

<b>Название журнала</b>	<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА</b>					
<b>Издательство</b>	Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр Российской академии наук "Издательство "Наука"					
<b>Сведения о переименовании и переводе</b>	Переводная версия: <i>Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics</i> <i>Earth Observation and Remote Sensing</i>					
<b>Год выпуска</b>	<b>2013</b>	<b>Том</b>		<b>Номер выпуска</b>	<b>1</b>	
	<b>Название статьи</b>				<b>Страницы</b>	<b>Цит.</b>
	<b>ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА</b>					
	<b>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ЛИНИЙ 22.2, 183 И 325 ГГц ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЬНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ ВОДЯНОГО ПАРА В ТРОПИЧЕСКОЙ АТМОСФЕРЕ</b> <i>Сёмин А.Г., Кузьмин А.В., Хапин Ю.Б., Шарков Е.А.</i>				3	4
	<b>ВЛИЯНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ АТМОСФЕРЫ НА ВЫХОДНОЙ СИГНАЛ СПУТНИКОВОГО КОРРЕЛЯЦИОННОГО РАДИОМЕТРА</b> <i>Шишигин С.А., Старновский С.А.</i>				9	1
	<b>НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ВАЛИДАЦИИ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СОДЕРЖАНИЯ NO<sub>2</sub> С ПОМОЩЬЮ ПРИБОРА OMI НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ЗВЕНИГОРОДСКОЙ НАУЧНОЙ СТАНЦИИ</b> <i>Груздев А.Н., Елохов А.С.</i>				16	1
	<b>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ</b>					
	<b>ПЕРСПЕКТИВЫ НЕФТЕНОСНОСТИ ЛЕНО-АНАБАРСКОГО ПРОГИБА И ОЛЕНЕКСКОЙ ЗОНЫ ДИСЛОКАЦИЙ ПО КОСМИЧЕСКИМ И МАГНИТОГРАВИМЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ</b> <i>Миловский Г.А., Орлянкин В.Н., Ишмухаметова В.Т., Ненадов Я.В.</i>				28	0
	<b>АНОМАЛЬНО СИЛЬНЫЕ БОРЫ В ЧЕРНОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ</b> <i>Иванов А.Ю., Антонюк А.Ю.</i>				32	4
	<b>ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ПОЛЕЙ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР В ГОРНЫХ ДОЛИНАХ АЛТАЯ</b> <i>Полищук Ю.М., Шаронов Д.С.</i>				44	0
	<b>ФОРМИРОВАНИЕ ЯРКОСТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ СПЛОШНЫХ РУБОК НА ЗИМНИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ СРЕДНЕГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ</b> <i>Кардаков А.А., Кивисте А.К., Петерсон У.К.</i>				48	1
	<b>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ СПУТНИКОВЫХ СЪЕМОК ДЛЯ АНАЛИЗА ЗНАЧЕНИЙ ХЛОРОФИЛЛЬНОГО ИНДЕКСА ТУНДРОВЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ</b> <i>Елсаков В.В.</i>				60	5
	<b>МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ</b>					
	<b>ОЦЕНКА СТРУКТУРЫ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА И ЕГО АНТРОПОГЕННОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ КОСМОСНИМКОВ QUICKBIRD (НОВОСИБИРСКИЙ АКАДЕМГОРОДОК)</b> <i>Лашинский Н.Н., Зольников И.Д., Глушкова Н.В.</i>				71	2
	<b>ОБЗОРЫ</b>					
	<b>АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ КАНАЛОВ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ (ПО ЗАРУБЕЖНЫМ ПУБЛИКАЦИЯМ)</b> <i>Кравцов С.Л., Голубцов Д.В., Лисова Е.Н.</i>				79	0

---

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

---

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ЛИНИЙ 22.2, 183 И 325 ГГц  
ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЬНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ  
ВОДЯНОГО ПАРА В ТРОПИЧЕСКОЙ АТМОСФЕРЕ**

© 2013 г. А. Г. Сёмин<sup>1</sup>, А. В. Кузьмин<sup>2\*</sup>, Ю. Б. Хапин<sup>2</sup>, Е. А. Шарков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Пензенский государственный педагогический университет им. В.Г. Белинского, Пенза

<sup>2</sup> Институт космических исследований Российской академии наук, Москва,

\* E-mail: kuzmin@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 29.05.2012 г.

В работе рассматривается возможность восстановления детальных профилей водяного пара в тропической атмосфере по данным спутниковых измерений радиотеплового микроволнового излучения. В прямой задаче анализируется возможность восстановления профиля водяного пара на 8–10 высотных уровнях до высоты 10 км с использованием резонансных линий поглощения 183 и 325 ГГц, а также использование линии 22.2 ГГц. В работе приводятся спектры интегрального поглощения в атмосфере, спектры радиоярких температур атмосферы и системы атмосфера–океан в диапазоне 5–220 ГГц. Решение этой задачи, несомненно, будет принципиально важным шагом в изучении физических условий генезиса и эволюции тропических циклонов.

**Ключевые слова:** восстановление профиля водяного пара в атмосфере, микроволновая радиометрия, радиояркая температура

DOI: 10.7868/S0205961413010053

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных факторов, определяющих процессы, происходящие в системе атмосфера–океан, является атмосферный водяной пар. Получение оперативной информации о детальных трехмерных полях влажности методами дистанционного зондирования (ДЗ) Земли из космоса позволит решить ряд актуальных научных и практических задач. В частности, дает возможность изучения физических условий генезиса и эволюции тропических циклонов (ТЦ), предсказания возникновения катастрофических циклонов.

ТЦ представляет собой явление природы планетарного масштаба, и естественно считать, что его генезис также обусловлен гидродинамической крупномасштабной неустойчивостью. Однако обычная система уравнений гидродинамики для сухой атмосферы не описывает никакой крупномасштабной неустойчивости. В свою очередь конвективная неустойчивость не является крупномасштабной и не может отвечать за возникновение и развитие такой структуры, как ТЦ. Таким образом, поиск физического механизма, адекватно описывающего возникновение крупномасштабной неустойчивости типа ТЦ, является одной из важнейшей физических задач (Sharkov, 1998, 2000; Rutkevich, Шарков, 2004; Шарков,

2010). Все существующие модели генезиса ТЦ сходятся на том, что его энергетическим источником является выделение скрытой теплоты конденсации и сублимации атмосферной влаги. Основные модели имеют варианты как “сухого”, так и “влажного” вихрей, различающихся только своими энергетическими характеристиками, и роль фазовых превращений влаги в атмосфере для этих моделей не выходит за рамки вспомогательного элемента. В работах (Rutkevich, 2002; Rutkevich, Шарков, 2004) предложена принципиально новая термогидродинамическая модель крупномасштабной неустойчивости в атмосфере с насыщенным водяным паром, которая может существенно изменить взгляды на формирование дистанционных микроволновых систем, предназначенных для исследования условий генезиса атмосферных катастроф. На основе модельных представлений, экспериментальных данных микроволновых комплексов и при учете насыщенности всего высотного столба атмосферы водяным паром показана принципиальная возможность существования немонотонного (в противоположность ситуации “сухой” атмосферы) распределения скорости звука по высоте (сжимаемая атмосфера) с явно выраженным минимумом величины скорости звука. Последнее и определяет необходимые условия генерации вихревых структур

тур. Именно эти условия, которые сводятся к выявлению своего рода инверсии высотного профиля звука, ставят на повестку дня требования к принципиально новым методам ДЗ предкризисных и кризисных ситуаций в земной атмосфере. В первую очередь это относится к дистанционному определению пространственно-временных характеристик детального высотного профиля содержания водяного пара и температуры внутри облачных систем (конвективного и неконвективного характера) на значительных пространственных океанических акваториях. Существующие методики обработки ИК-данных – например, в режиме “расщепленные” окна (Uspensky, Scherbina, 1996), – не позволяют достичь необходимой точности восстановления профиля водяного пара. Подобные исследования возможно выполнить только при помощи пассивных микроволновых дистанционных космических систем нового поколения (Кузьмин и др., 2005).

В работе рассматривается возможность восстановления детальных профилей водяного пара в тропической атмосфере по данным спутниковых измерений радиотеплового микроволнового излучения. В прямой задаче анализируется возможность восстановления профиля водяного пара на восемь–десяти высотных уровнях до высоты 10 км с использованием резонансных линий поглощения 183 и 325 ГГц, а также с использованием линии 22.2 ГГц. В работе приводятся спектры интегрального поглощения в атмосфере, спектры радиояркостных температур атмосферы и системы атмосфера–океан в диапазоне 5–220 ГГц. Решение этой задачи, несомненно, будет принципиально важным шагом в изучении физических условий генезиса и эволюции ГЦ.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕСОВЫХ ФУНКЦИЙ ИЗЛУЧЕНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА

Для получения детальных вертикальных профилей влажности рассмотрим возможность использования резонансных линий молекулярного водяного пара 22.2, 183.3 и 325.1 ГГц.

Радиояркостная температура атмосферы при восходящем и нисходящем излучении на частоте  $\nu$  в мм-диапазоне длин волн под углом падения  $\theta$  определяется следующими выражениями:

$$T_{au} = \int_0^{\infty} T(h) \gamma_{\nu}(h) \exp \left[ - \int_h^{\infty} \gamma_{\nu}(h') \sec \theta dh' \right] \sec \theta dh,$$

$$T_{ad} = \int_0^{\infty} T(h) \gamma_{\nu}(h) \exp \left[ - \int_0^h \gamma_{\nu}(h') \sec \theta dh' \right] \sec \theta dh,$$

где  $T(h)$  – вертикальный профиль температуры;  $\gamma_{\nu}(h)$  – погонный коэффициент поглощения на высоте  $h$ .

Радиояркостная температура системы атмосфера–океан, регистрируемая антенной радиометра на орбите ИСЗ, определяется следующим выражением:

$$T_{bv}(\theta) = [1 - R_v(\theta)] T_S \exp(-\tau_{0v} \sec \theta) + T_{au} + R_v(\theta) T_{ad} \exp(-\tau_{0v} \sec \theta),$$

где  $R_v(\theta)$  – энергетический коэффициент отражения поверхности;  $T_S$  – температура поверхности;  $\tau_{0v}$  – зенитное интегральное поглощение радиоволн. При расчете радиояркостной температуры учитывались три составляющие. Первая составляющая – это излучение подстилающей поверхности, ослабленное атмосферой; вторая – яркостная температура восходящего излучения атмосферы; третья – нисходящее излучение атмосферы, отраженное поверхностью и ослабленное атмосферой. При проведении модельных расчетов реликтовое излучение не учитывалось.

Интегральное поглощение в атмосфере под углом  $\theta$  определяется выражением

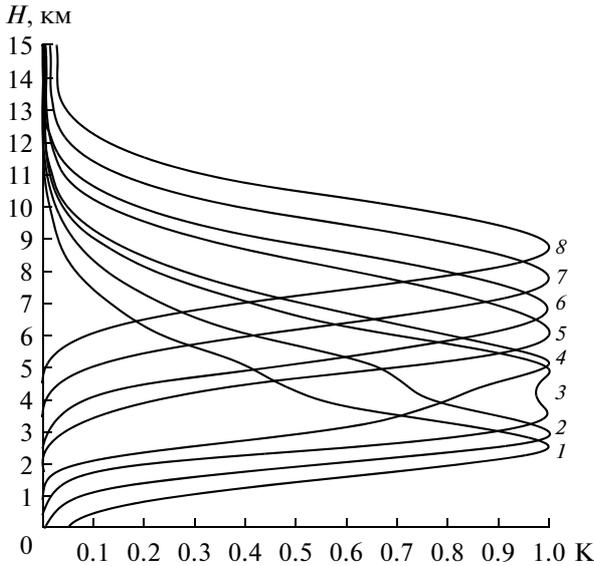
$$\tau_{\nu}(\theta) = \int_0^{\infty} \gamma_{\nu}(h) \sec \theta dh = \tau_{0\nu} \sec \theta.$$

При расчетах учитывалось поглощение в молекулярном кислороде, молекулярном водяном паре и облачности. Поглощение радиоволн в см- и мм-диапазоне длин волн в атмосферном кислороде подробно рассмотрено в работах (Жевакин, Наумов, 1965; Жевакин, 1986), поглощение радиоволн в атмосферном водяном паре в этом диапазоне приводится в работах (Жевакин, Наумов, 1964; Зражевский, 1976). Модельные расчеты интегрального поглощения электромагнитного излучения в диапазоне 5–220 ГГц в молекулярном кислороде проводились по методике, приведенной в работе (Жевакин, 1986), расчеты поглощения в атмосферном водяном паре – по методикам (Зражевский, 1976).

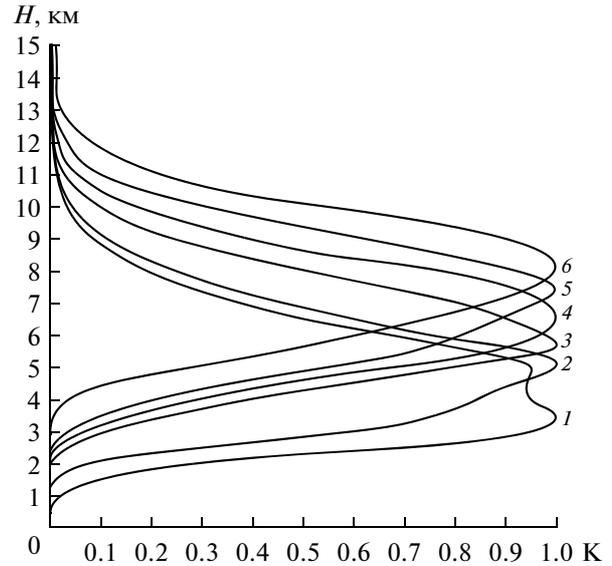
Расчет весовых функций электромагнитного излучения атмосферы в окрестностях линий резонанса проводился методом численного интегрирования. Атмосфера до высоты 25 км разбивается на слои высотой  $\Delta h = 50$  м, где рассчитывается погонное поглощение в середине каждого слоя. Радиояркостная температура  $i$ -го атмосферного слоя с учетом ослабления излучения вышележащими слоями может быть представлена в виде

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

где  $T(h_i)$  – температура  $i$ -го слоя;  $\gamma(h_i)$  – погонное атмосферное поглощение в середине слоя;  $n = 500$  – число слоев. Яркостная температура каждого слоя нормируется к температуре слоя с максимальной радиояркостной температурой.



**Рис. 1.** Весовые функции восходящего излучения атмосферы в линии резонанса водяного пара 183.31 ГГц. Тропическая атмосфера.  $T = 300$  К;  $R = 19$  г/м<sup>3</sup>;  $W = 41.4$  кг/м<sup>2</sup>. 1 – Частота  $183.31 \pm 12.0$  ГГц, максимум 2.50 км; 2 – частота  $183.31 \pm 8.0$  ГГц, максимум 4.17 км; 3 – частота  $183.31 \pm 5.95$  ГГц, максимум 5.1 км; 4 – частота  $183.31 \pm 4.8$  ГГц, максимум 5.1 км; 5 – частота  $183.31 \pm 2.7$  ГГц, максимум 6.0 км; 6 – частота  $183.31 \pm 2.1$  ГГц, максимум 6.9 км; 7 – частота  $183.31 \pm 1.2$  ГГц, максимум 7.8 км; 8 – частота  $183.31 \pm 0.3$  ГГц, максимум 8.7 км.



**Рис. 2.** Весовые функции восходящего излучения атмосферы в линии резонанса водяного пара 325.1 ГГц. Тропическая атмосфера.  $T = 300$  К;  $R = 19$  г/м<sup>3</sup>;  $W = 41.4$  кг/м<sup>2</sup>. 1 – Частота  $325.1 \pm 20.0$  ГГц, максимум 2.50 км; 2 – частота  $325.1 \pm 8.0$  ГГц, максимум 2.90 км; 3 – частота  $325.1 \pm 4.0$  ГГц, максимум 4.17 км; 4 – частота  $325.1 \pm 3.1$  ГГц, максимум 6.65 км; 5 – частота  $325.1 \pm 2.4$  ГГц, максимум 7.35 км; 6 – частота  $325.1 \pm 1.0$  ГГц, максимум 8.05 км.

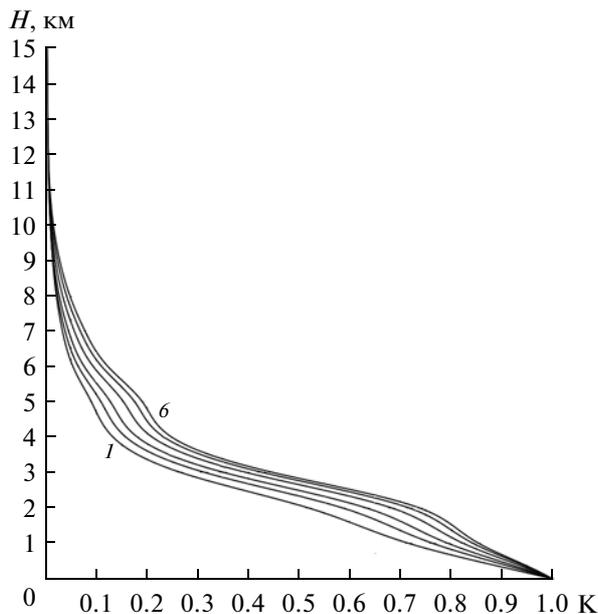
При расчете весовых функций была выбрана стандартная тропическая атмосфера, температура воздуха у поверхности – 300 К, влажность – 19.0 г/м<sup>3</sup>, давление – 1013 мб, интегральная влажность – 41.4 кг/м<sup>2</sup>. Угол  $\theta$  составляет 49.2° (высота орбиты 450 км, надирный угол – 45°). Предполагается двухполосный супергетеродинный режим приема радиометров, входные полосы симметричны относительно центров резонансных линий.

Результаты расчета весовых функций восходящего излучения атмосферы в линии 183.3 ГГц приведены на рис. 1. Центры полос приема выбирались таким образом, чтобы максимумы весовых функций достаточно равномерно располагались по высоте и охватывали максимальный диапазон высот. Здесь также учитывалась возможная ширина входной полосы приемного устройства. Расчеты показывают, что максимумы функций по высоте расположены достаточно равномерно от 2.5 до 8.7 км, число уровней может составлять 7–8. Снизить высоту максимума весовой функции ниже 2.5 км не позволяет ограничение на ширину входной полосы приемника. Увеличение высоты максимума функции более 8.7 км ограничивается возможностью приближения частоты полосы приема к центру резонансной линии.

Результаты расчета весовых функций восходящего излучения атмосферы в линии 325.1 ГГц приведены на рис. 2. Выбор частот приема осуществлялся по тем же критериям, что и для линии 183 ГГц. Однако диапазон изменения максимумов весовых функций здесь меньше и составляет 3.4–8.05 км при шести уровнях.

Для получения информации о профилях водяного пара на малых высотах проведены расчеты весовых функций восходящего излучения атмосферы вблизи линии резонанса 22.235 ГГц. Традиционно эта линия используется для определения интегральных параметров атмосферы (интегрального содержания водяного пара), поскольку основная масса водяного пара сосредоточена в приповерхностных слоях атмосферы. Результаты этих расчетов приведены на рис. 3. Здесь для частот в окрестности линии максимумы весовых функций приходятся на нулевую высоту, что дает возможность получить информацию о профилях влажности в приповерхностных слоях атмосферы.

Проведенные расчеты говорят о возможности использования резонансной линии водяного пара 183.31 ГГц для измерения вертикальных профилей влажности по семи–восми уровням до высот порядка 9 км. Разрешение на местности с учетом диаграмм направленности современных приемных антенн составляет порядка десятка ки-

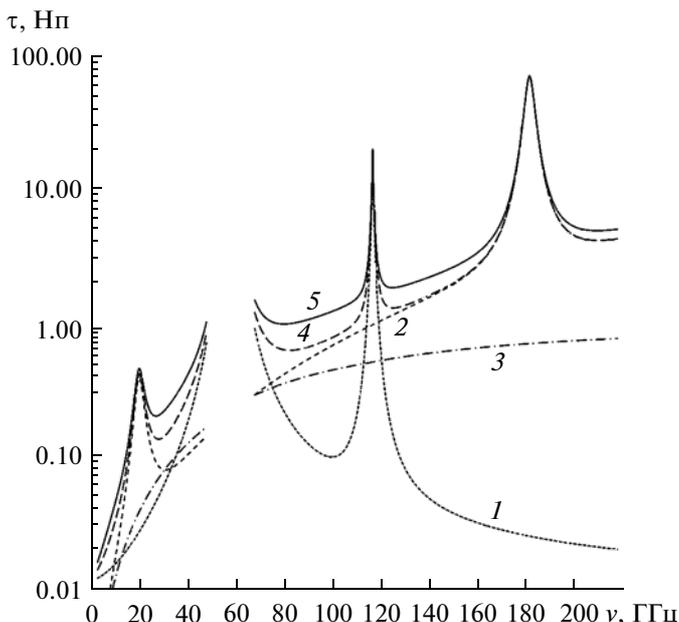


**Рис. 3.** Весовые функции восходящего излучения атмосферы в линии резонанса водяного пара 22.235 ГГц. Тропическая атмосфера.  $T = 300$  К;  $R = 19$  г/м<sup>3</sup>;  $W = 41.4$  кг/м<sup>2</sup>. 1 – частота  $22.235 \pm 3.0$  ГГц, максимум 0 км; 2 – частота  $22.235 \pm 1.5$  ГГц, максимум 0 км; 3 – частота  $22.235 \pm 1.0$  ГГц, максимум 0 км; 4 –  $22.235 \pm 0.6$  ГГц, максимум 0 км; 5 – частота  $22.235 \pm 0.4$  ГГц, максимум 0 км; 6 – частота  $22.235 \pm 0.2$  ГГц, максимум 0 км.

лометров. Таким образом, сравнение весовых функций в окрестности линии 183 и 325 ГГц позволяет сделать вывод, что для получения детальных трехмерных полей влажности в атмосфере использование линии 183 ГГц является более предпочтительным. В связи с этим в дальнейшем в работе линия 325 ГГц не рассматривается. Кроме того, информацию о распределении водяного пара на высотах менее 2.5 км можно получить, проведя измерения в окнах прозрачности или (и) в окрестности линии 22.235 ГГц.

#### СПЕКТРЫ РАДИОТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СИСТЕМЫ АТМОСФЕРА–ОКЕАН

Для изучения процессов, происходящих в системе атмосфера–океан, необходимо знание большого числа различных характеристик этой системы. Прежде всего, это трехмерные температурные поля, представляющие как самостоятельный интерес, так и необходимые для измерения полей влажности. Сюда необходимо отнести данные по интегральной водности и температуре облачности, величине и направлению приповерхностного ветра. Знание этих характеристик необходимо для изучения системы атмосфера–океан, а также для учета взаимного влияния различных метеопараметров на точность проводимых измерений.



**Рис. 4.** Интегральное поглощение: 1 – в молекулярном кислороде; 2 – в молекулярном водяном паре; 3 – в облачном слое ( $Q = 0.25$  кг/м<sup>2</sup>,  $T_Q = 273.3$  К). Суммарное интегральное поглощение: 4 – в безоблачной атмосфере; 5 – в облачной атмосфере. Стандартная тропическая атмосфера.  $T = 300$  К;  $R = 19$  г/м<sup>3</sup>;  $W = 41.4$  кг/м<sup>2</sup>.

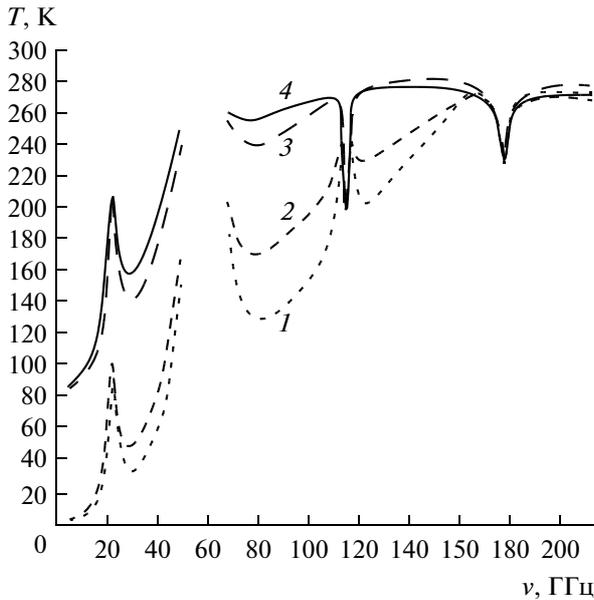
Для этих целей необходимо измерения проводить в широком диапазоне см- и мм-волн. Оценка возможностей использования этого диапазона для измерения метеопараметров может быть получена из спектров радиояркостной температуры системы атмосфера–океан.

Расчет радиояркостных температур атмосферы для восходящего и нисходящего излучения проводился численным интегрированием до высоты 25 км, высота слоя  $\Delta h = 50$  м, число слоев  $n = 500$ :

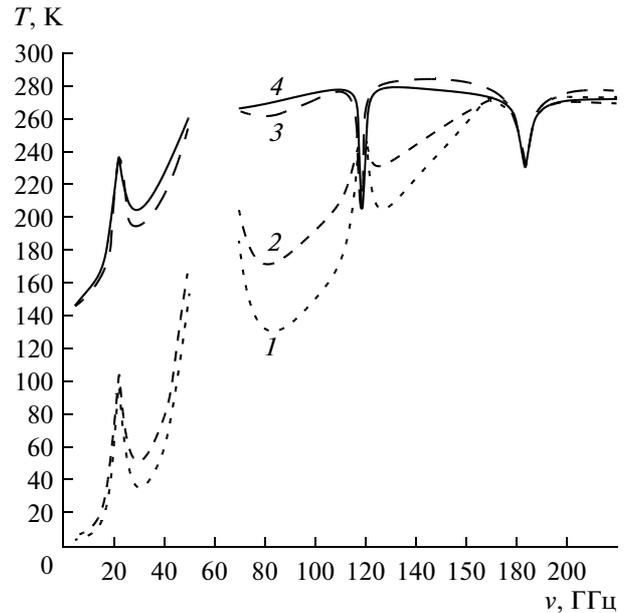
$$T_{au} = \sum_{i=1}^n \left\{ T(h_i) [1 - \exp(-\gamma(h_i)\Delta h \sec \theta)] \sum_{k=i+1}^n \gamma(h_k)\Delta h \sec \theta \right\},$$

$$T_{ad} = \sum_{i=1}^n \left\{ T(h_i) [1 - \exp(-\gamma(h_i)\Delta h \sec \theta)] \sum_{k=1}^{i-1} \gamma(h_k)\Delta h \sec \theta \right\}.$$

При расчетах использовались та же стандартная тропическая атмосфера, что и при расчетах весовых функций, а также тропическая атмосфера с облачностью. Облачность моделировалась слоем высотой 3 (3–6) км с равномерным распределением водности с водозапасом 0.25 кг/м<sup>2</sup>, тем-



**Рис. 5.** Радиояркостная температура (горизонтально-поляризованное излучение): 1 – восходящего излучения безоблачной атмосферы; 2 – восходящего излучения облачной атмосферы ( $Q = 0.25 \text{ кг/м}^2$ ,  $T_0 = 273.3 \text{ К}$ ); 3 – системы атмосфера–океан (безоблачная атмосфера); 4 – системы атмосфера–океан (облачная атмосфера,  $Q = 0.25 \text{ кг/м}^2$ ,  $T_0 = 273.3 \text{ К}$ ). Стандартная тропическая атмосфера.  $T = 300 \text{ К}$ ;  $R = 19 \text{ г/м}^3$ ;  $W = 41.4 \text{ кг/м}^2$ .



**Рис. 6.** Радиояркостная температура (вертикально-поляризованное излучение): 1 – восходящего излучения безоблачной атмосферы; 2 – восходящего излучения облачной атмосферы ( $Q = 0.25 \text{ кг/м}^2$ ,  $T_0 = 273.3 \text{ К}$ ); 3 – системы атмосфера–океан (безоблачная атмосфера); 4 – системы атмосфера–океан (облачная атмосфера,  $Q = 0.25 \text{ кг/м}^2$ ,  $T_0 = 273.3 \text{ К}$ ). Стандартная тропическая атмосфера.  $T = 300 \text{ К}$ ;  $R = 19 \text{ г/м}^3$ ;  $W = 41.4 \text{ кг/м}^2$ .

пература срединного слоя 273.3 К. Температура поверхности океана 300 К, соленость – 40‰, частотный диапазон 5–220 ГГц.

Результаты расчетов спектров интегрального поглощения в молекулярном кислороде, в молекулярном водяном паре, в облачном слое, суммарное интегральное поглощение в безоблачной атмосфере и суммарное интегральное поглощение в облачной атмосфере приведены на рис. 4. Максимальное поглощение водяным паром на частоте 22.235 ГГц составляет 0.393 Нп, а в линии 183.31 ГГц превышает 71 Нп. Поглощение в молекулярном кислороде на частоте 118.75 ГГц составляет 18.8 Нп. Столь большое поглощение вблизи резонансных линий обусловило выбор радиояркостной температуры атмосферного слоя при численных расчетах, пропорциональной  $1 - \exp(-\gamma(h_i)\Delta h \sec \theta)$ . Интегральное поглощение в безоблачной атмосфере в окне прозрачности 33–37 ГГц составляет 0.144–0.182 Нп; в окне 80–90 ГГц – 0.648–0.677 Нп; в окне 130–150 ГГц – 1.327–1.914 Нп. Поглощение в облачности в соответствующих окнах составляет 0.081–0.099 Нп; 0.343–0.393 Нп и 0.556–0.621 Нп. Это дает значительный вклад в общее интегральное поглощение атмосферы при водозапасе облачного слоя  $0.25 \text{ кг/м}^2$ , с увеличением водозапа-

са соответственно возрастает вклад в поглощение облачности.

Результаты расчетов спектров радиояркостных температур восходящего излучения безоблачной и облачной атмосфер, спектров радиояркостных температур системы атмосфера–океан при безоблачной и облачной атмосфере приведены на рис. 5 и 6. На рис. 5 приведены результаты расчетов для горизонтально поляризованного излучения, на рис. 6 – для вертикально поляризованного излучения. Анализ спектров радиояркостных температур излучения системы атмосфера–океан показывает, что для корректного измерения и учета параметров облачности предпочтительно использовать горизонтально поляризованную компоненту излучения. Здесь превышение температуры системы с облачной атмосферой над системой с безоблачной атмосферой в окне прозрачности 33–37 ГГц составляет около 21.5 К, а в окне 80–90 ГГц – 16.8 К, что в 1.64 и 2.43 раза больше, чем для вертикально поляризованного излучения. Измерения в окне 130–150 ГГц мало пригодны для измерения параметров облачности, поскольку изменения составляют 2.5–4 К, и появление облачности приводит к уменьшению радиояркостной температуры системы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для восстановления детальных высотных профилей влажности по восьми–десяти уровням до высот 9 км в тропической атмосфере средствами пассивной радиометрии с орбиты ИСЗ предпочтительными являются резонансная линия водяного пара 183.31 ГГц и измерения в окнах прозрачности 80–90, 130–150 ГГц или (и) в окрестностях линии 22.2 ГГц. Для измерения и учета параметров облачности измерения целесообразно проводить в окрестностях линии водяного пара 22.235 ГГц и в окнах прозрачности 33–37 ГГц и 80–90 ГГц. При измерениях радиояркостной температуры системы атмосфера-океан следует использовать горизонтально поляризованную компоненту излучения.

Исследования выполнены при поддержке грантов РФФИ (проекты № 090501019, 110500493).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т.* Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974. 187 с.
- Жевакин С.А.* Полуэмпирическая теория поглощения радиоволн молекулярным кислородом атмосферы. Новые результаты // 2-я Всесоюзная школа-симпозиум по распространению мм- и см-волн в атмосфере. Фрунзе: Илим, 1986. С. 16.
- Жевакин С.А., Наумов А.П.* К расчету коэффициента поглощения в атмосферном кислороде // Радиотехника и электроника. 1965. Т. 10. № 6. С. 987–995.
- Зражевский А.Ю.* Методика расчета поглощения в атмосферных парах воды в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах // Радиотехника и электроника. 1976. Т. 21. № 5. С. 951–957.
- Кузьмин А.В., Поспелов М.Н., Ханин Ю.Б., Шарков Е.А.* Микроволновый сканирующий радиометр-поляриметр нового поколения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Т. 1. С. 238–243.
- Руткевич П.Б., Шарков Е.А.* Физический механизм генезиса вихревых возмущений в сжимаемой и насыщенной водяным паром атмосфере: Препринт ИКИ РАН. М.: ИКИ РАН, 2004. Пр-2102. 11 с.
- Шарков Е.А.* Дистанционные исследования атмосферных катастроф // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 1. С. 52–68.
- Clatchey R.A., Fenn R.W., Selby J.E.A. et al.* Optical properties of the atmosphere. 3<sup>rd</sup> ed. // Air Force Cambridge Res. Lab. Rep. 1972. P. 108.
- Rutkevich P.B.* Convective and rotational instability in moist air // Physica A. 2002. V. 315. № 1–2. P. 215–221.
- Sharkov E.A.* Remote sensing of tropical regions. Chichester, N.Y., Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto: John Wiley & Sons/PRAXIS, 1998. 310 p.
- Sharkov E.A.* Global tropical cyclogenesis. L., Berlin, N.Y., Paris, Singapore, Tokyo: Springer/PRAXIS, 2000. 370 p.
- Sharkov E.A.* Passive microwave remote sensing of the Earth: physical foundations. Berlin, N.Y., L., Paris, Tokyo: Springer/PRAXIS, 2003. 612 p.
- Uspensky A.B., Scherbina G.I.* Derivation of perceptible water from Meteor and NOAA infrared window measurements // Adv. Space Res. 1996. V. 18. № 7. P. 17–20.

## Use of Resonance Lines 22.2, 183 and 325 GHz for Retrieval the Detailed Vertical Profiles Water Vapor in Tropical Atmosphere

A. G. Semin<sup>1</sup>, A. V. Kuzmin<sup>2</sup>, Yu. B. Khapin<sup>2</sup>, E. A. Sharkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> State Pedagogical University, Penza

<sup>2</sup> Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

Paper is considered possibility of the retrieval the detailed profiles water vapor in tropical atmosphere as of satellite measurements radiothermal microwave radiation. Direct problem is analyzed possibility of the retrieval the profile water vapor on 8–10 high-altitude levels before height 10 km with use resonance line absorptions 183 and 325 GHz, as well as use to lines 22.2 GHz. The spectrums of the integral atmosphere absorption, spectrums radio brightness temperature of atmosphere and system atmosphere-ocean within the range of 5–220 GHz are considered. The decision of this problem, certainly, will be important step in study of the physical conditions of the genesis and evolutions tropical cyclones.

**Keywords:** retrieval water vapor at atmosphere, microwave radiometry, radio brightness temperature

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

ВЛИЯНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ АТМОСФЕРЫ  
НА ВЫХОДНОЙ СИГНАЛ СПУТНИКОВОГО  
КОРРЕЛЯЦИОННОГО РАДИОМЕТРА

© 2013 г. С. А. Шишигин\*, С. А. Старновский

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева  
Сибирского отделения Российской академии наук, Томск\*

Государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск

\*E-mail: shansss@mail2000.ru

Поступила в редакцию 28.03.2012 г.

Проведен анализ метода корреляции газовых светофильтров для измерения содержания метана в атмосфере в спектральных интервалах 1220–1260 и 1330–1370 см<sup>-1</sup>. Рассчитаны оптимальная концентрация и давление метана в корреляционной кювете (0.02 атм м для участка 1220–1260 см<sup>-1</sup> и 0.005 атм м для участка 1330–1370 см<sup>-1</sup>) для аэрокосмического варианта оптоэлектронного прибора. Изучено влияния концентрации исследуемого газа в горизонтальных слоях воздуха и их излучения на погрешность измерений содержания метана в столбе атмосферы. Рассмотрена возможность применения метода корреляции газовых светофильтров для измерения содержания метана в приземном слое атмосферы с аэрокосмической платформы.

**Ключевые слова:** Корреляционный радиометр, метан, атмосфера, спутник, излучение

DOI: 10.7868/S0205961412060097

ВВЕДЕНИЕ

Исследование естественных и антропогенных источников и стоков газов в приземном слое атмосферы (Денисов и др., 2011) связано с разработкой дистанционных методов мониторинга содержания газов с высоким пространственным и временным разрешением (Рокотян и др., 2011). Современные спутниковые приборы не обладают достаточной чувствительностью к изменению содержания газов в нижних слоях атмосферы для контроля наземных источников загрязнений (Ситнов, 2011). Разработка оперативных методов мониторинга газового состава атмосферы с использованием космических аппаратов является актуальной проблемой атмосферной оптики, экологии, климатологии (Поляков и др., 2010а, 2010б).

Метод корреляционной спектроскопии является одним из перспективных для измерения содержания метана в атмосфере с аэрокосмической платформы (Петров, Смирнов, 2000; Баландин, Шишигин, 2011). Практическое использование данного метода может быть расширено в результате исследования влияния вертикальной неоднородности атмосферы на чувствительность радиометра. В данной работе рассмотрены два спектральных участка излучения в полосе поглощения метана, которые имеют значительное различие в

степени ослабления водяным паром. Показана возможность определения содержания метана в приземном слое атмосферы по разности показаний корреляционного радиометра в выбранных спектральных участках.

ВЫБОР СПЕКТРАЛЬНЫХ УЧАСТКОВ  
УХОДЯЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ МЕТАНА  
В АТМОСФЕРЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫМ  
РАДИОМЕТРОМ

Рассмотрена модель атмосферы, разделенной на однородные горизонтальные слои толщиной 1 и 2 км. В табл. 1 приведены средние значения температуры  $T$ , давления  $P$ , концентрации  $N$  и процентное содержание молекул  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $N_2O$ ,  $O_3$ ,  $H_2O$  в выбранных слоях атмосферы.

В работе (Баландин и др., 2008) показано, что участок спектра уходящего излучения 1220–1260 см<sup>-1</sup> для измерения содержания метана в столбе атмосферы пассивным корреляционным методом является наиболее перспективным. На функцию пропускания атмосферными газами в данном участке спектра оказывают основное влияние метан ( $CH_4$ ), пары воды ( $H_2O$ ), закись азота ( $N_2O$ ) (Киселёва и др., 1998). Функция пропуска-

Таблица 1. Параметры модели атмосферы

$H$ , км	$T$ , К	$P$ , атм	$O_2$ , %	$N_2$ , %	$CH_4 \times 10^{-4}$ %	$CO_2 \times 10^{-4}$ %	$CO \times 10^{-4}$ %	$N_2O \times 10^{-4}$ %	$O_3 \times 10^{-4}$ %	$H_2O \times 10^{-4}$ %	$N \text{ см}^{-3} \times 10^{-19}$
0	288	1	21	78	1.6	370	0.250	0.420	0.027	7730	2.550
1	282	0.891	21	78	1.6	370	0.250	0.400	0.026	6800	2.300
2	275	0.787	21	78	1.6	370	0.250	0.400	0.024	5000	2.100
3	269	0.694	21	78	1.6	370	0.250	0.400	0.024	3700	1.900
4	263	0.611	21	78	1.6	370	0.250	0.400	0.027	2600	1.700
5	256	0.535	21	78	1.6	370	0.250	0.400	0.027	1800	1.530
6	249	0.467	21	78	1.6	370	0.200	0.400	0.029	1000	1.370
7	243	0.407	21	78	1.6	370	0.180	0.400	0.033	500	1.230
8	236	0.353	21	78	1.6	370	0.150	0.400	0.041	240	1.100
9	230	0.305	21	78	1.6	370	0.120	0.400	0.052	50	0.970
10	223	0.262	21	78	1.5	370	0.100	0.400	0.070	10	0.860
12	217	0.192	21	78	1.45	370	0.080	0.400	0.123	8	0.650
14	217	0.141	21	78	1.40	370	0.060	0.400	0.213	7	0.470
16	217	0.103	21	78	1.32	370	0.050	0.400	0.857	6	0.350
18	217	0.075	21	78	1.25	370	0.008	0.400	2	4.50	0.250
20	217	0.055	21	78	1.20	370	0.005	0.400	3.333	4.00	0.180
22	219	0.040	21	78	1.10	370	0.005	0.350	4.286	4.20	0.140
24	221	0.029	21	78	1.00	370	0.005	0.300	5	4.40	0.100
26	223	0.022	21	78	0.90	370	0.005	0.200	5.714	4.50	0.070
28	225	0.016	21	78	0.80	370	0.005	0.150	6	4.60	0.050
30	227	0.012	21	78	0.70	370	0.005	0.100	4.444	4.70	0.045
32	229	0.009	21	78	0.65	370	0.007	0.080	3.750	4.80	0.040
34	235	0.008	21	78	0.60	370	0.008	0.070	3.714	5.00	0.035
36	245	0.007	21	78	0.58	370	0.010	0.060	3.333	6.00	0.030
38	255	0.006	21	78	0.53	370	0.020	0.050	2.917	6.50	0.024
40	265	0.003	21	78	0.50	370	0.030	0.040	3.333	7.00	0.012

ния излучения атмосферой в спектральном участке полосы поглощения метана  $1220\text{--}1260 \text{ см}^{-1}$  в среднем по данному диапазону составляет около 0.51, а в другом выбранном спектральном диапазоне  $1330\text{--}1370 \text{ см}^{-1}$  полосы поглощения метана пропускание атмосферы на порядок меньше. Это обусловлено значительным ослаблением излучения водяным паром в приземном слое атмосферы.

Распределение содержания газов  $H_2O$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $O_3$ ,  $N_2O$  в воздухе в зависимости от расстояния до поверхности Земли показано на рис. 1.

С помощью соотношения для выходного сигнала радиометра (аппаратурной функции), полученного в работе (Баландин и др., 2008), рассчитана зависимость сигнала корреляционного радиометра  $\Gamma$  при измерении содержания метана в рассмотренной модели атмосферы от количества метана в кювете  $LP$  ( $L$  — длина кюветы,  $P$  — давление метана) в спектральных диапазонах  $1330\text{--}1370$  (а) и  $1220\text{--}1260$  (б)  $\text{см}^{-1}$  (рис. 2).

На данном рисунке также приведены зависимости коэффициента пропускания  $T_k$  данных кювет от количества метана в них. Как видно из рис. 2, величина выходного сигнала  $\Gamma$  вначале резко возрастает, а затем темп роста сигнала уменьшается — с увеличением содержания метана в кювете. Увеличение метана в кювете приводит к ослаблению регистрируемого излучения.

Область величин  $LP$ , где происходит изменение чувствительности радиометра на изменение содержания исследуемого газа, считаем оптимальной для каждого спектрального участка. На основании данных расчетов выбрано оптимальное содержание метана в кюветах ( $0.02 \text{ атм м}$  для участка  $1220\text{--}1260 \text{ см}^{-1}$  и  $0.005 \text{ атм м}$  для участка  $1330\text{--}1370 \text{ см}^{-1}$ ) и рассмотрено влияния вертикальной неоднородности атмосферы на выходной сигнал корреляционного радиометра с кюветами при разных давлениях, но постоянном оптимальном содержании метана в них.

**ЗАВИСИМОСТЬ УХОДЯЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ СЛОЕВ АТМОСФЕРЫ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ**

#### ЗАВИСИМОСТЬ УХОДЯЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ СЛОЕВ АТМОСФЕРЫ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Мощность теплового излучения поверхности Земли при температуре  $290 \text{ К}$  составляет  $\sim 3.6 \times 10^{-5}$  и  $4.8 \times 10^{-5} \text{ Вт/см}^2 \text{ см}^{-1} \text{ Сг}$  соответственно

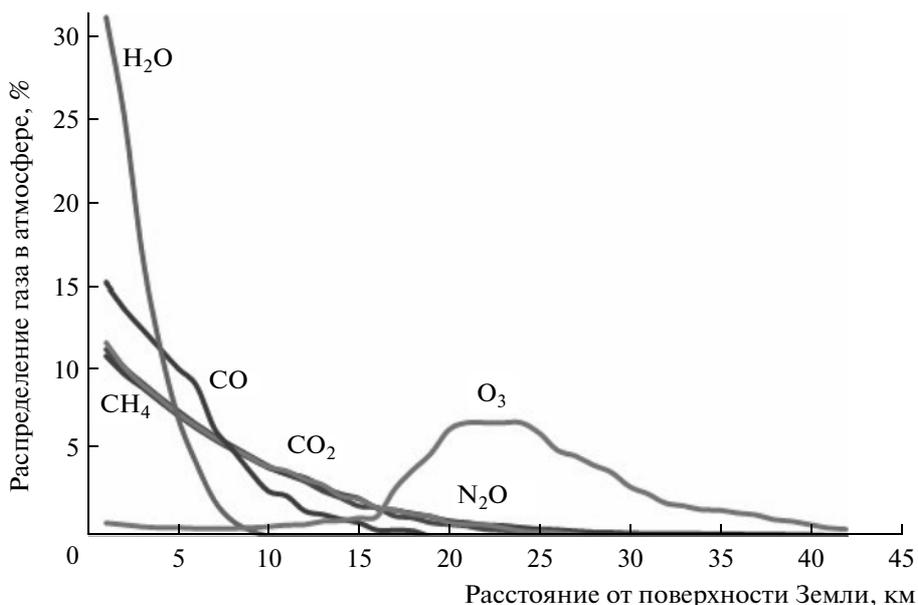


Рис. 1. Распределение содержания газа в слое воздуха 1 км (%) в зависимости от расстояния до поверхности Земли.

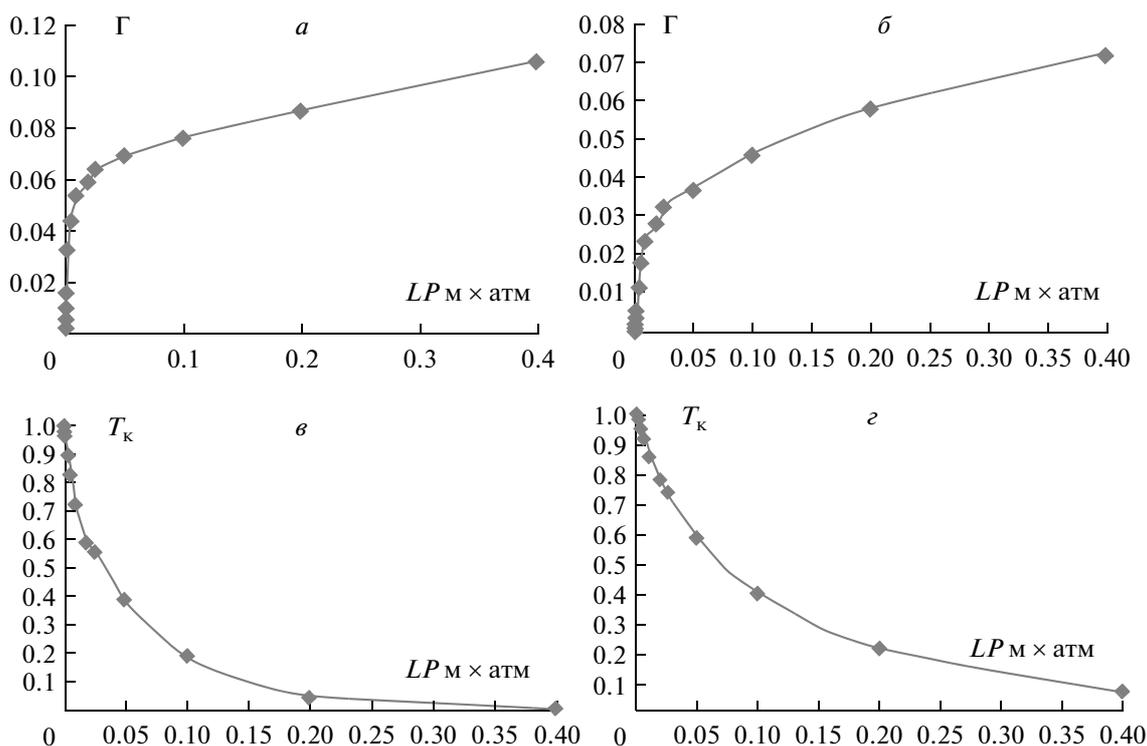


Рис. 2. Зависимость выходного сигнала корреляционного радиометра  $\Gamma$  и коэффициента пропускания кюветы  $T_k$  от содержания метана в кювете  $LP$  ( $L$  – длина кюветы,  $P$  – давление метана) в спектральном диапазоне 1330–1370 ( $a, б$ ) и 1220–1260  $cm^{-1}$  ( $в, г$ ).

