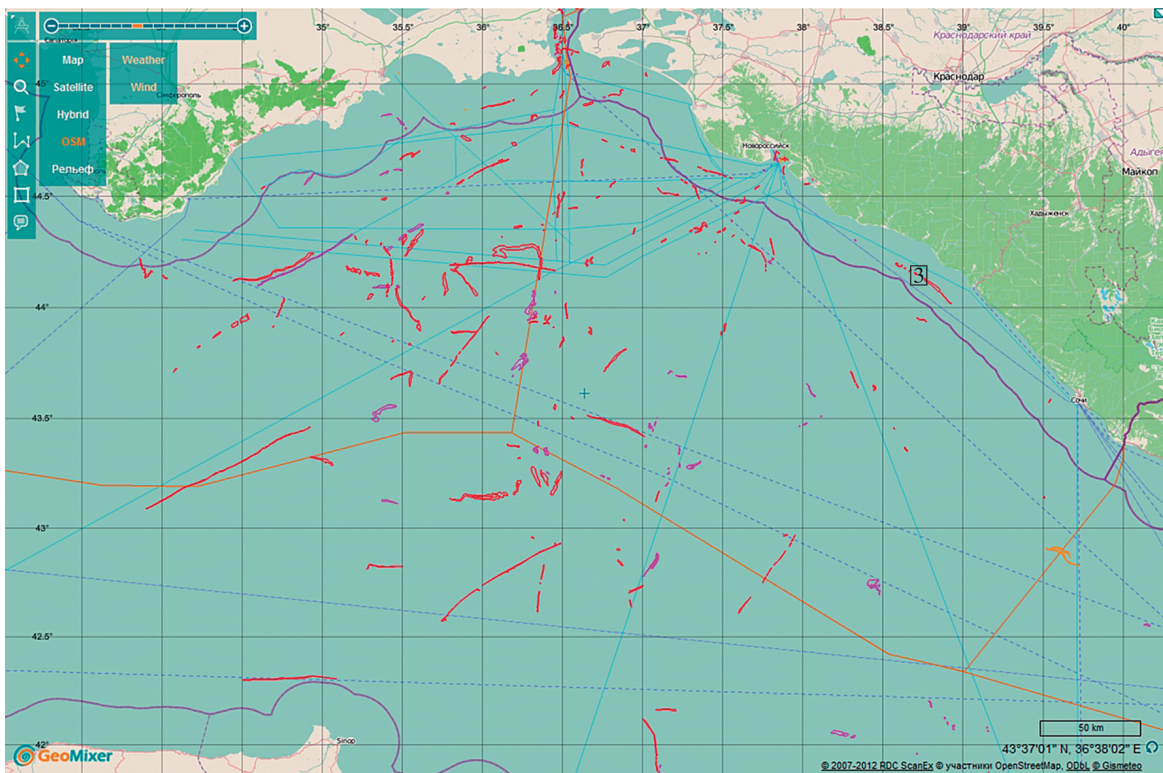


Рис. 10. Интегральная карта крупных судовых разливов, обнаруженных главным образом на РЛИ Radarsat-1 и Radarsat-2 в восточной части Черного моря во время мониторинга в 2012 г. Разливы в территориальных водах России и Украины однозначно нелегальные (3 – разлив «Сомери»). Обозначения те же, что на рис. 9. © «СКАНЭКС».