для спектральных участков 1330–1370 и 1220–1260  $cm^{-1}$ , и только ее часть  $\sim 1.7 \times 10^{-6}$  и  $1.34 \times 10^{-5}$  Вт/см<sup>2</sup> см<sup>-1</sup> Sr покидает атмосферу.

В табл. 2 приведена чувствительность аппаратной функции при измерении содержания ме-

тана в столбе атмосферы корреляционным радиометром в спектральных диапазонах 1220–1260 и 1330–1370  $cm^{-1}$  от изменения температуры поверхности Земли на 1 К в диапазоне 290–310 К при давлений метана в корреляционных кюветях

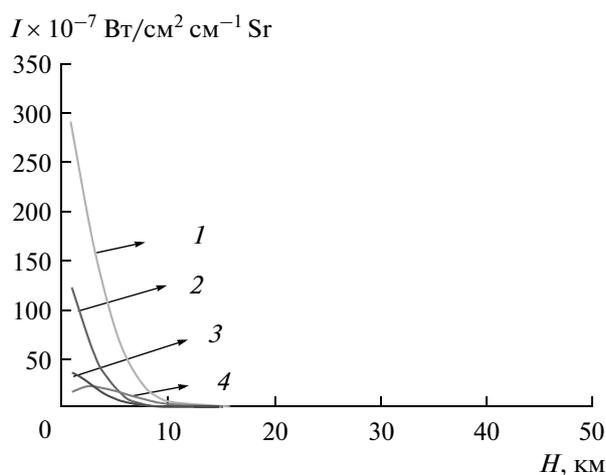
**Таблица 2.** Изменение сигнала радиометра из-за изменения температуры Земли на 1 К

$\Delta\nu, \text{см}^{-1}$ \diagdown $P, \text{атм}$	0.01	0.05	0.1	0.5	1	1.5	2	2.5
1220–1260	$7.4 \times 10^{-5}$	$17.8 \times 10^{-5}$	$23.7 \times 10^{-5}$	$37.6 \times 10^{-5}$	$40.4 \times 10^{-5}$	$40.38 \times 10^{-5}$	$39.6 \times 10^{-5}$	$38.8 \times 10^{-5}$
1330–1370	$1.28 \times 10^{-5}$	$3.35 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	$9.6 \times 10^{-5}$	$10.6 \times 10^{-5}$	$10.43 \times 10^{-5}$	$9.9 \times 10^{-5}$	$9.1 \times 10^{-5}$

от 0.01 до 2.5 атм. Выходной сигнал радиометра имеет максимальную чувствительность к изменению температуры поверхности Земли с корреляционной кюветой метана  $\sim 1$  атм и значительно уменьшается с понижением давления в кювете, особенно для спектрального участка 1330–1370  $\text{см}^{-1}$ . Излучение воздушной среды оказывает существенное влияние на информационный сигнал корреляционного радиометра.

Мощность теплового излучения всех слоев атмосферы в спектральных участках 1330–1370 и 1220–1260  $\text{см}^{-1}$  составляет  $\sim 1 \times 10^{-4}$ ;  $\sim 3.57 \times 10^{-5}$   $\text{Вт/см}^2 \text{см}^{-1} \text{Sr}$ , и только мощность излучения соответственно  $\sim 1.54 \times 10^{-5}$  и  $\sim 1.39 \times 10^{-5}$   $\text{Вт/см}^2 \text{см}^{-1} \text{Sr}$  в выбранной модели атмосферы уходит в космос. На рис. 3 приведены усредненная по спектру мощность излучения слоя атмосферы 1, 2 и мощность уходящего из атмосферы излучения данного слоя 4, 3 в зависимости от высоты для спектральных участков излучения 1330–1370 и 1220–1260  $\text{см}^{-1}$  соответственно. Уменьшение прозрачности атмосферы увеличивает тепловой обмен внутри атмосферы, значительно ослабляет уходящее излучение особенно приземного слоя.

Мощность излучения прозрачной воздушной среды имеет максимальное значение на линиях



**Рис. 3.** Мощность излучения в спектральных участках 1330–1370 и 1220–1260  $\text{см}^{-1}$  слоя атмосферы (1, 2) и мощность уходящего из атмосферы излучения данного слоя (4, 3) в зависимости от высоты.

поглощения газов и приводит к снижению информационного сигнала корреляционного радиометра. Как показывают расчеты, излучение воздуха в спектральном интервале 1220–1260  $\text{см}^{-1}$  на высоте  $\sim 3$  км оказывает максимальное влияние на снижение сигнала радиометра с корреляционной кюветой с метаном при давлении 0.1 атм и длиной 20 см, расположенного на аэрокосмической платформе. Излучение воздуха в спектральном диапазоне 1330–1370  $\text{см}^{-1}$  имеет максимальное воздействие на уровень сигнала радиометра с корреляционной кюветой с метаном при давлении 1 атм, длиной 5 мм на высоте  $\sim 5$  км. С уменьшением расстояния до поверхности Земли плотность и температура воздуха в тропосфере увеличивается, что приводит к увеличению мощности излучения воздуха с понижением высоты. Однако ослабление атмосферой уходящего излучения приземного слоя воздуха значительно снижает мощность излучения, уходящего в космос, что приводит к наблюдаемой высотной экстремальной зависимости информационного сигнала радиометра от излучения атмосферы.

На рис. 4 показаны изменения аппаратурной функции  $\Delta\Gamma$  с увеличением температуры слоя на 2 К при давлении метана в корреляционной кювете 0.01; 0.1; 1; 2 атм, но постоянной его массе, в зависимости от высоты в двух спектральных диапазонах работы радиометра 1220–1260 и 1330–1370  $\text{см}^{-1}$ . Увеличение температуры слоя атмосферы на 2 К приводит к уменьшению аппаратурной функции, и эти изменения возрастают с ростом давления в корреляционной кювете до 1–2 атм, а минимальное значение  $\Delta\Gamma$  смещается в более низкие слои атмосферы.

В спектральном диапазоне 1330–1370  $\text{см}^{-1}$  работы корреляционного радиометра увеличение температуры слоя на 2 К ниже  $\sim 8$  км оказывает возрастающее влияние на аппаратурную функцию, как и при увеличении температуры поверхности Земли.

На рис. 5 показаны изменения аппаратурной функции из-за увеличения в слое воздуха толщиной 2 км содержания метана на 10% в зависимости от высоты слоя при работе корреляционного радиометра в спектральных диапазонах 1220–1260 и 1330–1370  $\text{см}^{-1}$ , давлении в кювете 0.01; 0.05; 0.1; 0.5; 1; 2.5 атм. Несмотря на то, что с понижением высоты слоя добавочное количество

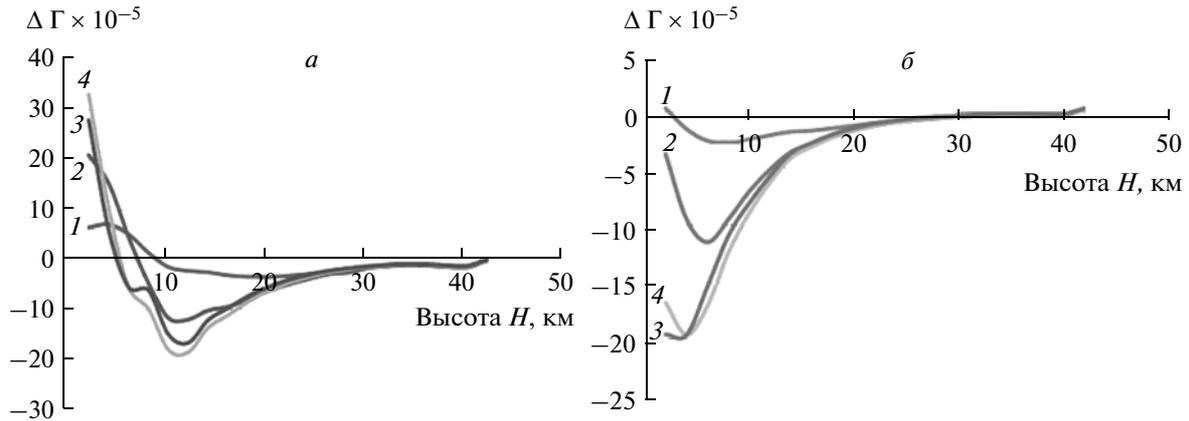


Рис. 4. Изменение аппаратной функции  $\Delta\Gamma$  корреляционного радиометра с кюветами с метаном при давлении 0.01 атм — 1; 0.1 атм — 2; 1 атм — 3; 2 атм — 4 в спектральных диапазонах 1330–1370 (а) и 1220–1260 (б)  $\text{см}^{-1}$  в зависимости от увеличения температуры на 2 К одного слоя воздуха и его высоты.

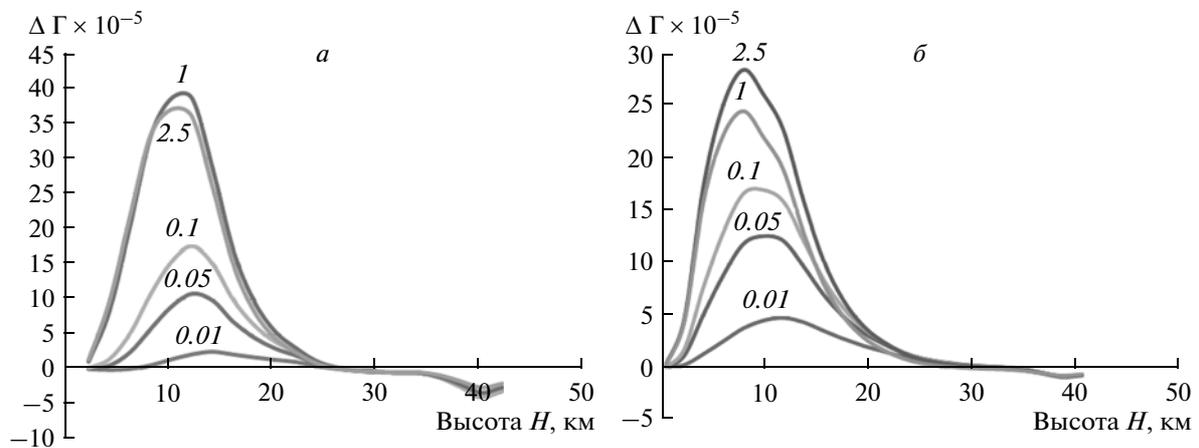
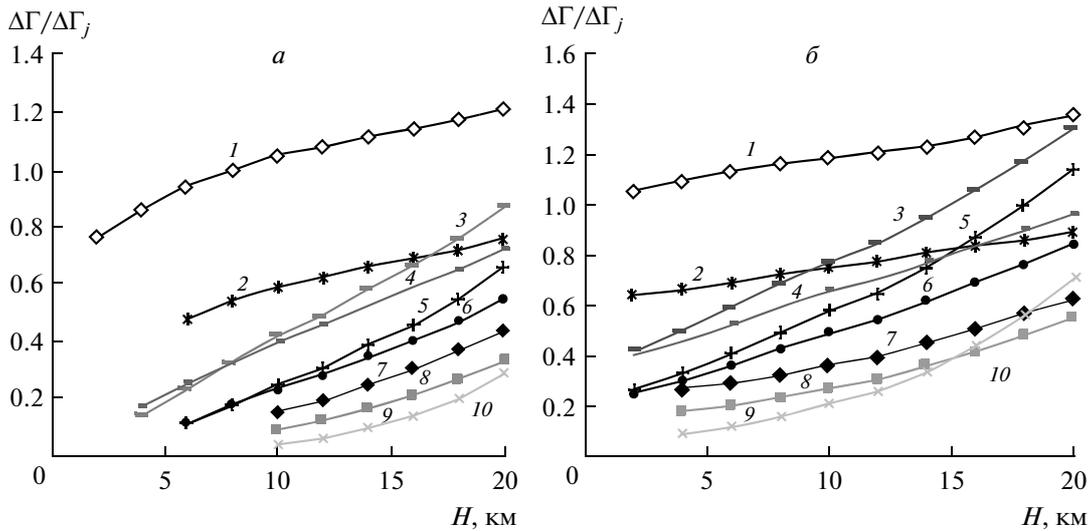


Рис. 5. Изменение аппаратной функции  $\Delta\Gamma$  корреляционного радиометра с кюветами с метаном при давлении 0.01; 0.05; 0.1; 1; 2 атм в спектральных диапазонах 1330–1370 (а) и 1220–1260 (б)  $\text{см}^{-1}$  в зависимости от увеличения содержания метана на 10% в одном слое и его высоты.

метана в слое увеличивается, наблюдается снижение изменения  $\Delta\Gamma$  в приземных слоях атмосферы. Это обусловлено конкуренцией процессов ослабления излучения рассматриваемым слоем атмосферы и его излучением в исследуемом спектральном диапазоне в зависимости от высоты нахождения слоя. Если практически значимым изменением выходного сигнала корреляционного радиометра считать уровень  $>10^{-5}$ , тогда выходной сигнал радиометра при регистрации уходящего излучения в спектральном диапазоне 1330–1370  $\text{см}^{-1}$  не имеет информации о содержании метана в приземном слое атмосферы. Одновременное измерение содержания метана в безоблачной атмосфере в двух спектральных участках 1220–1260 и 1330–1370  $\text{см}^{-1}$  радиометрами с набором корреляционных кювет с метаном при разных давлениях позволит контролировать со-

держание метана у поверхности Земли по разности показаний радиометров. При наличии облачности измерения содержания метана корреляционным радиометром над облаком и между облаками также позволяют получать данные о количестве метана в приземном слое.

Как видно на рис. 5, изменения корреляционной функции  $\Delta\Gamma$  радиометра при увеличении концентрации метана в 2-км слое воздуха неоднозначно зависят от расстояния до поверхности Земли. Уменьшение массы газа, добавляемой в атмосферный слой, с ростом высоты приводит вначале к увеличению изменения аппаратной функции  $\Delta\Gamma$  до высоты  $\sim 10$ –12 км, а затем к ее снижению. В случае возможного изменения содержания метана на любой высоте необходимо определять высоту нахождения области изменения исследуемого газа. Отклонение concentra-



**Рис. 6.** Отношение изменений выходных сигналов  $\Delta\Gamma$  корреляционного радиометра с кюветами при давлении метана 0.01; 0.05; 0.1; 1; 2.5 атм в зависимости от увеличения содержания метана в одном слое на 10% и его высоты для спектральных диапазонов 1330–1370 (а) и 1220–1260 (б)  $\text{см}^{-1}$ .

ции исследуемого газа от стандартного распределения его в атмосфере (Зуев, Комаров, 1986) в зависимости от высоты в атмосфере не одинаково проявляется в изменении выходного сигнала радиометра  $\Delta\Gamma$ , измеряющего содержание газа во всей толще атмосферы в разных спектральных диапазонах уходящего излучения.

На рис. 6 приведены отношения показаний радиометра  $\Delta\Gamma_1/\Delta\Gamma_{2.5} - 1$ ;  $\Delta\Gamma_{0.05}/\Delta\Gamma_{0.1} - 2$ ;  $\Delta\Gamma_{0.1}/\Delta\Gamma_{2.5} - 3$ ;  $\Delta\Gamma_{0.1}/\Delta\Gamma_1 - 4$ ;  $\Delta\Gamma_{0.05}/\Delta\Gamma_{2.5} - 5$ ;  $\Delta\Gamma_{0.05}/\Delta\Gamma_1 - 6$ ;  $\Delta\Gamma_{0.01}/\Delta\Gamma_{0.05} - 7$ ;  $\Delta\Gamma_{0.01}/\Delta\Gamma_{0.1} - 8$ ;  $\Delta\Gamma_{0.01}/\Delta\Gamma_{2.5} - 9$ ;  $\Delta\Gamma_{0.01}/\Delta\Gamma_1 - 10$  с корреляционными кюветами при давлении метана 0.01; 0.05; 0.1; 1; 2.5 атм (индексы при  $\Delta\Gamma$ ) в зависимости от увеличения содержания метана в одном слое на 10% и его высоты для спектральных диапазонов 1330–1370  $\text{см}^{-1}$  (а), 1220–1260  $\text{см}^{-1}$  (б). Наблюдается значительный разброс отношения реакции выходных сигналов радиометров на изменение содержания метана в слоях атмосферы, что позволяет однозначно определить слой атмосферы, подверженный изменению концентрации метана, и на основании этого найти истинное содержание данного газа во всей толще атмосферы. Изменение аппаратной функции  $\Delta\Gamma$  при изменении содержания метана от его стандартного распределения в атмосфере при измерении содержания  $\text{CH}_4$  во всем столбе атмосферы корреляционным радиометром с кюветами при разных давлениях метана в них можно записать в виде

$$\begin{cases} \Delta\Gamma_1 = k_{11}m_1 + k_{12}m_2 + k_{13}m_3 + \dots + k_{1n}m_n \\ \Delta\Gamma_2 = k_{21}m_1 + k_{22}m_2 + k_{23}m_3 + \dots + k_{2n}m_n \\ \dots \\ \Delta\Gamma_i = k_{i1}m_1 + k_{i2}m_2 + k_{i3}m_3 + \dots + k_{in}m_n \end{cases}, \quad (1)$$

где  $i$ , — число корреляционных кювет с исследуемым газом при разных давлениях и размерах;  $m_n$  — процентное изменение метана в слое  $n$ ;  $k_{in}$ , — коэффициенты, характеризующие чувствительность радиометра с корреляционной  $i$  кюветой к изменению метана в  $n$  слое атмосферы. Рисунок 5 демонстрирует соотношение данных коэффициентов в зависимости от высоты расположения слоя от поверхности Земли. Обработка результатов одновременных измерений содержания газа с аэрокосмической платформы корреляционными радиометрами в разных спектральных участках полосы поглощения исследуемого газа и набором корреляционных кювет с помощью системы уравнений (1) относительно массовой доли возрастания измеряемого газа в слоях воздуха позволяет оперативно определить изменение вертикального распределения газа при перемещении спутника.

Требования к параметрам и количеству корреляционных кювет, необходимым для обработки результатов измерений содержания метана в столбе атмосферы корреляционным радиометром с минимальным набором кювет, и вопросы разрешимости системы уравнений (1) будут рассмотрены в следующей статье.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ метода корреляции газовых светофильтров для измерения содержания метана

в атмосфере со спутника в спектральных интервалах 1330–1370 и 1220–1260 см<sup>-1</sup>. Исследовано влияние концентрации исследуемого газа в горизонтальных слоях атмосферы и их излучения на чувствительность измерений метана. Рассмотрена возможность применения метода корреляции газовых светофильтров для измерения содержания метана в приземном слое атмосферы. Результаты исследования могут быть использованы при разработке оптоэлектронного прибора для оперативного мониторинга содержания метана в атмосфере, а также в качестве методики для обработки спектров, полученных при помощи современных сенсоров, установленных на спутниках.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баландин С.Ф., Старновский С.А., Шишигин С.А.* Анализ возможного применения метода корреляции газовых светофильтров для измерения содержания метана в атмосфере со спутника журнал // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21. № 10. С. 897–901.
- Баландин С.Ф., Шишигин С.А.* Влияние температуры основных газовых компонент воздуха на погрешность измерения содержания углекислого газа в атмосфере корреляционным ИК-радиометром // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 6. С. 3–9.
- Денисов С.Н., Аржанов М.М., Елисеев А.В., Мохов И.И.* Чувствительность эмиссии метана болотными экосистемами Западной Сибири к изменениям климата: мультимодельные оценки // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 4. С. 319–322.
- Киселёва М.С., Казбанов В.А., Решетникова И.Н., Синельникова Г.Е., Голованов С.Н.* Высотные спектры прозрачности атмосферы в области 8.0–12.0 мкм: Эксперимент и расчет // Оптич. журн. 1998. Т. 65. № 11. С. 28–33.
- Петров С.Б., Смирнов А.П.* Тенденции развития спектральной аэрокосмической аппаратуры для исследования и оперативного контроля окружающей среды // Оптич. журн. 2000. Т. 67. № 5. С. 82–93.
- Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б.* Возможности определения температуры и излучательной способности поверхности суши по данным спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения (ИКФС-2) // Исслед. Земли из космоса 2010. № 4. С. 85–90.
- Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б.* Возможности определения содержания озона и малых газовых составляющих по данным спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения (ИКФС-2) // Исслед. Земли из космоса 2010. № 3. С. 3–11.
- Рокотян Н.В., Грибанов К.Г., Захаров В.И.* Эффект температурно-независимого поглощения и его использование для зондирования парниковых газов в атмосфере // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 6. С. 510–515.
- Ситнов С.А.* Анализ спутниковых наблюдений аэрозольных оптических характеристик и газовых примесей атмосферы над центральным районом Российской Федерации в период аномально высоких летних температур и массовых пожаров 2010 г. // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 7. С. 572–581.
- Зуев В.Е., Комаров В.С.* Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 320 с.

## Influence of Vertical Heterogeneity of Atmosphere on a Output Signal of a Satellite Correlation Radiometer

S. A. Shishigin\*, S. A. Starnovskii

\*V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk  
State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk

The analysis of a method of correlation of gas light filters for measuring of the content of methane in atmosphere in spectroscopic intervals of 1220–1260 and 1330–1370 cm<sup>-1</sup> is carry out. Optimum concentration and pressure of methane in a correlation cell (0.02 атм m for a site of 1220–1260 cm<sup>-1</sup>), (0.005 атм m for a site of 1330–1370 cm<sup>-1</sup>) for a space variant optoelectronic the device is calculated. It is explored influences of concentration of explored gas in horizontal layers of air and their radiation on an error of measuring of the content of methane in an atmosphere column. Possibility of application of a method of correlation of gas light filters for measuring of the content of methane in a ground layer of atmosphere from a space platform is viewed.

**Keywords:** Correlation radiometer, methane, atmosphere, satellite, radiation

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ВАЛИДАЦИИ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ  
СОДЕРЖАНИЯ NO<sub>2</sub> С ПОМОЩЬЮ ПРИБОРА OMI НА ОСНОВЕ ДАННЫХ  
ИЗМЕРЕНИЙ НА ЗВЕНИГОРОДСКОЙ НАУЧНОЙ СТАНЦИИ

© 2013 г. А. Н. Груздев\*, А. С. Елохов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Москва

\*E-mail: a.n.gruzdev@mail.ru

Поступила в редакцию 9.04.2012 г.

Сравнение результатов наземных измерений содержания NO<sub>2</sub> на Звенигородской научной станции и результатов измерений с помощью прибора OMI на борту спутника EOS-Aura при пролетах спутника над станцией выявило, что среднее расхождение значений “незагрязненной” (главным образом стратосферной) части общего содержания NO<sub>2</sub> за весь срок совместных наблюдений находится в пределах ошибок измерений. Однако содержание NO<sub>2</sub> по спутниковым данным летом меньше значений, получаемых из наземных наблюдений, и больше их зимой. Высокая корреляция между наземными и спутниковыми данными в значительной степени обусловлена годовым ходом NO<sub>2</sub>. Корреляция ухудшается при сравнении данных по месяцам. В целом отмечено значительное расхождение между значениями содержания NO<sub>2</sub> в вертикальном столбе тропосферы по данным OMI и данным наземных измерений. Корреляция между спутниковыми и наземными данными, слабая в целом за год, возрастает зимой и весной. Коэффициент корреляции между наземными и спутниковыми данными о “незагрязненной” части общего содержания NO<sub>2</sub> увеличивается, а коэффициент корреляции между данными о тропосферном содержании NO<sub>2</sub> уменьшается с увеличением доли облаков. Отмечено соответствие между отдельными квазирегулярными вариациями внутрисезонного масштаба, выявленными в данных OMI и в наземных данных. Однако годовой ход тропосферного содержания NO<sub>2</sub> в спутниковых данных не соответствует по фазе годовому ходу в данных наземных измерений. Аномалия NO<sub>2</sub> в конце марта–начале апреля 2011 г., вызванная затокком стратосферного воздуха из области арктической озонной “дыры”, отчетливо проявившаяся в результатах наземных измерений на Звенигородской станции, в данных OMI не выявлена.

**Ключевые слова:** валидация, NO<sub>2</sub>, OMI, дистанционное зондирование

DOI: 10.7868/S0205961412060024

## ВВЕДЕНИЕ

Число атмосферных параметров, измеряемых со спутников, постоянно расширяется, а методы измерений совершенствуются. Тем не менее, результаты дистанционных измерений со спутников требуют валидации на основе данных независимых измерений. Значительный интерес в атмосферных исследованиях представляют результаты измерений состава атмосферы. Двуокись азота (NO<sub>2</sub>), наряду с другими окислами азота, играет важную роль в химии атмосферного озона. Измерения ее содержания в стратосфере особенно важны в связи с проблемой изменений озонового слоя, а измерения содержания в нижней тропосфере — в связи с проблемой антропогенного загрязнения атмосферы.

В 2004 г. Национальным управлением США по авиации и исследованию космического пространства (NASA) запущен спутник EOS-Aura,

научными задачами которого являются исследования озонового слоя, качества воздуха и климата Земли. На спутнике установлены несколько приборов и среди них — прибор OMI (Ozone Monitoring Instrument), разработанный специалистами из Нидерландов и Финляндии и предназначенный для исследования газового и аэрозольного состава атмосферы. Прибор OMI позволяет определять общее содержание (OC) NO<sub>2</sub> в вертикальном столбе атмосферы, а специальная методика анализа и обработки результатов измерений позволяет также оценивать значения содержания NO<sub>2</sub> в загрязненном пограничном слое атмосферы и в вертикальном столбе тропосферы (Voersma et al., 2002). Другим достоинством этой аппаратуры является высокое пространственное разрешение (13 × 24 км<sup>2</sup> в надире), что наряду с солнечно-синхронизированной орбитой спутника обеспечивает

высокую степень детализации широтно-долготного распределения содержания NO<sub>2</sub>.

Результаты валидации данных ОМІ о содержании NO<sub>2</sub> в вертикальном столбе стратосферы с использованием данных спектрометрических измерений на наземных станциях представлены в нескольких работах (Celarier et al., 2008; Ionov et al., 2008; Груздев, Елохов, 2009; Gruzdev, Elokho, 2010). Данные ОМІ о содержании NO<sub>2</sub> в тропосферном столбе также были сопоставлены с результатами независимых (наземных, спутниковых, самолетных) измерений (Voersma et al., 2008; Brinksma et al., 2008; Buscela et al., 2008; Celarier et al., 2008; Irie et al., 2008; Kramer et al., 2008; Wenig et al., 2008; Груздев, Елохов, 2009; Gruzdev, Elokho, 2010). По мере отработки методики обработки данных измерений ОМІ, соответствие между значениями стратосферного содержания NO<sub>2</sub> по результатам спутниковых и наземных измерений в целом улучшалось (Груздев, Елохов, 2009; Gruzdev, Elokho, 2010). Отметим, что оно в значительной степени обусловлено хорошим соответствием особенностей годового хода NO<sub>2</sub>, который является доминирующей модой изменчивости NO<sub>2</sub> в стратосфере. Достаточно большой объем данных наблюдений NO<sub>2</sub> со спутника EOS-Aura, накопленный к настоящему времени, позволяет выполнить более тщательную их валидацию, с учетом сезонных особенностей и вариаций NO<sub>2</sub> меньшего временного масштаба.

Цель представленной работы состоит в проведении такой валидации с использованием данных измерений содержания NO<sub>2</sub> на Звенигородской научной станции (ЗНС) Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, полученных при пролетах спутника над станцией в период измерений с октября 2004 г. по май 2011 г.

#### КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДАННЫХ И МЕТОДИК ИЗМЕРЕНИЯ

Опишем кратко основные особенности данных об NO<sub>2</sub> и методик их получения, которые необходимо учитывать при валидации. Более подробное изложение можно найти в (Voersma et al., 2002; Celarier et al., 2008; Груздев, Елохов, 2009).

##### *Измерения с помощью прибора ОМІ*

Прибор ОМІ измеряет рассеянную атмосферой Земли солнечную радиацию в ультрафиолетовой и видимой частях спектра со спектральным разрешением ~0.5 нм и пространственным (горизонтальным) разрешением 13 × 24 км<sup>2</sup> в надире (Voersma et al., 2002; Celarier et al., 2008). Для определения содержания NO<sub>2</sub> используется спектральный диапазон 415–465 нм. Непосредственно из измерений определяется содержание NO<sub>2</sub> в

наклонном столбе атмосферы. Содержание NO<sub>2</sub> в вертикальном столбе атмосферы получается делением наклонного содержания на величину воздушной массы NO<sub>2</sub>, которая зависит от ряда параметров, включающих геометрию наблюдений, альbedo подстилающей поверхности, форму вертикального профиля NO<sub>2</sub>, характеристики облачности (высота, плотность, степень покрытия неба). Важно, что форма профиля и соответственно значение воздушной массы NO<sub>2</sub> существенно меняются в условиях загрязнения нижней тропосферы, при этом величина воздушной массы сильно зависит от облачности (Voersma et al., 2002). Наличие облачности влияет и на величину воздушной массы в отсутствие нижнетропосферного загрязнения (Voersma et al., 2002; Eskes et al., 2003), однако ее зависимость от доли облачности, согласно (Voersma et al., 2002), не выявляется на фоне естественной изменчивости по причине малой концентрации NO<sub>2</sub> в фоновых условиях в тропосфере.

Процедура получения конечных данных о содержании NO<sub>2</sub> состоит из нескольких этапов, включающих предварительную обработку результатов измерений с целью выявления загрязненных регионов с высокими значениями тропосферного содержания NO<sub>2</sub> и фотохимическое моделирование. В итоге определяется фоновое значение общего содержания NO<sub>2</sub> (считается, что оно составляет “незагрязненную” часть ОС NO<sub>2</sub> в загрязненных районах), собственно ОС NO<sub>2</sub> (оно совпадает с фоновым значением в незагрязненных районах) и содержание NO<sub>2</sub> в загрязненном слое – как разность между ОС NO<sub>2</sub> и фоновым значением. Кроме того, оценивается содержание NO<sub>2</sub> в вертикальном столбе тропосферы, которое складывается из содержания в загрязненном слое и содержания в лежащем выше слое тропосферы в предположении незагрязненного профиля (форма которого предписана по результатам фотохимических моделей). Отметим, что фоновое значение ОС NO<sub>2</sub> определяется осреднением результатов измерений в околосональном направлении вне областей с загрязненной нижней тропосферой, с учетом конфигурации планетарных волн (Voersma et al., 2002; Celarier et al., 2008; Груздев, Елохов, 2009). Поэтому получаемое из измерений ОМІ значение “незагрязненной” части ОС NO<sub>2</sub>, вообще говоря, не равняется аналогичной по смыслу величине непосредственно в окрестности ЗНС, что и может служить одной из причин расхождения результатов наземных и спутниковых измерений этой переменной. Другой причиной может служить возможное влияние облачности на фоновое значение ОС NO<sub>2</sub> ввиду недостаточно точной оценки воздушной массы (см. выше).

Случайная ошибка измерений содержания  $\text{NO}_2$  в стратосферном столбе (а также в “незагрязненном” столбе атмосферы) при безоблачном небе составляет, по оценкам (Voersma et al., 2002), около  $0.2 \times 10^{15}$  и  $0.8 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$  в незагрязненных и загрязненных условия соответственно. Согласно (Voersma et al., 2002), относительные ошибки оценок содержания  $\text{NO}_2$  в тропосферном столбе в безоблачных и облачных условиях составляют около 30 и 60% соответственно, в то время как по оценкам (Wenig et al., 2008) ошибки в безоблачных условиях заключены в большинстве случаев в пределах от 40 до 80%.

В работе использованы данные ОМІ за период с октября 2004 г. по май 2011 г. Использована выборка данных измерений ОМІ над Звенигородом, находящаяся в открытом доступе на сайте Центра валидации данных Aura (Aura Validation Data Center) <http://avdc.gsfc.nasa.gov>. Данные получены нами в мае 2011 г.

#### *Измерения на Звенигородской станции*

Звенигородская научная станция ( $55.7^\circ$  с.ш.,  $36.8^\circ$  в.д.) расположена в сельской местности на расстоянии около 50 км к западу от Москвы. Станция входит в состав международной Сети для обнаружения изменений состава атмосферы (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change – NDACC). Измерения содержания  $\text{NO}_2$  выполняются по рассеянной из зенита солнечной радиации в спектральном диапазоне 435–450 нм со спектральным разрешением 0.7 нм с помощью спектрофотометра на базе отечественного монохроматора МДР-23. Измерения проводятся во время утренних и вечерних сумерек при зенитных углах Солнца  $84^\circ$ – $96^\circ$ .

По измеренным спектрам пропускания рассчитываются значения содержания  $\text{NO}_2$  в наклонном столбе атмосферы в зависимости от зенитного угла Солнца, а по ним путем решения обратной задачи определяется вертикальный профиль  $\text{NO}_2$  (Елохов, Груздев, 2000; Груздев, Елохов, 2009). Профиль представлен десятью слоями шириной 5 км и тонким пограничным слоем, толщина которого априори неизвестна. Ядро обратной задачи составляют значения воздушных масс указанных слоев  $\text{NO}_2$ , которые рассчитываются с помощью сферической модели рассеяния с учетом рефракции и одномерной фотохимической модели. Назначение фотохимической модели – описание фотохимических изменений концентрации  $\text{NO}_2$  в течение сеанса измерений.

Суммирование значений содержания  $\text{NO}_2$  в соответствующих слоях позволяет получать содержание  $\text{NO}_2$  в вертикальном столбе тропосферы (0–10 км), содержание в вертикальном столбе стратосферы (10–50 км), ОС  $\text{NO}_2$  (0–50 км), а

также содержание  $\text{NO}_2$  выше пограничного слоя атмосферы, который наиболее часто подвергается антропогенному загрязнению.

Случайная ошибка определения содержания  $\text{NO}_2$  в стратосферном столбе находится в пределах между  $0.3 \times 10^{15}$  и  $0.6 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$  (Груздев, Елохов, 2009). Случайная ошибка содержания  $\text{NO}_2$  в нижней тропосфере сильно зависит от условий наблюдений и обычно заключена в пределах 5–100% (Груздев, Елохов, 2009). Например, она мала в стабильных условиях с большим содержанием  $\text{NO}_2$  под приземной инверсией и велика при малых значениях содержания  $\text{NO}_2$  в приземном слое.

Сечения поглощения  $\text{NO}_2$  зависят от температуры (Vandaele et al., 1998). Мы использовали сечения поглощения при фиксированном значении температуры 220 К, близком к типичной температуре в слое стратосферного максимума  $\text{NO}_2$  на широте Звенигорода зимой. Согласно (Груздев, Елохов, 2009), в пренебрежении температурной зависимостью сечений поглощения  $\text{NO}_2$  стратосферное содержание  $\text{NO}_2$  по нашим измерениям, в среднем занижено летом примерно на 4%, или на  $0.15 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Содержание  $\text{NO}_2$  в приземном слое занижено в среднем на 14% зимой (при  $-10^\circ\text{C}$ ) и 17% летом (при  $10^\circ\text{C}$ ).

С другой стороны, значения содержания  $\text{NO}_2$  в нижней тропосфере завышены из-за отсутствия учета многократного рассеяния. Завышение составляет около 45% в безоблачных условиях (Груздев, Елохов, 2009). В облачных условиях при высоком альбедо подстилающей поверхности оно может быть больше.

#### СОПОСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ

Прежде чем выполнить сопоставление данных, из них статистическим методом были отбракованы выбросы (Груздев, 2008).

Данные наблюдений, предназначенные для сопоставления, должны по возможности максимально соответствовать друг другу по месту и времени наблюдений. Мы использовали данные спутниковых измерений в 30-км окрестности станции.

$\text{NO}_2$  испытывает сильный суточный ход (Елохов, Груздев, 2000; Груздев, Елохов, 2009), и сопоставляемые данные измерений должны быть приведены к одинаковому времени. Поэтому результаты наземных наблюдений  $\text{NO}_2$  интерполировались по времени к моментам, соответствующим наблюдениям со спутника. Методика интерполяции подробно изложена в работе (Груздев, Елохов, 2009).

Благодаря солнечно синхронизованной орбите спутника, измерения с помощью прибора ОМІ над Звенигородом обычно выполнялись дважды в день, в разное время. При сопоставлении с дан-

ными наземных измерений использованы результаты и тех и других измерений, при этом результаты наземных измерений в нужный день интерполировались к соответствующим (различным) моментам измерений со спутника.

### *Общие характеристики*

Сравнение результатов спутниковых и наземных наблюдений выполним для двух величин, измеряемых со спутника: “незагрязненной” части ОС NO<sub>2</sub> и содержания NO<sub>2</sub> в толще тропосферы. Первой из них сопоставим значение содержания NO<sub>2</sub> в вертикальном столбе атмосферы, за исключением пограничного слоя, полученное по результатам наземных измерений (эта величина включает содержания NO<sub>2</sub> в двух тропосферных и восьми стратосферных 5-км слоях). Оно характеризует незагрязненную часть ОС NO<sub>2</sub> и отражает главным образом содержание NO<sub>2</sub> в стратосфере. Второй величине сопоставим интегральное содержание NO<sub>2</sub> в слое 0–10 км по результатам наземных измерений, представляющее собой сумму содержаний NO<sub>2</sub> в пограничном слое и двух 5-км тропосферных слоях.

На рис. 1а, б показаны значения незагрязненной части ОС NO<sub>2</sub> и значения содержания NO<sub>2</sub> в тропосферном столбе по результатам измерений на приборе OMI и по данным наземных измерений, интерполированным ко времени наблюдений со спутника. Данные приведены только для тех дней, для которых имеются результаты и спутниковых, и наземных измерений. Разрывы в данных на рисунке обусловлены перерывами в наземных измерениях. Данные измерений со спутника на рис. 1а в целом достаточно точно ложатся на данные наземных измерений. Этого, вообще говоря, нельзя сказать о тропосферном содержании NO<sub>2</sub> (рис. 1б). Диапазон изменений тропосферного содержания NO<sub>2</sub> по наземным измерениям существенно больше, чем по измерениям со спутника. И те, и другие значения зачастую значительно превосходят значения незагрязненной части ОС NO<sub>2</sub>.

Различия между данными наземных и спутниковых измерений тропосферного содержания NO<sub>2</sub> можно частично объяснить значительной неоднородностью полей концентрации NO<sub>2</sub> в зоне загрязнения, что приводит к зависимости получаемого из измерений значения тропосферного содержания NO<sub>2</sub> от степени пространственного осреднения (которая больше при наблюдениях со спутника), а также значительной временной изменчивостью NO<sub>2</sub> в слое загрязнения (Груздев, Елохов, 2009; Gruzdev, Elokho, 2010).

На рис. 1в приведена разность между спутниковыми и наземными данными (спутниковые

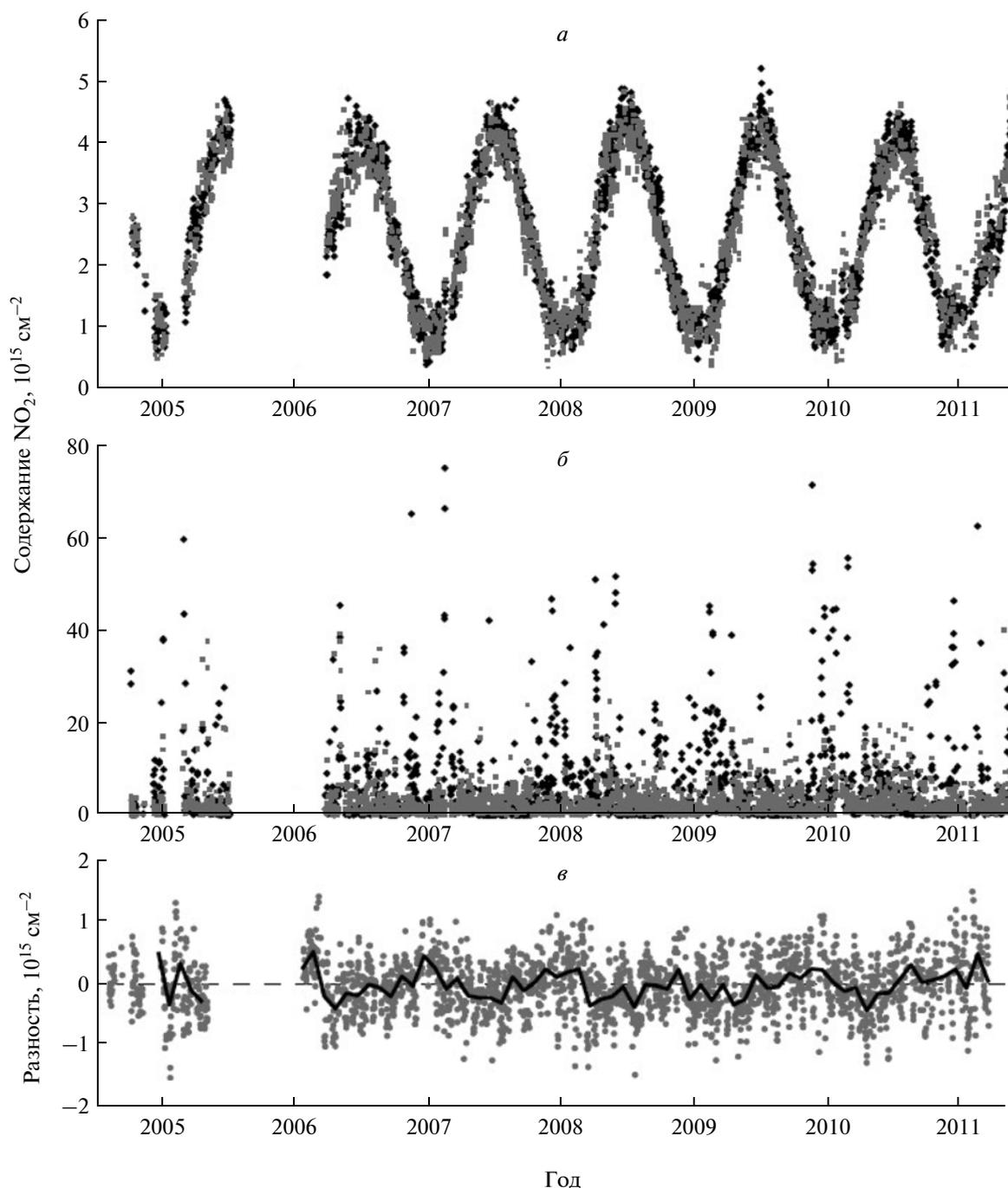
минус наземные) о незагрязненной части ОС NO<sub>2</sub>. Среднеквадратичный разброс разности составляет  $0.44 \times 10^{15}$  см<sup>-2</sup>, или 17% относительно среднегодового значения содержания NO<sub>2</sub>. Средняя за весь срок совместных наблюдений разность отрицательна и равняется  $-(0.045 \pm 0.019) \times 10^{15}$  см<sup>-2</sup>, или  $-(1.7 \pm 0.7)\%$  относительно среднего значения содержания NO<sub>2</sub>. Значения незагрязненной части ОС NO<sub>2</sub> по данным OMI в среднем несколько ниже значений, получаемых из наземных измерений. Однако средняя разность мала и находится в пределах точности наземных и спутниковых измерений. Сопоставление с результатами работ (Груздев, Елохов, 2009; Gruzdev, Elokho, 2010) выявляет последовательное уменьшение среднего и среднеквадратичного значений разности, что, по-видимому, свидетельствует о совершенствовании методики определения содержания NO<sub>2</sub> с помощью прибора OMI.

Корреляционная диаграмма значений незагрязненной части ОС NO<sub>2</sub> на рис. 2а демонстрирует достаточно хорошую корреляцию между результатами наземных и спутниковых измерений. Коэффициент корреляции для полного периода измерений составляет 0.92, а коэффициент линейной регрессии спутниковых данных на наземные данные – 0.88. Разброс точек относительно прямой регрессии примерно одинаков для различных участков диаграммы. Затемненные круговые области на рис. 2а соответствуют экстремумам годового хода NO<sub>2</sub>. Сопоставляя рис. 2а и рис. 1а, отметим, что высокая корреляция значений незагрязненной части ОС NO<sub>2</sub> в определенной степени обусловлена годовым ходом.

Корреляция между значениями тропосферного содержания NO<sub>2</sub> за полный период наблюдений низкая (рис. 2б), как и следовало ожидать, исходя из рис. 1б. Коэффициент корреляции составляет всего 0.2. Сопоставляя новые результаты с результатами предыдущих работ (Груздев, Елохов, 2009; Gruzdev, Elokho, 2010), мы не можем отметить улучшение соответствия между данными измерений тропосферного содержания NO<sub>2</sub> наземным методом и с помощью прибора OMI.

### *Сезонные особенности*

Статистические характеристики сравнения результатов измерений, полученные по всему объему данных, вообще говоря, нельзя распространять на меньшие временные масштабы. Например, кривая среднемесячных значений разности содержаний NO<sub>2</sub> на рис. 1в демонстрирует вполне определенный сезонный ход. Задачи исследования атмосферной изменчивости часто требуют более детального соответствия данных наблюдений реальным данным. Выполним срав-

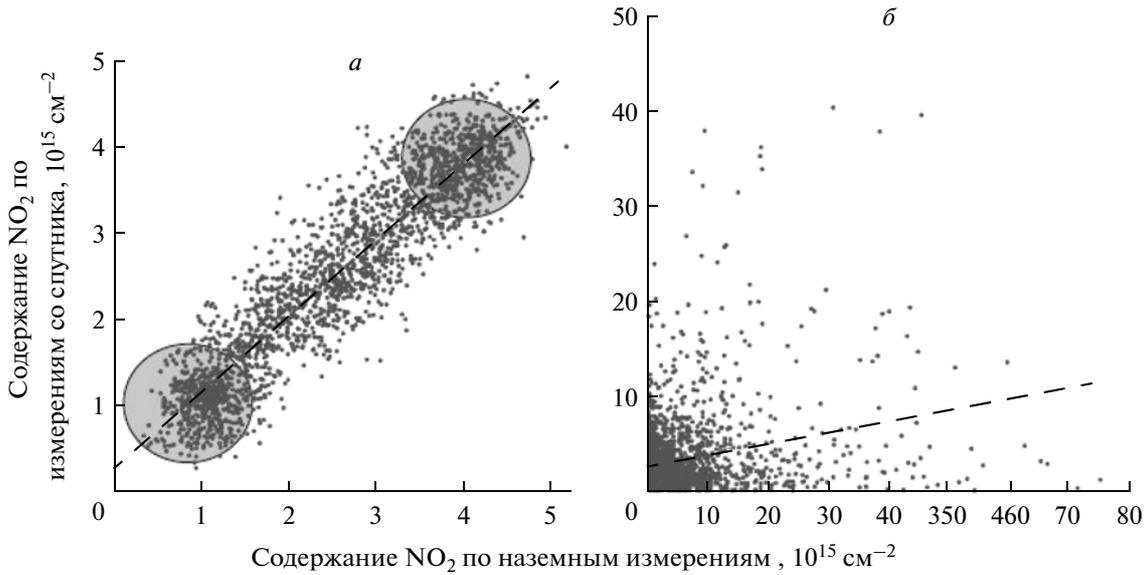


**Рис. 1.** Незагрязненная часть общего содержания NO<sub>2</sub> (*a*) и содержание NO<sub>2</sub> в вертикальном столбе тропосферы (*б*) над станцией Звенигород по результатам измерений с помощью прибора OMI (серые квадраты) и по данным наземных измерений, интерполированным ко времени наблюдений со спутника (черные ромбы), а также разность суточных (серые кружки) и среднемесячных (черная кривая) значений (спутниковые минус наземные) незагрязненной части общего содержания NO<sub>2</sub> (*в*).

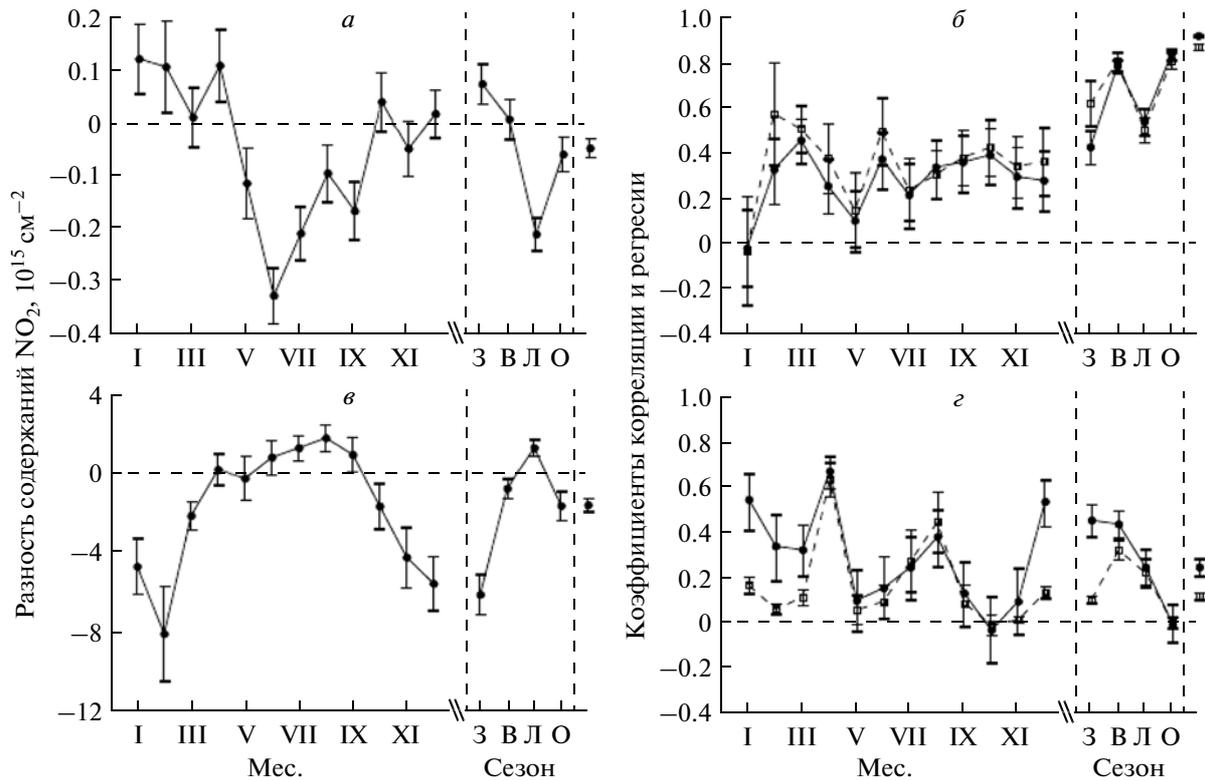
нение данных спутниковых и наземных измерений с учетом сезона.

Рисунки *3a* и *в* показывают сезонную зависимость разностей значений содержания NO<sub>2</sub>, полученных в измерениях на приборе OMI и в наземных измерениях. На рисунках приведены многолетние

среднемесячные и среднесезонные значения разностей, а в их правых частях показаны и средние за полный период наблюдений разности, соответствующие описанным выше результатам. Среднемесячные и среднесезонные разности, как правило, значительно отличаются от последних.



**Рис. 2.** Корреляционные диаграммы незагрязненной части общего содержания NO<sub>2</sub> (а) и содержания NO<sub>2</sub> в вертикальном столбе тропосферы (б) над станцией Звенигород по результатам наземных и спутниковых измерений. Прямые соответствуют линейной регрессии. Круговые области на рисунке а показывают области зимних и летних значений содержания NO<sub>2</sub>.



**Рис. 3.** Разность (спутниковые минус наземные) (а) и коэффициенты корреляции (сплошные кривые) и линейной регрессии (штриховые кривые) (б) между значениями незагрязненной части общего содержания NO<sub>2</sub> по результатам наземных и спутниковых измерений в зависимости от месяца (левее левой вертикальной пунктирной линии), сезона (между пунктирными линиями) и в целом за год (правее правой пунктирной линии). Вертикальные отрезки соответствуют 95%-ным доверительным интервалам. Окончания доверительных отрезков для коэффициентов корреляции утолщены; (в–г) – аналогично (а–б), но для содержания NO<sub>2</sub> в вертикальном столбе тропосферы. Коэффициенты регрессии соответствуют регрессии данных ОМІ на данные наземных измерений.

Значения незагрязненной части ОС  $\text{NO}_2$  по спутниковым данным летом меньше значений, получаемых из наземных наблюдений (на величину до  $3.4 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , или 7.5%, в июне), и больше их зимой (примерно на  $0.1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , или 10%) (рис. 3а). С октября по декабрь разность статистически неотличима от нуля. Наибольшие внутрисезонные изменения разности приходятся на весну и осень, когда максимальны изменения стратосферного содержания  $\text{NO}_2$  в годовом ходе (ср. с рис. 1а). Средняя по весеннему сезону разность близка к нулю, однако среднемесячные значения могут отличаться от нуля.

Соответствие по величине между данными наземных и спутниковых измерений содержания  $\text{NO}_2$  в тропосферном столбе наилучшее весной и летом, когда разность содержаний  $\text{NO}_2$  относительно невелика, и наиболее плохое зимой (рис. 3в). В целом сезонный ход разности тропосферных значений и ход разности стратосферных значений содержания  $\text{NO}_2$  противоположны друг другу. Вероятно, это указывает на чувствительность данных ОМІ о незагрязненной части ОС  $\text{NO}_2$  к загрязнению нижней тропосферы окислами азота (см. также (Груздев, Елохов, 2009; Gruzdev, Elokho, 2010)).

Рисунок 3б показывает, что месячные коэффициенты корреляции и регрессии для значений незагрязненной части ОС  $\text{NO}_2$  значительно меньше, чем коэффициенты, рассчитанные за полный период. В январе корреляция отсутствует совсем. Удивительно, но месячные коэффициенты корреляции для тропосферного содержания  $\text{NO}_2$  достигают значений 0.6–0.7 (рис. 3г), превышающих максимальное значение коэффициента корреляции для незагрязненной части ОС  $\text{NO}_2$ . Корреляция между спутниковыми и наземными данными о содержании  $\text{NO}_2$  в тропосферной толще в целом наиболее сильная в зимне-весенний период. Зимой межсуточные вариации тропосферного содержания  $\text{NO}_2$ , определяемого в спутниковых и наземных измерениях, коррелируют между собой относительно хорошо, несмотря на максимальную в этот сезон разность значений содержания  $\text{NO}_2$  (ср. рис. 3г и в).

Месячные коэффициенты регрессии значений содержания  $\text{NO}_2$ , измеряемых со спутника, на значения содержания  $\text{NO}_2$ , получаемые в наземных измерениях, как правило, значительно меньше единицы (рис. 3б и г), а свободные члены в уравнении линейной регрессии всегда положительные. В случае тропосферного содержания  $\text{NO}_2$  это, в частности, связано с меньшим диапазоном значений тропосферного содержания  $\text{NO}_2$ , измеряемого со спутника, что может быть обусловлено сглаживанием локальных неоднородностей содержания  $\text{NO}_2$  в зоне загрязнения погра-

ничного слоя атмосферы. Аналогично вариации незагрязненной части ОС  $\text{NO}_2$ , определяемой из спутниковых измерений, сглажены осреднением по большей площади (см. предыдущий раздел), и это приводит, по-видимому, к уменьшению амплитуды вариаций по сравнению с локальными вариациями по результатам наземных измерений.

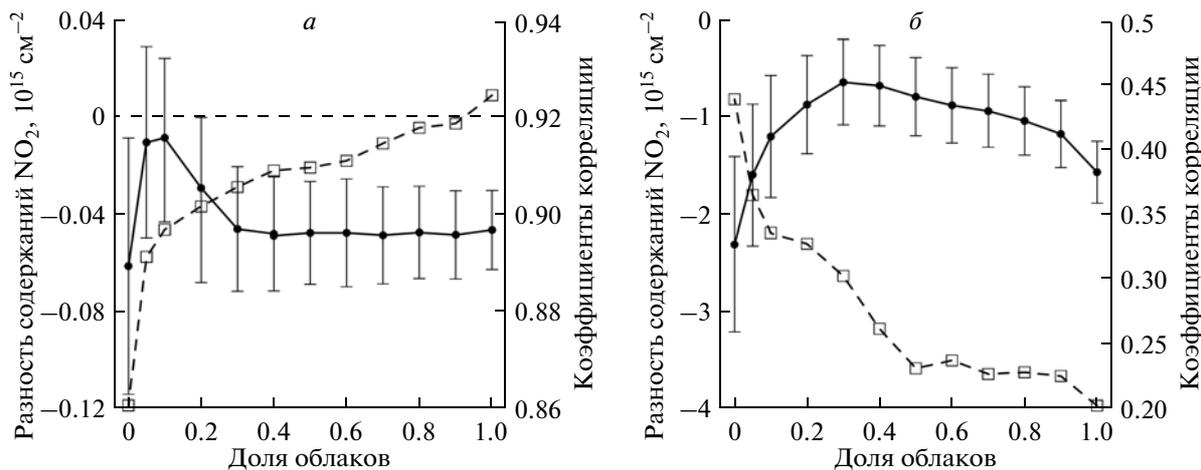
Невысокие по сравнению с годовыми месячные значения коэффициента корреляции подтверждают сделанное выше предположение о том, что высокая степень статистической связи между измеряемыми со спутника и с земли ежедневными значениями незагрязненной части ОС  $\text{NO}_2$  в значительной мере обусловлена годовым ходом стратосферного  $\text{NO}_2$ .

### *Эффект облачности*

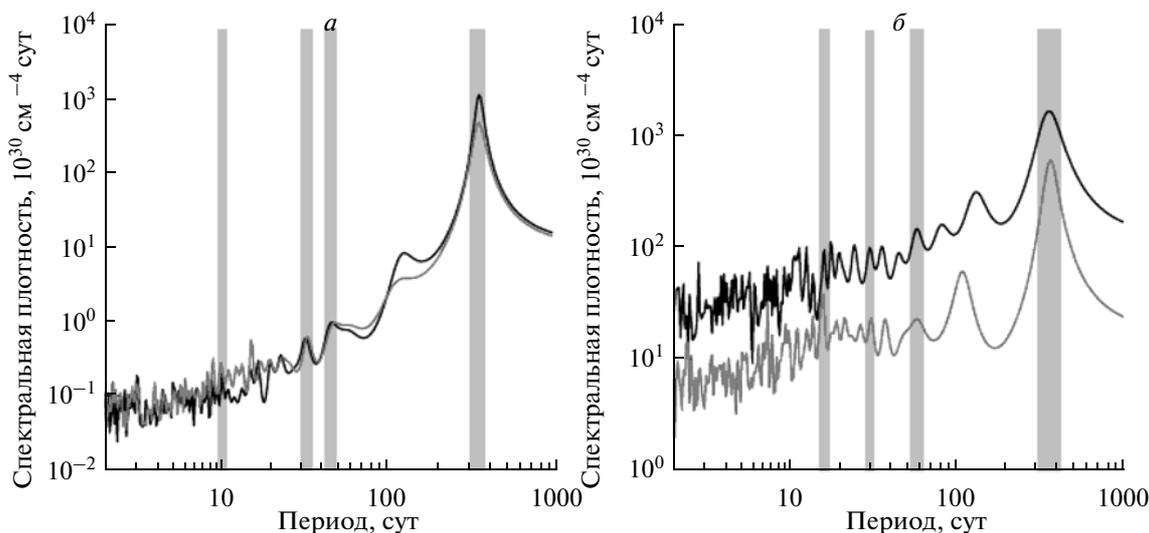
Мы уже рассматривали зависимость результатов сопоставления от облачности в предыдущих работах (Груздев, Елохов, 2009; Gruzdev, Elokho, 2010). Однако с обновленными данными ОМІ, использованными в настоящей работе, получены новые особенности этой зависимости.

На рис. 4 приведены значения средней разности и коэффициента корреляции между данным ОМІ и результатами наземных измерений, в зависимости от максимальной доли облачности (доля облачности определялась со спутника и соответствовала времени его пролета). Для этого анализа использовались только данные, полученные при значениях доли облаков, равных или меньших заданной максимальной доле. Средняя разность между значениями незагрязненной части ОС  $\text{NO}_2$  невелика и находится в пределах ошибок измерения при любой доле облаков (рис. 4а). При этом коэффициент корреляции увеличивается с увеличением максимальной доли облаков, причем наиболее быстро при малых значениях доли облаков. Этот результат можно объяснить экранирующим действием облачности при измерениях со спутника: наличие облачности уменьшает влияние  $\text{NO}_2$ , содержащегося в подоблачном слое, на результаты определения незагрязненной части ОС  $\text{NO}_2$ . Отметим, что облачность практически не оказывает влияния на результаты зенитных измерений содержания  $\text{NO}_2$  в стратосфере с поверхности земли (Елохов, Груздев, 2000; Груздев, Елохов, 2009).

Противоположный характер зависимости коэффициента корреляции от доли облаков получен для тропосферного содержания  $\text{NO}_2$  (рис. 4б). Он объясняется той же причиной. В отсутствие облачности нет и ее экранирующего влияния на регистрируемое со спутника рассеянное атмосферой излучение, и корреляционная связь между результатами спутниковых и наземных измерений в этих условиях наилучшая. Отметим, что



**Рис. 4.** Средняя разность и коэффициент корреляции между значениями незагрязненной части общего содержания NO<sub>2</sub> (а) и значениями содержания NO<sub>2</sub> в вертикальном столбе тропосферы (б) по данным наземных и спутниковых измерений в зависимости от максимальной доли облачности. Вертикальные отрезки соответствуют 95%-ным доверительным интервалам.



**Рис. 5.** Спектры мощности флуктуаций значений незагрязненной части общего содержания NO<sub>2</sub> (а) и содержания NO<sub>2</sub> в вертикальном столбе тропосферы (б) по данным наземных (черные кривые) и спутниковых (серые кривые) измерений. Вертикальные серые полосы на рисунке а указывают спектральные пики, соответствующие десятисуточным, квазимесячным, полуторамесячным и годовым, а на рисунке б – двухнедельным, месячным, двухмесячным и годовым вариациям.

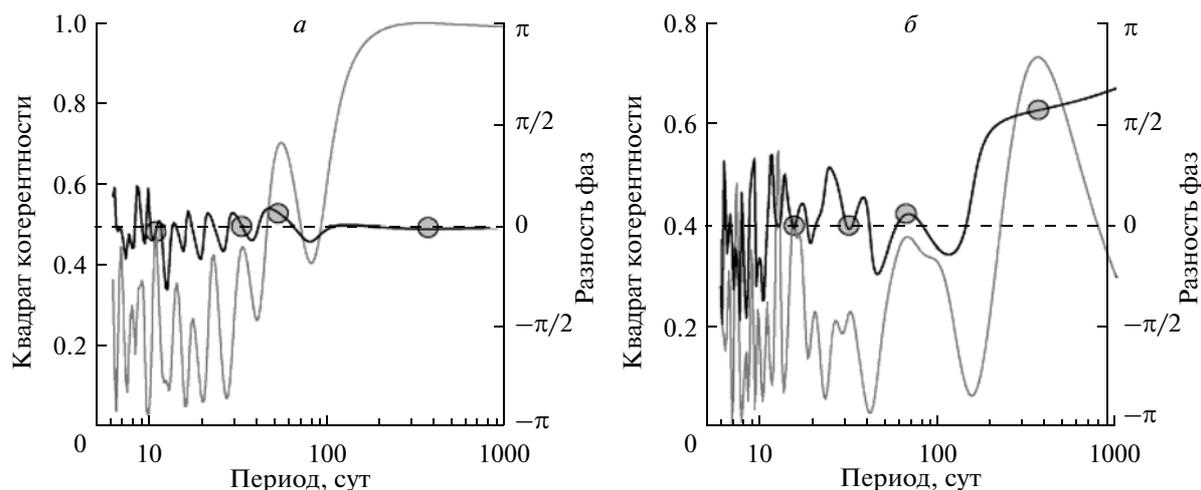
средняя разность содержаний NO<sub>2</sub> на рис. 4б при малых значениях доли облаков близка к нулю, с учетом 45%-ной поправки на наземные данные (см. предыдущий раздел) и с учетом доверительных интервалов. Однако мы не можем учесть такого рода поправку в облачных условиях из-за отсутствия ее оценок.

*Спектральный и кросс-спектральный анализ*

Если причины, приводящие к ухудшению корреляции между данными наземных и спутнико-

вых измерений, имеют случайный характер, то статистическая связь между данными все-таки может проявляться в регулярных и квазирегулярных вариациях. С целью их выявления применим технику спектрального и кросс-спектрального анализа высокого разрешения с использованием метода максимальной энтропии (Кей, Марпл, 1981; Jones, 1978).

На рис. 5 приведены спектры мощности флуктуаций незагрязненной части ОС NO<sub>2</sub> и содержания NO<sub>2</sub> в вертикальном столбе тропосферы по



**Рис. 6.** Спектры когерентности (серые кривые) и спектры разности фаз (черные кривые) между данными спутниковых и наземных измерений “незагрязненной” части общего содержания  $\text{NO}_2$  (а) и содержания  $\text{NO}_2$  в вертикальном столбе тропосферы (б). Серые кружки на фазовых спектрах соответствуют максимумам спектра когерентности в спектральных полосах, выделенных на рис. 5.

данным наземных и спутниковых измерений. Для расчета спектров использованы среднесуточные данные.

В спектрах незагрязненной части ОС  $\text{NO}_2$  кроме сильного годового максимума отметим слабые спектральные максимумы с периодами около 10, 30 и 45 сут, присутствующие в обоих спектрах (рис. 5а). Их небольшие амплитуды обусловлены, в частности, тем, что, согласно спектрально-временному анализу (Gruzdev, Elokhov, 2011; Груздев, 2011), вариации внутрисезонных масштабов проявляются в течение не всего анализируемого периода, а только в ограниченных временных интервалах.

В спектре когерентности между среднесуточными значениями незагрязненной части ОС  $\text{NO}_2$ , полученными из спутниковых и наземных измерений, отмечены максимумы в окрестностях этих четырех периодов (рис. 6а), а сдвиг фазы на этих периодах близок к нулю. Следовательно, между спутниковыми и наземными данными имеется соответствие не только в годовом ходе, но и в вариациях с периодами в окрестности 10, 30 и 45 сут.

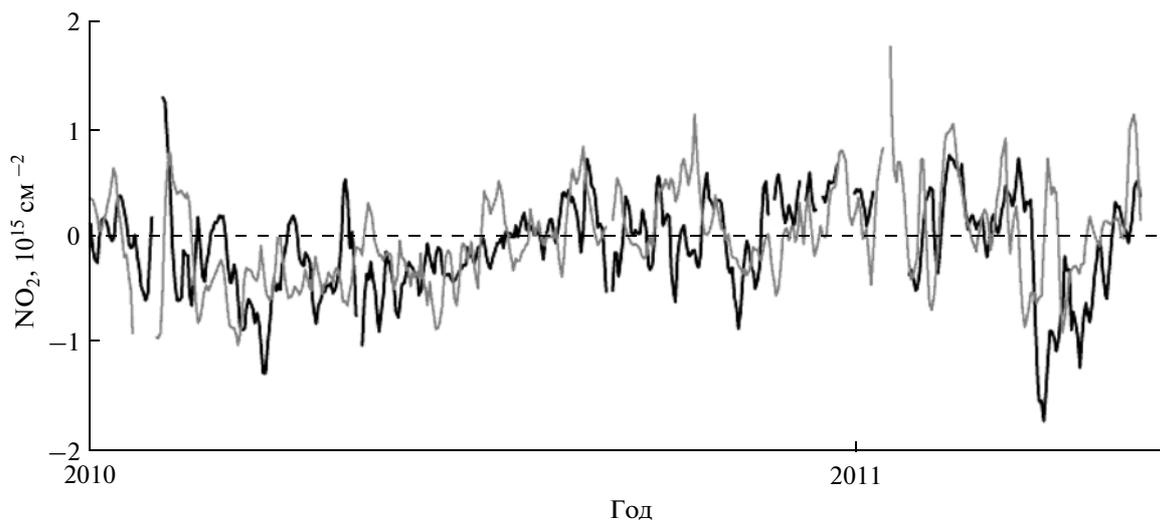
Тропосферные спектры содержат общие максимумы с годовым периодом и с периодами в окрестности двух недель, месяца и двух месяцев, выделенные на рис. 5б вертикальными полосами. Фазовый спектр на рис. 6б показывает наличие синхронности между вариациями в спутниковых и наземных данных на двухнедельном, месячном и двухмесячном масштабах. Однако годовое поведение тропосферного  $\text{NO}_2$  по спутниковым данным запаздывает примерно на четверть периода относительно годового хода в данных наземных измерений. Приблизительная ортогональность годовых вариаций в значительной степени обуславливает

плохую корреляцию тропосферных значений содержания  $\text{NO}_2$  по всему периоду наблюдений (рис. 3з).

#### Отдельные события

Наземная сеть измерений содержания  $\text{NO}_2$  включает лишь несколько десятков станций (<http://www.ndacc.org/>). Поэтому важно знать, можно ли информацию, получаемую со спутника, использовать для изучения отдельных событий, например, для анализа аномалий.

По измерениям на ЗНС мы обнаружили сильную отрицательную аномалию ОС  $\text{NO}_2$  в конце марта—начале апреля 2011 г., вызванную переносом стратосферного воздуха из области озонной “дыры”, наблюдавшейся в тот сезон над Арктикой (Груздев, Елохов, 2012). Аномалия сопровождалась значительным похолоданием стратосферы и уменьшением общего содержания озона. На рис. 7 приведены отклонения незагрязненной части ОС  $\text{NO}_2$  в течение 2010–2011 гг. от многолетнего среднего годового хода по вечерним данным наземных измерений и по среднесуточным данным ОМТ. Годовой ход удален с помощью предложенного в (Груздев, 2011) метода. Сначала рассчитывались многолетние среднемесячные значения и по ним путем разложения в ряд Фурье определялись амплитуды и фазы гармоник — спектральных компонент годового хода. Годовой ход для произвольного времени года определялся как суперпозиция Фурье-компонент для этого момента времени. Из данных об  $\text{NO}_2$  был также удален линейный тренд, рассчитанный по методу (Груздев, 2008). Мы привели результаты вечерних



**Рис. 7.** Отклонение “незагрязненной” части общего содержания NO<sub>2</sub> в течение 2010–2011 гг. от многолетнего среднего годового хода по вечерним данным наземных измерений (черная кривая) и по среднесуточным данным измерений с помощью прибора OMI (серая кривая).

наблюдений на ЗНС по причине меньшего количества разрывов в этих данных.

На рис. 7 наибольший интерес представляют выявленные по наземным данным значительные отрицательные аномалии NO<sub>2</sub> в конце марта 2010 г. и в конце марта 2011 г. Обе они вызваны переносом из арктической области, но дополнительный вклад в рекордную аномалию 2011 г. внесла денитрификация нижней стратосферы Арктики (Груздев, Елохов, 2012). Из рис. 7 следует, что соответствие между отклонениями содержания NO<sub>2</sub> в целом плохое. Отмеченные выше аномалии не выявлены в данных OMI. Отрицательная аномалия в данных OMI в марте 2011 г., предшествующая аномалии в наземных данных, ничем не выделяется на фоне других отрицательных аномалий. Более того, стратосферный перенос в этот период в точку с координатами ЗНС происходил в зональном направлении.

Аномалии приземного и, в целом, тропосферного содержания NO<sub>2</sub> природного происхождения могут вызываться крупномасштабными пожарами. В период лесных и торфяных пожаров в Подмоскowie в июле–сентябре 2002 г. (т.е. еще до запуска спутника EOS-Aura) на ЗНС было несколько эпизодов с высокими значениями содержания NO<sub>2</sub> в пограничном слое атмосферы, сопровождавшихся аномалиями приземной концентрации субмикронного аэрозоля (Груздев и др., 2003). Не менее сильные, но преимущественно торфяные, пожары, охватившие значительную часть Центральной России, включая Московскую обл., были в июле–августе 2010 г. Однако повышение содержания NO<sub>2</sub> в пограничном слое атмосферы на ЗНС при заносе задымленного возду-

ха в 2010 г. не зарегистрировано (Исаков и др., 2011). Это подтверждается и анализом химического состава приземного микронного аэрозоля, в пробах которого в 2010 г., в отличие от 2002 г. (Груздев и др., 2003), отсутствовали химические компоненты, связанные с атмосферной NO<sub>2</sub>.

Рис. 1б показывает, что тропосферное содержание NO<sub>2</sub> на ЗНС в июле–августе 2010 г. по наземным измерениям было типичным для этого времени года, когда в годовом ходе тропосферного содержания NO<sub>2</sub> наблюдается годовой минимум. Однако по данным OMI этому периоду соответствует продолжительный максимум тропосферного содержания NO<sub>2</sub>.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение результатов наземных измерений содержания NO<sub>2</sub> на Звенигородской научной станции и результатов измерений с помощью прибора OMI при пролетах спутника над станцией выявило, что среднестатистическое расхождение значений незагрязненной (главным образом стратосферной) части общего содержания NO<sub>2</sub> за весь срок совместных наблюдений невелико и не выходит за пределы ошибок измерений. Однако значения содержания NO<sub>2</sub> по спутниковым данным летом меньше значений, получаемых из наземных наблюдений и больше их зимой.

Достаточно высокая корреляция (0.92) между значениями незагрязненной части ОС NO<sub>2</sub>, определяемыми из наземных и спутниковых измерений, за полный период в значительной степени обусловлена годовым ходом NO<sub>2</sub>. Корреляция су-

щественно ухудшается при сравнении данных по месяцам. В январе корреляция отсутствует совсем.

В целом отмечено значительное расхождение между значениями содержания  $\text{NO}_2$  в вертикальном столбе тропосферы по данным ОМІ и данным наземных измерений. Соответствие по величине между данными наземных и спутниковых измерений наилучшее весной и летом и наиболее плохое зимой. В целом годовой ход разности тропосферных значений и годовой ход разности стратосферных значений содержания  $\text{NO}_2$  противоположны друг другу.

Месячные значения коэффициентов корреляции для тропосферного содержания  $\text{NO}_2$  достигают значений 0.6–0.7, превышающих максимальное значение коэффициента корреляции для незагрязненной части ОС  $\text{NO}_2$ . Корреляция между спутниковыми и наземными данными о содержании  $\text{NO}_2$  в тропосферной толще наиболее сильная в зимне-весенний период.

Коэффициент корреляции между наземными и спутниковыми данными о незагрязненной части ОС  $\text{NO}_2$  увеличивается, а коэффициент корреляции между данными о тропосферном содержании  $\text{NO}_2$  уменьшается с увеличением доли облаков.

Отмечено соответствие между отдельными квазирегулярными вариациями внутрисезонного масштаба, выявленными в данных ОМІ и в наземных данных. Однако годовой ход тропосферного содержания  $\text{NO}_2$  в спутниковых данных не соответствует по фазе годовому ходу по результатам наземных измерений.

Сильная отрицательная аномалия незагрязненной части ОС  $\text{NO}_2$  в конце марта–начале апреля 2011 г., вызванная затоком стратосферного воздуха из области арктической озонной дыры, отчетливо проявившаяся в результатах наземных измерений на Звенигородской станции, не проявилась в данных ОМІ.

В целом данные измерений содержания  $\text{NO}_2$  с помощью прибора ОМІ должны использоваться с осторожностью при изучении временной изменчивости  $\text{NO}_2$ .

Авторы благодарят коллектив международной научной группы по измерениям с помощью прибора ОМІ (OMI International Science Team) за подготовку данных о содержании  $\text{NO}_2$  для станции Звенигород. Данные измерений с помощью прибора ОМІ получены из Центра валидации данных спутника Aura (AVDC). Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ и программ Президиума РАН и Отделения наук о Земле РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Груздев А.Н.* Широтная зависимость вариаций стратосферного содержания  $\text{NO}_2$  // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 3. С. 345–359.
- Груздев А.Н.* О недельной цикличности в атмосфере // Докл. РАН. 2011. Т. 439. № 3. С. 407–412.
- Груздев А.Н., Елохов А.С.* Валидация результатов измерений содержания  $\text{NO}_2$  в вертикальном столбе атмосферы с помощью прибора ОМІ с борта спутника EOS-Aura по данным наземных измерений на Звенигородской научной станции // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 4. С. 477–488.
- Груздев А.Н., Елохов А.С.* Отрицательная аномалия стратосферного содержания  $\text{NO}_2$  над Звенигородом в конце марта–начале апреля 2011 г. // Докл. РАН. 2012. Т. 446. № 5.
- Груздев А.Н., Исаков А.А., Шукурова Л.М., Елохов А.С., Шукуров К.А.* Совместные исследования субмикронного аэрозоля и двуокси азота в приземном слое атмосферы в период лесных и торфяных пожаров в Подмосковье в июле–сентябре 2002 г. // Докл. РАН. 2003. Т. 391. № 4. С. 540–544.
- Елохов А.С., Груздев А.Н.* Измерения общего содержания и вертикального распределения  $\text{NO}_2$  на Звенигородской научной станции // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36. № 6. С. 831–846.
- Исаков А.А., Аникин П.П., Елохов А.С., Курбатов Г.А.* О характеристиках дымов лесных и торфяных пожаров в Центральной России летом 2010 г. // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 6. С. 478–482.
- Кей С.М., Марпл С.Л.* Современные методы спектрального анализа: обзор // ТИИЭР. 1981. Т. 69. № 11. С. 5–51.
- Boersma K.F., Busceta E.J., Brinksma E.J., Gleason J.F.* OMI algorithm theoretical basis document. Volume IV: OMI trace gas algorithms // ATBD-OMI-02. NASA Goddard Space Flight Center / Ed. K. Chance. Greenbelt, Md., 2002. P. 15–36.
- Boersma K.F., Jakob D.J., Eskes H.J., Pinder R.W., Wang J., van der A R.J.* Intercomparison of SCIAMACHY and OMI tropospheric  $\text{NO}_2$  columns: Observing the diurnal evolution of chemistry and emissions from space // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. № D16S26. doi: 10.1029/2007JD008816.
- Brinksma E.J., Pinardi G., Volten H., Braak R., Richter A., Schönhardt A., van Roozendaal M., Fayt C., Hermans C., Dirksen R.J., Vlemmix T., Berkhout A.J.C., Swart D.P.J., Oetjen H., Wittrock F., Wagner T., Ibrahim O.W., de Leeuw G., Moerman M., Curier R.L., Celarier E.A. Cede A., Knap W.H., Veefkind J.P., Eskes H.J., Allaart M., Rothe R., Pijters A.J.M., Levelt P.F.* The 2005 and 2006 DANDELIONS  $\text{NO}_2$  and aerosol intercomparison campaigns // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. № D16S46. doi: 10.1029/2007JD008808.
- Busceta E.J., Perring A.E., Cohen R.C., Boersma K.F., Celarier E.A., Gleason J.F., Wenig M.O., Bertram T.H., Wooldridge P.J., Dirksen R., Veefkind J.P.* Comparison of tropospheric  $\text{NO}_2$  from in situ aircraft measurements with near-real-time and standard product data from OMI // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. № D16S31ю doi: 10.1029/2007JD008838.
- Celarier E.A., Brinksma E.J., Gleason J.F., Veefkind J.P., Cede A., Herman J.R., Ionov, D., Goutail F., Pommereau J.P., Lambert J.C., van Roozendaal M., Pinardi G., Wittrock F., Schönhardt A., Richter A., Ibrahim O.W., Wagner T., Bojkov B.,*

- Mount G., Spinei E., Chen C.M., Pongetti T.J., Sander S.P., Bucselo E.J., Wenig M.O., Swart D.P.J., Volten H., Kroon M., Levelt P.F. Validation of Ozone Monitoring Instrument nitrogen dioxide columns // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. № D15S15. doi:10.1029/2007JD008908.
- Gruzdev A.N., Elokhov A.S. Validation of Ozone Monitoring Instrument NO<sub>2</sub> measurements using ground based NO<sub>2</sub> measurements at Zvenigorod, Russia // *Int. J. Rem. Sens.* 2001. V. 31. № 2. P. 497–511.
- Gruzdev A.N., Elokhov A.S. Variability of stratospheric and tropospheric nitrogen dioxide observed by the visible spectrophotometer at Zvenigorod, Russia // *Int. J. Rem. Sens.* 2011. V. 32. № 11. P. 3115–3127.
- Ionov D.V., Timofeyev Y.M., Sinyakov V.P., Semenov V.K., Goutail F., Pommereau J.-P., Bucselo E.J., Celarier E.A., Kroon M. Ground-based validation of EOS-Aura OMI NO<sub>2</sub> vertical column data in the midlatitude mountain ranges of Tien Shan (Kyrgyzstan) and Alps (France) // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. № D15S08. doi:10.1029/2007JD008659.
- Irie H., Kanaya Y., Akimoto H., Tanimoto H., Wang Z., Gleason J.F., Bucselo E.J. Validation of OMI tropospheric NO<sub>2</sub> column data using MAX-DOAS measurements deep inside the North China Plain in June 2006: Mount Tai Experiment 2006 // *Atmos. Chem. Phys.* 2008. V. 8. P. 6577–6586.
- Jones R.H. Multivariate autoregression estimation using residuals // *Applied Time Series Analysis* / Ed. Findley D.F. N.Y.: Acad. Press, 1978. P. 139–162.
- Kramer L.J., Leigh R.J., Remedios J.J., Monks P.S. Comparison of OMI and ground-based in situ and MAX-DOAS measurements of tropospheric nitrogen dioxide in an urban area // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. № D16S39. doi:10.1029/2007JD009168.
- Vandaele A.C., Hermans C., Simon M., Carleer M., Colin R., Fally S., Mérienne M.-F., Jenouvrier A., Coquart B. Measurements of the NO<sub>2</sub> absorption cross section from 42,000 cm<sup>-1</sup> to 10,000 cm<sup>-1</sup> (238–1000 nm) at 220 and 294 K // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 1998. V. 59. № 3–5. P. 171–184.
- Wenig M.O., Cede A.M., Bucselo E.J., Celarier E.A., Boersma K.F., Veeffkind J.P., Brinksma E.J., Gleason J.F., Herman J.R. Validation of OMI tropospheric NO<sub>2</sub> column densities using direct-Sun mode Brewer measurements at NASA Goddard Space Flight Center // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. № D16S45. doi:10.1029/2007JD008988.

## New Results of Validation of OMI NO<sub>2</sub> Measurements Using Data of Measurements at Zvenigorod Scientific Station

A. N. Gruzdev, A. S. Elokhov

*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics Russian Academy of Sciences, Moscow*

Comparison of results of ground-based NO<sub>2</sub> measurements at Zvenigorod Scientific Station and results of overpass OMI measurements onboard the EOS-Aura satellite shows that the mean difference between the unpolluted (mainly stratospheric) NO<sub>2</sub> columns for the whole period of correlative measurements is within measurement errors. The NO<sub>2</sub> contents derived from satellite measurements are less than those derived from ground-based observations in summer but larger in winter. High correlation between ground-based and satellite data are significantly due to the annual cycle in NO<sub>2</sub>. The correlation falls if data are compared on monthly basis. On the whole, a significant discrepancy is noted between tropospheric NO<sub>2</sub> columns derived from OMI and ground-based measurements. The correlation between satellite and ground-based data is weak for an entire year but increases in winter and spring. The correlation coefficient between ground-based and satellite data of unpolluted NO<sub>2</sub> columns increases while the correlation coefficients between tropospheric NO<sub>2</sub> columns decreases with increase in a cloud fraction. There is a correspondence between some quasi-regular variations of intra-seasonal scale revealed in OMI and ground-based data. However the annual variation in tropospheric NO<sub>2</sub> deduced from satellite data does not correspond by phase to the annual variation deduced from ground-based measurements. The NO<sub>2</sub> anomaly in the end of March through the beginning of April 2011 caused by inflow of stratospheric air from the area of the Arctic ozone hole and seen distinctively in results of ground-based measurements at Zvenigorod station has not been revealed in OMI data.

**Keywords:** validation, NO<sub>2</sub>, OMI measurements, remote sensing

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

### АНОМАЛЬНО СИЛЬНЫЕ БОРЫ В ЧЕРНОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2013 г. А. Ю. Иванов<sup>1\*</sup>, А. Ю. Антониук<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии  
им. П.П. Ширшова Российской академии наук, Москва

<sup>2</sup>Инженерно-технологический центр “СКАНЭКС”, Москва

\* E-mail: ivanoff@ocean.ru

Поступила в редакцию 10.05.2012 г.

С использованием данных дистанционного зондирования анализируются два случая аномальной боры (ветер до 40–45 м/с), которые охватили прибрежную зону российского сектора Черного моря в январе и феврале 2012 г. и привели к катастрофическим последствиям. Показано, что воздействие боры на характеристики ветрового волнения, верхнего слоя моря и облачности приводит к формированию характерных сигнатур, которые отображаются на радиолокационных (РЛ) изображениях и снимках из космоса видимого диапазона. За развитием боры, особенно аномальной, можно следить из космоса в оперативном режиме, используя мультиспутниковые и мультиспектральные съемки. Совместное использование данных космической радиолокации и оптической съемки для мониторинга и исследования боры позволяет существенно расширить знания об этом опасном явлении.

**Ключевые слова:** аномальная бора, г. Новороссийск, Черное море, радиолокационные изображения, оптические снимки

DOI: 10.7868/S0205961413010028

#### ВВЕДЕНИЕ

Синоптические ситуации, складывающиеся над Черным морем в зимнее время, часто приводят к резкому ухудшению погоды на большей части Краснодарского края и на российском Черноморском побережье. Быстрое продвижение средиземноморских циклонов на восток может привести к резкому усилению ветра в черноморском регионе до ураганных значений и резкому понижению температуры. Очень часто в таких синоптических условиях развивается знаменитый норд-ост, или новороссийская бора — сильный холодный северо-восточный (СВ) ветер, дующий с гор на море (Бурман, 1969). На побережье, особенно в р-не Новороссийска, локальное резкое усиление ветра происходит за счет местного рельефа (Бурман, 1969).

В начале 2012 г. наиболее экстремальные погодные условия сложились в Новороссийске и окрестностях 25–29 января и 6–9 февраля во время аномально сильных бор. Ветер над акваторией Черного моря в р-не Новороссийска разогнался до ураганных значений — 30–40 м/с, с порывами до 45 м/с; температура воздуха упала до  $-19^{\circ}\text{C}$  (рис. 2). На море наблюдались волны высотой 3–6 м. В прибрежной зоне моря холодный штормо-

вой ветер срывал брызги с гребней волн, что привело к обледенению судов, портовых сооружений и набережных (рис. 1). Последний раз такая экстремальная бора случилась в 1997 г.

Региональное управление МЧС разослало экстренные предупреждения; в СВ части Черного моря несколько раз объявлялось штормовое предупреждение. В связи с экстремальными погодными условиями в Новороссийске и других прибрежных городах региона возникли чрезвычайные ситуации: были повреждены кровли зданий, линии электропередач, повалены деревья и рекламные конструкции, обледенели суда в порту и на его акватории. Из-за обрыва линий электропередач без света временно оказались 250 тыс. жителей. В целях безопасности все работы в порту были остановлены, закрыт участок федеральной трассы “Дон”, отменено автобусное сообщение. Жертвами боры в Новороссийске стали два человека.

Оперативный космический мониторинг, организованный Инженерно-технологическим центром (ИТЦ) “СКАНЭКС”, позволил увидеть развитие ситуации в СВ части Черного моря из космоса.



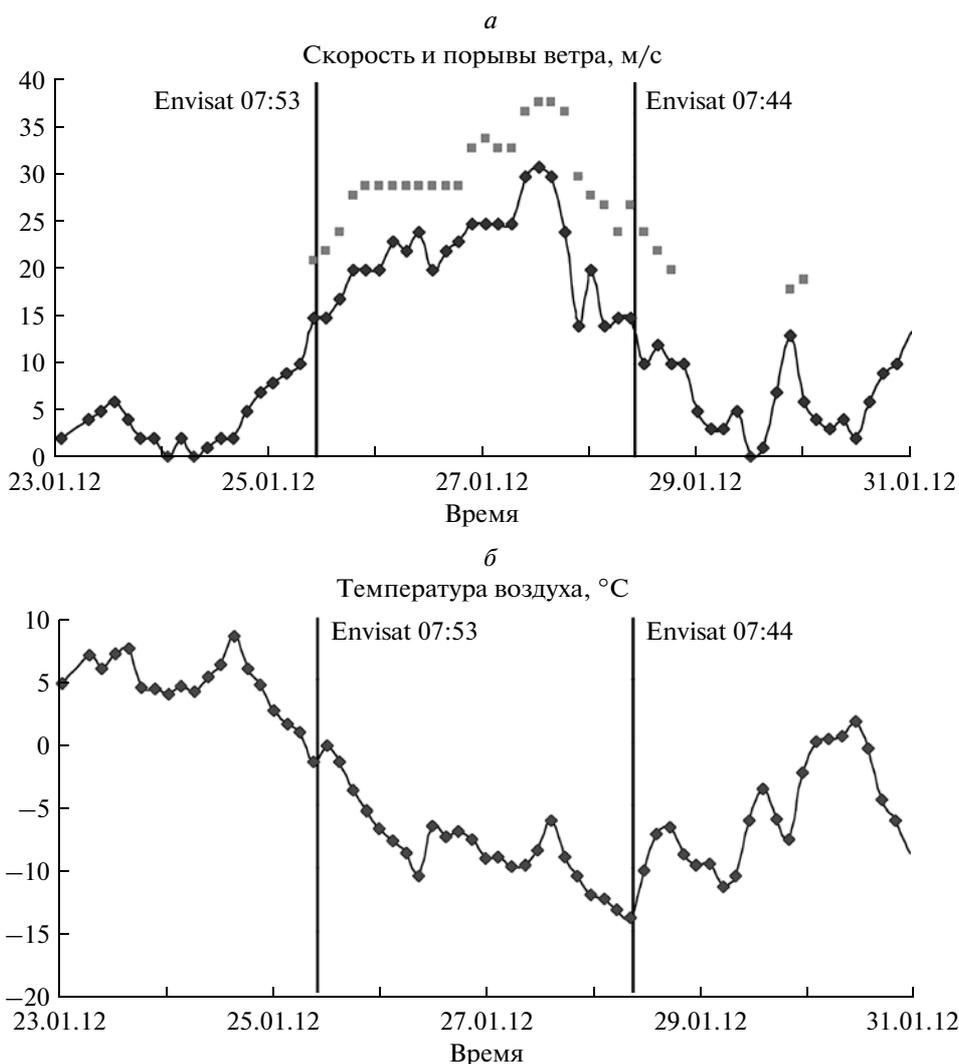
**Рис. 1.** После боры: обледеневшее судно у одного из причалов г. Геленджик (фото Н. Скалацкого).

В настоящей статье проведен анализ данных со спутников Envisat, Radarsat-1, Radarsat-2, EOS (Terra и Aqua), полученных во время этих аномальных событий. Методологические основы анализа и интерпретации радиолокационных изображений (РЛИ) и снимков из космоса, отображающих проявления местных ветров (боры, фёна), изложены в работах (Иванов, 2008, 2010, 2012; Alpers et al., 2008, 2009, 2010a, 2010b, 2011).

### ДАННЫЕ И ИХ АНАЛИЗ

Данные дистанционного зондирования (ДЗ) на СВ Черного моря были получены из Европейского космического агентства (ESA) и ИТЦ «СКАНЭКС». Основные сведения о съемках, проведенных во время боры, приведены в таблице.

РЛИ спутника Envisat использовались в виде стандартных продуктов ASA\_WSM (Wide Swath Mode) с размером кадра  $400 \times 400$  км, с пространственным разрешением 150 м и вертикальной поляризацией сигнала. РЛИ спутников Radarsat-1 и Radarsat-2 – в виде стандартных продуктов SCN (ScanSAR Narrow) с размером кадра  $300 \times 300$  км, с пространственным разрешением 50 м и горизонтальной поляризацией. Для оценки гидрометеорологических условий до, во время и после съемок была собрана доступная метеорологическая информация (данные метеостанций в гг. Новороссийск, Анапа, Геленджик и Туапсе). Эти метеоданные (рис. 2, 6), а также карты приземного анализа (с сайта [www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de)), стали основным подспутниковым материалом, позволяющим провести анализ РЛИ. Как видно из рис. 2 и 6, ветер во время съемок изменялся значительно – от 3 до 35 м/с; это позволило увидеть поверхностные



**Рис. 2.** Ход метеорологических параметров в Новороссийске во время январской боры: *а* – скорость ветра и его порывы; *б* – температура воздуха. Вертикальными линиями показано время (UTC) съемок Envisat.

проявления различных типов на снимках из космоса.

Помимо РЛИ использовались квазисинхронные съемки оптических датчиков MERIS и MODIS (таблица), установленных на ИСЗ Envisat, Terra и Aqua, на которых отобразились главным образом облачные поля.

Обработка РЛИ проводилась по стандартной схеме (Иванов, 2008, 2012). Для анализа РЛИ и исследования отпечатков сильного ветра на поверхности моря использовалась методика, применявшаяся в ряде публикаций (Иванов, 2008, 2012; Alpers et al., 2009, 2010б). Основной метод исследования – анализ сигнатур, видимых на снимках и РЛИ, с учетом подспутниковых метеорологических измерений, а также результатов моделирования (модель GFS NOAA  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$

NOMADS), представленных на сайте МГИ НАНУ <http://dvs.net.ua>.

Воспользовавшись описанными выше подходами, проведем анализ спутниковых снимков, которые были получены в конце января и начале февраля 2012 г.

#### *Бора 25–29 января 2012 г.*

В конце января в условиях противостояния мощного антициклона, расположенного на северной частью ЕТР (1058 гПа), и средиземноморского циклона (1003 гПа), который вышел на Черное море и затем перемещался на восток, развивалась экстремально сильная новороссийская бора. Кроме того, это привело к резкому ухудшению погоды на большей части Южного и Северо-Кавказского федеральных округов и над Азов-

Основные сведения о съемках, проведенных во время боры в январе и феврале 2012 г.

Спутник / Сенсор	Дата, время (UTC)	Дата, время (UTC)
Envisat/ASAR	25.01.2012, 07:53	
	28.01.2012, 07:44	
Envisat/MERIS	25.01.2012, 07:55	08.02.2012, 07:43
	28.01.2012, 07:44	
Radarsat-1/PCA		06.02.2012, 03:43
		09.02.2012, 15:15
Radarsat-2/PCA		07.02.2012, 15:25
Terra/MODIS		07.02.2012, 08:30
		08.02.2012, 09:10
Aqua/MODIS		07.02.2012, 10:10
		08.02.2012, 10:55

ским морем, в частности, к резкому усилению ветра до ураганных значений и понижению температуры до отрицательных величин.

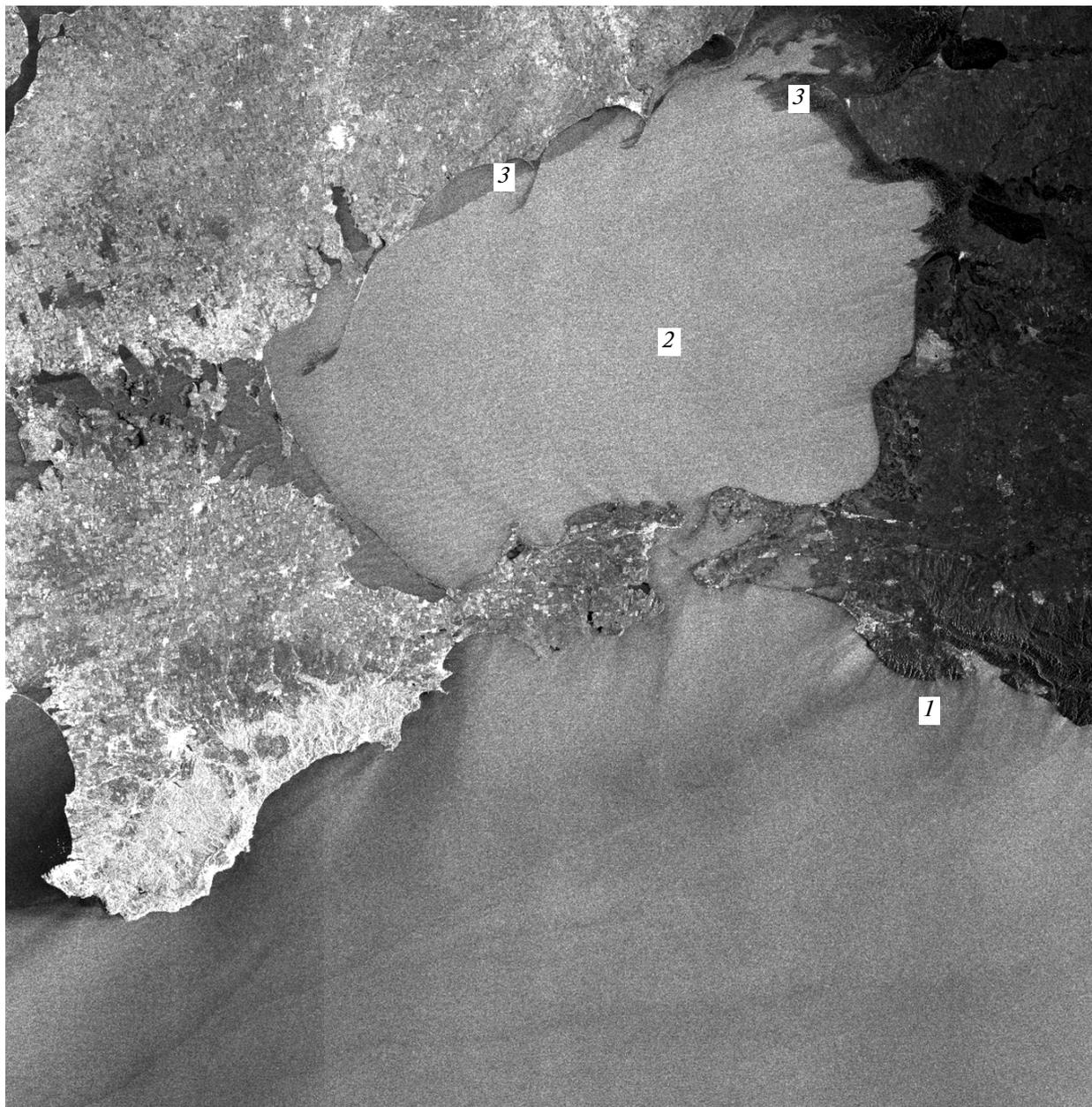
По данным ГМЦ РФ, ветер на акватории Черного моря в р-не Новороссийска разогнался до ураганных значений – 25–30 м/с, 26–27 января – с порывами до 35–45 м/с; температура воздуха упала до –15°C (рис. 2). Во время боры наблюдалось резкое падение атмосферного давления (до 1012 гПа) с последующим его ростом. Сильный СВ ветер вызвал волнение с высотой волн до 3–5 м. В прибрежной зоне моря холодный штормовой ветер срывал брызги с гребней волн, что привело к обледенению судов, набережной и портовых сооружений.

Анализ полученной спутниковой информации показал следующее. На РЛИ Envisat от 25.01.2012 (рис. 3) зафиксировано начало боры; на нем виден ряд коротких искривленных полос-струй (1) в р-не Новороссийск–Анапа длиной 15–25 км. Во время съемки ветер был 15 м/с, порывы до 20 м/с.

Здесь заметим, что сильный холодный восточный ветер в виде достаточно однородного поля (2) наблюдался также и над Азовским морем (рис. 3). Низкие температуры воздуха привели к началу быстрого замерзания моря; лед первоначальных

форм (3) у восточного и северного берегов моря, а также в Таганрогском заливе, был обнаружен уже 25.01.2012. Все море покрылось льдом в период между 25 и 28 января.

На РЛИ от 28.01.2012 (рис. 4) бора отобразилась в стадии, близкой к завершению; во время съемки ветер был около 15 м/с, порывы 20–25 м/с. Тем не менее, на этом РЛИ в поле поверхностного волнения хорошо видны орографически-модулированные, продольные струи сильного ветра и поперечные полосы – волнообразные проявления, в общем случае визуализирующие порывистость ветра. Причиной порывистости ветра могут являться вихри с горизонтальной осью, атмосферные гравитационные волны и т.п. явления, возникающие ниже по потоку при взаимодействии ветра с неоднородностями прибрежной топографии (Alpers, 2008). Измерение расстояний между поперечными полосами и знание скорости ветра на момент съемки позволяет определить порывистость ветра (Иванов, 2008; Signell et al., 2010); в данном случае она составляет 3.5–7 мин. Это РЛИ также иллюстрирует то, что сильный порывистый ветер, характерный для боры и создающий характерные проявления на поверхности моря, отмечаются на участке побережья от Анапы до Туапсе вплоть до п. Лазаревское. В целом бора охватила обширную

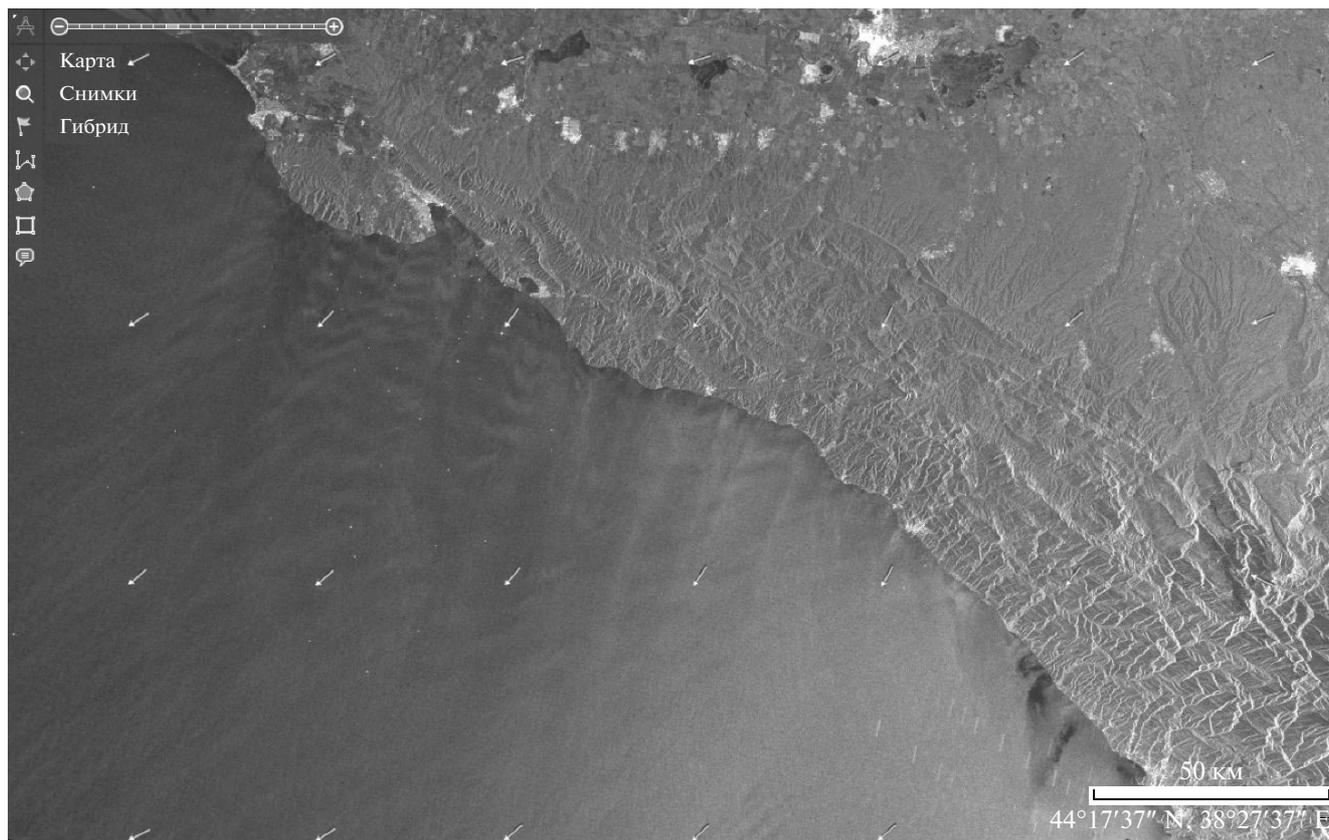


**Рис. 3.** Начало боры в г. Новороссийске на РЛИ Envisat от 25.01.2012, 07:53 UTC: 1 – начальные струи боры, 2 – ветровые полосы, 3 – начальные формы льда в Азовском море. © ESA.

акваторию СВ части Черного моря; в открытом море ветер достигал скоростей в 10–15 м/с.

На снимках спектрометра MERIS хорошо видно, что бора приводит к формированию характерных сигнатур и в поле облачности на снимках видимого диапазона. На начальной стадии развития боры наблюдается размытие облачности из-за нисходящих потоков воздуха (рис. 5а). В то время, как на заключительной стадии в районе моря, охваченном борой, воздушные потоки часто визуализируются полосами облаков кучевообраз-

ных форм, образуются так называемые “облачные дорожки” (рис. 5б). Пространственно-упорядоченные гряды облаков, как правило, формируются в нижнем слое атмосферы в массах холодного воздуха, движущегося над теплой поверхностью моря, при двухмерной конвекции. Это происходит в сравнительно тонких неустойчиво стратифицированных слоях, и поэтому сам факт их существования свидетельствует о неустойчивой стратификации нижнего слоя атмосферы (Радиолокация ..., 1982).



**Рис. 4.** Орографически-модулированные, продольные струи сильного ветра и поперечные полосы – волнообразные проявления, определяющие порывистость ветра, в поле поверхностного волнения во время боры на РЛИ Envisat от 28.01.2012, 07:44 UTC. Стрелками показано прогнозное поле ветра на 07:00 UTC. © ESA, ИТЦ “СКАНЭКС”.

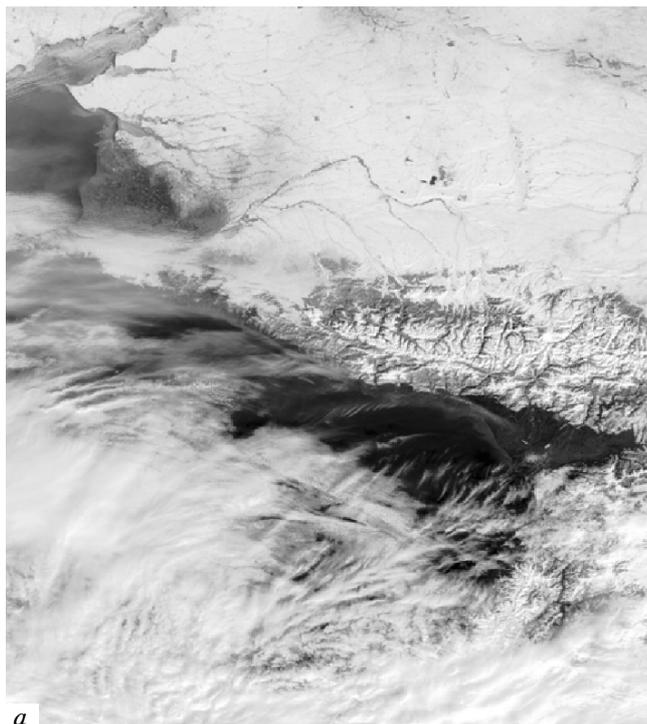
#### *Бора 6–9 февраля 2012 г.*

Во второй половине дня 6 февраля в Новороссийске вновь началась бора, причем аномально сильная. Ее причиной стало усиление антициклона (с очень холодным континентальным воздухом), расположенного над севером европейской территории России и Западной Сибирью (1054 гПа), и активизация циклонической деятельности над Средиземным морем. Над Средиземноморьем образовался глубокий циклон (984 гПа), что привело к большим контрастам температуры и давления в узкой градиентной зоне, протянувшейся в широтном направлении вдоль северного побережья Черного моря. Кроме того, возникновению аномальной боры способствовало сильное выхолаживание воздуха над Краснодарской равниной, Нижним Поволжьем и замерзшим Азовским морем.

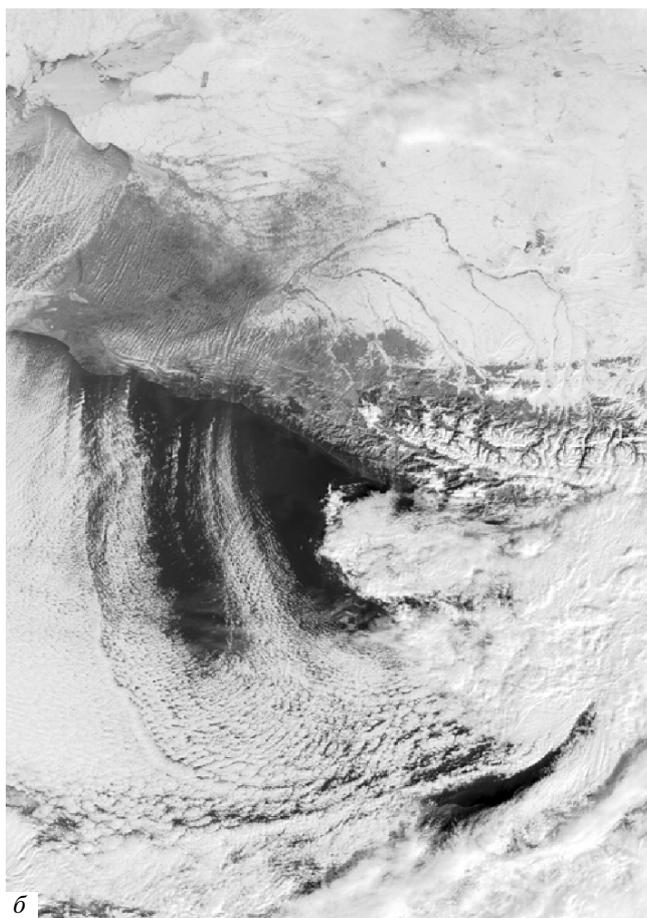
Из-за аномально сильной боры большая часть Черноморского побережья Краснодарского края повторно подверглась удару стихии; наибольший ущерб штормовой ветер причинил Новороссийску и Геленджикю, а также их пригородам. В регионе вновь действовало штормовое предупреждение.

Пик непогоды пришелся на 7–8 февраля, температура воздуха в ночное время в г. Анапе и Новороссийске упала до  $-19^{\circ}\text{C}$ . Перед борой давление упало с 1031 до 1016 гПа, а затем стало расти. К утру 7 февраля ветер достиг ураганной силы 30–35 м/с, с порывами до 40–45 м/с; на Маркхотском перевале скорость ветра достигала 50 м/с. 8–9 февраля бора еще продолжалась, однако начала стихать; скорость ветра уменьшилась до 15–20 м/с. Анализ метеоданных (рис. 6) показал, что аномальные погодные условия сложились исключительно в Новороссийске и его окрестностях; ветер в Анапе и Геленджике не достиг таких аномальных значений, хотя его порывы в Анапе были 20–25 м/с, Геленджике – 30–40 м/с, Туапсе – 20–25 м/с. Бора наблюдалась на участке черноморского побережья от г. Анапы до п. Головинка.

В данном случае основными материалами для анализа стали РЛИ Radarsat-1 и Radarsat-2, а также оптические снимки спектрорадиометров MODIS Terra и Aqua и MERIS Envisat. Анализ полученных РЛИ еще раз подтвердил, что воздействие боры на поверхность моря приводит к формированию характерных поверхностных сигнатур, которые



а



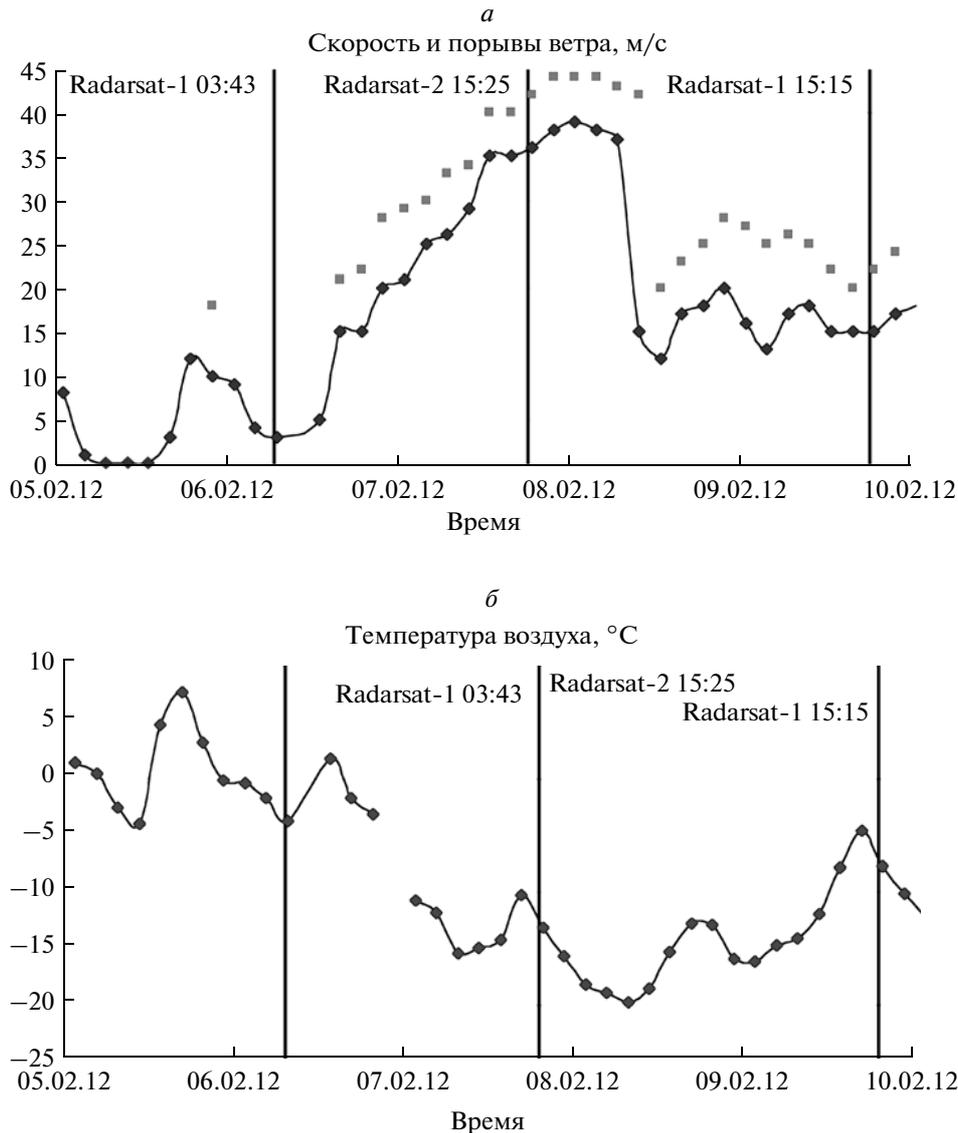
б

отображаются на РЛИ в виде длинных полос (рис. 7, 8), ортогональных берегу (Иванов, 2008). Так, на РЛИ Radarsat-1 от 06.02.2012 (рис. 7) фактически зарегистрировано начало боры – на нем отобразились: (1) – атмосферный фронт, разделяющий теплые и холодные воздушные массы; (2) – волнистый “квази-фронт боры”, расположенный квазипараллельно берегу на концах ветровых “конусов выноса” (3), исходящих из понижений прибрежного рельефа. Заметим, что структуры (3) аналогичны структурам, появляющимся на РЛИ из-за гравитационного стока холодного воздуха (горно-долинные ветры) в ночное время (Alpers et al., 1998)). На РЛИ Radarsat-2 от 07.02.2012 (скорость ветра у берега составляла 35 м/с, порывы до 40–45 м/с) видно, что полосы достигают длины в 350–370 км, причем наиболее длинные образуются на участке побережья Новороссийск–Геленджик; их ширина – 6–15 км (рис. 8). Ветер над открытым морем, охваченным борой, достигал 20–25 м/с, ослабевая до 15–20 м/с по мере движения к центральной части бассейна. Более того, контрастная граница на этом РЛИ, разделяющая светлую и темную области в районе пп. Лазаревское–Головинка, иллюстрирует орографический фактор: горы Главного Кавказского хребта, достигая после г. Туапсе высот 1000 м и более, препятствуют развитию боры. В таких ситуациях над юго-восточной частью Черного моря часто образуются орографические циклоны (Alpers et al., 2010б).

Следует заметить об одном интересном эффекте, отобразившемся на РЛИ от 07.02.2012 (рис. 8). На нем хорошо видны две серии полос: одни из них, уже упоминавшиеся, – аномально длинные (характерные для боры) и, как уже говорилось, практически ортогональные берегу, а другие – значительно более короткие (120–150 км), расположены под углом 35°–40° к первым. На первый взгляд представляется, что мы имеем дело с двумя системами поверхностных проявлений, обусловленных аномально сильной борой, однако для более обоснованных заключений необходим детальный анализ всей совокупности имеющихся данных, и, в частности, данных аэрологии.

На РЛИ Radarsat-1 от 09.02.2012 (рис. 9) также отобразились орографически-модулированные, относительно широкие ветровые полосы-струи (1) длиной 40–80 км (на море в районе действия боры ветер 7–10 м/с). Однако с запада они блокируются северным ветром, дующим с суши (проявления (2), характерные для облачных дорожек); причем, на этом РЛИ можно увидеть зону взаи-

Рис. 5. Этапы развития боры на оптических снимках MERIS Envisat: а – 25.01.2012, 07:55 UTC; б – 28.01.2012, 07:44 UTC. © ESA.



**Рис. 6.** Ход метеорологических параметров в Новороссийске во время февральской боры: *а* – скорость ветра и его порывы; *б* – температура воздуха. Вертикальными линиями показано время (UTC) съемок со спутников Radarsat-1 и Radarsat-2.

модействия двух потоков (или зону блокировки боры), а также проявления, связанные с неустойчивостью этого взаимодействия (3). Это означает, что синоптическая ситуация начала меняться коренным образом.

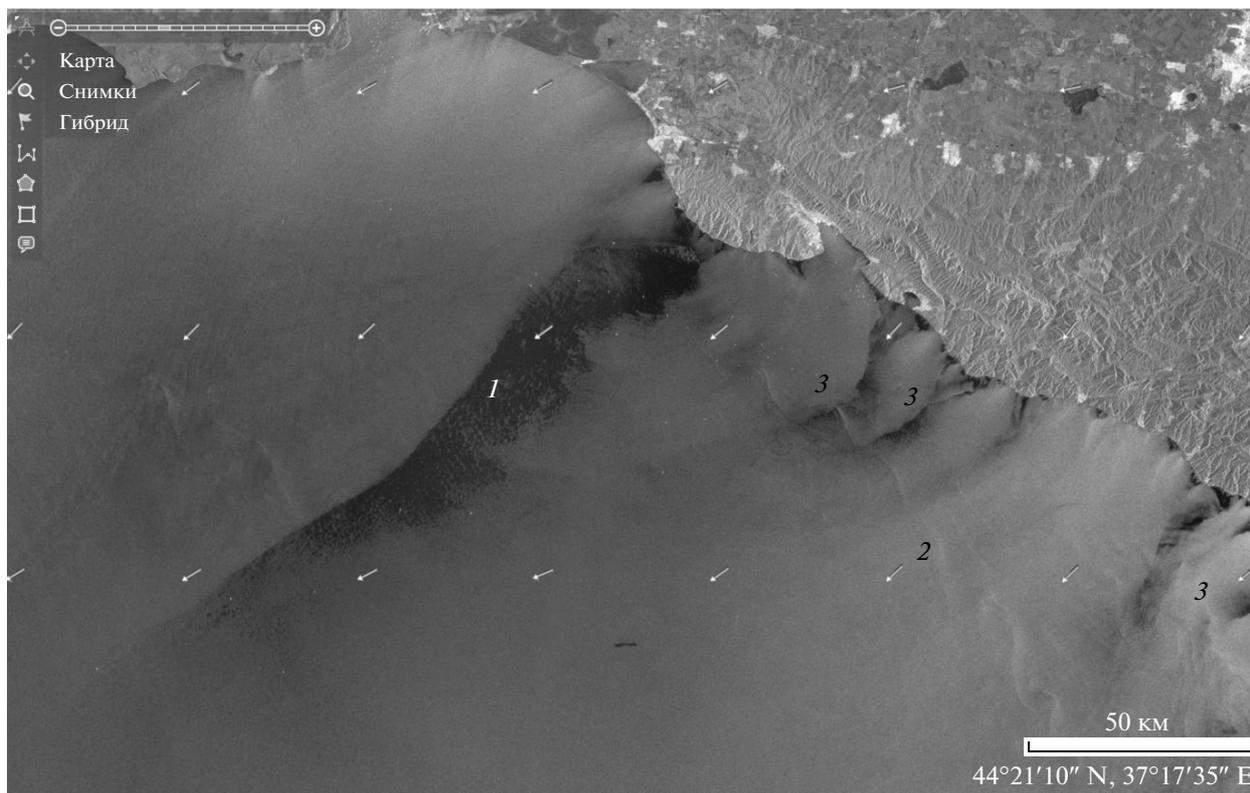
На снимках видимого диапазона (MODIS) бора сначала (07.02.2012) способствовала размытию облачности (рис. 10); однако на них в зоне прояснения отчетливо видны широкие слабоконтрастные полосы, вытянутые по ветру, скорее всего, визуализируемые низкими рваными облаками и парением.

Во второй половине 8 февраля бора в Новороссийске начала стихать, однако сильный СВ ветер (15 м/с, порывы до 20 м/с) продолжал дуть и

9 февраля (рис. 6). По мере ослабления боры вдоль струй холодного воздуха также начали образовываться гряды кучевых облаков (облачные дорожки), их маркирующие, что и отобразилось на оптических снимках MERIS и MODIS (рис. 11). Ориентация облачных полос позволяла судить о направлении ветра над морем.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены и проанализированы космические снимки, на которых зарегистрированы две последовавшие друг за другом аномально сильных боры, случившиеся в конце января и начале февраля 2012 г. Аномалии и проявления, отобразившиеся на снимках из космоса, были



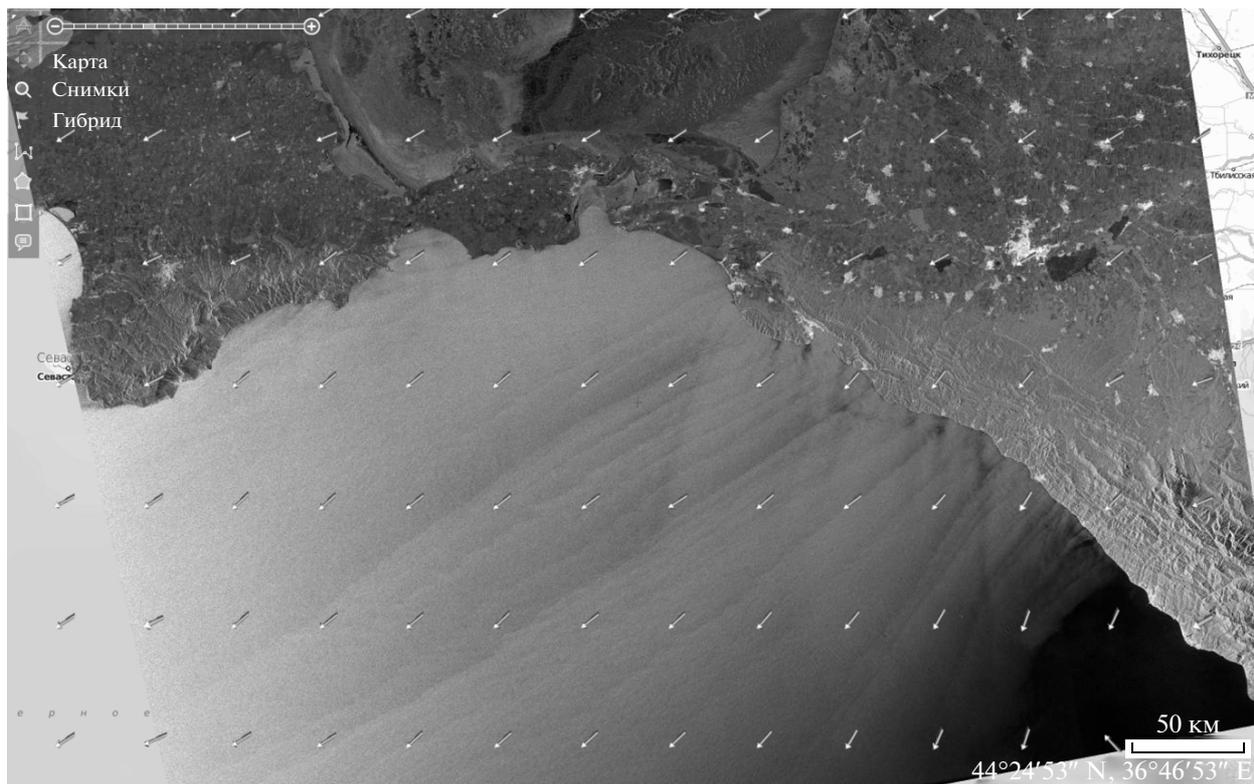
**Рис. 7.** Начало боры в Новороссийске и окрестностях на РЛИ Radarsat-1 от 06.02.2012, 03:43 UTC: 1 – атмосферный (ветровой) фронт; 2 – фронт боры; 3 – ветровые “конусы”. Стрелками показано прогнозное поле ветра на 03:00 UT. © MDA, ИТЦ “СКАНЭКС”.

связаны с нисходящими потоками очень холодного воздуха и сильным северо-восточным ветром, дующим с берега на море. Это подтвердили метеоданные и карты приземного анализа, а также результаты моделирования. На основе разработанного подхода (Иванов, 2008, 2012; Alpers et al., 2009, 2011) был проведен оперативный спутниковый мониторинг этих событий, благодаря которому были получены сведения об их развитии и определен ряд их параметров.

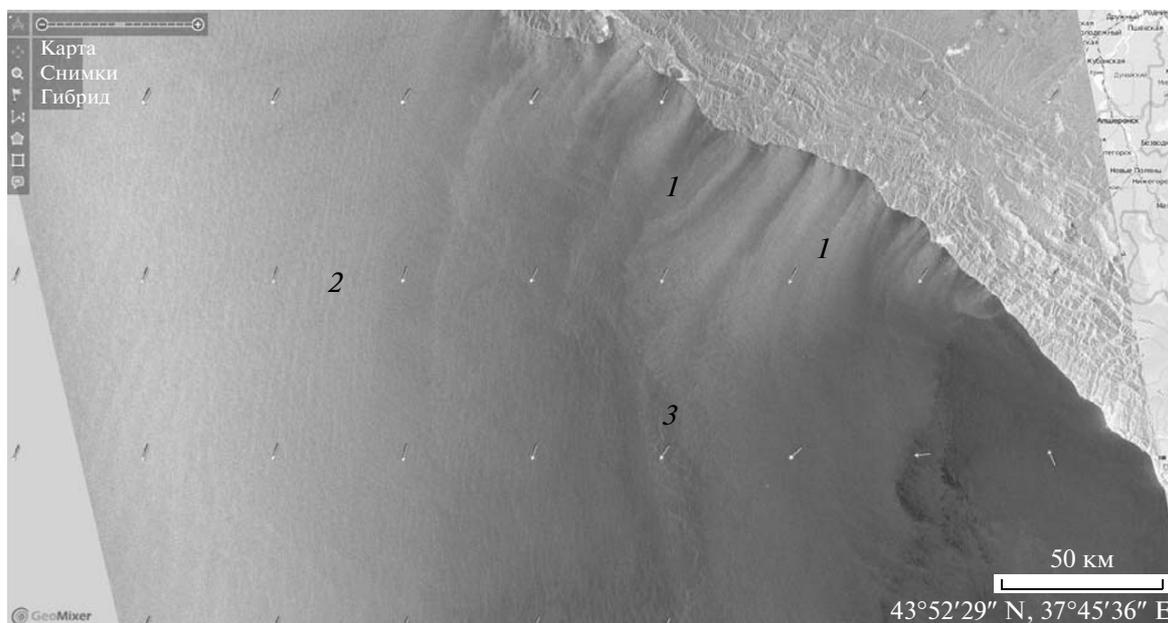
Анализ РЛИ показал, что воздействие сильной боры на поверхность моря приводит к формированию характерных поверхностных сигнатур, которые отображаются на РЛИ в виде сигнатур двух типов: на начальной стадии – в виде “конусов выноса”, характерных для кататических (стоковых) ветров (рис. 7), а на средней и заключительных стадиях – в виде длинных полос, ортогональных берегу (рис. 4, 8, 9). Часто они осложнены поперечными волнообразными полосами (возмущениями), что обусловлено порывистостью ветра (рис. 4).

Спутниковые данные радаров с синтезированной апертурой (РСА) позволили определить ряд количественных характеристик явления и судить о его масштабах. Во-первых, на РЛИ (рис. 4, 8) хо-

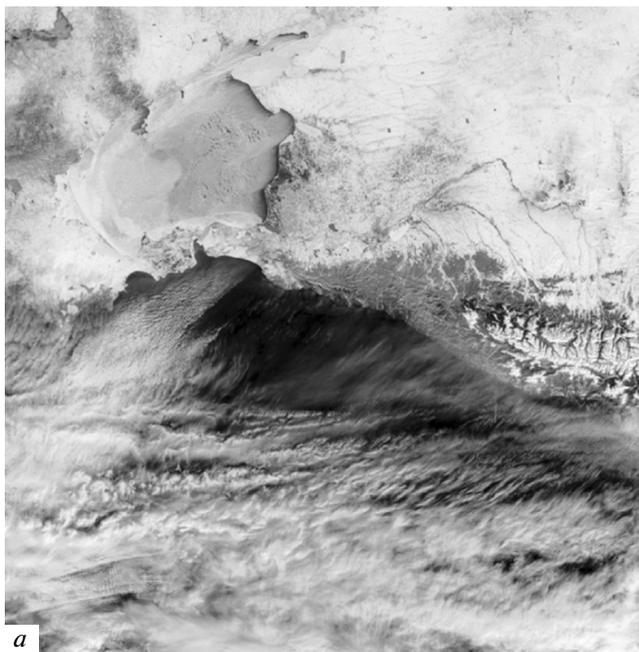
рошо видно, что сильный, порывистый ветер при боре всегда отмечается на участке побережья Анапа–Туапсе (наиболее сильный и порывистый – в Новороссийске и окрестностях). Во-вторых, бора, особенно аномальная, охватывает обширную акваторию СВ части Черного моря. Максимальная длина (протяженность) ветровых струй, отобразившихся на РЛИ, может достигать 350 км и более (рис. 8). Это, в частности, может говорить о том, что холодный воздух во время экстремальных бор, переваливая хребет, приобретает значительную нисходящую составляющую скорости не только из-за гравитационного эффекта, но и, главным образом, вследствие больших горизонтальных барических градиентов и перепадов температур. Их интенсификация происходит в благоприятных синоптических условиях: при прохождении холодных атмосферных фронтов или перетекании очень холодных воздушных масс (Бурман, 1969). Не исключено, что ветер дополнительно ускоряется из-за горизонтального градиента давления, вызванного разностью температур воздуха на одних и тех же высотах над холодной сушей и поверхностью моря. В-третьих, в открытом море ветер при боре может достигать 10–25 м/с. Взаимодействие ветра с прибрежной топографией



**Рис. 8.** Орографически-модулированные, продольные струи сильного ветра (на море 18–24 м/с) в поле поверхностного волнения во время боры на РЛИ Radarsat-2 от 07.02.2012, 15:25 UTC. Стрелками показано прогнозируемое поле ветра на 15:00 UTC. © MDA, ИТЦ “СКАНЭКС”.



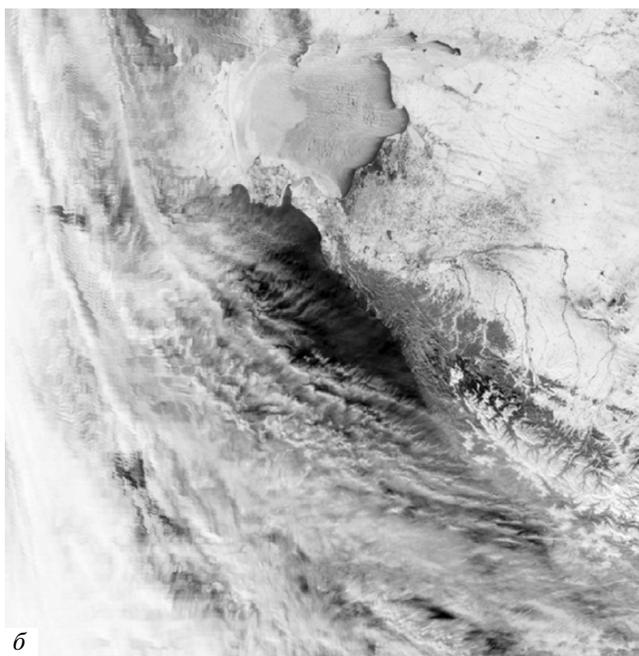
**Рис. 9.** Орографически-модулированные, продольные струи сильного ветра (7–10 м/с) в поле поверхностного волнения на РЛИ Radarsat-1 от 09.02.2012, 15:15 UTC: 1 – полосы-струи боры; 2 – полосы северного ветра; 3 – зона блокировки боры. Стрелками показано прогнозируемое поле ветра на 15:00 UTC. © MDA, ИТЦ “СКАНЭКС”.



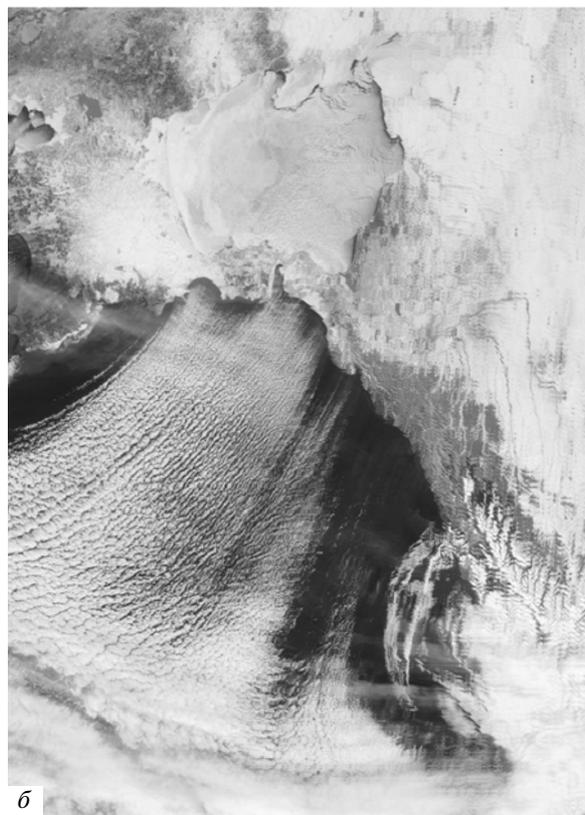
а



а



б



б

**Рис. 10.** Февральская бора в ее самой интенсивной стадии на оптических снимках: *а* – MODIS Terra от 07.02.2012, 08:30 UTC; *б* – MODIS Aqua 07.02.2012, 10:10 UTC. © NASA GSFC.

часто является причиной возникновения порывистости ветра в прибрежной зоне моря; она наиболее интенсивна в районе Новороссийск–Геленджик и мористее (рис. 4).

**Рис. 11.** Февральская бора на завершающей стадии на оптических снимках: *а* – MERIS Envisat от 08.02.2012, 07:43 UTC; *б* – MODIS Aqua от 08.02.2012, 10:55 UTC. © ESA, NASA, ИТЦ “СКАНЭКС”.

Бора значительно видоизменяет локальное поле облачности. Снимки видимого диапазона позволяют увидеть динамику облачного покрова в районе моря, охваченном борой. В широкой полосе моря наблюдается ее отсутствие или малооблачность; на заключительных стадиях над морем образуются облачные полосы (“облачные дорожки”) там, где холодный воздух начинает прогреваться и возникают конвективные процессы (рис. 5б, 11а, 11б). Последнее является признаком ослабления и окончания боры.

Вполне очевидно, что в настоящее время, при наличии доступа к космической информации, за развитием боры, особенно аномальной, можно следить из космоса в оперативном режиме. Современные средства ДЗ позволяют получить информацию не только о синоптической обстановке во время боры, но и ряд ее параметров, что практически невозможно сделать традиционными методами. Анализ оперативных данных ДЗ в итоге позволит улучшить существующие методы прогноза боры и уменьшить возникающие в связи с ней риски. Наконец, данные ДЗ, в первую очередь радиолокационные, существенно расширяют представления об этом опасном явлении.

Данные Envisat (РЛИ и снимки MERIS), использованные в работе, были получены в рамках проектов ESA С1Р.3424 и С1Р.8116; РЛИ Radarsat-1 и Radarsat-2 любезно предоставлены ИТЦ “СКАНЭКС”. Источник метеорологических данных – <http://rp5.ua>.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бурман Э.А. Местные ветры. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 342 с.

Иванов А.Ю. Новороссийская бора: взгляд из космоса // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 2. С. 68–83.

Иванов А.Ю. О восстановлении параметров морской среды по данным космических РСА // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 3. С. 77–92.

Иванов А.Ю. Фён в юго-восточной части Черного моря и его наблюдение из космоса с помощью РСА // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 1. С. 40–53.

Радиолокация поверхности Земли из космоса / Под ред. С.В. Викторова, Л.М. Митника. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 300 с.

Alpers W. Investigation of atmospheric gravity waves and rotors in the marine boundary layer using spaceborne synthetic aperture radar images / Proc. IGARSS-2008. 6–11 July 2008. Boston, MA, USA. 2008. V. 4. P. 57–60.

Alpers W., Ivanov A. Yu., Dagestad K.-F. Observation of local wind fields and cyclonic atmospheric eddies over the Eastern Black Sea using Envisat ASAR images // Proc. ESA Living Planet Symp. 28 June–2 July 2010. Bergen, Norway, 2010a. ESA SP-686.

Alpers W., Ivanov A. Yu., Dagestad K.-F. Observation of local wind fields and cyclonic atmospheric eddies over the Eastern Black Sea using Envisat synthetic aperture radar images // Исслед. Земли из космоса. 2010б. № 5. С. 46–58.

Alpers W., Ivanov A. Yu., Dagestad K.-F. Encounter of foehn wind with an atmospheric eddy over the Black Sea as observed by the synthetic aperture radar onboard the Envisat satellite // Monthly Weather Rev. 2011. V. 139. № 12. P. 3992–4000.

Alpers W., Ivanov A. Yu., Horstmann J. Bora events in the Adriatic Sea and Black Sea studied by multi-sensor satellite imagery / Proc. IGARSS'2007. 23–27 July 2007. Barcelona, Spain, 2008. P. 1307–1313.

Alpers W., Ivanov A., Horstmann J. Observations of bora events over the Adriatic Sea and Black Sea by spaceborne synthetic aperture radar // Monthly Weather Rev. 2009. V. 137. P. 1150–1161.

Alpers W., Pahl U., Gross G. Katabatic wind fields in coastal areas studied by ERS-1 synthetic aperture radar imagery and numerical modeling // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 7875–7887.

Signell R.P., Chiggiato J., Horstmann J. et al. High-resolution mapping of bora winds in the northern Adriatic Sea using synthetic aperture radar // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. doi:10.1029/2009JC005524.

## Anomalously Strong Bora Events over the Black Sea Studied Using Satellite Imagery

A. Yu. Ivanov<sup>1</sup>, A. Yu. Antonyuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup> P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow

<sup>2</sup> Research and Development Center “SCANEX”, Moscow

Two very strong bora events (wind speed up to 40–45 m/s), occurred in the end of January and in the beginning of February, 2012 in Novorossiysk and over the North-Easterly Black Sea, have been studied by using synthetic aperture radar (SAR) and optical images acquired by remote sensing satellites. It is shown that strong winds during the boras influencing the sea surface roughness and cloud cover result in formation of characteristic signatures, which can be imaged by SAR and optical sensors and seen in their imagery. There is a possibility to track evolution and dynamics of a bora event step by step using multisatellite and multisensor imagery. Combined use of SAR and optical images for monitoring and study of bora events yields information and new knowledge on this dangerous atmospheric phenomenon.

**Keywords:** strong bora events, Novorossiysk, Black Sea, SAR and optical images

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

### ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ПОЛЕЙ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР В ГОРНЫХ ДОЛИНАХ АЛТАЯ

© 2013 г. Ю. М. Полищук<sup>1, 2</sup>, Д. С. Шаронов<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Институт химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук, Томск

<sup>2</sup>Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск

\*E-mail: D\_Sharonov@mail.ru

Поступила в редакцию 29.03.2012 г.

Исследована динамика площадей термокарстовых озер на шести тестовых участках многолетней мерзлоты в Горном Алтае с использованием коллекции разновременных космических снимков Landsat 5 (1993–2010 гг.). Показано, что суммарная площадь озер на всех тестовых участках возрастает со временем, и за исследуемый период увеличение площадей составило в среднем 31%.

**Ключевые слова:** Многолетняя мерзлота, термокарстовые озера, космические снимки, глобальное потепление, геоинформационные системы

DOI: 10.7868/S0205961412060061

Современные изменения климата сопровождаются усилением многих природных опасностей, в том числе и геокриологических, связанных с таянием льда. Сопутствующие им геоморфологические изменения земной поверхности оказывают неблагоприятное воздействие на объекты инженерной инфраструктуры. Для снижения рисков аварийности необходимы исследования динамики термокарстовых процессов на различных территориях многолетней мерзлоты.

В работе (Кирпотин и др., 2008) показано, что термокарстовые озера (ТО) являются удобным индикатором деградации многолетнемерзлых пород. Они хорошо дешифрируются на космических снимках, что позволяет использовать данные дистанционного зондирования (ДДЗ) при проведении геокриологических исследований. Использование ДДЗ позволяет проводить исследования на значительных по площади территориях. Кроме того, для прогнозирования возможных изменений состояния вечной мерзлоты в современных условиях требуется собирать и анализировать большие объемы информации, что в настоящее время на труднодоступных территориях многолетней мерзлоты можно выполнить только с использованием методов ДЗ.

В настоящее время проводятся обширные дистанционные исследования динамики ТО на территории вечной мерзлоты северной Евразии (Кравцова, 2009; Smith et al., 2005). Однако динамика озер в горных районах изучена явно недостаточно.

В данной работе излагаются результаты дистанционных исследований ТО на территории, расположенной в южной части республики Алтай вблизи границ Монголии и Казахстана.

На исследуемой территории были выбраны шесть тестовых участков (ТУ) наиболее интенсивного термокарста, расположение которых показано на карте (рис. 1).

В исследованиях использованы разновременные космические снимки с космического аппарата Landsat 5 (пространственное разрешение 30 м), полученные 20.09.1993; 27.06.2000; 08.09.2006 и 15.06.2010. Выбор космических снимков определялся и отсутствием в пределах сцен облачного покрова. Дешифрирование снимков и выделение термокарстовых озер проводилось с помощью ERDAS Imagine 9.1. Общее число озер на шести ТУ составило 274. Площади озер определялись с использованием ArcGis 9.3. Статистическая обработка полученных результатов проводилась в программе Statistica 6.0.

По результатам измерений площадей исследованных озер был построен график временных изменений суммарных (по всем ТУ) площадей озер (рис. 2).

Из графика видно, что временной ход суммарной площади озер может быть аппроксимирован (с высоким коэффициентом детерминации  $R^2 = 0.98$ ) линейным уравнением вида

$$y = ax + b, \quad (1)$$

где  $a$  – коэффициент линейного тренда (га/год);  $b$  – свободный член уравнения (га).

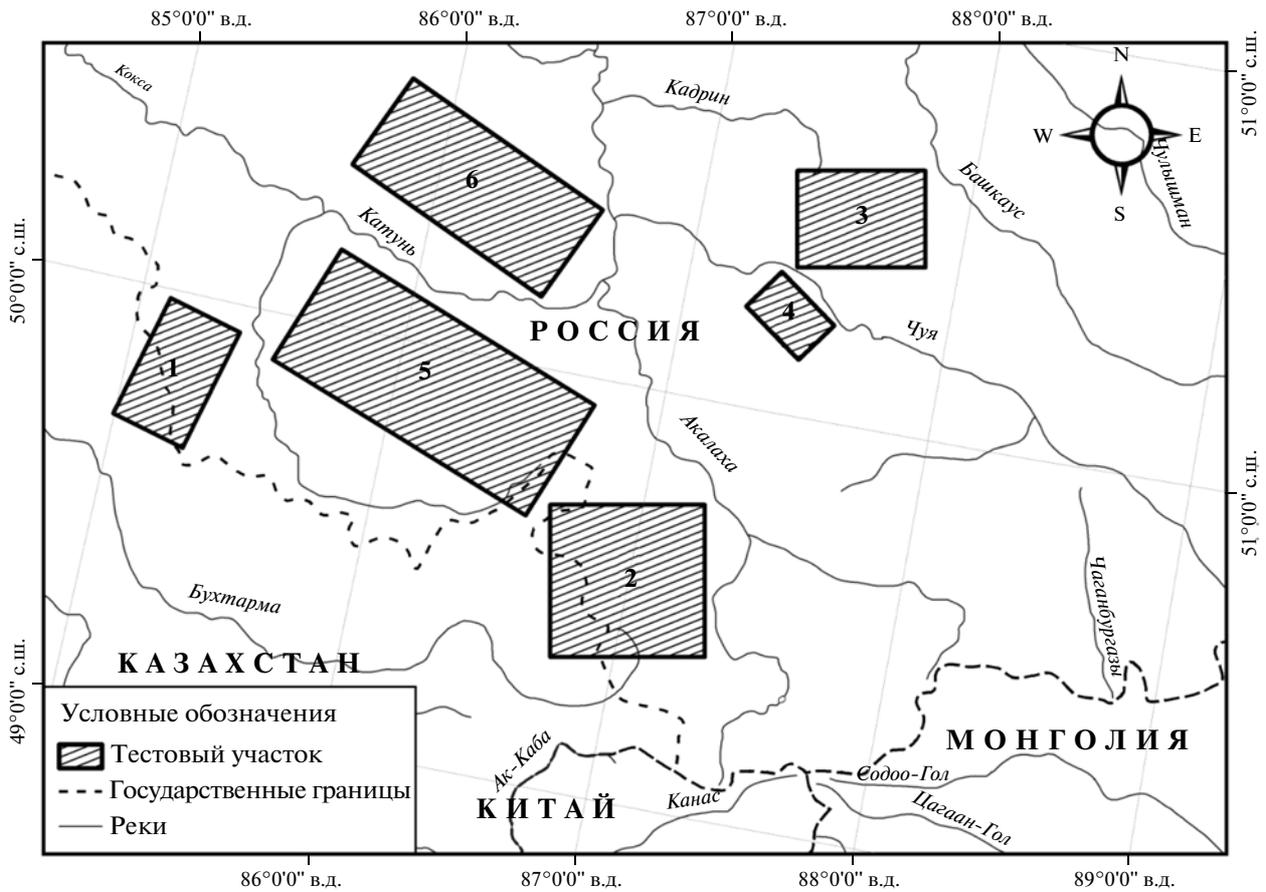


Рис. 1. Карта-схема расположения исследуемых участков.

По данным рис. 2 было рассчитано относительное изменение суммарной площади озер во времени как отношение приращения суммарной площади озер за период исследований к ее величине в начальный год исследования (1993 г.). Расчет показал, что суммарная площадь озер за 17 лет увеличилась на 31%. Следовательно, на горных ТО наблюдается тенденция увеличения площади озер. Это увеличение площадей, по нашему мнению, может быть объяснено тем, что в условиях наблюдаемого в последние десятилетия глобального потепления прогрессирующий термокарст вызывает рост площадей озер. Заметим, что проведенный в (Климатообусловленные ...) анализ материалов ДЗ за 50-летний период показал устойчивое увеличение на 50% площадей ТО в пределах озерно-болотного комплекса Джангызколь, который находится в непосредственной близости от района наших исследований.

Представляет интерес рассмотрение временных изменений средних значений площади ТО на различных ТУ. На рис. 3 приведены графики временного хода средних площадей озер на каждом ТУ. Точки на графиках обозначают средние (за

каждый исследуемый год в отдельности) значения площадей озер на каждом ТУ, рассчитанные на основе полученных данных. Отрезки прямых линий показывают доверительные интервалы,

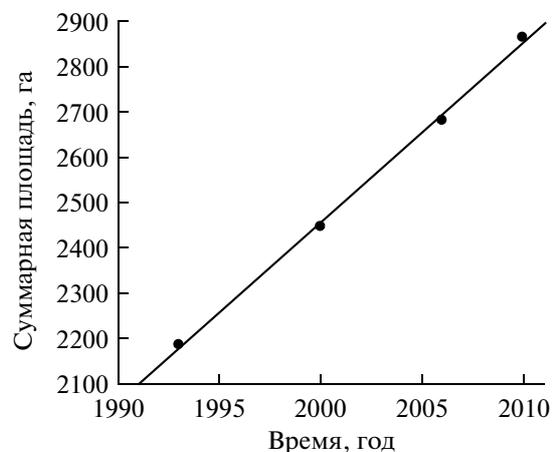


Рис. 2. Временные изменения суммарных площадей озер во времени.

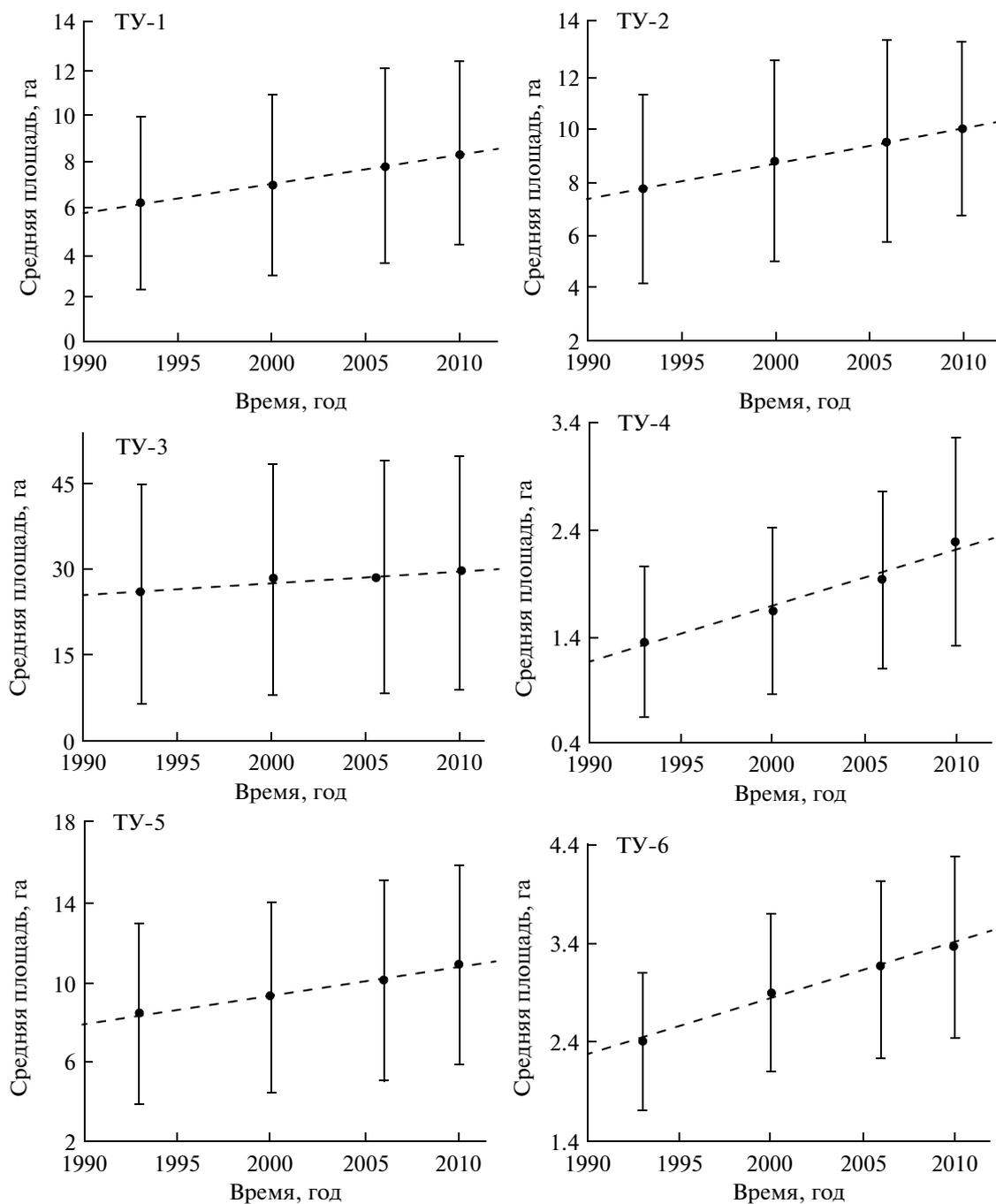


Рис. 3. Средние значения площади термокарстовых озер на разных ТУ.

Относительное изменение средней площади озер для различных ТУ

№ ТУ	1	2	3	4	5	6
$\overline{S}_H$ , га	6.18	7.73	25.58	1.36	8.46	2.41
$\overline{S}_K$ , га	8.34	10.04	29.21	2.29	11.91	3.37
$\delta$ , %	35	30	14	69	30	40

определенные для вероятности 90%. Пунктирной линией на графиках обозначена линия тренда.

Как видно из рис. 3, временной ход среднего значения на всех ТУ может быть аппроксимирован уравнением (1) с высоким уровнем коэффициента детерминации (0.92–0.99 на разных ТУ).

Для количественной оценки динамики полей ТО рассчитаны относительные изменения сред-

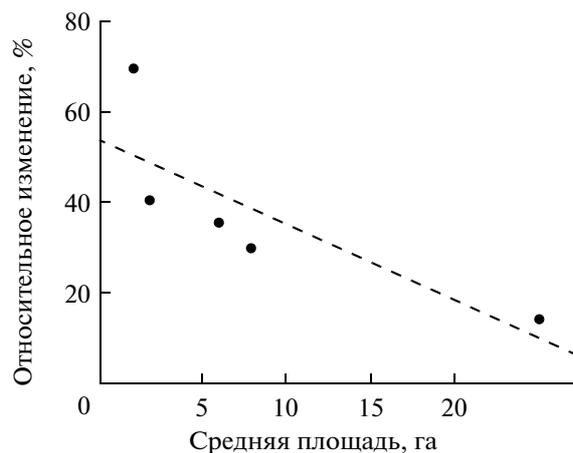


Рис. 4. Зависимость  $\delta$  от величины среднего значения площадей озер.

него значения площадей озер  $\delta$  на каждом ТУ по следующей формуле:

$$\delta = \left| \frac{\overline{S_K} - \overline{S_H}}{\overline{S_H}} \right|,$$

где  $\overline{S_H}$  — средняя площадь озер, измеренная в начальный год исследования;  $\overline{S_K}$  — средняя площадь озер на том же ТУ, измеренная в конечный год исследования.

Результаты этих расчетов приведены в таблице, на основе которой был построен график (рис. 4) зависимости относительного изменения средней

площади озер от величины средней площади озер в начальный год исследования (1993 г.) на каждом ТУ. Точками на графике обозначены величины  $\delta$ , определенные для различных ТУ, пунктирная линия (линия тренда) показывает тенденцию уменьшения относительных изменений средних площадей озер с увеличением в среднем их размеров.

Работа выполнена при поддержке ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” (госконтракт № 14.740.11.0409 от 20 сентября 2010 г.) и АВЦП Минобрнауки РФ (проект “Изучение термокарста в зонах многолетней мерзлоты Западной Сибири под воздействием глобального потепления с использованием геоимитационного моделирования и дистанционного зондирования”).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Кирпотин С.Н., Полищук Ю.М., Брыксина Н.А. Динамика площадей термокарстовых озер в сплошной и прерывистой криолитозонах Западной Сибири в условиях глобального потепления // Вестн. Томского гос. ун-та. 2008. № 311. С. 185–189.

Климатообусловленные геоморфологические опасности Горного Алтая. URL: <http://www.georiski.ru/testu1.htm>.

Кравцова В.И. Распространение термокарстовых озер в России в пределах зоны современной мерзлоты // Вестн. Московского ун-та. 2009. № 3. С. 33–42.

Smith L.C., Sheng Y., MacDonald G.M., Hinzman L.D. Disappearing Arctic Lakes // Science. 2005. V. 308. № 3. P. 14.

## Study of the Thermokarst Lakes Dynamics in the Mountain Valleys of Altai

Y.M. Polishchuk<sup>1,2</sup>, D.S. Sharonov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Petroleum Chemistry, SB RAS, Tomsk

<sup>2</sup>Ugra State University, Khanty-Mansiysk

The dynamics of the thermokarst lakes areas in the six test sites of permafrost in the Gorny Altai is studied using a collection of multi-temporal space images Landsat 5 (1993–2010 yrs.). It is shown that the total area of lakes in all test sites increases in time and growth of areas during the study period is in average 31%.

**Keywords:** Permafrost, thermokarst lakes, space image, global warming, geoinformation system

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

### ФОРМИРОВАНИЕ ЯРКОСТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ СПЛОШНЫХ РУБОК НА ЗИМНИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ СРЕДНЕГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

© 2013 г. А. А. Кардаков<sup>1\*</sup>, А. К. Кивисте<sup>1</sup>, У. К. Петерсон<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Эстонский университет естественных наук, Тарту, Эстония

<sup>2</sup>Тартуская обсерватория, Тыравере, Эстония

\*E-mail: anton\_kardakov@hotmail.com

Поступила в редакцию 15.03.2012 г.

В данной статье проанализированы факторы из таксационной базы данных, влияющие на формирование средней яркости пикселей возобновляющихся сплошных рубок на разностном снимке. Использован метод разностных изображений, вычитание значений яркости пикселей одного снимка из значений яркости другого и зимние снимки Landsat TM. Выявлены факторы, влияющие на выделительные различия площади классифицированных и полученных из базы данных объектов. Наибольшее влияние на формирование средней яркости пикселей возобновляющихся сплошных рубок на разностном снимке оказывают возраст древостоя и проводимые лесохозяйственные работы. Анализ факторов из таксационной базы данных, способных влиять на выделительные различия площадей между классифицированными и взятыми из таксационных баз данных, показал, что классы *Соседство с лесом* и *Соседство с рубкой* имеют более сильное влияние на различие площадей, нежели переменные таксационной базы данных.

**Ключевые слова:** возобновляющиеся сплошные рубки, зимние снимки Landsat TM, метод разностных снимков

DOI: 10.7868/S0205961412060048

#### ВВЕДЕНИЕ

Восстанавливающиеся природные ресурсы подвержены постоянным изменениям, меняется и лесной покров Земли. Мониторинг и оценка состояния лесов целесообразны при использовании данных дистанционного зондирования (ДЗ) (Song et al., 2007). С целью повышения достоверности получаемых данных, желательны их использование и последующий анализ с информацией из других источников – главным образом из таксационных баз данных (Исаев и др., 2009).

Архивные снимки, полученные при помощи различных спутников, являются незаменимым инструментом для изучения лесной сукцессии на обширных территориях в течение длительного времени. Данные с оптических сенсоров применялись для прогнозирования возраста древостоев с различной погрешностью (Schroeder et al., 2011).

Бореальные леса и леса умеренного климатического пояса подвержены частым нарушениям и вмешательствам, которые влияют на их отражательную способность. Изменения отражательной способности лесов обычно вызваны тремя различными силами: рост (Schroeder et al., 2007), природные явления, такие как наводнения (Lee,

Lee, 2010), пожары (Поморцев и др., 2008), очаги усыхания от вредителей и болезней (Goodwin et al., 2010) и антропогенные факторы – главным образом различные виды рубок (Healey et al., 2006). Данные изменения варьируются как по времени, так и по масштабу. Находить изменения, в том числе определение возрастного состава насаждений, возможно, основываясь на информации, получаемой с единичных изображений. Таким образом, были выявлены несколько общих классов сукцессии (Fiorella, Ripple, 1993; Peterson, Nilson, 1993; Jakubauskas, 1996). Возраст насаждений старше 20–25 лет сложно оценить, используя единичный снимок с должной степенью точности, результаты могут быть улучшены при использовании многовременных архивных снимков или их серий (Kennedy et al., 2007). После быстрого изменения отражения в первые 15–20 лет развития культур взаимосвязь (корреляция) отражательной способности и возраста насаждений в лесах умеренного пояса и в бореальных лесах становится слабой. Основываясь на изменениях структурных и композиционных факторов во времени, для каждого участка леса можно построить траектории или кривые восстановления, которые позволяют наблюдать динамику лесовосстановления

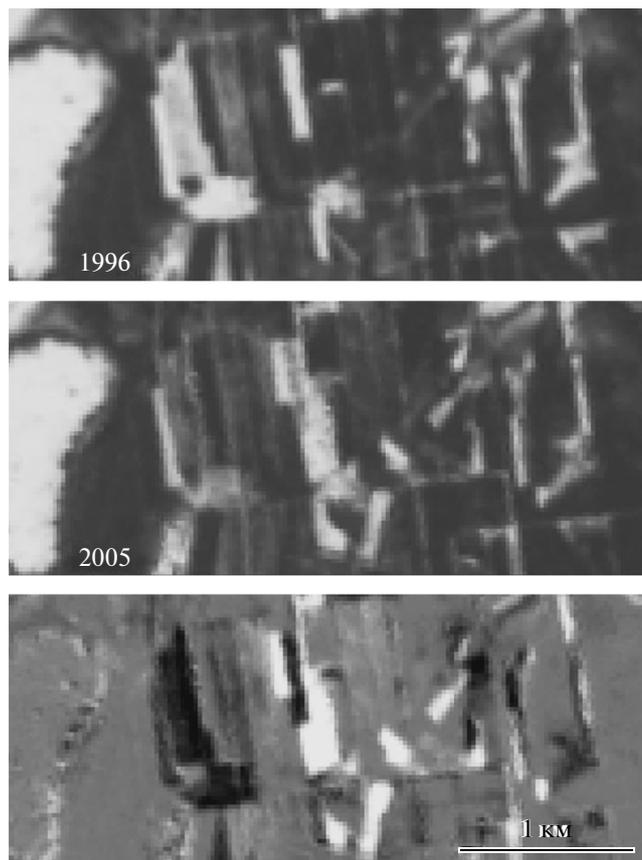
(Thomas et al., 2011). Траектории изменений дают возможность выявлять наличие изменений, но не описывают влияния параметров объектов на формирование отражательной способности.

Открытие Геологической службой США (USGS) архивов снимков среднего пространственного разрешения Landsat Thematic Mapper (TM) и их бесплатное распространение (Woodcock et al., 2008) увеличило применение различных автоматизированных алгоритмов, использующих для выявления изменений как пары, так и серии разновременных снимков (Huang et al., 2010; Kennedy et al., 2007).

Снимки, полученные в разное время, — интервал между снимками составляет как правило от нескольких до десятка лет (Lunetta et al., 2004; Masek et al., 2006) — сравниваются для выявления изменений в ландшафте. Благодаря резким яркостным изменениям, выявление сплошных рубок является наиболее успешной областью применения ДЗ ландшафта (Cohen et al., 1998; Wilson, Sader, 2002; Song, Woodcock, 2002). Однако картирование восстанавливающихся лесов (в данной работе — восстанавливающиеся сплошные рубки) остается сложной задачей, так как при использовании интервала между снимками, подходящего для выявления сплошных рубок, яркостные изменения едва различимы (Song et al., 2007). По сравнению с приспевающими и спелыми лесными массивами, в молодняках (насаждения, возраст которых менее 20 лет) с несомкнутыми или редкими кронами деревьев связь между возрастом и отражательной способностью сильно варьируется (Joyce, Olsson, 1999). Вариации способствует различия типов условия места произрастания, способ лесовосстановительных работ, место расположения, происхождение, густота и состав насаждений (Schroeder et al., 2006).

Влияние ведущих факторов на изменение значений яркости объектов на снимках в бореальных лесах после сплошных рубок мало изучено. Поэтому необходимо изучение влияния таких параметров, как время, прошедшее после сплошной рубки, условия места произрастания и наличие лесохозяйственных работ, на формирование яркостных значений объектов. Точность определения возраста насаждений обычно ограничена.

Зимние снимки со сплошным снежным покровом с высокой точностью позволяют выявить различия спектральных яркостей контрастных объектов. Поздняя зима является лучшим сезоном для картирования лесного покрова, для разграничения древостоя и безлесистых территорий (Peterson et al., 2004), а также для выявления изменений растительного покрова после потрясений, таких, как вырубки, пожары, повреждения древостоя ветром или энтомовредителями. В это время года контраст между лесом и безлесистыми тер-



**Рис. 1.** Фрагмент зимних снимков Landsat TM, сделанных в условиях снежного покрова в марте 1996 и 2005 гг. Темные участки на разностном снимке являются восстанавливающимися сплошными рубками, светлые — свежими рубками, срубленными в промежутке между двумя снимками, в светло-серые тона окрашены объекты, не изменившиеся за время между снимками (как лес, так и безлесистые территории).

риториями с ярким снежным покровом позволяет выявлять даже незначительные различия в сомкнутости крон деревьев. Отражательная способность снежного покрова особенно высока в видимой и ближней ИК областях спектра (Кринов, 1947) — это соответствует спектральным каналам Landsat TM1–TM4. Отражательная способность снежного покрова увеличивается соответственно его толщине примерно до 15 см, последующее увеличение не ведет к существенному изменению отражательной способности (Robinson, Kulka, 1985).

Цель данной статьи — анализ факторов таксационной базы данных и созданных в ходе анализа изображений на формирование яркости восстанавливающихся сплошных рубок. Для выявления временных изменений использовались метод разностных изображений, вычитание значений яркости пикселей одного снимка из значений яркости другого (Warner et al., 2009) и зимние снимки Landsat TM, сделанные в условиях сплошного

снежного покрова (рис. 1). В ходе анализа выяснили, какие факторы имеют статистически значительное влияние на изменение яркости объектов на зимнем разностном снимке в ходе лесной сукцессии. Выявили факторы, влияющие на поведельные различия площади классифицированных и полученных из базы данных объектов. Сравнение разницы площадей сделано при равной общей площади классифицированных объектов и объектов из таксационной базы данных (изучены различия единичных объектов).

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

### *Географическая область исследования и исходные данные*

Область исследования расположена в центральной Эстонии на территории Йыгеваского лесничества (58°43' с.ш. и 26°27' в.д.). На изучаемых территориях преобладают береза (*Betula pendula* и *Betula pubescens*), ель обыкновенная (*Picea abies*), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*) и осина обыкновенная (*Populus tremula*). Данный район был выбран в связи с его большой лесистостью, плоским рельефом и высокой интенсивностью лесохозяйственных работ (рубка леса, лесовосстановление).

В данной работе были использованы изображения со спутника Landsat TM, полученные 10 марта 1996 г. и 03 марта 2005 г. В течение двух недель, предшествующих дате спутниковых снимков, толщина снежного покрова оставалась в промежутке от 13 до 30 см. Сумма осадков в виде снега за десятидневный период, предшествующий снимкам, составляла менее 3 мм при постоянной среднесуточной температуре ниже нуля. Прозрачность атмосферы на момент обоих съемок, рассчитанная из входящих прямых солнечных лучей, была в промежутке 0.82–0.83. Долгосрочная средняя прозрачность в ясные дни в марте в районе 0.77 (Руссак, 2003). Уровень атмосферного тумана в этот период низок, горизонтальная видимость составляла 20 км. Данные о погоде были получены от Эстонского Института Метеорологии и Гидрологии (ЕМНИ) с метеостанции в Тыравере, расположенной в 20 км от района исследования.

Восстанавливающиеся сплошные рубки были выявлены при использовании векторной карты Центра управления государственными лесами Эстонии с границами выделов и таксационными данными, включающими в себя такие важные параметры, как возраст восстанавливающейся рубки и лесохозяйственные работы. Сплошные рубки являются наиболее распространенным видом рубок, большинство имеет правильную форму. В общей сложности было отобрано 332 регенерирующие рубки. На изучаемой территории в относительно равных долях от общей площади пред-

ставлены береза (42%), ель обыкновенная (39%), и осина обыкновенная, которая произрастает на 26% территорий. На данной территории доминируют свежие борео-неморальные леса (44%), а заболоченные и перегнойно-болотные занимают 35% и 13% соответственно. Площадь восстанавливающихся рубок варьировалась от 0.8 до 11.2 га, в среднем по 2.84 га. Среднее соотношение площади и периметра – очертание (форма) – было 1.21, с минимальным значением 0.96 и максимальным 1.76. Возраст регенерирующих рубок варьировался от 9 до 18 лет по отношению ко второму снимку (2005 г.). В зависимости от года рубки количество объектов варьировалось от 13 до 87. Несмотря на активное лесопользование, рубки ухода отсутствуют в трети изученных выделов. Наибольшее количество рубок ухода было сделано за три года перед датой второго изображения – в период с 2002 по 2004 г. (в год обработано от 36 до 49 объектов). Примерно треть лесов создана искусственным путем (посевом или посадкой), остальные – леса естественного происхождения.

Для контроля года восстанавливающейся рубки были использованы летние снимки Landsat TM 1987–1996 и материалы лесоустройства, включающие лесоустроительные планшеты и таксационные базы данных. Границы лесосек были визуально сравнены с ортофотоизображениями и Основной картой Эстонии (М 1 : 10000). Ортофотоизображения 1995 и 2003 гг. имеют пространственное разрешение от 0.25 до 0.5 м. Границы выделов векторной карты были при необходимости уточнены.

Изучаемые восстанавливающиеся рубки были срублены в период с 1987 по 1996 г. В данной статье использовались снимки спутника Landsat TM в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра (TM1–TM4).

### *Обработка изображений*

Снимки Landsat TM были геометрически трансформированы в эстонскую систему координат – коническую проекцию Ламберта с пространственным разрешением 25 м и использованием линейного преобразования первого порядка (в данной проекции представлены векторные карты лесных выделов). Пространственная интерполяция была выполнена при использовании опорных пунктов с ортофотоизображений Основной карты Эстонии методом наименьших квадратов. В данном случае использовалась интерполяция методом ближайшего соседа (ступенчатая интерполяция). Различия преобразованных изображений от ортофотоизображений Основной карты Эстонии составило 0.4 пиксела, что является хорошим результатом (стандартом для снимков среднего пространственного разрешения является не более 0.5 пиксела).

В ходе данной работы были изучены факторы, влияющие на формирование средней яркости пикселей возобновляющихся сплошных рубок. Для выявления изменений использовался метод разности снимков. В ходе данного метода значения яркости пикселей более раннего по времени снимка вычитаются из значений яркости более позднего по времени снимка, которые предварительно преобразованы в шкалу яркости первого из них при помощи модели линейной регрессии (Corrin et al., 2004). Преобразование в единую шкалу яркости (нормализация) устраняет различия, обусловленные различиями атмосферных условий и калибровки сенсора. На разностном снимке негативные и позитивные значения пикселей соответствуют изменениям отражательной способности объектов.

Преобразование зимних снимков в одинаковую яркостную шкалу основано на бимодальном распределении значений пикселей на снимке и характеризуется существованием у кривой плотности двух локальных максимумов, которые определяются двумя значениями мода. Для нахождения линейной зависимости использовались 2, 5, 10, 90, 95, 98 значений процентилей (Peterson et al., 2004).

Восстанавливающиеся сплошные рубки имеют небольшую площадь и на снимках среднего пространственного разрешения Landsat TM представлены малым количеством пикселей (минимально допустимое количество пикселей, представляющих один выдел, равно 3). Для уменьшения влияния соседних выделов (смежных пикселей) изучаемые полигоны были буферизированы внутрь на один пиксел. В результате площадь некоторых сердцевин объектов составила один–два пиксела. Для увеличения достоверности результатов было принято решение не включать в анализ выделы с площадью менее трех пикселей. Таким образом, мы уверены, что сердцевинки изученных объектов с достаточной точностью отражают истинные яркостные значения восстанавливающихся сплошных рубок. Средняя яркость была рассчитана на основе сердцевин объектов без учета пикселей буферной зоны.

При анализе факторов, способствующих ошибке в оценивании площади восстанавливающихся сплошных рубок, разностный снимок был классифицирован на два класса – класс “изменившиеся” и класс “неизменные” пиксели, – с использованием порогового значения. Пороговое значение было найдено итеративно, путем сопоставления общей площади классифицированных рубок на разностном снимке и общей площади объектов по таксационной базе данных.

Пороговое значение было определено для разностных снимков четырех спектральных каналов спутника Landsat TM, использованных в данном

анализе. После определения порогового значения была составлена “карта изменений”. Был принят во внимание возможный эффект соседних выделов на изучаемые объекты. На разностном снимке “Соседи” могут быть со временем изменившимися (ставшими светлее или темнее) и со временем неизменившимися объектами. Пороговое значение для темных и светлых объектов определялось отдельно. Неизменившиеся пиксели были между двух пороговых значений. Пороговое значение для светлых соседей, показывающее возрастание яркости, было найдено как подходящее для классифицирования сплошных рубок на разностном снимке. Пороговое значение для темных соседей – как подходящее для восстанавливающихся сплошных рубок. Пороговые значения были найдены отдельно для каждого спектрального канала и применены для всей изучаемой территории. Как темные, так и светлые соседи считаются объектами в пределе одного пиксела за пределами самих объектов.

#### Статистическая обработка данных

Влияние факторов таксационной базы данных на разницу яркостных значений восстанавливающихся сплошных рубок в зимних условиях было оценено для четырех каналов спутника Landsat TM1–TM4 отдельно (синяя, зеленая, красная и ближняя ИК-области спектра). В ходе работы использована общая линейная модель (General Linear Model), главная задача которой заключается в определении взаимосвязи между несколькими независимыми переменными (предикторами) и зависимой переменной. В этом случае зависимой переменной являются разности яркостных значений на разностном снимке, сделанном в зимних условиях. Независимые переменные, рассмотренные в ходе данной работы, представлены в табл. 1А.

Дальнейший анализ факторов, влияющих на повидельные различия площади классифицированных и полученных из базы данных объектов, предполагал создание параметров, представленных в табл. 1Б

$$S_{rel} = \frac{(S_{db} - S_{cl})}{S_{db}}, \quad (1)$$

где  $S_{rel}$  – относительная разница площадей;  $S_{db}$  – площадь восстанавливающейся сплошной рубки из таксационной базы данных, га;  $S_{cl}$  – площадь восстанавливающейся сплошной рубки, классифицированная на основании разностного снимка, га.

*Форма* – рассчитанная по параметрам таксационной базы данных

$$SHAPE = \frac{0.25U}{\sqrt{S}}, \quad (2)$$

Таблица 1. Переменные, рассмотренные в ходе анализа

А	
<i>Возраст</i>	время, прошедшее после сплошной рубки (в годах)
<i>Рубки ухода</i>	рубки ухода в молодняках, сделанные в течение трех лет до даты позднего по времени снимка (уход производился в период с 2002 по 2004 гг.)
<i>Класс бонитета</i>	различия в условиях произрастания леса (в соответствии с классификацией М. Орлова), в таксации характеризуется несколькими классами бонитета, обозначаемыми порядковыми номерами: класс I означает лучшие условия произрастания леса, а последующие — их постепенное ухудшение
<i>Порода</i>	для анализа породы деревьев были сгруппированы в два класса; класс “хвойные” и класс “лиственные”
<i>Группы типов лесов</i>	группы лесов в соответствии с классификацией Я. Пааля (1997). В данной работе использованы шесть групп: 1) свежие борео-неморальные леса; 2) свежие бореальные леса; 3) перегнойно-болотные леса; 4) заболоченные леса; 5) травяно-болотные леса; 6) верхово-болотные леса
<i>Происхождение</i>	культура (образованная посевом или методом посадки) или естественное (семенное или порослевое)
Б	
<i>Форма</i>	среднее соотношение площади и периметра, рассчитанное по параметрам таксационной базы данных (2)
<i>Соседство с лесом</i>	относительная площадь возобновляющихся сплошных рубок, граничащих с объектами класса “возобновляющиеся выработанные делянки”, которые представлены на разностном снимке темными объектами
<i>Соседство с рубками</i>	относительная площадь возобновляющихся сплошных рубок, граничащих с объектами класса “выработанные делянки”, представленными на разностном снимке светлыми объектами
<i>Площадь</i>	площадь выдела из таксационной базы данных, га

где  $U$  периметр и  $S$  площадь выдела (Jagomägi et al., 1988).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Взаимосвязь изменения разницы яркостных значений восстанавливаемых сплошных рубок в зимних условиях и параметров таксационной базы данных была изучена для четырех спектральных каналов Landsat TM отдельно (TM1, TM2, TM3 и TM4). Наш анализ охватывает изменения, произошедшие за период между снимками (с 1996 по 2005 гг.). В зависимости от спектрального канала, 19–20% (скорректированный коэффициент детерминации) вариации яркости на разностном снимке было описано факторами из таксационной базы данных. Изменения яркостных значений восстанавливаемых делянок на разностном снимке в зависимости от прошедшего после вырубке времени, представлены на рис. 2. Схожие тренды наблюдаются для трех видимых и ближнего ИК-каналов спутника Landsat TM. На основе изученных ранних стадий наблюдается линейная зависимость между возрастом после рубки и разностью яркостных значений. Чем больше времени прошло после вырубке, тем большее негативное значение имеют выделы на разностном снимке, — тем более велико изменение яркостных значений. Анализ остатков не выявил систематических различий между отклонениями модели и временем после рубки (рис. 3а).

Первые четыре спектральных канала спутника Landsat TM имеют примерно одинаковую чувствительность к данному типу изменений. Были рассмотрены и единичные изображения. При помощи этих снимков изменения не выявляются, описываются только значимость факторов влияющих на формирование яркостных значений (табл. 2). Кроме фактора *Возраст*, значимое влияние на формирование разницы яркостных значений имеет фактор *Рубки ухода* во всех рассмотренных каналах (TM1–TM4). Остатки линейной модели (отсутствует влияние времени после сплошной рубки) выявили криволинейную взаимосвязь между яркостными изменениями и бонитетом насаждений (рис. 3б), однако множественная модель не подтвердила статистическую значимость этого фактора для формирования яркости в первых трех спектральных каналах (табл. 2). Добавление квадратичного значения фактора *Класс бонитета* не способствовало достоверной связи параметров. *Порода* была проанализирована в отношении класса “хвойные” леса. Анализ не выявил статистической зависимости ни в одном из каналов. Данный фактор описывает хозяйственную деятельность по отношению к культурам, так как в зависимости от породы применяются различные методы хозяйственной деятельности (в таксационной базе данных *Порода* определяет хозяйственную деятельность). *Происхождение* анализировалось в отношении насаждений, возникших естественным путем (семенным или порос-

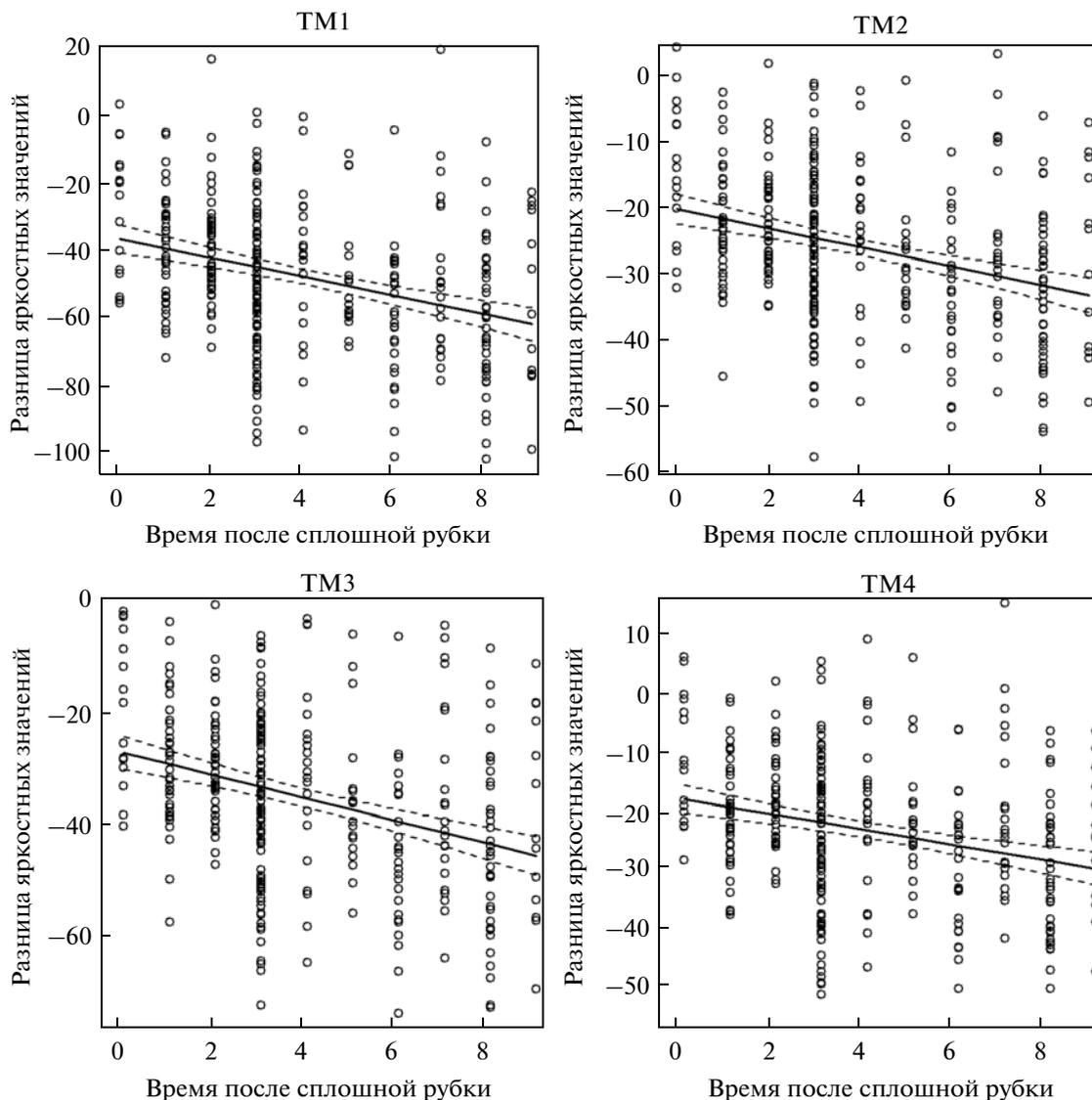
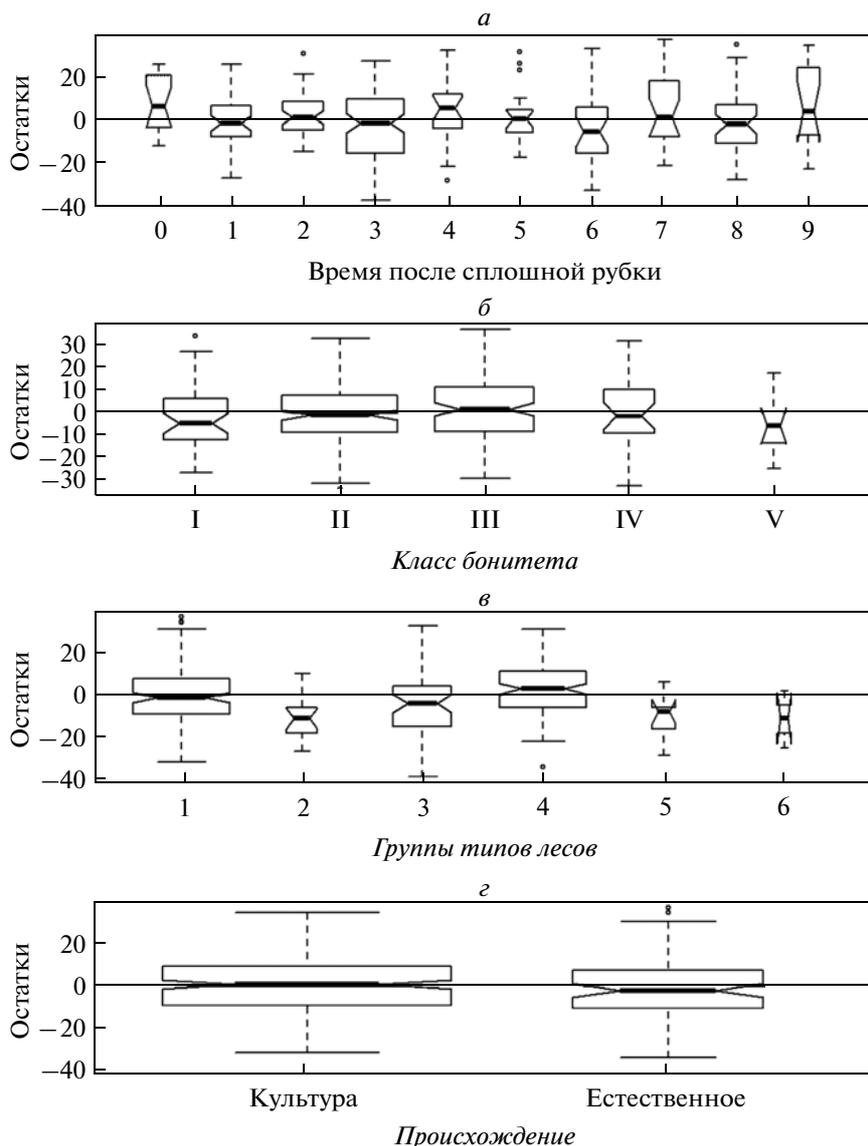


Рис. 2. Зависимость яркостных значений на разностном снимке от времени, прошедшем после сплошной рубки в видимом и ИК спектрах спутника Landsat TM. Сплошная линия – регрессионная прямая, малые штриховые линии – доверительные границы средней модели.

левым). При рассмотрении всего объема данных значительного влияния найдено не было. В выделах культурного и естественного происхождения средние значения остатков отличаются значительно (рис. 3з). При отдельном анализе классов “хвойные” и “лиственные” леса выяснилось, что формирование яркостных значений хвойных зависит от происхождения. Схожий результат был получен при анализе молодых насаждений с выявленными рубками ухода (табл. 3). Предварительно группы типов лесов были упорядочены в соответствии с их продуктивностью. Анализ проводился в отношении самых продуктивных и вместе с тем наиболее широко представленных свежих бореально-неморальных лесов. На яркостные значения во всех частях изучаемого спектра

влияют свежие бореальные и перегнойно-болотные Группы типов лесов, травяно-болотные – только в первых трех. Анализ остатков не выявил линейной зависимости яркостных значений от фактора Группы типов лесов (рис. 3в). Фактор Группы типов лесов имеет более сильное влияние на формирование яркостных значений разностного снимка, нежели фактор Класс бонитета (скорректированный коэффициент детерминации попарного анализа  $R^2 = 0.01$  и  $R^2 = 0.05$  соответственно).

Факторы, влияющие на повидельные различия площади и разницу между классифицированными выделами, при использовании разностного снимка и таксационной базы данных, показывают, что окружающие объекты имеют большее



**Рис. 3.** Графики коробок, представляющие зависимость остатков линейного тренда красного спектрального диапазона Landsat TM3: *а* – от времени прошедшего после сплошной рубки; *б* – от класса бонитета насаждений; *в* – от группы типов лесов (1 – свежие борео-неморальные леса; 2 – свежие бореальные леса; 3 – перегнойно-болотные леса; 4 – заболоченные леса; 5 – травяно-болотные леса; 6 – верхово-болотные леса); *г* – от происхождения. Размер коробок зависит от количества анализируемых объектов.

влияние на различие площадей, нежели переменные таксационной базы данных (табл. 4). Окружающие восстанавливающиеся сплошные рубки участки могут быть классифицированы при помощи двух классов – класса “изменившиеся” и класса “неизменные”. Изменения могут происходить в двух направлениях. Соседние объекты могут быть выработанными делянками, представленными на разностном снимке “светлыми” объектами, и выделами, находящимися на различных стадиях восстановительной сукцессии, представленными на разностном снимке “темными” объектами. С увеличением площади пригранич-

ных выделов, относящихся к классу *Соседство с лесом* (темных объектов), значения относительной разницы площадей, классифицированных при помощи разностного снимка и полученных с использованием таксационной базы данных, уменьшаются (рис. 4а). Увеличение площади приграничных выделов, относящихся к классу *Соседство с рубкой*, ведет к увеличению значений относительной разницы площадей (рис. 4б). Различие между площадями зависит и от площади из таксационной базы данных. С увеличением площади значения относительной разницы площадей увеличиваются (рис. 4в). Объекты, имеющие

**Таблица 2.** Результаты множественной регрессии раннего, позднего и разностного снимков для каналов спутника Landsat TM1-TM4

	1996 г.				2005 г.				Разностный снимок			
	TM1	TM2	TM3	TM4	TM1	TM2	TM3	TM4	TM1	TM2	TM3	TM4
<i>Возраст</i>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>								
<i>Рубки ухода</i>	0.273	0.296	0.274	0.400	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>
<i>Класс бонитета</i>	<b>0.033</b>	<b>0.040</b>	<b>0.047</b>	0.106	<b>&lt;0.001</b>	<b>0.001</b>	<b>0.002</b>	<b>0.001</b>	<b>0.050</b>	0.095	0.099	<b>0.023</b>
<i>Класс бонитета<sup>2</sup></i>	<b>0.025</b>	<b>0.029</b>	<b>0.033</b>	0.062	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	0.061	0.100	0.117	<b>0.027</b>
<i>Порода</i>												
лиственные	0.695	0.966	0.940	0.920	0.727	0.805	0.936	0.361	0.969	0.756	0.879	0.256
<i>Группы типов лесов</i>												
свежие бореальные	0.377	0.271	0.340	0.461	0.088	0.073	0.104	0.106	<b>0.007</b>	<b>0.002</b>	<b>0.005</b>	<b>0.011</b>
перегнойно-болотные	0.173	0.248	0.256	0.286	<b>0.002</b>	<b>0.002</b>	<b>0.005</b>	<b>0.010</b>	<b>0.028</b>	<b>0.023</b>	<b>0.037</b>	<b>0.048</b>
заболоченные	0.237	0.238	0.259	0.203	0.331	0.157	0.231	0.168	0.985	0.671	0.817	0.696
травяно-болотные	0.115	0.078	0.099	0.114	0.589	0.798	0.715	0.686	<b>0.042</b>	<b>0.046</b>	<b>0.041</b>	0.052
верхово-болотные	0.946	0.917	0.959	0.729	0.186	0.585	0.222	0.490	0.121	0.479	0.152	0.264
<i>Происхождение</i>												
культура	0.864	0.678	0.659	0.606	0.292	0.414	0.313	0.554	0.180	0.193	0.119	0.247
<b>Скорректированный R<sup>2</sup></b>	<b>0.100</b>	<b>0.105</b>	<b>0.110</b>	<b>0.087</b>	<b>0.336</b>	<b>0.341</b>	<b>0.350</b>	<b>0.306</b>	<b>0.191</b>	<b>0.196</b>	<b>0.199</b>	<b>0.190</b>

Примечание. Вероятности значимости менее чем в 0.05 выделены жирным шрифтом.

**Таблица 3.** Результаты множественной регрессии для канала спутника Landsat TM3 для различных выборок

	Класс “хвойные”	Класс “лиственные”	Молодняки с рубками ухода
<i>Возраст</i>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>
<i>Рубки ухода</i>	<b>0.016</b>	<b>0.014</b>	NA
<i>Класс бонитета</i>	0.553	0.346	0.716
<i>Класс бонитета<sup>2</sup></i>	0.859	0.326	0.774
<i>Порода</i>			
лиственные	NA	NA	0.648
<i>Группы типов лесов</i>			
свежие бореальные	0.245	<b>0.012</b>	0.206
перегнойно-болотные	0.561	0.662	0.259
заболоченные	0.174	<b>0.032</b>	0.485
травяно-болотные	<b>0.002</b>	0.209	NA
верхово-болотные	<b>0.040</b>	NA	0.122
<i>Происхождение</i>			
культура	<b>0.024</b>	0.098	<b>0.033</b>
<b>Скорректированный R<sup>2</sup></b>	<b>0.217</b>	<b>0.238</b>	<b>0.234</b>

Примечание. Вероятности значимости менее чем в 0.05 выделены жирным шрифтом.

более правильную форму (квадратные объекты имеют индексное значение, равное одному), имеют меньшую относительную разницу площадей. С увеличением индекса формы выдел приобретает неправильную форму, увеличивается негативная разница относительных площадей (рис. 4г).

### ОБСУЖДЕНИЕ

Спектральная отражательная способность покрытых снегом выделов на снимке, сделанном в зимних условиях, зависит от типа и густоты растительности. Увеличивающиеся количество дере-

**Таблица 4.** Результаты множественной регрессии, показывающие взаимосвязь между относительной разницей площадей и проанализированными факторами

	Оценка	Стд. ошибка	t-критерий	Pr(> t )
<i>Возраст</i>	−0.001	0.007	−0.137	0.891
<i>Рубки ухода</i>	0.010	0.032	0.310	0.757
<i>Класс бонитета</i>	0.020	0.019	1.065	0.288
<i>Порода</i>				
лиственные	−0.016	0.043	−0.362	0.718
<i>Группы типов лесов</i>				
свежие бореальные	−0.038	0.100	−0.381	0.703
перегнойно-болотные	−0.038	0.048	−0.809	0.420
заболоченные	−0.024	0.036	−0.676	0.500
травяно-болотные	−0.111	0.142	−0.780	0.436
верхово-болотные	−0.206	0.148	−1.398	0.164
<i>Происхождение</i>				
культура	−0.019	0.048	−0.385	0.701
форма	−0.130	0.102	−1.271	0.206
<i>Соседство с лесом</i>	−0.530	0.036	−14.582	<b>&lt;0.001</b>
<i>Соседство с рубками</i>	0.159	0.048	3.301	<b>&lt;0.001</b>
<i>Площадь</i>	0.100	0.013	7.727	<b>&lt;0.001</b>
<b>Скорректированный R<sup>2</sup></b>				<b>0.660</b>

Примечание: Вероятности значимости менее чем в 0.05 выделены жирным шрифтом.

вьев и ветвей, увеличение их теней уменьшает яркость восстанавливающихся выделов. Проведенный анализ представляет яркостные изменения в восстанавливающихся выделах в зависимости от возраста (времени после сплошной рубки). Молодые насаждения имеют наибольшие яркостные значения. Последующее развитие ведет к постепенному уменьшению яркостных значений в видимом и ближнем ИК частях спектра. Несмотря на то, что траектории сукцессии являются нелинейными для 30–40-летних насаждений, изучение ранних этапов сукцессии 10–15 лет возможно с использованием линейных моделей. Данное утверждение верно для зимних снимков.

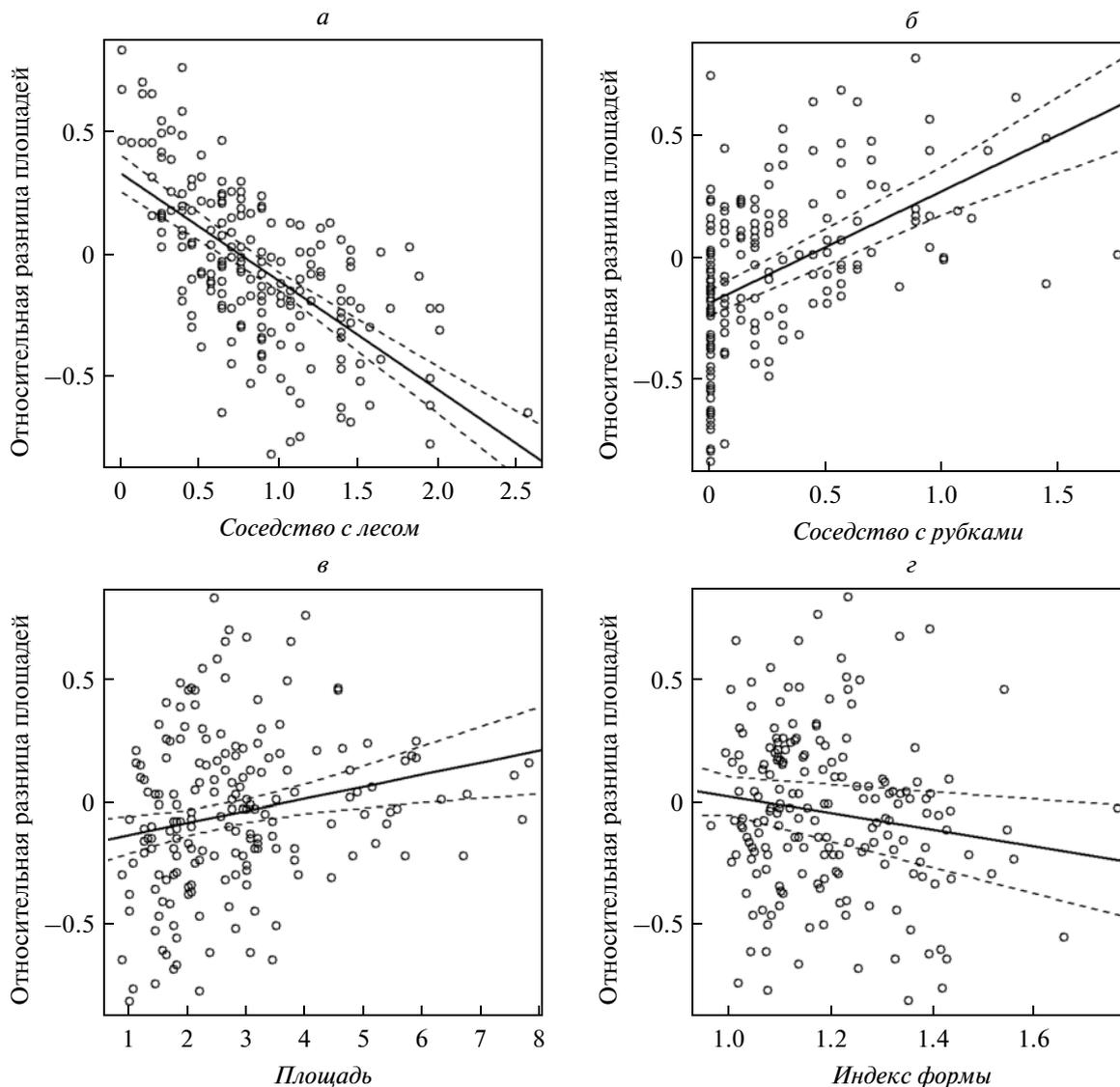
Каналы Landsat TM1–TM4 имеют одинаковую чувствительность. Результаты подтверждают ранее опубликованные работы (Peterson et al., 2004; Kardakov et al., 2009). Изменения яркостных значений уменьшаются после увеличения сомкнутости крон деревьев и кустарников на участке. Была замечена вариативность внутри возрастных классов восстанавливающихся рубок: так, на более плодородных выделах рост деревьев, а вместе с ним и изменения яркостных значений более значимы, нежели в менее плодородных. Взаимоотношение изменений между яркостными изменениями на разностном снимке и бонитетом насаждений по классификации М. Орлова возросло

внутри классов I–III, которые имели более быстрый прирост. Индексы бонитета IV–V имеют обратную связь. Эти выделы наименее привлекательны с лесохозяйственной точки зрения, и рубки ухода здесь, как правило, не производятся.

Значения скорректированного коэффициента детерминации линейной модели, объясняющие среднее значение пикселей восстанавливающихся выделов на разностном снимке Landsat TM, довольно малы (0.19–0.20). Схожие результаты найдены и в других работах (Song et al., 2007).

Фактор *Порода* показывает, что в молодых насаждениях разграничение классов “хвойные” и “лиственные” возможно на разностном снимке в зимних условиях.

Анализ факторов из таксационных баз данных, способных влиять на повыдельные различия площадей между классифицированными и взятыми из таксационных баз данных, показал, что классы *Соседство с лесом* и *Соседство с рубкой* имеют более сильное влияние на различие площадей, чем остальные параметры. Учитывая расчетную формулу относительной разницы площадей (2) можно сделать вывод, что площадь выдела, классифицированного с разностного снимка, была больше, нежели площадь, представленная в таксационной базе данных, если его окружали регенерирующие



**Рис. 4.** Зависимость значений относительной разницы площадей от: а – соседства с лесом; б – соседства с рубками; в – площади; г – индекса формы. Сплошная линия – регрессионная прямая, малые штриховые линии – доверительные границы средней модели.

выделу – темные объекты. Площадь, классифицированная при помощи разностного снимка, была меньше площади таксационной базы данных, если соседние выделы были срублены в период между двух рассматриваемых снимков.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье мы оценили влияние факторов из таксационной базы данных на формирование яркостных значений выделов на разностном снимке, сделанном в зимнее время. Выяснили, что первые четыре спектральных канала спутника Landsat TM имеют примерно одинаковую чувствительность к данному типу изменений. Время, прошедшее после сплошной рубки, оказывает

наибольшее влияние на формирование яркостных значений во всех четырех изученных диапазонах (видимый и ближний ИК). Значимое влияние на формирование разницы яркостных значений во всех рассмотренных каналах имеет и фактор *Рубки ухода*.

Изучили факторы, влияющие на повыделные различия площади классифицированных и полученных из базы данных объектов, сравниваемых при равной общей площади классифицированных и таксационных баз данных (изучены различия единичных объектов). Выяснили, что окружающие объекты оказывают большее влияние на разницу площадей, нежели факторы из таксационной базы данных описывающие свойства выделов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Исаев А.С., Князева С.В., Пузаченко М.Ю., Черненко-ва Т.В. Использование спутниковых данных для мониторинга биоразнообразия лесов // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 2. С. 55–66.
- Кринов Е.Л. Спектральная отражательная способность природных образований. М.: Изд-во АН СССР, 1947. 272 с.
- Пааль Я. Классификация типов местопроизрастания в Эстонии. (На эст. яз.). Таллинн: Министерство Охраны Окружающей Среды, 1997. 297 с.
- Поморцев О.А., Ведешин Л.А., Дальбинов А.А. Лесные пожары: от мониторинга к прогнозу (на примере Якутии) // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 2. С. 57–67.
- Руссак В. Прозрачность атмосферы // Эстонский справочник по изучению излучения. (На эст. яз.) / Под ред. Тооминг Х. Таллинн: Эстонский Институт Метеорологии и Гидрологии, 2003. 384 с.
- Cohen W.B., Fiorella M., Gray J., Helmer E., Anderson K. An efficient and accurate method for mapping forest clearcuts in the Pacific Northwest using Landsat imagery // Photogram. Eng. Rem. Sens. 1998. V. 64. № 4. P. 293–300.
- Coppin P., Jonckheere I., Nackaerts K., Muys B., Lambin E. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review // Int. J. Rem. Sens. 2004. V. 25. № 9. P. 1565–1596.
- Fiorella M., Ripple W.J. Analysis of conifer forest regeneration using Landsat Thematic Mapper data // Photogram. Eng. Rem. Sens. 1993. № 59. P. 1383–1388.
- Goodwin N.R., Magnussen S., Coops N.C., Wulder M.A. Curve fitting of time-series Landsat imagery for characterizing a mountain pine beetle infestation // Int. J. Rem. Sens. 2010 V. 31. № 12. P. 3263–3471.
- Healey S.P., Yang Z., Cohen W.B., Pierce D.J. Application of two regression-based methods to estimate the effects of partial harvest on forest structure using Landsat data // Rem. Sens. Environ. 2006. № 101. P. 115–126.
- Huang C., Goward S.N., Masek J.G., Thomas N., Zhu Z., Vogelmann J.E. An automated approach for reconstructing recent forest disturbance history using dense Landsat time series stacks // Rem. Sens. Environ. 2010. № 114. P. 183–198.
- Jagomägi J., Külvik M., Mander Ü., Jacuchno V. The structural-functional role of ecotones in the landscape // Ekológia (ČSSR). 1988. V. 7. № 1. P. 81–94.
- Jakubauskas M.E. Thematic Mapper characterization of lodgepole pine seral stages in Yellowstone National Park, USA // Rem. Sens. Environ. 1996. № 56. P. 118–132.
- Joyce S., Olsson H. Long-term forest monitoring with temporal-spectral trajectories from Landsat TM data. In Forest Information from Remote Sensing // Proc. IUFRO Conf. Rem. Sens. and For. Monit. 1–3 June 1999, Rogow, Poland. EUR 19530 EN, Luxembourg / Eds. Zawila-Niedzwiecki T., Brach M. 1999. P. 477–489.
- Kardakov A., Kiviste A., Peterson U. Assessment of Driving Factors Affecting Radiance Changes in Regenerating Mixed Forest Clearcuts Using Landsat Winter Imagery // Balt. Forest. 2009. V. 15. № 2. P. 216–225.
- Kennedy R.E., Cohen W.B., Schroeder T.A. Trajectory-based change detection for automated characterization of forest disturbance dynamics // Rem. Sens. Environ. 2007. № 110. P. 370–386.
- Lee K.S., Lee S.I. Assessment of post-flooding conditions of rice fields with multi-temporal satellite SAR data // Int. J. Rem. Sens. 2010 V. 24. № 17. P. 3457–3465.
- Lunetta R.S., Johnson D.M., Lyon J.G., Crotwell J. Impacts of imagery temporal frequency on land-cover change detection monitoring // Rem. Sens. Environ. 2004. № 89. P. 444–454.
- Masek J.G., Collatz G.J. Estimating forest carbon fluxes in a disturbed southeastern landscape: Integration of remote sensing, forest inventory, and biogeochemical modelling // J. Geophys. Res. 2006 V. 111. G01006. doi:10.1029/2005JG000062.
- Peterson U., Nilson T. Successional reflectance trajectories in northern temperate forests // Int. J. Rem. Sens. 1993. № 14. P. 609–613.
- Peterson U., Piissa K., Liira J. Issues related to delineation of forest boundaries on Landsat Thematic Mapper winter images // Int. J. Rem. Sens. 2004. V. 25. № 24. P. 5617–5628.
- Robinson D.A., Kukla G. Maximum surface albedo of seasonally snowcovered lands in the Northern Hemisphere // J. Clim. and Appl. Meteor. 1985. V. 24. P. 402–411.
- Schroeder T.A., Cohen W.B., Song C., Canty M.J., Yang Z. Radiometric correction of multi-temporal Landsat data for characterization of early successional forest patterns in western Oregon // Rem. Sens. Environ. 2006. № 103. P. 16–26.
- Schroeder T.A., Cohen W.B., Yang Z. Patterns of forest regrowth following clearcutting in western Oregon as determined from a Landsat time-series // Forest Ecol. and Managem. 2007. № 243. P. 259–273.
- Schroeder T.A., Wulder M.A., Healey S.P., Moisen G.G. Mapping wildfire and clearcut harvest disturbances in boreal forests with Landsat time series data // Rem. Sens. Environ. 2011. № 115. P. 1421–1433.
- Song C., Woodcock C.E. The spatial manifestation of forest succession in optical imagery. The potential of multiresolution imagery // Rem. Sens. Environ. 2002. № 82. P. 271–284.
- Song C., Schroeder T.A., Cohen W.B. Predicting temperate conifer forest successional stage distributions with multi-temporal Landsat Thematic Mapper imagery // Rem. Sens. Environ. 2007. № 106. P. 228–237.
- Thomas N.E., Huang C., Goward S.N., Powell S., Rishmawi K., Schleeweis K., Hinds A. Validation of North American Forest disturbance Dynamics derived from Landsat time series stacks // Rem. Sens. Environ. 2011. № 115. P. 19–32.
- Warner T.A., Nellis M.D., Foody G.M. et al. The SAGE handbook of remote sensing / Eds. Warner T.A., Nellis M.D., Foody G.M. SAGE Publications Ltd., 2009. 568 p.
- Wilson E.H., Sader S.A. Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery // Rem. Sens. Environ. 2002. № 80. P. 385–396.
- Woodcock C.E., Allen R., Anderson M., et al. Free access to Landsat imagery // Science. 2008. V. 320. № 5879. P. 1011.

## **Radiance Changes of Regenerating Clear-Felled Areas Using Moderate Spatial Resolution Winter Images**

**A. A. Kardakov<sup>1\*</sup>, A. K. Kiviste<sup>1</sup>, U. K. Peterson<sup>1,2</sup>**

*<sup>1</sup>Estonian University of Life Sciences, Tartu, Estonia*

*<sup>2</sup>Tartu Observatory, Tõravere, Estonia*

This paper analyses forestry database variables that are candidates to have a significant effect on radiance changes on a difference image. The difference image was calculated from two Landsat TM winter scenes imaged with a time interval of nine years. Another analysis was performed to investigate the factors that cause patch-wise differences in area estimates when the patch areas noted in the database were compared to the areas of the same patches classified on the satellite image. A significant effect of patch age - time passed since disturbance of clearcut logging on the radiance difference of regenerating patches on a difference image. The nature of neighbors either dark or bright had a more significant effect on the errors of patch area estimates rather than the database parameters of the patches themselves.

**Keywords:** Clearcut regeneration, Landsat TM winter images, difference image method

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ СПУТНИКОВЫХ СЪЕМОК ДЛЯ АНАЛИЗА ЗНАЧЕНИЙ ХЛОРОФИЛЛЬНОГО ИНДЕКСА ТУНДРОВЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ

© 2013 г. В. В. Елсаков

*Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, Сыктывкар*

*E-mail: elsakov@ib.komisc.ru*

Поступила в редакцию 23.04.2012 г.

В работе рассмотрены возможности использования материалов спектрально-зональных спутниковых съемок для анализа временных изменений и широтных особенностей распределения значений хлорофилльного индекса в доминирующих фитоценозах тундровой зоны. Для модельного участка южных гипоарктических тундр среднее значение показателя составило 6.4 кг/га. На основании привлечения материалов съемки MODIS показаны географические закономерности распределения показателя и выявлены участки, связанные с существенными изменениями в результате климатических флуктуаций последних десятилетий.

**Ключевые слова:** хлорофилльный индекс, материалы спектрально-зональных спутниковых съемок, климатические флуктуации

DOI: 10.7868/S0205961413010016

### ВВЕДЕНИЕ

Растительный покров является основным звеном биогеоценоза, обеспечивая сток CO<sub>2</sub> за счет фотосинтетической аккумуляции, и определяет продуктивность экосистем, для оценки которой привлекаются газометрические, весовые, а в последнее время и дистанционные методы исследований. Основные оптические свойства фитоценозов, во многом определяемые суммарным накоплением пигментов в надземной фитомассе растений разных жизненных форм, активно используются для выделения доминирующих контуров растительного покрова (классификации), количественной оценки сезонного развития растений, выявления сукцессионных смен растительности или ее деградации.

Серии работ, выполненные в фитоценозах различных регионов (Prince, Goward, 1995; Raynolds et al., 2006; Puma et al., 2007; Huemmrich et al., 2010 и др.), демонстрируют наличие тесной коррелятивной связи между объемами поглощенной/отраженной растительным покровом энергии в диапазонах красного и ближнего ИК-излучения, поглощенной фотосинтетически активной радиацией (APAR) и продуктивностью сообществ. Все это позволяет рассматривать спектральные показатели в качестве основы для расчета количественных величин, отражающих запас пигментов и интенсивность фотосинтетически обусловленных

CO<sub>2</sub>-потоков, а их сезонную вариабельность — как показатель продуктивности.

В качестве показателя проективного содержания зеленых пигментов в фитоценозах введена и широко используется величина хлорофилльного индекса (ХИ, кг/га). Для различных сообществ ботанико-географических зон России отмечена положительная корреляция между годичным фотосинтетическим стоком углерода, продуктивностью сообществ и проективным содержанием хлорофилла (Воронин и др., 1995). Поэтому анализ пространственно-временных закономерностей распределения индекса позволит выявить влияние ландшафтных, географических и сезонных условий на объемы фотосинтетического связывания углерода растительными сообществами и их продуктивность.

Использование спектральных вегетационных индексов для дистанционной оценки характеристик растительного покрова связано с существенными преимуществами ввиду их меньшей зависимости от изменений яркости почв, геометрических условий освещения и наблюдения, прозрачности атмосферы (Виноградов, 1984) и может рассматриваться как интегральный показатель фотосинтетической активности наземной растительности в связи с положительной корреляцией этих показателей

$$VI = f(\text{ХИ}, \text{PAR})\epsilon, \quad (1)$$

где ХИ — проективный запас хлорофилла в растительном покрове участка; PAR — поглощенная растительным покровом фотосинтетически активная радиация;  $\varepsilon$  — коэффициент, зависящий от структурных особенностей растительных сообществ, условий съемки и состояния атмосферы. Наиболее широко среди используемых спектрально-индексных индексов привлекается нормализованный разностный индекс состояния растительного покрова (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index). Расчет показателя выполняется как нормализованная разность яркости элементов изображения (пикселей) в видимом красном диапазоне (0.6–0.7 мкм, максимум поглощения фитомассой) и ближнем ИК (0.7–1.0 мкм, максимум отражения), что позволяет рассматривать NDVI как интегральный показатель фотосинтетической активности наземной растительности

$$NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED), \quad (2)$$

где NIR — отражение в ближней ИК-области спектра; RED — отражение в красной области спектра. Несмотря на основную роль хлорофилла в формировании спектральных свойств фитоценозов, большинство исследований, направленных на анализ распределения ХИ по спутниковым данным, в настоящее время связано с оценкой концентрации хлорофилла в водных экосистемах (Копелевич и др., 2006). Для наземных сообществ работы выполнялись преимущественно в моновидовых искусственных агроценозах (Сидько, Шевырнов, 1998; Gitelson et al., 2012; Peng et al., 2011). Чаще всего переход от спектральных показателей к физическим величинам характеристик фитоценозов проводится через показатель индекса листовой поверхности (LAI). Высокая корреляция между проективным содержанием хлорофилла и запасом наземной фотосинтетически активной фитомассы (Tieszen, Johnson, 1968), позволяет привлекать спектрально-индексные изображения и для оценки запаса наземной фитомассы различных регионов:

$$ХИ = \sum (P_{ph}c)_n, \quad (3)$$

где  $P_{ph}$  — биомасса автотрофных органов отдельных форм растений на единице площади;  $c$  — средняя концентрация хлорофилла в растениях. При выполнении подобных оценок требуется учитывать структурные особенности фитоценозов и спектр доминирующих жизненных форм их составляющих. Для сообществ, имеющих ярусную структуру или высокие значения наземной фитомассы, коррелятивные связи между показателями ослабевают (Голубятников, Денисеко, 2006). В большей степени данные зависимости прослеживаются в тундровой зоне, что связано с упрощением вертикальной структуры сообществ, снижением общего проективного покрытия, большим участием мхов и лишайников (Bliss, Matveyeva, 1992). Так, между величинами NDVI и

надземной фитомассой ( $г/м^2$ ) для циркумполярной области (по съемке AVHRR) зависимость представлена в виде экспоненциальных функций (Epstein et al., 2009; Reynolds et al., 2006; Walker et al., 2003). Для приморских лугов европейского северо-востока России, с упрощенной структурой сообществ и доминированием однолетних травянистых псаммофитов, зависимость имеет линейный вид (Елсаков, Щанов, 2005).

В настоящей работе нами рассмотрены возможности использования данных спектрально-индексных съемок для оценки распределения и анализа пространственно-временных изменений показателя ХИ в пределах различных фитоценозов территории Севера Евразии.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использование материалов спутниковых спектрально-индексных съемок сверхвысокого разрешения QuickBird (разрешение 2.44 м) для середины вегетационного периода (06.07.2007 г.) позволило выполнить анализ коррелятивной связи спектральных показателей и величин запаса хлорофилла. Запасы хлорофилла в тундровых сообществах оценивали по данным литературных источников (Tieszen, Johnson, 1968; Шмакова, 2006; Шмакова, Кудрявцева, 2002).

В качестве модельного участка рассматривали тундровые сообщества и редколесья территории восточной части Большеземельской тундры ( $67^{\circ}00' - 67^{\circ}06' \text{ с.ш.}, 54^{\circ}46' - 57^{\circ}00' \text{ в.д.}$ ). После выполнения геометрической коррекции и радиометрической калибровки для модельного участка была выполнена управляемая классификация с выделением доминирующих классов фитоценозов, проведен расчет средних для выделенного класса значений индекса NDVI.

Дополнительно для даты съемки в пределах модельного участка проводились измерения  $CO_2$ -поточков методами полевой газометрии с использованием ИК-газоанализатора LiCor-6200 (Небраска, США) (Елсаков, Марущак, 2011). Полученные результаты стали основой для выявления коррелятивных связей между величинами первичной продукции (GPP), NDVI и рассчитанными значениями ХИ.

Отсутствие достаточного количества разносезонных съемок QuickBird, их относительно высокая стоимость и редкая повторность диктуют необходимость привлечения для выполнения межгодовых и сезонных оценок изменений количественных показателей фитоценозов более доступных, но имеющих более низкое пространственное разрешение сенсоров. Для таких оценок в настоящее время широко привлекаются материалы более часто выполняемой съемки Landsat (Cohen, Goward, 2004), выполненной в идентичных спек-

тральных диапазонах (0.63–0.69 и 0.76–0.90 мкм), но с более низким пространственным разрешением (30 м). В ходе выполнения исследований был проведен анализ сопоставимости данных съемок сенсоров различного разрешения для одного периода наблюдений. Полученные после классификации сцен QuickBird контуры растительности использовали для выделения однородных по составу пикселов на сцене Landsat и анализа межгодовых изменений ХИ для доминирующих классов растительности. Пиксел считался однородным по классу, если 80% пространства пиксела составлял один класс земной поверхности по более высокому разрешению.

Вариабельность показателя проективного содержания хлорофилла в различные по погодным условиям годы демонстрирует возможность выявления и анализа трендов флуктуаций показателя для исследуемой территории. Особенности распределения индекса ХИ и его изменения в пределах отдельных географических зон на региональном уровне наблюдали, используя данные съемки спутника Terra-MODIS (MOD13Q1.005) с пространственным разрешением 0.25 км за период 2000–2011 гг. (источник данных: modis.gsfc.nasa.gov). Несмотря на снижение пространственного разрешения, использование материалов среднего разрешения, с одной стороны, устраняет шумы, вызванные влиянием микро- и мезорельефа, а их высокая временная повторяемость (2 раза в сутки) позволяет снизить влияние облачности. Алгоритм выполнения работы включал: 1) предварительную подготовку базы данных индекса NDVI по 16-дневным временным композитам (максимальные величины показателя за данный период), отбор наибольших значений показателя для каждого года наблюдений ( $NDVI_{MAX}$ ). Наиболее часто данные величины достигали максимальных значений для периода июль-август (12–15 композит); 2) выявление корреляции индекса между данными съемки спутника Terra-MODIS и QuickBird и пересчет величин  $NDVI_{MAX}$  в значения ХИ по разработанной модели. На основании полученных данных для каждого пиксела итогового изображения рассчитывали средний показатель максимального проективного содержания пигментов за период 2000–2011 гг. и тренд изменения показателя для всего временного интервала.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### *Спектральные вегетационные индексы в выявлении особенностей распределения проективного содержания хлорофилла и наблюдаемой продуктивности фитоценозов*

Для фитоценозов Северной Евразии прослеживается общая зависимость распределения по-

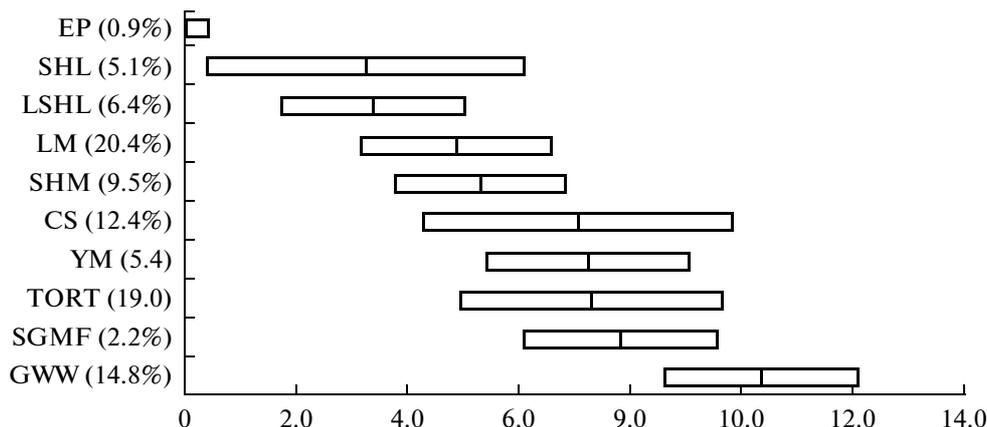
казателя ХИ на территории: величина данного показателя демонстрирует широтную зональность и снижается к северу от 35–40 кг/га в средней и южной тайге и лиственных лесах до 3–4 кг/га в тундре (Воронин и др., 1995; 2004). В лесных сообществах наибольшую долю (от 70 до 90%) в общем проективном содержании хлорофилла составлял первый ярус древостоя на уровне кронаобразующего слоя (Воронин и др., 1995). Поэтому использование дистанционных методов для определения ХИ лимитировано структурой сообществ и оценки целесообразно проводить для разреженных или одноярусных фитоценозов, не превышающих величины показателя 24 кг/га (Цельникер, Малкина, 1994).

Для тундровой зоны среднее значение проективного содержания хлорофилла в фитоценозах оценено в 3.5 кг/га (Воронин, 2006). Для тундр Аляски этот показатель варьирует от 3.2 до 7.7 кг/га (Tieszen, Johnson, 1968). В микрогруппировках горных тундр Хибин показатель изменялся от 3.3 до 9.7 кг/га, с переходом на уровень сообществ амплитуда варьирования снижалась до 4.1–6.6 кг/га (Шмакова, Кудрявцева, 2002).

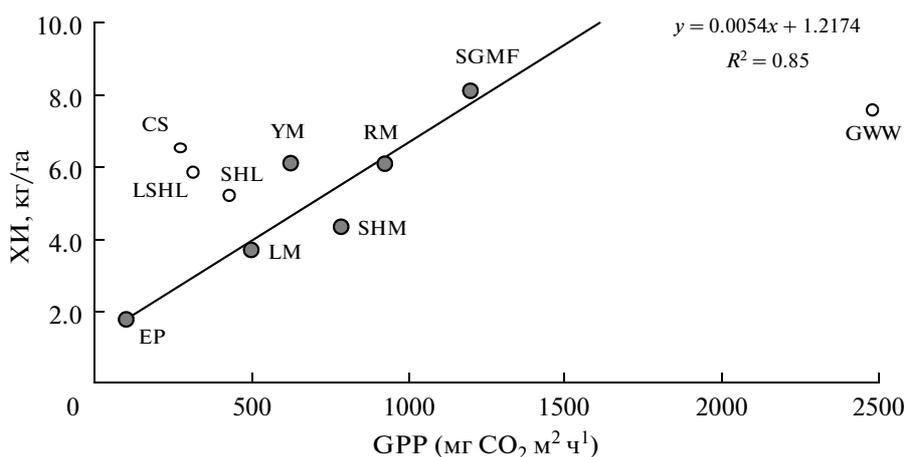
В рассмотренных авторами фитоценозах величина показателя снижается в следующем ряду: злаковые (11.8 кг/га) → кустарниковые/ерниковые (7.5–9.0 кг/га) → осоковые болота (7.7 кг/га) → воронично-ерниковые (5.8 кг/га) → разреженные ивняки (4.3 кг/га) → пушицево-моховые (4.2 кг/га) → кустарничково-моховые (3.6 кг/га) (Шмакова, 2006; Шмакова, Кудрявцева, 2002; Tieszen, Johnson, 1968).

Выполнение управляемой классификации спектрального спутникового изображения QuickBird позволило подготовить тематическую геоботаническую карту территории с выделением 11 классов земной поверхности. В районе выполненных полевых исследований, границы которого совпадали с границами сцены изображения ( $9 \times 10.9$  км), в составе растительного покрова доминировали лишайниково-моховые тундры (20.4% площади сцены), участки с березовыми редколесьями (19.0%) и ивняки (14.8%). В сумме данные сообщества локализованы на 54.2% площади изображения.

Привлечение опубликованных данных и материалов спутниковых измерений для смежных сообществ установило наличие линейной статистически значимой зависимости ( $y = 24.0x - 5.1$ ;  $n = 8$ ;  $r^2 = 0.86$ ;  $p = 0.01$ ) между величинами суммарного проективного содержания хлорофилла и спектральным вегетационным индексом NDVI. Полученная зависимость позволила экстраполировать значение показателя на все пикселы изображения и получить предварительные результаты по проективному содержанию хлорофилла, в том числе и для ранее не рассмотренных сообществ (рис. 1). Наиболее высокие показатели установлены для класса ивняков и приручейных лугов (среднее 10.3 кг/га). Отсутствие сомкнутого по-



**Рис. 1.** Распределение показателя ХИ в выделенных классах растительного покрова по результатам моделирования: EP – эродированные торфяники (eroded peat); SHL – кустарничково-лишайниковые (shrub lichen tundra); LSHL – кустарничково-лишайниковые (low shrub lichen tundra); LM – лишайниково-моховые (lichen-moss tundra); SHM – кустарничково-моховые (low shrub moss tundra); CS – пушицево-моховые (cotton grass swamp); YM – ерничково-моховые (yernik moss tundra); TORT – березовые редколесья (sparse *B. tortuosa*); SGMF – осоково-моховые (sedge moss fen); GWW – травяные ивняки (grass willow). Представлены средние значения  $\pm$  доверительный интервал ( $\bar{X} \pm tSx$ ,  $p < 0.05$ ), по оси ординат приведены значения встречаемости выделенных классов сообществ, %.



**Рис. 2.** Связь индекса ХИ и первичной продукции фитоценозов (GPP). Условные обозначения см. на рис. 1.

крова сосудистых растений и наличие единичных мхов на участках эродированных торфяников и песчаных раздувов определили наиболее низкие значения показателя в выделенных классах (менее 0.4 кг/га). Для нерассмотренных в литературе сообществ травяно-моховых редколесий с березой извилистой (*Betula tortuosa*) величина показателя составила 7.3 кг/га. Доминирующие в пределах рассмотренной территории классы растительности оказывают ключевое влияние на формирование средних значений показателя индекса по изображению. Для растительных сообществ территории (исключены водные объекты, участки, лишенные растительного покрова,  $ХИ > 0$ ) величина индекса

составила 6.4 кг/га. Водные поверхности занимали 3.8% площади снимка.

Сочетание методов полевой газометрии с использованием ИК-газоанализатора LiCor-6200 и данных QuickBird, для одного временного интервала, выполненные в смежных фитоценозах модельного участка, показало, что между первичной продукцией (GPP) и величинами рассчитанного ХИ для большинства конкретных участков прослеживаются значимые тесные положительные корреляции ( $n = 18$ ;  $r^2 = 0.85$ ;  $p = 0.01$ ) (рис. 2).

Порядка 60% рассмотренных сообществ удовлетворяют установленной линейной зависимости ( $p < 0.05$ ,  $N = 30$ ). Для остальных сообществ наблюдаемая интенсивность поглощения CO<sub>2</sub>

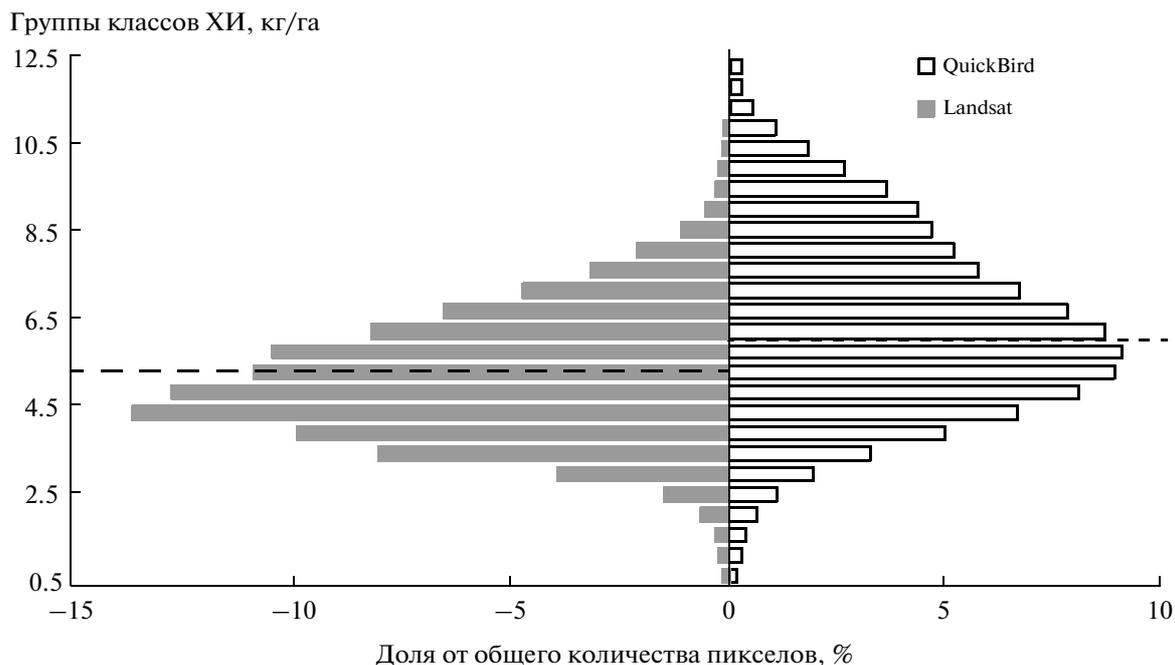


Рис. 3. Распределение значений классов ХИ для сцены Landsat и QuickBird для одного периода съемки. Пунктиром показаны средние значения по общему участку сцены ( $ХИ_{Landsat} = 5.0$  кг/га;  $ХИ_{QuickBird} = 6.1$  кг/га).

ниже (сообщество GWW – grass willow) и выше (LSHL – low shrub lichen tundra, SHL – shrub lichen tundra и CS – cotton grass swamp) ожидаемой. Выявленные различия могут быть обусловлены как суммарной природой регистрируемого отраженного излучения, характеризующего участок земной поверхности, так и спецификой видового состава рассмотренных фитоценозов, биологическими особенностями растений, составляющими суммарную фитомассу сообществ. Использование выявленной зависимости позволило экстраполировать результаты оценки распределения ХИ и GPP на прилегающие территории с построением тематических карт.

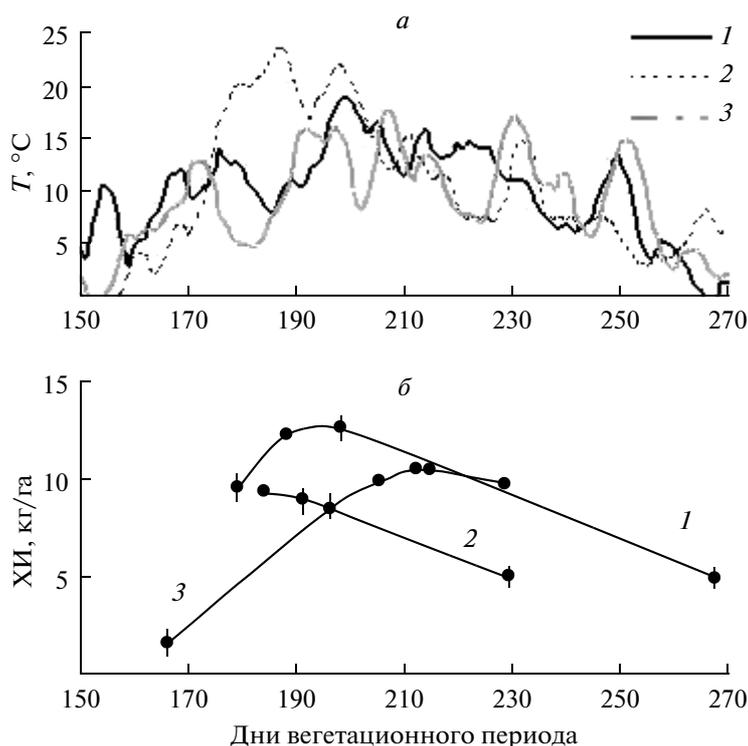
#### *Межгодовые и сезонные изменения проективного содержания хлорофилла по спектральным данным*

Сопоставление материалов, полученных для одного участка и времени съемки, сенсоров QuickBird (06.07.2007) и Landsat (03.07.2007) (рис. 3), показало, что в результате пространственной генерализации изображения наблюдается нивелирование крайних значений показателя на изображениях меньшего разрешения. Снижается вариабельность показателя, что вносит ошибку в выполнение сравнительного анализа количественных характеристик мозаичных участков и малых по площади фитоценозов. Однако, несмотря на занижение средних значений (общее по всей сцене:  $ХИ_{Landsat} = 5.0$  кг/га;  $ХИ_{QuickBird} = 6.1$  кг/га; для пикселей рас-

чительного покрова ( $ХИ > 0$ )  $ХИ_{Landsat} = 5.1$  кг/га;  $ХИ_{QuickBird} = 6.4$  кг/га), использование сцен Landsat целесообразно.

Анализ сезонных изменений индекса ХИ, выполненный для однородных по составу классов по сцене Landsat, показал, что вариабельность показателя определяется сезонными особенностями вегетационного периода и погодными условиями лет наблюдений. Несмотря на эпизодичность съемок Landsat, существенно затрудняющую анализ, общая оценка сезонных изменений параметра демонстрирует наличие существенной вариабельности. Максимальные значения показателя проективного содержания хлорофилла для разных лет не совпадают и определяются в большей степени температурными характеристиками первой части вегетационного периода (рис. 4). Так, для ивняков травяных максимумы проективного содержания хлорофилла смещались между годами на 14–30 дней. При более раннем наступлении вегетационного периода и сохранении теплого периода в 2007 г. содержание показателя достигает максимальных значений в более ранние сроки (к 3 июля). Несмотря на вариабельность ХИ в различающиеся по климатическим особенностям годы, сообщества обнаруживают сходство по величине ХИ в периоды с одинаковыми климатическими условиями. Для отдельных лет отклонение запаса хлорофилла от среднего показателя составило 2.5–17%.

Полученные результаты показывают, что точная оценка количественных значений и трендов



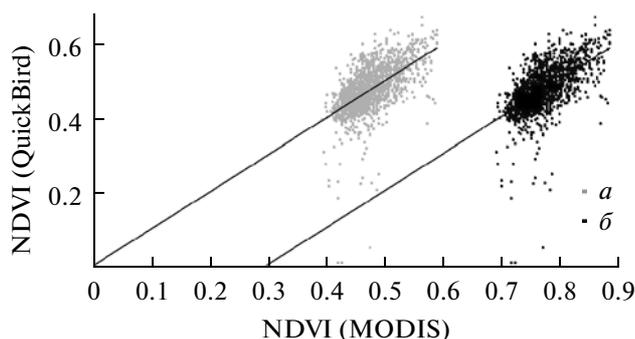
**Рис. 4.** *а* – Динамика усредненных за пять дней среднесуточных температур воздуха района исследований (м/ст. Воркута); *б* – изменения индекса ХИ в течение вегетационного периода для класса ивняков травяных по данным сенсоров разносезонных/разногодовых сцен Landsat-5 TM (1 – 2000 г.; 2 – 2007 г.; 3 – 2009 г.).

изменения индекса для доминирующих сообществ по данным съемки Landsat в настоящее время затруднена в силу ряда причин. Во-первых, возможно существенное смещение сроков наступления фенологических событий для лет с различающимися климатическими условиями. Влияние может оказывать и выраженная сезонная динамика содержания пигментов в растениях криолитозоны (Петров и др., 2010; Golovko et al., 2011). Поэтому выбор одних дат съемки не позволяет выполнить корректной оценки таких изменений. Во-вторых, при проведении количественных сравнений характеристик фитоценозов по оптическим спутниковым данным с разными датами, но со сходными по фенологическим особенностям развития растений параметрами, не исключена возможность регистрации изменений, обусловленных сезонными изменениями положения зенитного угла Солнца (Елсаков, Тетерюк, 2012). Данные ограничения могут быть устранены в ближайшее время с вводом в эксплуатацию новых спутниковых систем наблюдения Sentinel-2, развертываемых в рамках программы GMES (Global Monitoring for Environment and Security), и обеспечивающих возможность частых повторных съемок с интервалом в 2–3 дня.

#### *Величины ХИ для оценки трендов климатически обусловленной трансформации растительных сообществ Севера Евразии*

Анализ сходимости величин индекса NDVI по данным сенсоров MODIS и QuickBird для одной даты съемок, выполнен приведением съемки QuickBird к пространственному разрешению MODIS. Значение итогового пиксела, доведенного до размера MODIS, было рассчитано как среднее значение всех включенных в него величин пикселов QuickBird. Несмотря на наличие смещения величин в сторону увеличения значений индекса для данных MODIS, между величинами индекса, полученными разными сенсорами, наблюдали значимую среднюю по силе корреляционную зависимость ( $y = 0.997x - 0.293$ ;  $n = 1924$ ;  $r^2 = 0.60$ ;  $p = 0.001$ ) (рис. 5б). Наибольшие расхождения между величинами отмечены для участков с расположенными на них водными объектами.

Полученные линейные зависимости использовали для приведения данных съемок MODIS (значения  $NDVI_{MAX}$  разных лет) в сопоставимые со значениями QuickBird (рис. 5а) и для последующего расчета значений ХИ с привлечением ранее установленной по данным съемки QuickBird зависимости.



**Рис. 5.** Сходимость величин индекса NDVI, полученных по данным съемок MODIS и QuickBird, выполненных на одну дату: *a* – после выполнения процедуры коррекции; *б* – до ее выполнения.

Использование данных съемки Terra-MODIS показало, что распределение индекса ХИ связано с общими закономерностями распределения растительного покрова на территории Северной Евразии и отражает современную континентальную зональность, определяемую климатическими, геокриологическими и мерзлотными условиями отдельных регионов, их орографическими особенностями (рис. 6*a*). С другой стороны, демонстрирует исторические особенности расположения и деградации многолетнемерзлых пород и возможные изменения южных границ криолитозоны в современных климатических условиях. Для восточно-европейских тундр с “вялой, теплой” мерзлотой (Астахов, Свенсен, 2011) проективное содержание хлорофилла в среднем выше, чем на территории Зауралья, и представлено для участков одинаковых типов растительности (выделенных по: (Базилевич, 1993)) в диапазоне значений  $5.7 \pm 1.6$  кг/га ( $X \pm SD$ ). Для фрагмента Западно-Сибирских тундр той же широты значения показателя ниже и составляют  $3.2 \pm 1.6$  кг/га. Современные климатические условия северо-востока Русской равнины отличает большая океаничность климата, что сказывается на меньшей протяженности климатических и геокриологических зон, здесь представлены преимущественно южные субарктические тундры. Немаловажное значение на сохранение в восточных регионах реликтовых многолетнемерзлых пород (ММП) оказывает и влияние более морозного и континентального климата, в то время как в регионах Европейского северо-востока оно относительно неблагоприятно и определяется прежде всего незначительной льдистостью горных пород, слагающих эти регионы (Баулин и др., 1981).

Оценка средней величины связывания атмосферного углерода различными фитоценозами тундры варьирует от 100 (Шмакова, 2006) до 314 кгС/кг хлорофилла в год (Воронин, 2006).

Перерасчет величин ХИ позволяет оценить особенности распределения фотосинтетического стока углерода в пределах исследованного региона, выполнить перерасчет в показатели биомассы и может активно использоваться при выполнении землеустроительных работ на пастбищах северного оленя. Однако при анализе влияния ценологических, зональных и ландшафтных условий на распределение фитомассы по материалам спутниковых съемок необходимо учитывать и структурные особенности фитоценозов. Так, южные тундры характеризуются значительным участием зеленых частей – преимущественно мхов и лишайников (до 40%) и одревесневевших надземных частей кустарников и кустарничков (35–40%) (Базилевич, 1993).

Согласно резервуарно-поточковой модели продукционного процесса (Воронин, 2006), растения могут быть разделены на донорную (фототрофную) и акцепторную (гетеротрофную) части, объединенные проводящей системой. Следовательно, и растительные сообщества в целом могут быть рассмотрены как составленные из комбинаций автотрофных/гетеротрофных частей. Данные спектральной съемки отражают преимущественно параметры, формирующиеся донорными частями растений. Для большинства тундровых сообществ, составленных в основном однолетними растениями, модель упрощена, и первичная продукция фотосинтеза (NPP) достаточно тесно связана с фотосинтетическим стоком углерода (*Ph*). Большинство таких сообществ описывается уравнением, представленным на рис. 2.

Сравнение полученных значений с результатами, установленными ранее для района Воркутинского мерзлотного стационара (Елсаков, 2003), показало, что интенсивность ожидаемого поглощения  $CO_2$ , оцененная по запасам надземной фитомассы, выше наблюдаемого в сообществах с доминированием в фитомассе растений акцепторной части. Так, для сообществ SGMF (sedge moss fen) с менее сомкнутой осокой водной (*Carex aquatilis*) за вегетационный сезон около 59%  $CO_2$  аккумулируется в надземной фитомассе. Из них в надземной биомассе сосудистых растений за вегетационный период аккумулируется 14.5% углерода (12.1% – в массе *C. aquatilis*), во мхах – 44.5%. С ростом уровня мохового покрова модельных площадок и плотности мохового слоя увеличивается количество углерода, ассимилированного в моховом слое. Для пушицево-мохового (CS – cotton grass swamp) и мохового сообществ данные величины составили 74.2 и 87.2% соответственно. Вместе с тем снижаются доля углерода, запасенного в надземной биомассе сосудистых растений (6.1 и 3.5%), и доля “неучтенного” запаса углерода (19.8 и 9.3%). В кустарничково-моховом и кустарничково-лишайниково-моховом сообществах зе-

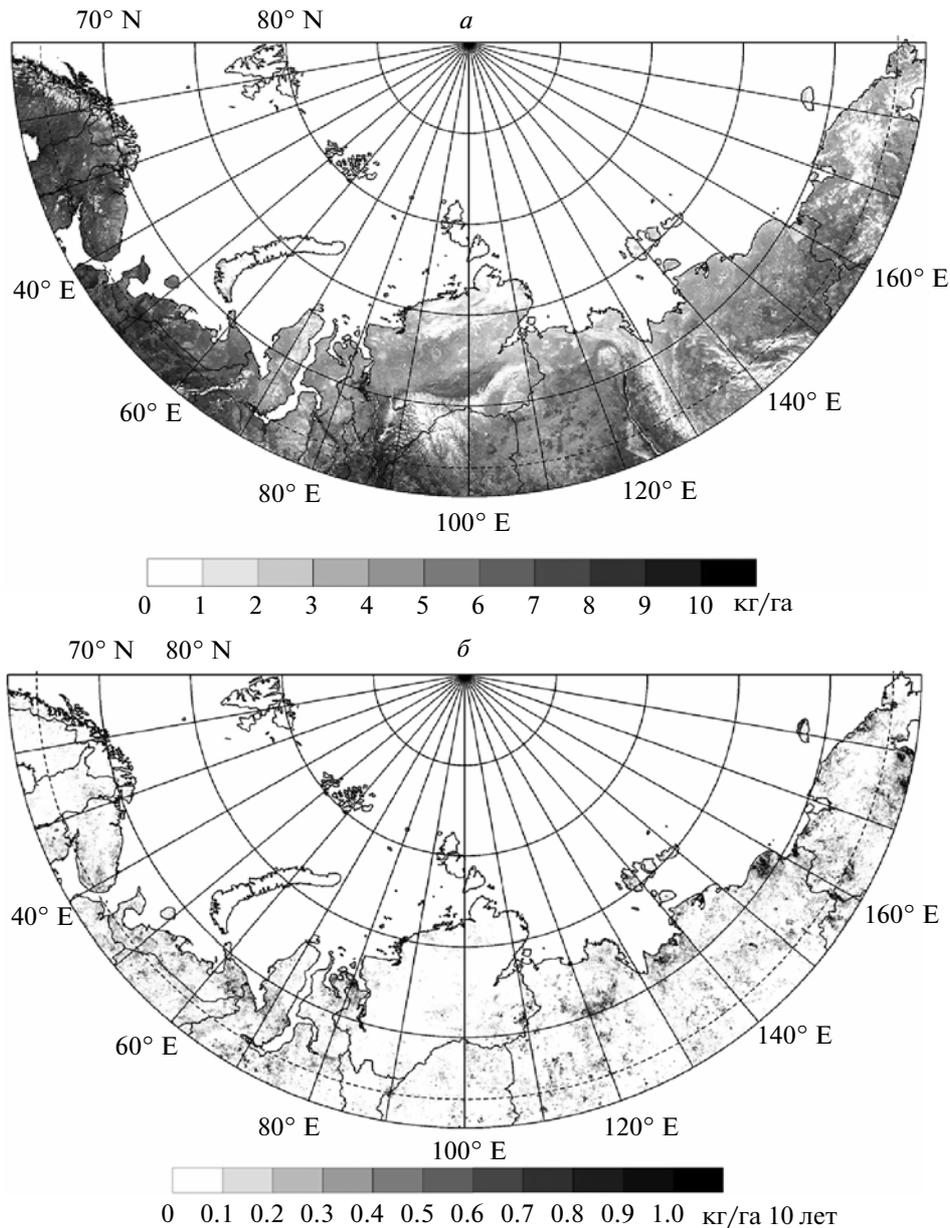


Рис. 6. *a* – Распределение средних значений ХИ на территории Северной Евразии по материалам спутниковых данных MODIS; *б* – тренды роста показателя для периода 2000–2011 гг.

ленные части сосудистых растений депонируют 5.7 и 17.5% углерода от NPP.

Анализ межгодовой вариабельности значений и обобщенного тренда изменений ХИ показал, что динамика показателя в пределах Северной Евразии имеет территориально неоднородную структуру и во многом зависит от распределения ММП. Несмотря на наличие межгодовых погодных изменений, ответная реакция показателя выражена на территории незначительно, что определяется влиянием сглаживающего эффекта мерзлых толщ, находящихся в равновесном состоянии

с усредненными климатическими параметрами нескольких лет.

Более суровые мерзлотные условия Зауралья, сформированные в континентальных областях, в меньшей степени подвержены климатическим влияниям. Отмеченные нами участки устойчивых изменений, по-видимому, маркируют территории с перестройками мерзлотно-климатических условий. Они преимущественно связаны с быстрым развитием ивняков (аэровизуальные наблюдения) на территориально сопряженных участках в районах сплошного распространения многолетнемерзлых пород (рис. 6б). Сопоставление полученных

результатов с ранее выполненными наблюдениями за временными изменениями криогенных ландшафтов территории (Елсаков, Марушак, 2011) позволяет соотнести рост продуктивности фитоценозов на отдельных участках с увеличением глубины протаивания сезонно-талого слоя и ростом температуры верхней кровли ММП, отмечаемым в последние десятилетия (Природная ..., 2005).

Наиболее существенный рост показателей ХИ (0.07–0.1 кг/га за год) соответствует увеличению аккумуляции углерода в биомассе с интенсивностью от 7 до 30 кгС/га в год. Участки интенсивного роста показателя не формируют ярко выраженного широтного пояса, их расположение подчинено скорее региональным особенностям. Данные территории спорадически расположены и отмечены на Европейском Севере (восток Кольского п-ова, в Малоземельской и Большеземельской тундрах на участках сквозных таликов, на Пай-хое), Западной (южная часть п-ва Ямал и восток Гыданского п-ова), Средней (среднее течение р. Оленек) и Восточной Сибири (восток Яно-Индигирской тундры и Колымская тундра), ряде арктических островов (север о-ва Врангеля и восток о-ва Котельный).

Выявленные участки роста показателя ХИ приурочены к территориям, испытывающим наиболее существенные изменения. Так, для Нижнеколымского района (пастбища общины “Турваургин”) отмечено катастрофическое сокращение и деградация пастбищных угодий северного оленя (до 30% территории), связанная с быстрым распространением кустарников (Шадрин, 2009). Анализ ценотической активности и видового богатства широтных географических элементов видов сосудистых растений и лишайников разных ценофлор позволил зафиксировать увеличение влажности и уменьшение тепла в ерниково-кустарничково-лишайниково-моховых и дриадовых тундрах (в подзоне южных тундр) Ямала (Телятников, 2002).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты демонстрируют широкие возможности использования материалов спектрозональных спутниковых съемок для количественной оценки распределения показателя ХИ и анализа его сезонных и межгодовых изменений на уровне отдельных фитоценозов, типов растительности и ботанико-географических зон. Привлечение сцен съемки разных лет позволяет установить интенсивность и направленность временных трансформаций фитоценозов (динамическое картографирование), выделить роль ландшафтных (фациальных), геоморфогенных и климатогенных условий в формировании углеродного баланса экосистем, проследить пространственные закономерности его формирования на уровне отдельных регионов. Вместе с тем фрагментарность

полевых геоботанических и экологических исследований, выполненных для различных регионов территории, затрудняет корректную оценку зональных и долготных различий характеристик фитоценозов. Это диктует необходимость организации региональных баз данных показателя с учетом изменений сезонных и пространственно-временных характеристик.

Для большинства рассмотренных зон отмечена стабильность показателя развития в условиях невысокой межгодовой флуктуации. Однако полуоченные результаты демонстрируют и наличие трендов изменения фитоценозов арктического региона, связанных с флуктуацией климата. Использование показателя ХИ как косвенного признака позволяет оценить изменения продуктивности фитоценозов. Вариабельность величин показателя маркирует наличие участков, реагирующих на глобальные изменения, и позволяет выделить территории, испытывающие существенные перестройки в связи с изменением криогенных условий.

Работа выполнена в рамках выполнения программы научных исследований Уральского отделения РАН “Реакция экосистем криолитозоны Европейского Севера и Западной Сибири на климатические флуктуации последних десятилетий” (12-С-4-1018).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Астахов В.И., Свенсен Й.И.* Покровная формация финального плейстоцена на крайнем северо-востоке европейской России // Региональная геология и металлогения. 2011. № 47. С. 12–27.
- Базилевич Н.И.* Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.
- Баулин В.В., Данилова Н.С., Суходольская Л.А.* История развития многолетнемерзлых пород на территории СССР и методы ее изучения // История развития многолетнемерзлых пород Евразии. М.: Наука, 1981. С. 24–40.
- Виноградов Б.В.* Аэрокосмический мониторинг экосистем. М.: Наука, 1984. 320 с.
- Воронин П.Ю.* Хлорофильный индекс и фотосинтетический сток углерода Северной Евразии // Физиология растений. 2006. Т. 53. № 5. С. 777–785.
- Воронин П.Ю., Ефимцев Е.И., Васильев А.А., Ватковский О.С., Мокроносов А.Т.* Проективное содержание хлорофилла и биоразнообразие растительности основных зон России // Физиология растений. 1995. Т. 42. № 2. С. 295–302.
- Воронин П.Ю., Коновалов П.В., Болондинский В.К., Кайбияйнен Л.К.* Хлорофильный индекс и фотосинтетический сток углерода в леса Северной Евразии // Физиология растений. 2004. Т. 53. № 5. С. 777–785.
- Голубятников Л.Л., Денисенко Е.А.* Взаимосвязь вегетационного индекса с климатическими параметрами и структурными характеристиками растительного покрова // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 4. С. 524–538.

- Елсаков В.В.* Аккумуляция азота и углерода наземной массой растений в сообществах Большеземельской тундры. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2003. № 461. 28 с.
- Елсаков В.В., Марущак И.О.* Межгодовые изменения термокарстовых озер Северо-востока Европейской России // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 5. С. 45–57.
- Елсаков В.В., Марущак М.* Спектрональные данные в оценке аккумуляции углерода фитоценозами Воркутинской тундры // Резервуары и потоки углерода в лесных и болотных экосистемах бореальной зоны. Сыктывкар, 2011. С. 40–41.
- Елсаков В.В., Тетерюк Л.В.* Спутниковые изображения в изучении влияния рельефа на формирование флористического своеобразия фитоценозов карстовых ландшафтов европейского северо-востока России // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 3. С. 78–93.
- Елсаков В.В., Щанов В.М.* Особенности спектральных характеристик приморских лугов восточного побережья Малоземельской тундры // Биоразнообразие наземных и водных экосистем охраняемых территорий Малоземельской тундры и прилегающих регионов. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2005. № 178. С. 5–20.
- Копелевич О.В., Буренков В.И., Шеберстов С.В.* Разработка и использование региональных алгоритмов для расчета биологических характеристик морей России по данным спутниковых сканеров цвет // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. 2006. Вып. 3. Т. 2. С. 99–105.
- Петров К.А., Софронова В.А., Чепалов В.А., Перк А.А., Максимов Т.Х.* Сезонные изменения содержания фотосинтетических пигментов у многолетних травянистых растений криолитозоны // Физиология растений. 2010. Т. 57. № 2. С. 192–199.
- Природная среда в условиях открытой разработки угля (на примере Юньягинского месторождения) / Под ред. М.В. Гецен. Сыктывкар, 2005. 246 с.
- Сидько А.Ф., Шевырнов А.П.* Изучение сезонной зависимости спектральной яркости посевов сельскохозяйственных культур от содержания хлорофилла и физиологических параметров растений // Исслед. Земли из космоса. 1998. № 3. С. 96–105.
- Телятников М.Ю.* Растительный покров как индикатор изменений климата в субатлантическую фазу голоцена (на примере субарктических тундр полуострова Ямала) // Сибирский экол. журн. 2002. Т. 9. № 4. С. 461–472.
- Цельникер Ю.Л., Малкина И.С.* Хлорофильный индекс как показатель годичной аккумуляции углерода деревьями леса // Физиология растений. 1994. Т. 41. № 3. С. 325–330.
- Шадрин В.И.* Коренные народы в условиях изменения климата (на примере народов Севера Якутии) // Вопросы истории и культуры северных стран и территорий. 2009. Т. 2. № 6. С. 95–101.
- Шмакова Н.Ю.* Формирование и трансформация органического вещества в растительных сообществах горной тундры Хибин: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Петрозаводск, 2006. 40 с.
- Шмакова Н.Ю., Кудрявцева О.В.* Сравнительная оценка листового и хлорофилльного индексов для определения годичной продукции органического вещества в сообществах горной тундры Хибин // Ботанический журн. 2002. № 3 Т. 87. С. 85–98.
- Bliss L.C., Matveyeva N.V.* Circumpolar Arctic Vegetation // Arctic ecosystems in a changing climate. An ecophysiological perspective / Eds. F.S. Chapin, R.L. Jefferies, J.F. Reynolds, G.R. Shaver, J. Svoboda, E.W. Chu. San-Diego, CA: Academic Press, 1992. P. 59–89.
- Cohen W., Goward S.* Landsat's role in ecological applications of remote sensing // Biosci. 2004. V. 54. № 6. P. 535–545.
- Epstein H.E., Walker D.A., Raynolds M.K., Kelley A.M., Jia G.J., Ping C.L., Michaelson G.J.* Vegetation biomass, leaf area index, and NDVI patterns and relationships along two latitudinal transects in arctic tundra // AGU Fall Meeting. San Francisco, CA. 2009. № 90:GC31A-0697.
- Golovko T., Dymova O., Yatsco Y., Tabalenkova G.* Photosynthetic Pigments Apparatus in the Northern Plants // Handbook of plant and crop stress. 3d Edition / Eds. M. Pessarakli. N.Y.: Marcel Dekker, Inc., 2011. P. 391–405.
- Gitelson A.A., Peng Y., Masek J.G., Rundquist D.C., Verma Sh., Suyker A., Baker J.M., Hatfield J.L., Meyers T.* Remote estimation of crop gross primary production with Landsat data // Rem. Sens. Env. 2012. V. 121. P. 404–414.
- Huemrich K.F., Gammon J.A., Tweedie C.E., Oberbauer S.F., Kinoshita G., Houston S., Kuchy, Hollister R.D., Kwon H., Mano M., Harazono Y., Webber P.J., Oechel W.C.* Remote sensing of tundra gross ecosystem productivity and light use efficiency under varying temperature and moisture conditions // Rem. Sens. Env. 2010. V. 114. P. 481–489.
- Peng Y., Gitelson A.A., Keydan G., Rundquist D.C., Moses W.* Remote estimation of gross primary production in maize and support for a new paradigm based on total crop chlorophyll content // Rem. Sens. Env. 2011. V. 115. P. 978–989.
- Prince S.D., Goward S.N.* Global primary production: a remote sensing approach // J. Biogeogr. 1995. № 22. С. 815–835.
- Puma I.P., Philippi Th.E., Oberbauer S.F.* Relating NDVI to ecosystem CO<sub>2</sub> exchange patterns in response to season length and soil warming manipulations in arctic Alaska // Rem. Sens. Env. 2007. V. 109. № 2. P. 225–236.
- Raynolds M.K., Walker D.A., Maier H.A.* NDVI patterns and phytomass distribution in the circumpolar Arctic // Rem. Sens. Env. 2006. V. 102. P. 271–281.
- Tieszen L.L., Johnson P.L.* Pigment Structure of Some Arctic Tundra Communities // Ecology. 1968. V. 49. № 2. P. 370–373.
- Walker D.A., Epstein H.E., Jia J.G., Balsler A.W., Copass C., Edwards E.J., Gould W.A.* Phytomass, LAI, and NDVI in northern Alaska: Relationships to summer warmth, soil pH, plant functional types, and extrapolation to the circumpolar Arctic // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. d2:8169.

## Use of the Satellite Data in Chlorophyll Index Investigation at Tundra Communities

V. V. Elsakov

*Institute of Biology, Komi Scientific Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar*

The publication analyze possibility of different spatial resolution satellite data using for estimation of spatial and temporal features of chlorophyll index at dominant tundra communities. The average chlorophyll index content at tundra communities of European south hypoarctic zone was 6.4 kg/ha. The MODIS satellite data for 2000–2011 demonstrate main geographic regularities of index distribution and changes related with climate fluctuation of last years.

**Keywords:** chlorophyll index, remote sensing methods, climatic changes

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ  
КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ОЦЕНКА СТРУКТУРЫ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА  
И ЕГО АНТРОПОГЕННОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ  
КОСМОСНИМКОВ QUICKBIRD (НОВОСИБИРСКИЙ АКАДЕМГОРОДОК)

© 2013 г. Н. Н. Лашинский<sup>1</sup>, И. Д. Зольников<sup>2, 3</sup>, Н. В. Глушкова<sup>2, 3</sup>

<sup>1</sup>Центральный сибирский ботанический сад Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск

<sup>2</sup>Институт геологии и минералогии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск

<sup>3</sup>Новосибирский государственный университет

E-mail: nnl630090@gmail.com; zol@igm.nsc.ru; hope@igm.nsc.ru

Поступила в редакцию 27.04.2012 г.

На примере лесных массивов Новосибирского Академгородка разработана методика картографирования лесов посредством обработки космоснимков высокого пространственного разрешения. Основой методики являются управляемые классификации по летнему и осеннему космоснимкам QuickBird, оверлейные операции и плотностной сеточный анализ. В результате созданы схемы плотности леса, а также количественного соотношения хвойных и лиственных пород деревьев. При сравнении с геоботанической картосхемой, построенной традиционными методами, выявлены преимущества дистанционной методики (точность контуров, объективный характер оценки сомкнутости крон, соотношения лиственных и хвойных пород деревьев) и ее ограничения. Предложенная технология не заменяет, а дополняет и количественно уточняет стандартную методику. Сопряженный анализ полученной интегральной картосхемы лесов с геолого-геоморфологической картой местности обеспечивает возможность выявления связей между геоморфологическими особенностями территории, составом поверхностных отложений и структурой древостоев, что позволяет оценить степень антропогенной трансформации природных лесных экосистем. Это в свою очередь может использоваться для организации экосистемного мониторинга.

**Ключевые слова:** картографирование лесных массивов, дистанционное зондирование, ГИС-технологии, космоснимки высокого разрешения

DOI: 10.7868/S020596141206005X

## ВВЕДЕНИЕ

В представленной работе космические снимки высокого пространственного разрешения QuickBird использовались для картирования лесов Академгородка г. Новосибирск при оценке современного состояния лесных массивов. Новосибирский Академгородок располагается на правом берегу р. Обь в двадцати километрах к югу от города Новосибирска (рис. 1). При его строительстве был применен метод диффузной застройки, основой которого является взаимопроникновение жилых и рабочих кварталов и больших массивов нетронутых природных насаждений (Природа ..., 2007). Очевидно, что дальнейшая застройка этой территории должна планироваться так, чтобы кардинально не трансформировать ситуацию, исказив изначальную концепцию экополиса. Для этого необходимо не только качественно, но и количественно оценивать соотношение природной и антропогенной составляющих в сложившейся

экосистеме как в настоящий момент, так и на перспективу.

Правобережная часть Новосибирска размещена на территории Томь-Колыванской зоны Алтае-Саянской складчатой области, а левобережная часть – на территории Западно-Сибирской плиты (Мартынов и др., 1977). Эту границу фиксирует р. Обь, русло которой расположено вдоль региональной разломной зоны. Таким образом, Академгородок находится на периферии Алтае-Саянской складчатой области. Основу естественного растительного покрова территории Академгородка составляют леса. По преобладающим видам деревьев можно выделить пять лесных формаций: сосновые леса, смешанные березово-сосновые леса, березовые леса из березы повислой, березовые леса из березы пушистой и осиново-березовые леса. В зональном отношении леса Академгородка расположены в подзоне лесостепи на стыке с подпоясом горной подтайги (Куминова, 1963). Высокая облесенность территории, по сравне-

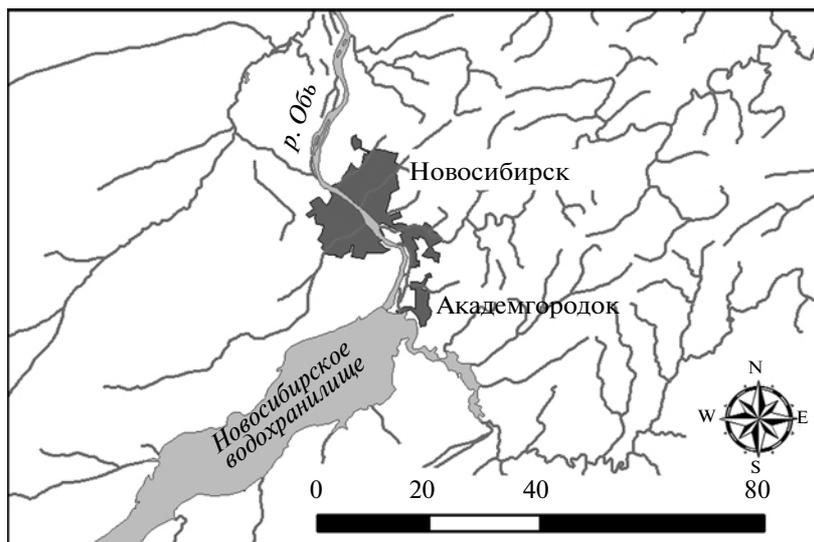


Рис. 1. Местоположение Новосибирского Академгородка.

нию с зональным окружением, связана с близостью р. Обь и песчаными почвами на древних речных террасах. Большинство лесов, особенно сосновых, окружающих Академгородок, связаны с феноменом Приобских боров — массивов сосновых и смешанных лесов, протянувшихся цепочкой по долине Оби через всю лесостепную подзону.

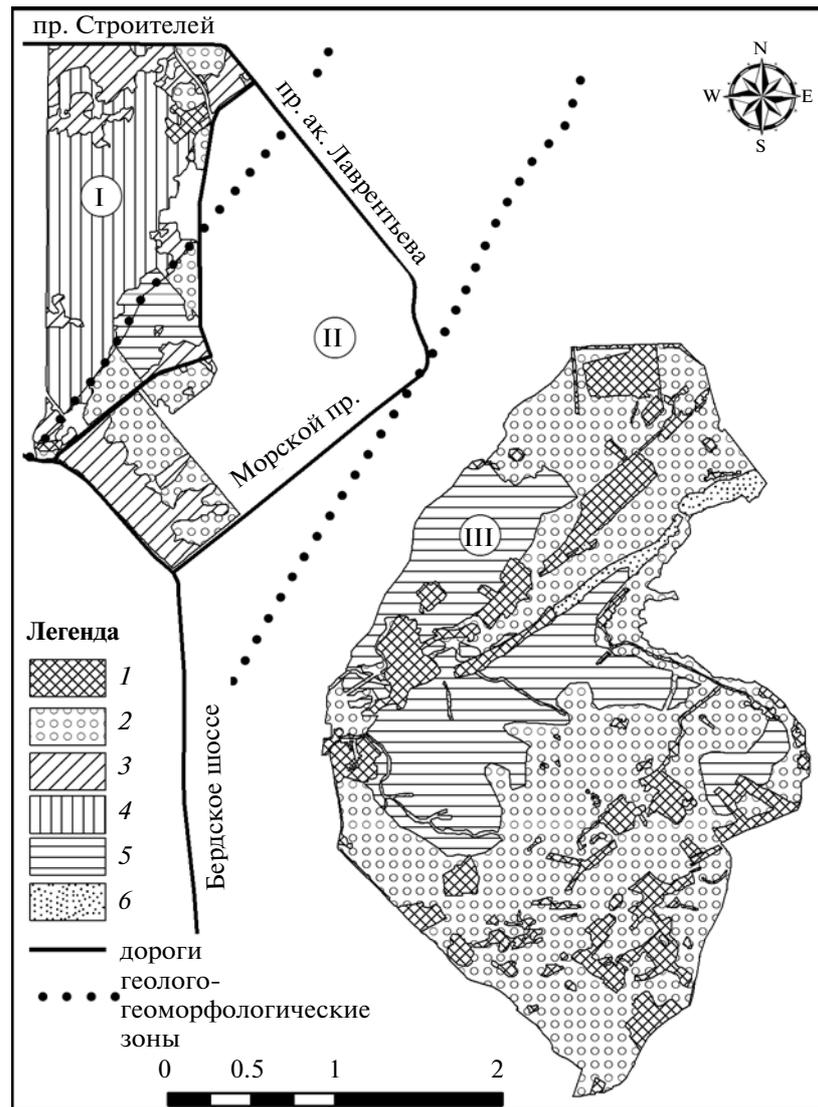
Для оценки современного состояния лесных массивов Академгородка были выполнены картосхемы растительности в двух вариантах. Первый вариант реализован по традиционной технологии с использованием наземного обследования и выделов, представленных в материалах лесоустройства. Второй вариант был построен на основе обработки космических снимков датчика QuickBird с применением программных продуктов ENVI и ArcMap. Космоснимки QuickBird имеют пространственное разрешение 2.4 м в многозональном режиме и 0.61 м в панхроматическом; охватывают видимый и ближний инфракрасный диапазон (0.45–0.9 мкм). В работе использовались снимки летнего и осеннего сезонов съемки 2008 г. многозонального режима.

#### МЕТОДИКА СОСТАВЛЕНИЯ КАРТОСХЕМ

Сотрудники Центрального сибирского ботанического сада (ЦСБС) СО РАН на основе наземного обследования территории и данных лесоустройства создали картосхему растительности Академгородка, основанную на традиционном эколого-фитоценологическом подходе. Геоботанические описания, выполненные на местности по стандартной методике, были расклассифицированы по доминантам различных ярусов, слагающих сообщества, и нанесены на картосхему по координатам, отмеченным с помощью GPS. Гра-

ницы контуров уточнялись с использованием выделов лесоустроительной карты. Легенда полуценной картосхемы, включавшая 16 элементов, различающихся по доминантам древостоя и напочвенного покрова, была генерализована до шести основных классов, основанных преимущественно на доминантах древесного яруса (рис. 2). Все сообщества, испытавшие глубокую антропогенную трансформацию (лесные культуры различных древесных пород, как местных, так и интродуцированных, луга и залежи на месте пахотных земель, декоративные и коллекционные посадки) были отнесены к одному классу легенды. Другой класс составили кустарниковые заросли по долине р. Зырянка. Четыре оставшиеся класса легенды распределились между четырьмя лесными формациями: сосновых лесов; мелколиственных (березовых и осиновых) лесов; смешанных лесов с преобладанием хвойных; смешанных лесов с преобладанием лиственных деревьев.

В Новосибирском региональном центре геоинформационных технологий была разработана технология автоматической классификации снимка высокого разрешения QuickBird для оценки плотности леса и количественного соотношения хвойных и лиственных пород деревьев (Глушкова и др., 2010). Технология (рис. 3) состоит в управляемой классификации (правилом максимального правдоподобия) снимков осеннего и летнего сезонов съемки. Летний снимок использовался для обнаружения участков леса (как хвойного, так и лиственного). Осенний снимок использовался для выделения хвойных деревьев (поскольку лиственные породы деревьев сбросили листву). Полученные классы конвертировались в векторные слои. Для того чтобы выделить из вектора крон всего леса лиственные и хвойные деревья, прово-



**Рис. 2.** Картосхема растительности, созданная сотрудниками ЦСБС СО РАН. Условные обозначения: 1 – антропогенно трансформированная растительность (лесные культуры, луга, залежи и т.п.); 2 – мелколиственные (берзовые и осиновые) леса; 3 – смешанные берзово-сосновые леса с преобладанием хвойных; 4 – естественные сосновые кустарничково-травянистые леса; 5 – смешанные сосново-берзовые леса с преобладанием лиственных деревьев; 6 – ивовые заросли по долинам ручьев. Геолого-геоморфологические зоны: I – древние надпойменные террасы, II – водораздельное плато, III – делювиальный шлейф.

дидась оверлейная операция (в программном продукте ArcGis). В результате были получены два типа объектов: кроны хвойных деревьев и кроны лиственных деревьев. Для оценки удельного вклада каждого типа объектов использовались плотностные сетки. Схемы плотностного распределения позволяют выделять интервалы процентного содержания для каждого компонента отдельно и оконтуривать комплексные выделы с определенными типами соотношения компонентов (Зольников и др., 2005; Лямина и др., 2009). Были построены две плотностные сетки (размер ячейки 2.5 м, радиус 50 м) по распределению: а) кроны хвойного леса (осеннего снимка),

б) кроны всего леса (летнего снимка). На основе плотностной сетки всего леса была построена схема густоты леса Академгородка. Схема соотношения хвойных и лиственных пород деревьев была получена путем деления плотностной сетки кроны хвойных деревьев на сетку плотности всех кроны. В результате получили области распространения хвойных лиственно-хвойных, хвойно-лиственных и лиственных лесов (рис. 4). На конечном этапе была создана интегральная схема распределения лесов как по густоте–разреженности, так и по соотношению хвойных и лиственных пород. Для этого созданные выше плотностные схемы конвертировались в векторный фор-



Рис. 3. Технологическая схема построения картосхем густоты и породного соотношения леса.

мат с последующим проведением оверлейной операции. Заверка результатов проводилась в полевых условиях и при дешифрировании геоботаниками эталонных участков на космоснимках. Максимальная погрешность компьютерного определения сомкнутости крон и удельного соотношения пород деревьев в радиусе окна (для нашего случая – 50 м) не превышает  $\pm 5\%$ . Максимальная погрешность макровизуального определения этих параметров геоботаниками иногда может достигать  $\pm 15\%$ . Таким образом, при сравнении результатов на тестовых полигонах был сделан вывод, что погрешность определения контуров при компьютерной обработке дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) значительно выше, чем традиционными способами.

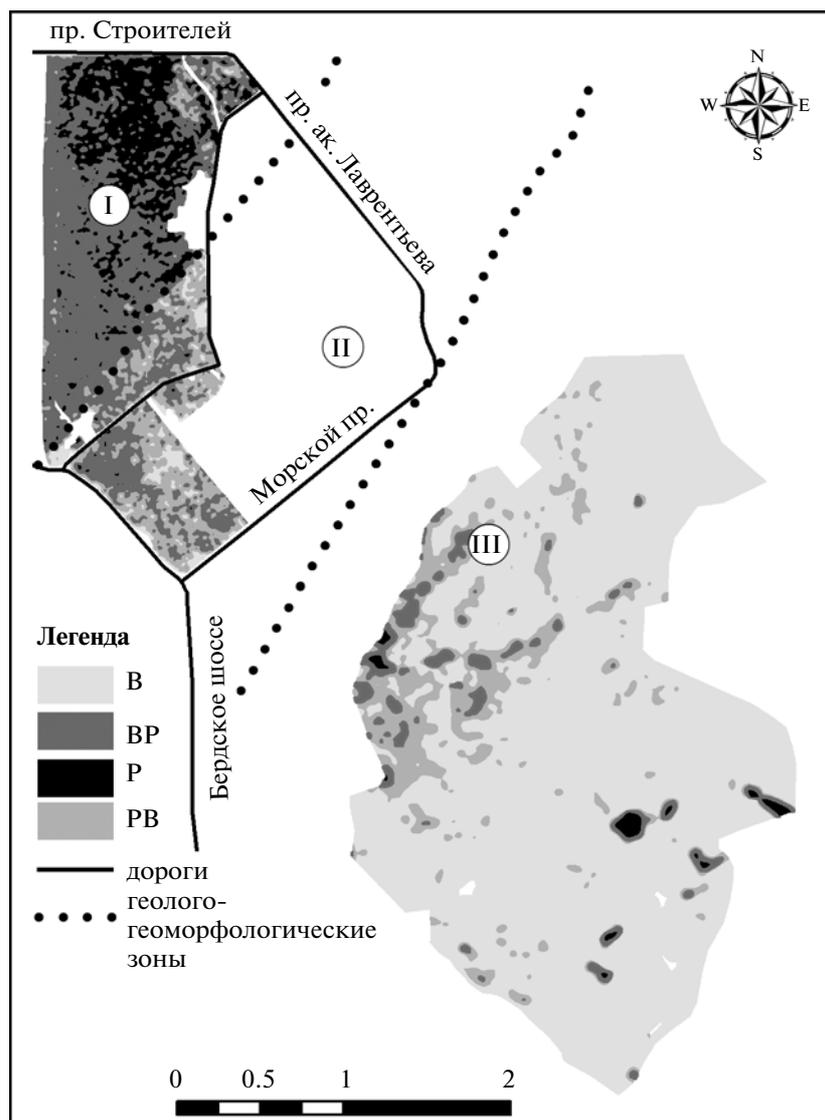
Исследуемая территория была разбита на зоны по геолого-геоморфологическому признаку. Их было выделено три: древние надпойменные террасы, водораздельное плато и делювиальный шлейф между ними. Границы проводились на основе анализа космического снимка и цифровой

модели рельефа (ЦМР), построенной на основе векторной карты. Затем были проведены оверлейные операции геолого-геоморфологической карты с картосхемами растительности, построенными: 1) по космоснимкам и 2) по традиционной геоботанической методике. Это позволило проанализировать зависимость растительности от геолого-геоформологического строения территории. В итоге получили сравнительную оценку достоверности и информативности картосхем, полученных различными методами.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнение картосхем растительного покрова, полученных с применением стандартной методики и с помощью данных ДЗ, показало хорошее совпадение результатов, но вместе с тем выявило ряд существенных различий, на которых стоит остановиться подробнее.

На водораздельном плато однородный контур антропогенно-трансформированной растительности, выделенный по геоботанической карто-



**Рис. 4.** Картограмма соотношения лиственных и хвойных пород деревьев для разных массивов Академгородка, созданная на основе классификации космического снимка QuickBird. Условные обозначения, лес: В – лиственный, РВ – хвойно-лиственный, ВР – лиственно-хвойный, Р – хвойный.

схеме, разбился на несколько классов согласно картограмме, полученной при анализе космоснимков. Это вполне предсказуемый результат, так как указанный элемент легенды геоботанической картограммы объединял разнообразные фитоценозы – от открытых травяных сообществ до сомкнутых культур хвойных и лиственных деревьев. Критерием для отнесения сообществ в состав этого выдела служила степень антропогенной трансформации, устанавливаемая экспертно, по результатам натурального обследования. Естественно, что разнородные сообщества давали различный спектральный отклик и были разнесены в разные классы при интерпретации космических снимков.

Ивовые заросли по долинам рек, выделенные на геоботанической картограмме, не отразились

при обработке космоснимков и попали преимущественно в класс среднесомкнутых хвойно-лиственных насаждений. Это различие объясняется, во-первых, сходными спектральными характеристиками крупных листопадных кустарников и лиственных деревьев; во-вторых, эффектом теней, возникающих в пересеченном рельефе речной долины и дающих на снимке более глубокий тон, сходный с сигналом от насаждений с участием хвойных.

Общая площадь смешанных насаждений на водораздельном плато, согласно геоботанической картограмме, существенно больше, чем на картограмме, полученной по результатам ДЗ. В данном случае предпочтение стоит отдать информации, полученной по космическим снимкам, с

**Таблица 1.** Структура растительного покрова согласно геоботанической картосхемы на разных геолого-геоморфологических зонах

Наименование класса легенды картосхемы	Древние надпойменные террасы (% от общей площади)	Делювиальный шлейф (% от общей площади)	Водораздельное плато (% от общей площади)
1	2.45	1.1	17.8
2	6.38	45.5	54.5
3	21.9	36.4	0
4	66.71	0.8	0
5	2.56	15.9	25.9
6	0	0.3	1.8

точными границами контуров и отражением реального состояния древостоя. При геоботаническом картировании доля хвойных в составе смешанных насаждений часто завышается, особенно если примесь хвойных представлена крупномерными старовозрастными экземплярами.

Растительный покров делювиального шлейфа показан довольно сходно на обоих вариантах картосхем. Наибольшие различия связаны с отражением границ выделов, которые, несомненно, более детальные и реалистичны на картосхеме, составленной по космическим снимкам. Эта же картосхема показывает в целом больший процент участия хвойных в растительном покрове делювиального шлейфа, чем геоботаническая. Причина этого разночтения связана с групповыми посадками хвойных под пологом лиственных насаждений, которые игнорировались в обобщенной легенде геоботанической картосхеме, но вносили существенный вклад в спектральный отклик соответствующих контуров.

Интересная картина была получена для растительного покрова древних речных террас. Обе картосхемы показывают абсолютное преобладание хвойных и лиственно-хвойных лесов, но если на геоботанической картосхеме преобладают хвойные сосновые леса, то на схеме, построенной по космическим снимкам, большую площадь занимают смешанные леса с преобладанием хвойных. Более того, сомкнутые хвойные леса на картосхеме, основанной на космоснимках, соответствуют смешанным насаждениям на геоботанической, и наоборот. Это обусловлено тем, что при создании геоботанической картосхемы все смешанные насаждения, в которых доля лиственных деревьев составляла менее 25%, картировались как хвойные, и только если доля лиственных превышала 25%, то насаждения относились к смешанным, с преобладанием хвойных. При классификации космических снимков хвойный лес, даже с небольшой примесью лиственных деревьев, попадал в категорию смешанных лиственно-хвойных лесов. Территории, выделившиеся на

космическом снимке как сомкнутый хвойный лес, в недавнем прошлом были пройдены сильным низовым пожаром. Последний не только уничтожил подлесок и подрост лиственных деревьев, но и способствовал успешному возобновлению сосны на минерализованной поверхности почвы. Сочетание густого подроста сосны с деревьями верхнего яруса дало сильный сигнал хвойных деревьев на космическом снимке. При наземном геоботаническом картировании такие участки чаще описывались как смешанный лес по составу верхнего яруса древостоя. Подрост сосны под пологом описывался как отдельный структурный элемент сообщества и не учитывался в легенде картосхемы. Стоит также подчеркнуть мелкоконтурность и сложность границ на картосхеме, сделанной по космоснимкам, что лучше отражает реальное распределение сообществ по сравнению с обобщенными и не совсем точными границами лесоустроительных выделов. Таким образом, сравнение картосхем растительности, полученных различными методами, показало, что информация, отраженная на них, часто взаимно дополняет и корректирует друг друга, так как обращает внимание на разные стороны строения растительного покрова.

Рассмотрим далее зависимость структуры растительного покрова от геолого-геоморфологического строения территории, и ее отражение на разных картосхемах. В табл. 1 представлено распределение лесных формаций, согласно геоботанической картосхеме, по основным геолого-геоморфологическим зонам. Водораздельные пространства показывают наименьшее разнообразие естественных лесных формаций при абсолютном преобладании мелколиственных лесов. Смешанные леса с преобладанием мелколиственных деревьев сосредоточены на водораздельном плато по бортам долин мелких рек и связаны преимущественно со склоновыми местообитаниями. Ивовые заросли по долинам ручьев практически исключительно приурочены к этой геолого-геоморфологической зоне. Также обращает на себя

**Таблица 2.** Распределение видового состава древостоев, полученных по космоснимкам в разных геолого-геоморфологических зонах

Наименование класса	Древние надпойменные террасы (% от общей площади)	Делювиальный шлейф (% от общей площади)	Водораздельное плато (% от общей площади)
В	0.1	10.9	84.7
РВ	3.8	48.5	12.2
ВР	67.1	40.1	2.5
Р	28.9	0.4	0.6

внимание высокая доля антропогенно трансформированной растительности на водораздельном плато. Последнее связано с высоким потенциальным плодородием почв на водоразделах, покрытых лессовидными суглинками, и с благоприятными условиями для с.-х. освоения территории. Кроме того, здесь же расположены основные научные коллекции и экспозиции ЦСБС СО РАН.

Растительность древних речных террас в основном образована сосновыми лесами и смешанными лесами с преобладанием хвойных деревьев (табл. 1). Плоская, слабо расчлененная поверхность и песчаные грунты обеспечивают хороший дренаж и не способствуют развитию кустарниковых зарослей. Преобладание сосновых лесов также связано с бедностью песчаных почв и их слабой водоудерживающей способностью. В таких условиях сосна получает конкурентное преимущество над березой и выступает основным ценообразователем.

Наиболее разнообразна растительность поверхности делювиального шлейфа, где представлены все варианты растительного покрова, отраженные на геоботанической картосхеме (табл. 1). Переходный характер этой геолого-геоморфологической зоны выражается в наличии местообитаний, пригодных как для растительности древних террас, так и для растительности водоразделов. Основу растительного покрова этой зоны составляют смешанные леса с преобладанием хвойных деревьев.

Картина, полученная при анализе картосхемы растительности, составленной по космическим снимкам, в целом соответствует закономерностям, полученным при анализе геоботанической картосхемы. Из табл. 2 видно, что на террасах преобладают хвойные и лиственнично-хвойные леса, а лиственные и хвойно-лиственные в сумме не превышают 4%. На водораздельном плато, наоборот, преобладают лиственные и хвойно-лиственные леса (их в сумме около 97%). В зоне делювиального шлейфа между террасами и водоразделом преобладают смешанные леса — хвойно-лиственные и

лиственнично-хвойные, а лиственные и хвойные леса различной плотности занимают менее 12%.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный сравнительный анализ породно-пространственной структуры двух крупных лесных массивов с использованием ГИС-технологий и данных ДЗЗ показал высокую информативность метода, возможность выявления связей между геоморфологическими особенностями территории, составом поверхностных отложений и структурой древостоев. Метод дает возможность оценить, насколько современная структура и сложность древостоя отражают комплекс естественных причин, и насколько предшествующая хозяйственная деятельность человека влияет на эти параметры.

Сравнение картосхемы, полученной с использованием данных ДЗЗ и ГИС-технологий с геоботанической картосхемой, составленной традиционными методами, показало хорошее совпадение результатов. В то же время, каждая из полученных картосхем отражает некоторую специфику растительного покрова, не выявляемую другим методом. В итоге информация обеих картосхем служит для взаимного дополнения и коррекции. Идеальным вариантом следовало бы признать гибридный вариант, наиболее полно и разносторонне описывающий растительный покров территории. Огромным достоинством использования данных ДЗЗ является получение точных и детальных границ различных растительных сообществ.

Использование космических снимков высокого разрешения и современных ГИС-технологий позволяет организовать оперативный мониторинг состояния лесов и экспресс-оценку степени их антропогенной трансформации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Глушкова Н.В., Зольников И.Д., Лямина В.А., Макунина Н.И., Мальцева Т.В. Картографирование лесных массивов Центрального сибирского ботанического сада // Вестн. НГУ. 2010. Т. 8. № 3. С. 83–91.

Зольников И.Д., Айриянц А.А., Королюк А.Ю., Мартысевич У.В. Подход к моделированию региональной экосистемы и пространственных взаимосвязей ее компонентов на основе интеграции междисциплинарной информации // Сиб. экол. журн. 2005. № 6. С. 927–937

Куминова А.В. Основные закономерности распределения растительного покрова в ю-в части Западно-Сибирской низменности // Растительность степной и лесостепной зон Западной Сибири. 1963. Вып. 6. С. 7–35.

Лямина В.А., Зольников И.Д., Королюк А.Ю., Добрецов Н.Н., Смоленцев Б.А., Глушкова Н.В. Использо-

вание методов ГИС и ДЗ для картографирования и мониторинга гетерогенных ландшафтов // Сб. мат. V Международного конгресса “ГЕО-Сибирь-2009”. Новосибирск: СГГА, 2009. Т. 4. Ч. 1. С. 171–175.

Мартынов В.А., Мизеров Б.В., Никитин В.П., Шаевич Я.Е. Геоморфологическое строение долины р. Оби в районе г. Новосибирска. Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1977. 34 с.

Природа Академгородка: 50 лет спустя / Отв. ред. Жимулев И.Ф., РАН, Сиб. отд., Ин-т цитологии и генетики [и др.]. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 250 с.

## Estimate of Structure of the Vegetative Cover and Extent of Anthropogenous Transformation of the Wood Frame of the Novosibirsk Academic Town on the Basis of Processing of Satellite Images QuickBird

N. N. Lashinskiy\*, I. D. Zolnikov\*\*, N. V. Glushkova\*\*

\*Central Siberian botanic garden SB RAS Novosibirsk,

\*\* Institute of geology and mineralogy SB RAS Novosibirsk; Novosibirsk State University

New method of forest mapping based on high-resolution satellite image analysis was developed. The main method points are guided classifications of summer and fall QuickBird images; overlay operations and grid density analysis. As a result schemes of forest density and quantitative relations between soft- and hardwood trees were constructed. Few advantages of new method in comparison with traditional geobotanical mapping were founded (precise borders, high accuracy estimation of the canopy closeness and ratio between soft- and hardwood trees) together with some limitations. New method not replaced the traditional one but supplement it. Conjugate analysis of forest map with geomorphologic map showed interconnections between geomorphologic features? Surface geological layers and tree layer structure. By this way the level of anthropogenic ecosystem transformation could be estimated. This estimation, in its turn, could be used for the ecosystem monitoring.

**Keywords:** mapping of forest stand, remote sensing, GIS-technology, space images of high resolution

## АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ КАНАЛОВ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ (ПО ЗАРУБЕЖНЫМ ПУБЛИКАЦИЯМ)

© 2013 г. С. Л. Кравцов\*, Д. В. Голубцов, Е. Н. Лисова

Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, Минск

\* E-mail: Krautsou\_sl@rambler.ru

Поступила в редакцию 05.04.2012 г.

Охарактеризованы основные пигменты растений, биофизические и биохимические факторы, определяющие спектры поглощения и отражения растительности. Рассмотрено влияние фаз развития, дефицита минеральных элементов, заморозков, болезней, повреждения градом и условий влажности на спектр отражения растительности. Представлены оптимальные для дистанционного мониторинга состояния растительности узкие спектральные каналы в диапазонах 395–1010 и 350–2500 нм, а также их ширина. Проведено сравнение информативности данных узких и широких каналов для дистанционного мониторинга состояния растительности. Работа представляет собой систематизацию зарубежных публикаций по изложенным вопросам.

**Ключевые слова:** оптимальные каналы, дистанционный мониторинг, растительность

DOI: 10.7868/S020596141301003X

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире сельское хозяйство является ведущей сферой использования данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Они широко используются в агропромышленных комплексах США, Канады, Евросоюза, Индии, Китая, Японии, Израиля. Существует более 30 национальных и национальных систем мониторинга с.-х. земель. С учетом все возрастающей роли сельского хозяйства в экономиках Республики Беларусь и Российской Федерации данное направление использования данных ДЗЗ и в наших странах со всем основанием претендует на роль приоритетного.

Растительность, как правило, закрывает почву, в результате сенсорами ДЗЗ регистрируется главным образом ее отражение/излучение. Данные гиперспектральных сенсоров нового поколения со многими узкими каналами, таких как AVIRIS, Hyperion и др., обеспечивают значительное улучшение информативности относительно данных многоканальных сенсоров старшего поколения с несколькими широкими каналами (Landsat TM/ETM+, SPOT HRV и др.). В частности для растительности значительно улучшаются отделимость и точность классификации видов, обнаружение стресса, извлечение биохимических характеристик, определение изменения влажности и различий в доле покрова (Thenkabail et al., 2004).

Однако эти преимущества достигаются сбором гиперспектральными сенсорами значительно больших объемов данных (относительно многоспектральных сенсоров), что ведет к многочисленным сложным техническим проблемам. Они включают передачу данных с сенсора (ширину полосы пропускания канала передачи), пространственное разрешение, атмосферную коррекцию, объем хранения и вычислений при анализе данных, их “избыточность” и алгоритмы обработки (Thenkabail et al., 2004; Thenkabail, 2001). Так, первый спутниковый гиперспектральный сенсор Hyperion (ИСЗ EO-1) собирает данные с радиометрическим разрешением 12 бит в 220 узких каналах диапазона 400–2500 нм с пространственным разрешением 30 м. Объем 1.0 км<sup>2</sup> изображения сенсора Hyperion составляет приблизительно 0.5 МБ по сравнению с 0.0067 МБ изображения сенсора Landsat TM с шестью широкими каналами – увеличение примерно в 37 раз. Объем же изображения гиперспектрального сенсора Warfighter-1 (ИСЗ Orbview-4) с 200 узкими каналами, спектральным разрешением 8 бит и пространственным разрешением 8 м составляет 3.125 МБ – увеличение в 469 раз (Thenkabail, 2001).

Для преодоления указанных проблем сенсоры будущих поколений, вероятно, будут специализированными, т.е. оптимизированными в сборе данных для определенных приложений (сельско-

го хозяйства, экологического мониторинга и т. д.), или гиперспектральными с большим количеством узких каналов (подобно Hyperspec), из которых пользователи смогут извлечь оптимальные каналы для соответствующих приложений (Thenkabail et al., 2004). Таким образом, нахождение оптимальных каналов для дистанционного мониторинга состояния растительности имеет важное значение. Это помогло бы избежать “избыточности” данных при их обработке, а также разработать специализированные сенсоры (Thenkabail, 2001).

Данная статья представляет собой анализ и систематизацию результатов разрозненных многочисленных исследований в области дистанционного мониторинга состояния растительности. Представленные результаты могут быть полезны при выборе спектральных каналов разрабатываемой аэрокосмической аппаратуры дистанционного мониторинга с.-х. земель (в частности проектируемой в РФ спутниковой системы “Космос-СХ”).

## ОСНОВНЫЕ ПИГМЕНТЫ РАСТЕНИЙ, БИОФИЗИЧЕСКИЕ И БИОХИМИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СПЕКТРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ И ОТРАЖЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

### *Основные пигменты растений*

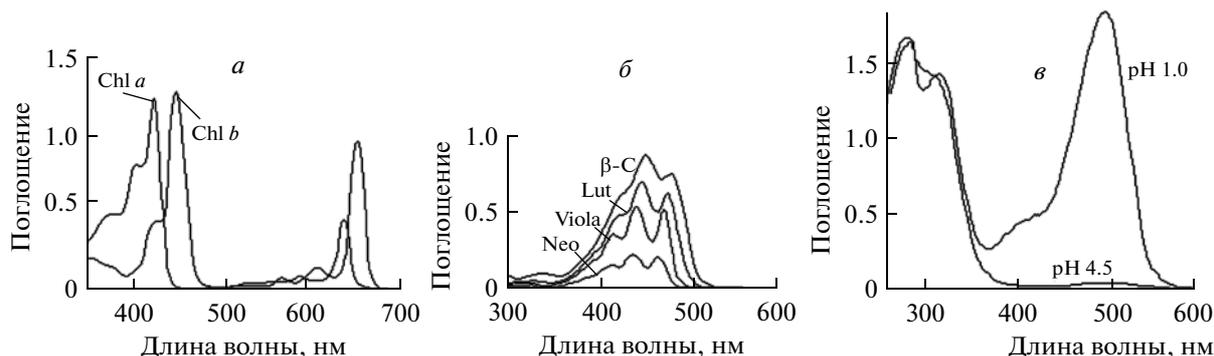
**Хлорофиллы** (Chl *a* и Chl *b*) – жизненно важный пигмент растений, необходимый для преобразования солнечного излучения в запасенную химическую энергию. Количество поглощенного растениями солнечного излучения является функцией содержания фотосинтезирующих пигментов (в первую очередь Chl). Таким образом, содержание Chl может напрямую определить фотосинтезирующий потенциал и, следовательно, первичную продуктивность (Gitelson et al., 2009). Помимо этого, Chl является косвенным индикатором обеспеченности минеральными элементами, поскольку в составе его молекулы находится большое количество азота (N). К тому же, в условиях природных или антропогенных стрессов и старения содержание Chl в растениях снижается (Blackburn, 2007), и изменяется отношение Chl *a* к Chl *b*, следовательно, оценка содержания Chl, а также отдельно Chl *a* и Chl *b* может предоставить информацию о взаимодействиях среда-растения и их физиологическом состоянии.

**Каротиноиды** (Car) являются второй основной пигментной группой растений, состоящей из каротинов и ксантофиллов (Blackburn, 2007). Красно-желтые цвета осенних листьев наблюдаются из-за изменения в фотопериоде (к коротким дням/длинным ночам) и/или низких температур, вызывающих старение, при котором разрушается Chl с одновременным повышением содержания Car (Ustin et al., 2009). Car могут поглощать сол-

нечное излучение и способствовать выработке энергии для фотосинтеза. В результате содержание Chl не является ограничивающим фактором переработки солнечного излучения для фотосинтеза, так как полученная энергия поглощается как Chl *b*, так и Car. Таким образом, фотосинтезирующий потенциал двух растений может отличаться, хотя поглощаемая ими доля солнечного излучения равна – в зависимости от соотношения содержания пигментов (Blackburn, 2007). Кроме того, когда солнечное излучение превышает необходимое для фотосинтеза, Car рассеивают избыток энергии и защищают центры реакции. Car играют ключевую роль в адаптации высших растений и к другим неблагоприятным условиям окружающей среды (Zur et al., 2000).

Таким образом, хотя изменения в содержании Chl являются индикатором стресса и фазы развития, изменение содержания Car и его соотношение с содержанием Chl обеспечивает дополнительную информацию и широко используется для диагностики состояния растений во время развития, старения, акклиматизации и адаптации к различным условиям окружающей среды и стрессам (Gitelson et al., 2009; Blackburn, 2007).

**Антоцианы** (Anth) – растворимые в воде флавоноиды – являются третьей основной пигментной группой растений (Blackburn, 2007). Зрелые темно-зеленые растения лишены Anth, их содержание значительно возрастает при стрессах (например, низких или высоких температурах), в ювенильных (в течение наиболее ранних фаз развития прежде, чем фотосистемы становятся полностью функциональными) и в стареющих растениях (обеспечивая в течение разрушения фотосинтезирующего механизма защиту от фототоксичности, обусловленной продуктами деградации Chl) и ответственны за их красную окраску. Anth могут изменять световую среду внутри растений и обладают потенциалом регулирования фотосинтеза и ограничения фотоингибирования и фотообесцвечивания, тем самым обладая фотопротектными функциями (Merzlyak et al., 2008). Защитные эффекты Anth связаны с их способностью посредством экранирования и/или заманивания света во внутреннюю ловушку уменьшить (в 2–4 раза) чрезмерное количество солнечного излучения, достигающего фотосинтезирующего аппарата, которое иначе было бы поглощено пигментами хлоропласта (Gitelson et al., 2009). Anth также могут (со значительным возрастанием содержания) повышать устойчивость растений к стрессовым воздействиям, например, низкой температуре (заморозкам), засухе, сильному ветру, бактериальной и грибной инфекциям, гербицидам и загрязняющим веществам, дефициту минеральных элементов (Gitelson et al., 2009; Blackburn, 2007). Кроме того, Anth обладают антиоксидантными свойствами, способствуя восстановлению расте-



**Рис. 1.** Спектры поглощения основных пигментов растений: *a* – Chl в диэтиловом эфире; *б* – Caг в диэтиловом эфире ( $\beta$ -C –  $\beta$ -каротин, Lut – лютеин, Neo – неоксантин, Viola – виолаксантин); *в* – Anth очищенной редики в растворах pH = 1.0 и pH = 4.5.

ний после травм. Помимо этого, Anth могут обеспечить защиту от травоядных животных и грибковых патогенов (Ustin et al., 2009).

Поскольку содержание Anth является индикатором многих видов стресса, оценка его динамики предоставляет информацию о чувствительности и адаптации растений к стрессу (Gitelson et al., 2009).

#### *Влияние основных пигментов на спектр поглощения растительности*

Пигменты поглощают излучение на определенных длинах волн, уменьшая коэффициент отражения. Chl *a* и Chl *b* в диэтиловом эфире имеют узкие полосы поглощения (рис. 1*a*) в синей (около 428 и 453 нм) и красной (около 661 и 642 нм) областях спектра (Ustin et al., 2009; Wrolstad, 2000). Для Caг характерна широкая полоса поглощения с тремя максимумами в синей области спектра в диапазоне 400–500 нм (рис. 1*б*). Все Anth содержат две отличительные полосы поглощения (рис. 1*в*) – одну в ультрафиолетовой (260–280 нм) и другую в сине-зеленой областях спектра (490–550 нм) (Wrolstad, 2000).

#### *Биофизические и биохимические источники изменчивости спектра отражения растительности*

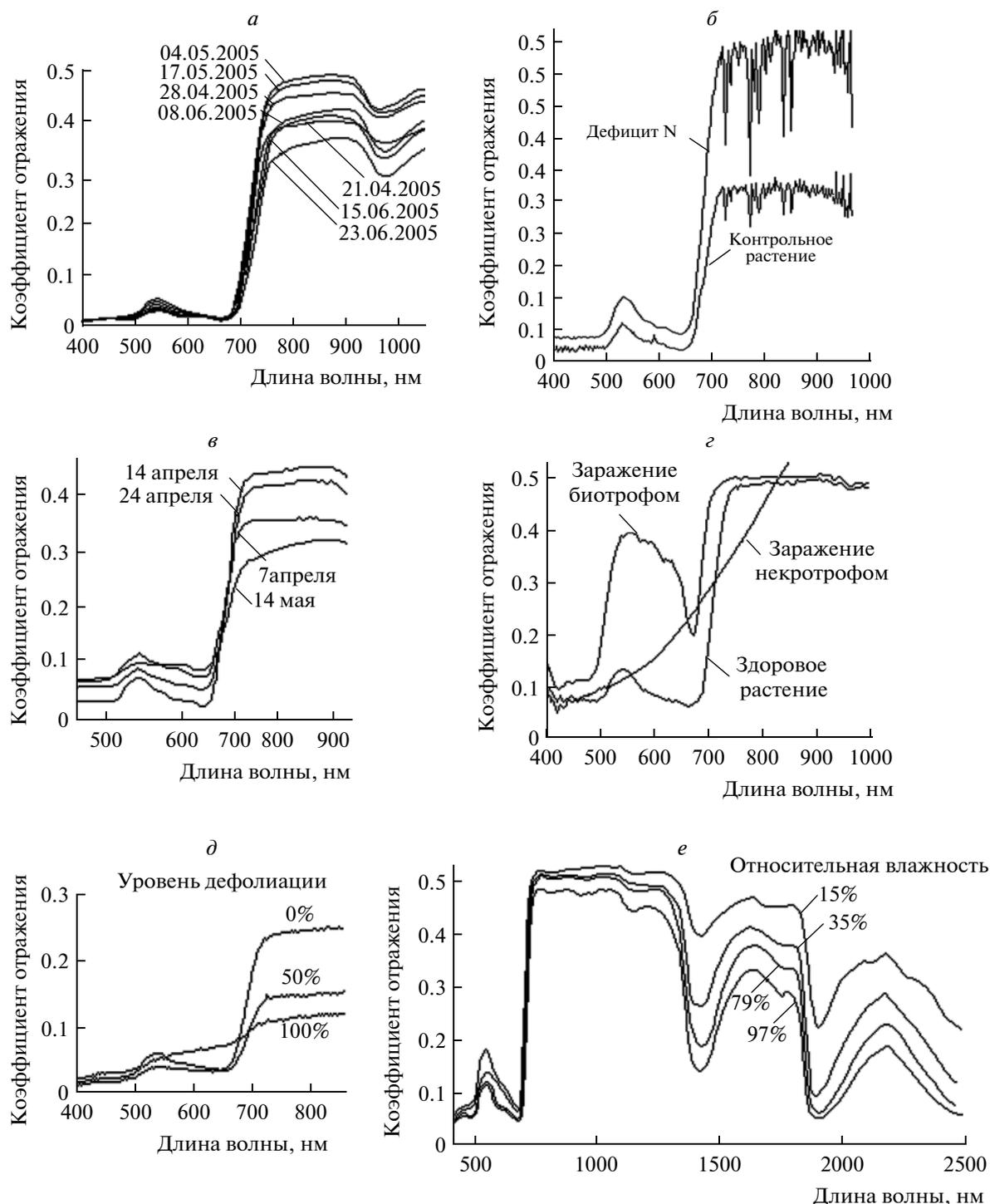
На спектр отражения листьев влияет множество факторов: содержание CO<sub>2</sub>, N, лигнина, целлюлозы, воды, полярных (растворимые полифенолы, сахара, крахмал и др.) и неполярных (жиры, воски, фенольные смолы и др.) экстрагируемых веществ, характеристики поверхности (ворсистость и др.), внутренняя структура листьев (преломляющие неоднородности между стенками клеток и межклеточными воздушными пространствами) (Blackburn, 2007). Спектр отражения покрова находится под влиянием еще более сложных факторов: тканей (листьев и нефотосинтезирующей части рас-

тений – деревянистых стеблей, отмершей биомассы и др.), биофизических свойств (площади и ориентации листьев и стеблей, группирования листьев и др.), фона почвы, условий освещения и геометрии наблюдения (Asner, 1998). Так, для покрова, состоящего преимущественно из листьев, при их горизонтальной ориентации и высокой биомассе большинство информации масштаба листьев переводится в масштаб покрова. А нефотосинтезирующая часть растений оказывает значительное влияние на спектр отражения покрова, когда ее доля высока (Asner, 1998).

### ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА СПЕКТР ОТРАЖЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

#### *Влияние фаз развития на спектр отражения растительности*

В течение вегетационного сезона наибольшие изменения спектра отражения покрова пшеницы происходят в зеленой и ближней ИК-областях спектра (рис. 2*a* (Franke, 2007)). Это вызвано изменением содержания Chl, биомассы и доли покрова. В начале вегетационного сезона коэффициент отражения в зеленой и ближней ИК-областях спектра возрастает из-за увеличения биомассы и уменьшения доли фона почвы (развитие листьев), на более поздних фазах развития коэффициент отражения в этих областях спектра уменьшается из-за созревания пшеницы и как следствие изменения структуры покрова (развитие плодов). Местоположение красного края спектра отражения покрова пшеницы в течение фаз роста находится в диапазоне 700–730 нм. От фазы кушения до фазы колошения наблюдается слабое смещение местоположения красного края спектров отражения покрова и листьев к более длинным длинам волн, а от фазы колошения до фазы созревания – значительное смещение к более коротким длинам волн (Xiaoping, 2008).



**Рис. 2.** Влияние на спектр отражения: *a* – различных фаз развития покрова пшеницы; *б* – дефицита азота растений пшеницы; *в* – заморозков для озимой пшеницы в фазе кущения; *г* – уровня дефолиации покрова кукурузы (стадия 8–12 листьев); *д* – наиболее типичных болезней зерновых культур; *е* – условий влажности для листьев пшеницы.

#### *Влияние дефицита минеральных элементов на спектр отражения растительности*

Дефицит минеральных элементов, как правило, уменьшает содержание Chl (Chl *a* и Chl *b*), вызывая смещение местоположения красного края к

более коротким длинам волн и возрастание коэффициента отражения листьев пшеницы (рис. 2б (Ayala-Silva, Beyl, 2005)). Дефициты N и магния (Mg) (важнейших элементов молекулы Chl) вызывают наибольшее уменьшение Chl *a* и Chl *b*, да-

лее – фосфор (P), калий (K) и кальций (Ca). Изменения спектра отражения и местоположения красного края пропорциональны уровням дефицита минеральных элементов и происходят в тех же диапазонах. В результате то же самое содержание Chl в листьях пшеницы, изменение коэффициента отражения, или смещение местоположения красного края могут быть обусловлены дефицитом разных минеральных элементов (например, как дефицитом K, так и дефицитом Mg) (Ayala-Silva, Beul, 2005). Кроме того, при дефиците специфического минерального элемента значительно уменьшается не только его содержание в растениях, но также изменяется содержание иных минеральных элементов, – уменьшаясь или увеличиваясь по сравнению с контрольными растениями. Поэтому визуальные признаки дефицита, морфологические и физиологические изменения растений не могут быть обусловлены или охарактеризованы дефицитом только одного элемента, поскольку являются результатом дефицита нескольких элементов (Ayala-Silva, Beul, 2005).

#### *Влияние заморозков на спектр отражения растительности*

Повреждение растений холодом сопровождается потерей ими тургора и изменением окраски (вследствие разрушения Chl и нарушения снабжения водой), снижением аэробного дыхания и фотосинтеза, деградацией хлоропластов, разрушением структуры пигментно-липидного комплекса, накоплением в тканях растворимых форм N и др. Основными причинами гибели клеток растений при отрицательных температурах являются чрезмерное обезвоживание клеток и/или механическое давление (сжатие клеток кристаллами льда). Последствия воздействия отрицательных температур зависят от оводненности тканей растений: насыщенные водой ткани легко повреждаются и растения могут погибнуть; тогда как при низком содержании воды льда образуется немного и клетки не повреждаются механически его кристаллами, в результате при последующем оттаивании растения могут сохранить жизнеспособность. Спустя две-три недели после заморозков поврежденные растения становятся желтыми (относительно контрольных растений), значение коэффициента отражения увеличивается в желтой и красной областях спектра, форма спектра отражения становится плоской (рис. 2в (Li et al., 2008)). После обморожения растений содержание Chl снижается, местоположение красного края смещается к более коротким длинам волн (Li et al., 2008).

#### *Влияние повреждения градом на спектр отражения растительности*

Ключевым параметром при оценке степени повреждения растений градом является уровень дефолиации – потери листы, которая снижает эффективность фотосинтеза и связана со способностью растений восстанавливаться после вызванного градом стресса (Young et al., 2004). Дефолиация напрямую связана с уменьшением площади листовой поверхности, разрушением структуры листьев и клеток растений, нарушением поглощения солнечного излучения Chl (Young et al., 2004; Chandler et al., 2004). Увеличение уровня дефолиации приводит к повышению значения коэффициента отражения в видимой (прежде всего в красной) области спектра и к понижению в ближней ИК-области спектра (Young et al., 2004; Aran et al., 2005; Chandler et al., 2002), – т.е. чем выше уровень дефолиации, тем больше спектр отражения растительности смещается в направлении спектра голый почвы (рис. 2г (Aran et al., 2005)).

#### *Влияние болезней на спектр отражения растительности*

Большинство болезней поражает только определенную часть растений (корни, стебли, листья, плоды и др.) и создает характерные признаки (мозаику, некроз, пятна, вялость и др.) (Gröll, 2008). После заражения паразиты извлекают питательные вещества из растений-хозяев различными способами и по этому признаку делятся на три группы: *некротрофы*, которые убивают клетки растений (рис. 2д (Steddom, 2005)); *биотрофы*, которые оставляют живыми клетки растений; *полубиотрофы*, которые первоначально поддерживают живыми клетки растений, но убивают их на более поздних стадиях инфекции (Gröll, 2008).

Болезни листьев (желтая ржавчина, мучнистая роса и др.) проявляются на внешней стороне покровов и поэтому легко обнаруживаются по изменениям спектра отражения. Напротив, корневые и стеблевые болезни (гельминтоспориозная корневая гниль, церкоспореллезная корневая гниль и др.) скрыты покровом, а потому могут быть идентифицированы только по вторичным признакам (стресс минеральных элементов, воды и др.). Некоторые болезни на более поздних стадиях инфекции вызывают характерный состав пигментов. В результате болезней (Gröll, 2008; Bravo, 2006; Stilwell, 2009) происходит следующее: а) уменьшается содержание Chl – затрагиваются видимая область спектра и область красного края (550 и 650–720 нм); б) происходит старение зараженных, а также близких к ним тканей – затрагиваются видимая, ближняя ИК (680–800 нм), и коротковолновая ИК-области спектра (1400–1600 и 1900–2100 нм); в) разрушается внутренняя струк-

тура листьев — затрагивается ближняя ИК-область спектра; г) изменяются плотность покрова и площадь листовой поверхности — затрагивается ближняя ИК-область спектра; д) увеличивается (на начальных стадиях инфекции)/уменьшается (на поздних стадиях инфекции) норма испарения — затрагивается тепловая ИК-область спектра (800–14000 нм). При заражении растений наблюдается смещение местоположения красного края к более коротким длинам волн: тем сильнее, чем выше степень пораженности.

#### *Влияние условий влажности на спектр отражения растительности*

Рост и развитие растений непосредственно определяются условиями влажности. В ближней ИК и коротковолновой ИК-областях спектра существует пять полос поглощения (Zhang et al., 2010) воды растений, центрированных в 970, 1200, 1450, 1940 и 2500 нм (рис. 2e (Penuelas, 1999)). При этом чувствительность коэффициента отражения растений к содержанию воды наиболее высока в сильных полосах поглощения воды 1450, 1940 и 2500 нм коротковолновой ИК-области спектра. На полосу поглощения 1450 нм преобладающее влияние оказывает содержание воды растений, но на полосы поглощения 970, 1200 и 1900 нм также влияет содержание крахмала и белка растений (Zhang et al., 2010). С уменьшением содержания воды растений от полностью насыщенного до сухого состояния (рис. 2e (Penuelas, 1999)) коэффициент отражения возрастает во всей области спектра с постепенным исчезновением полос поглощения воды. Изменения коэффициента отражения в видимой области спектра также связаны с прогрессивной деградацией Chl вследствие высушивания. Однако норма изменения спектра отражения различается для разных видов растений — это обусловлено различием морфологии, структуры и содержания сухого вещества (Penuelas, 1999).

#### **ОПТИМАЛЬНЫЕ УЗКИЕ КАНАЛЫ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ**

При анализе делимости шести зерновых культур (ячмень, пшеница, чечевица, нут, тмин и вика) и других категорий наземного покрытия (земель под паром и др.) в (Thenkabail, 2001) определены 16 оптимальных узких каналов в диапазоне 395–1010 нм (табл. 1):  $\lambda_1 = 418$ ,  $\lambda_2 = 461$ ,  $\lambda_3 = 489$ ,  $\lambda_4 = 518$ ,  $\lambda_5 = 547$ ,  $\lambda_6 = 575$ ,  $\lambda_7 = 604$ ,  $\lambda_8 = 661$ ,  $\lambda_9 = 675$ ,  $\lambda_{10} = 704$ ,  $\lambda_{11} = 718$ ,  $\lambda_{12} = 846$ ,  $\lambda_{13} = 875$ ,  $\lambda_{14} = 904$ ,  $\lambda_{15} = 918$ ,  $\lambda_{16} = 975$  нм. Наилучшие четыре канала: 547, 675, 718 и 904 нм. Наилучшие 12 каналов: 489, 518, 547, 575, 604, 661, 675, 704, 718, 846, 904, 975 нм.

При анализе делимости трех видов кустов, четырех видов травы, пяти видов сорняков и шести видов с.-х. культур в диапазоне 395–2500 нм в (Thenkabail et al., 2004) определены 22 оптимальных узких канала (при отсутствии упоминания ширина канала составляет 10 нм):  $\lambda_1 = 495$ ,  $\lambda_2 = 555$ ,  $\lambda_3 = 645$ – $665$ ,  $\lambda_4 = 675$ – $695$ ,  $\lambda_5 = 705$ ,  $\lambda_6 = 735$ ,  $\lambda_7 = 885$ ,  $\lambda_8 = 915$ – $935$ ,  $\lambda_9 = 985$ ,  $\lambda_{10} = 1085$ ,  $\lambda_{11} = 1135$ ,  $\lambda_{12} = 1215$ ,  $\lambda_{13} = 1235$ – $1255$ ,  $\lambda_{14} = 1275$ – $1285$ ,  $\lambda_{15} = 1445$ – $1455$ ,  $\lambda_{16} = 1675$ – $1705$ ,  $\lambda_{17} = 1715$ – $1735$ ,  $\lambda_{18} = 1985$ – $2015$ ,  $\lambda_{19} = 2025$ – $2045$ ,  $\lambda_{20} = 2235$ ,  $\lambda_{21} = 2275$ – $2295$  и  $\lambda_{22} = 2315$ – $2345$  нм (рис. 3, табл. 2 (Thenkabail et al., 2004)). Наилучшие четыре канала: 675, 1245, 2005 и 2345 нм. Наилучшие 11 каналов: 495, 675, 735, 1085, 1215, 1245, 1285, 1445, 2005, 2295, 2345 нм. Наилучшие 17 каналов: 495, 655, 675, 705, 735, 915, 1085, 1215, 1245, 1285, 1445, 1675, 2005, 2035, 2235, 2295 и 2345 нм.

Семь из 22 оптимальных узких каналов диапазона 350–2500 нм находятся среди 12 оптимальных узких каналов диапазона 395–1010 нм. Различия обусловлены главным образом разной шириной каналов (10 и 14.3 нм), расширением диапазона и видов растений.

Данные в диапазонах 1350–1440, 1790–1990 и 2360–2500 нм серьезно затронуты атмосферным поглощением, в диапазоне 350–390 нм — шумами. Вследствие этого данные указанных диапазонов в (Thenkabail et al., 2004; Thenkabail, 2001) исключены из анализа. При высокой частоте возникновения двух близких каналов проведены испытания избыточности (корреляция между каналами, с биомассой и др.). Если два канала обеспечивали чрезвычайно схожую информацию, выбирался более часто встречаемый канал (Thenkabail et al., 2004).

#### **ОПТИМАЛЬНАЯ ШИРИНА УЗКИХ КАНАЛОВ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ**

Данные узких каналов обычно характеризуются высоким уровнем шума. Это обусловлено тем, что узкая ширина позволяет захватить лишь очень небольшое количество энергии, которая к тому же находится под значительным влиянием переменного освещения Солнца и, как следствие, может быть подавлена собственными шумами сенсора. Поэтому необходимо избегать слишком узкой ширины спектральных каналов. Оптимальная ширина узких каналов должна сохранить особенности спектра, одновременно обеспечив отсутствие смещения местоположения локальных минимумов/максимумов, а также точек изгиба. Это означает необходимость нахождения компромисса между способностью разрешать спектральные детали и возможностью удаления шума.

**Таблица 1.** Оптимальные узкие каналы для дистанционного мониторинга состояния растительности в диапазоне 395–1010 нм

Центр канала, нм	Важность для дистанционного мониторинга состояния растительности
418	максимум поглощения Chl <i>a</i> в 428 нм, плечо поглощения Ca <sub>g</sub> в 425 нм
461	максимум поглощения Chl <i>b</i> в 453 нм, максимумы поглощений Ca <sub>g</sub> в 455 и 480 нм
489	максимум поглощения Chl <i>b</i> в 453 нм, максимумы поглощений Ca <sub>g</sub> в 455 и 480 нм
518	максимум положительного изменения наклона спектра отражения, чувствительность к содержанию Anth и хлоропласту
547	максимум коэффициента отражения в зеленой области спектра, сильная взаимосвязь с содержанием полного Chl, максимум поглощения Anth в 530 нм
575	максимум отрицательного изменения наклона спектра отражения, чувствительность к содержанию Anth и хлоропласту
604	максимум поглощения Chl <i>b</i> в 642 нм
661	максимум поглощения Chl <i>a</i> ; чувствительность к биомассе, индексу листовой поверхности LAI (leaf area index, LAI), фону почвы, структуре покрова, N, влажности, виду и стрессу растений
675	максимум поглощения Chl <i>a</i> в 661 нм, наибольший контраст почва/растения; чувствительность к биомассе, LAI, фону почвы, структуре покрова, N, влажности, виду и стрессу растений
704	начало области красного края (начало значительного изменения спектра от высокого поглощения к высокому отражению), наибольшая чувствительность к стрессу растений, дополнительная информация о содержании Chl и N
718	центр области красного края – максимум изменения наклона спектра отражения в видимой и ближней ИК-областях спектра, наибольшая чувствительность к стрессу растений, дополнительная информация о содержании Chl и N
846	центр плеча максимума коэффициента отражения в ближней ИК-области спектра, сильная корреляция с содержанием полного Chl
875	максимум коэффициента отражения в ближней ИК-области спектра
904	максимум коэффициента отражения в ближней ИК-области спектра для некоторых видов и/или фаз развития растений
918	максимум коэффициента отражения в ближней ИК-области спектра в 920 нм
975	максимум поглощения воды в 970 нм
Ширина каналов – 14.3 нм.	

В (Ray et al., 2010) исследована ширина каналов в диапазоне 325–1075 нм для следующих с.-х. культур: рис, пшеница, кукуруза, просо, мелкий горошек, соя, горчица и хлопок. Данные каналов с шириной 3 нм имели высокий уровень шума, несколько меньшим шумом характеризуются данные каналов с шириной 5 нм (рис. 4а (Ray et al., 2010)). Значительное снижение шума начинается с ширины 10 нм. Однако при ширине 20–30 нм многие полосы поглощения сглаживаются, как может быть замечено в диапазоне 700–750 нм для первой производной спектра отражения риса (рис. 4б (Ray et al., 2010)).

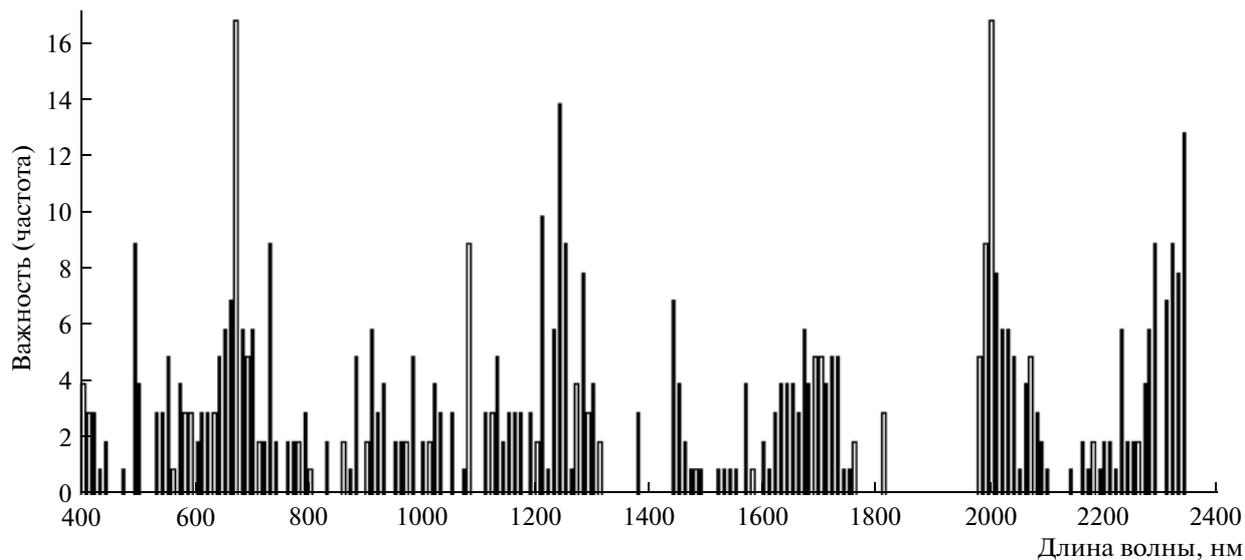
Для диапазона 700–800 нм (включающего область красного края) более узкая ширина снижает среднеквадратическую ошибку (СКО). Для диапазонов 600–700 и 800–900 нм нет какого-либо изменения СКО до ширины каналов 15 нм (рис. 5 (Ray et al., 2010)). Для диапазонов 400–500 и 900–

1000 нм СКО не изменяется до ширины 25 нм, поскольку в этих диапазонах коэффициент отражения близок к однородному.

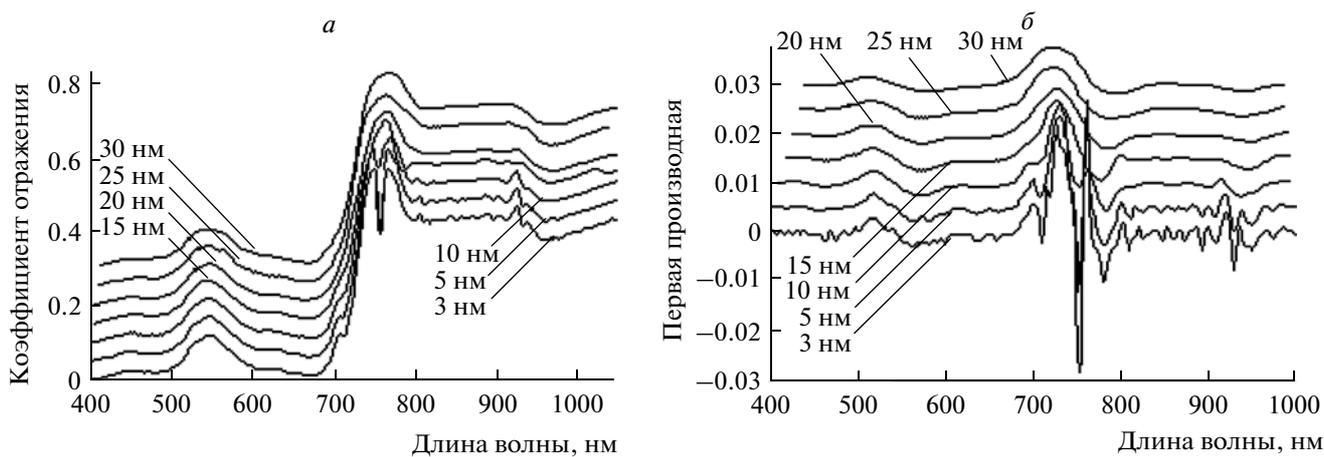
Таким образом, оптимальная ширина отличается для различных областей спектра. В области красного края и начала ближней ИК-области спектра оптимальная ширина является узкой (5–10 нм), тогда как в областях 500–700 и 800–900 нм она составляет до 25 нм.

#### ИНФОРМАТИВНОСТЬ ДАННЫХ УЗКИХ И ШИРОКИХ КАНАЛОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

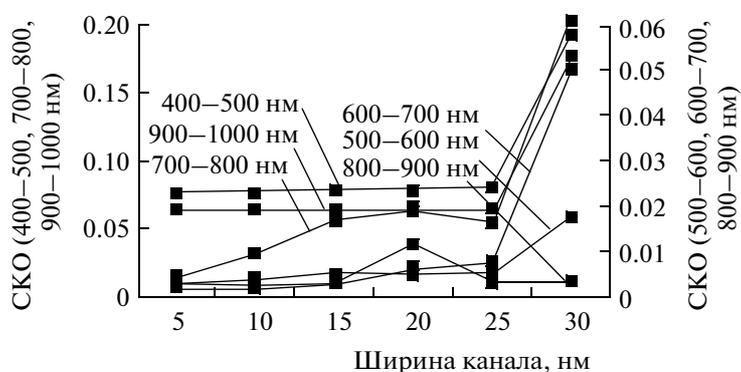
Четыре узких канала в диапазоне 395–1010 нм (547, 675, 718 и 904 нм) значительно улучшают отделимость шести видов культур по сравнению с четырьмя широкими каналами сенсора Landsat TM



**Рис. 3.** Важность узких каналов для дистанционного мониторинга состояния растительности в диапазоне 350–2500 нм (определена на основании анализа главных компонент, корреляционного анализа и пошагового дискриминантного анализа).



**Рис. 4.** Влияние ширины каналов на: *а* – спектр отражения; *б* – первую производную спектра отражения для риса с нормой внесения азота = 180 кг/га (спектры отображены со смещением по вертикали).



**Рис. 5.** Зависимость среднеквадратической ошибки коэффициента отражения от ширины каналов для различных областей спектра.

**Таблица 2.** Оптимальные узкие каналы для дистанционного мониторинга состояния растительности в диапазоне 350–2500 нм

Центр канала, нм	Важность для дистанционного мониторинга состояния растительности
495	чувствительность к старению, Саг и фону почвы
555	максимум коэффициента отражения в зеленой области спектра, чувствительность к содержанию полного Chl и N
655	максимум поглощения Chl <i>a</i> в 661 нм; чувствительность к биомассе, LAI, фону почвы, структуре покрова, N, влажности, виду и стрессу растений
675	максимум поглощения Chl <i>a</i> в 661 нм, наибольший контраст почва/растения в диапазоне 350–2500 нм для многих видов растений в большинстве фаз развития; чувствительность к биомассе, LAI, фону почвы, структуре покрова, N, влажности, виду и стрессу растений
705	начало быстрого изменения наклона спектра отражения, наибольшая чувствительность к стрессу растений, дополнительная информация о содержании Chl и N
735	окончание быстрого изменения наклона спектра отражения, наибольшая чувствительность к стрессу растений, дополнительная информация о содержании Chl и N
885	предмаксимум коэффициента отражения в ближней ИК-области спектра; чувствительность к содержанию полного Chl, биомассе, LAI и белку
915	максимум коэффициента отражения в ближней ИК-области спектра; чувствительность к содержанию полного Chl, биомассе, LAI и белку
985	максимум поглощения воды в 970 нм; в этом канале выполнимы прямые измерения содержания пара воды в и по покрову растительности
1085	1-й максимум коэффициента отражения в диапазоне 1050–1300 нм, чувствительность к биомассе и LAI
1135	пост 1-го максимума коэффициента отражения в диапазоне 1050–1300 нм, чувствительность к биомассе и LAI
1215	максимум поглощения воды в 1200 нм
1245	пред 2-го максимума коэффициента отражения в диапазоне 1050–1300 нм, чувствительность к биомассе и LAI
1285	2-й максимум коэффициента отражения в диапазоне 1050–1300 нм, чувствительность к биомассе и LAI
1445	максимум поглощения воды в 1450 нм
1675	1-й максимум коэффициента отражения в средней ИК-области спектра; чувствительность к лигнину, биомассе и крахмалу
1725	пост 2-го максимума коэффициента отражения в средней ИК-области спектра; чувствительность к биомассе, целлюлозе и лигнину
2005	1-й максимум поглощения воды в диапазоне 1900–2350 нм
2035	2-й максимум поглощения воды в диапазоне 1900–2350 нм
2235	2-й максимум коэффициента отражения в средней ИК-области спектра; чувствительность к лигнину, биомассе и крахмалу
2295	2-й максимум коэффициента отражения в средней ИК-области спектра; чувствительность к фону почвы и стрессу растений
2345	2-й максимум поглощения в средней ИК-области спектра; чувствительность к стрессу растений, лигнину и крахмалу

Ширина каналов – 10 нм.

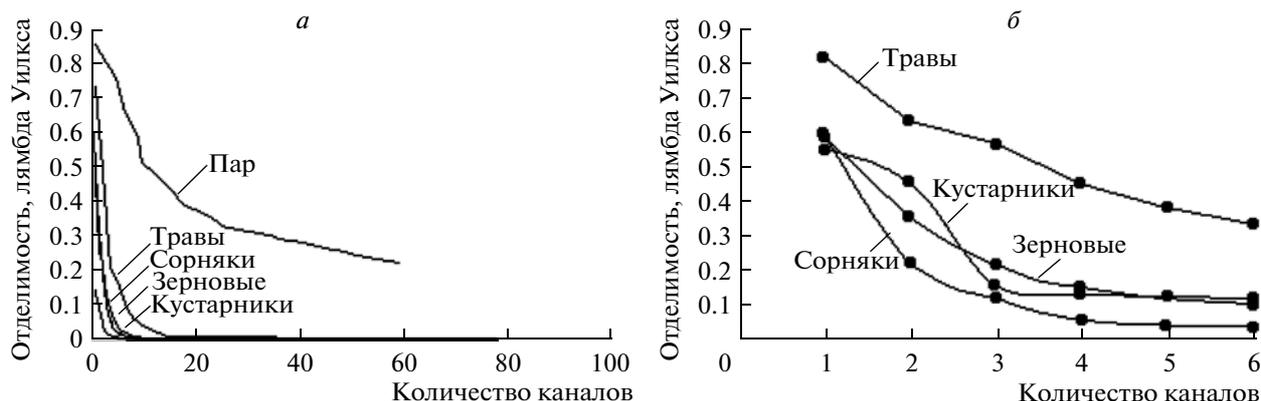


Рис. 6. Отделимость культур (чем меньше значение лямбда Уилкса, тем выше отделимость): а – узкие каналы; б – широкие каналы сенсора Landsat TM.

(485, 560, 665 и 830 нм) и обеспечивают такую же отделимость, как и шесть широких каналов (с каналом в средней ИК-области спектра) (Thenkabail, 2001). Это показывает преимущество узких каналов в определенных областях спектра. Отделимость значительно улучшается с увеличением количества узких каналов до 12, и в меньшей степени – при дальнейшем увеличении каналов до 16. Улучшение отделимости становится близким к асимптотическому (статистически незначим) при использовании более 16 каналов. Таким образом, 12–16 узких каналов могут обеспечить оптимальную отделимость видов культур.

Дополнение двух широких каналов средней ИК-области спектра (ТМ5 и ТМ7) к четырем каналам видимой/ближней ИК-областей спектра (ТМ1, ТМ2, ТМ3 и ТМ4) значительно увеличивает точность классификации (на 10%). Это – обещающая особенность, которая подразумевает, что дополнение определенных каналов средней ИК-области спектра к каналам видимой/ближней ИК-областей спектра увеличивает отделимость и точность классификации культур (Thenkabail, 2001). Шесть узких каналов обеспечивают значительно лучшую точность классификации четырех зерновых культур (ячмень, чечевица, вика и пшеница) по сравнению с шестью широкими каналами сенсора Landsat TM. Однако для таких культур, как нут и тмин, шесть широких каналов сенсора Landsat TM обеспечивают большую точность, чем шесть узких каналов. Это обусловлено наличием каналов средней ИК-области спектра (ТМ5 и ТМ7), которые наиболее полезны в отношении культур с комплексными эффектами фона почвы, сухой и зеленой биомассы. Тмин и нут (доля покрова 48 и 69%) характеризовались низкими уровнями биомассы в фазе старения и наибольшим эффектом фона почвы.

Точность классификации зерновых культур значительно возрастает с увеличением количе-

ства узких каналов до 12, после чего увеличение характеризуется низкой нормой. Например, при использовании 12 узких каналов точность возрастает до 80% для таких зерновых культур, как ячмень (84.1%), нут (85.7%), тмин (100%), пшеница (82.2%), и более 60% для чечевицы (65.2%) и вики (64.3%). С увеличением количества каналов с 12 до 16 точность классификации остается почти такой же, как для 12 каналов. Точность классификации превышает 90% для всех зерновых культур кроме вики (85.7%) только при использовании 43 каналов. Эти каналы охватывают весь диапазон 395–1010 нм, тогда как 12 каналов выбраны в наиболее чувствительных областях данного диапазона и позволяют исключить избыточность каналов.

Узкие каналы определенных областей спектра имеют большую чувствительность к биофизическим характеристикам. Так, ширококанальный индекс (вычисленный с использованием каналов ТМ2 и ТМ3) имеет значения  $r^2 = 0.50$  с LAI и 0.51 с влажной биомассой. Соответствующий узкоканальный индекс (вычисленный с использованием каналов 550 и 680 нм шириной 15 нм) имеет значение  $r^2 = 0.67$  с LAI и влажной биомассой (Thenkabail, 2001).

Почти полная отделимость культур в диапазоне 350–2500 нм (Thenkabail et al., 2004) достигнута между 11 и 20 узкими каналами (рис. 6а). При количестве каналов более 14 отделимость возрастает лишь незначительно. При количестве каналов более 20 отделимость приобретает асимптотический характер, кроме видов земель под паром. Для них отделимость относительно низка даже при использовании 26 каналов. Спектральные данные для пара составлены из более 25 видов – такое высокое разнообразие и обусловило низкую отделимость. Напротив, даже при использовании всех шести широких каналов сенсора Landsat TM отделимость значительно ниже по

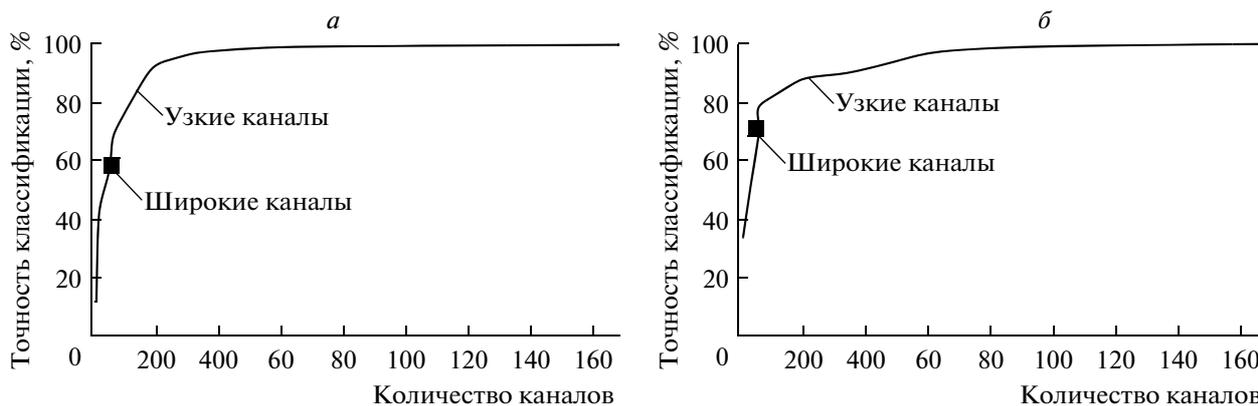


Рис. 7. Точность классификации: а – пяти видов сорняка; б – шести видов зерновых культур.

сравнению с узкими каналами (рис. 6б (Thenkabail et al., 2004)).

Для первых 10–15 каналов точность классификации всех видов культур в (Thenkabail et al., 2004) быстро возрастает с каждым дополнительным каналом, достигая плато (около 94%), как правило, между 13 и 22 каналами. Так, при классификации пяти видов сорняка точность увеличилась с 56% для трех каналов, до 72% – для семи каналов, до 90% – для 13 каналов и до 98% – для 22 каналов (рис. 7а (Thenkabail et al., 2004)). То есть лучшие 22 узких канала обеспечивают почти максимальную точность классификации. Для зерновых культур 13 каналов обеспечили точность 90%, но требовалось более 50 каналов для достижения 98% (рис. 7б (Thenkabail et al., 2004)), – отражая пределы возможностей гиперспектральных данных.

Наибольшее увеличение точности 15% было при добавлении каналов диапазона 1051–1300 нм (к каналам диапазона 350–1050 нм): 1085, 1135, 1215, 1245 и 1285 нм, далее 8% при добавлении каналов диапазона 1300–2500 нм: 1445, 1675, 1725, 2005, 2035, 2235, 2295, 2345 нм. Вместе с тем ролью каналов диапазона 1051–2500 нм удивительно пренебрегают в большинстве сенсоров, тогда как использование узких каналов в этом диапазоне может улучшить дистанционный мониторинг состояния растительности за счет обеспечения дополнительной информации, не доступной в каналах диапазона 300–1050 нм (Thenkabail et al., 2004).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спектры отражения большинства видов растительности замечательно идентичны из-за схожести в химическом составе и структуре. В результате множество различных факторов (заморозки, болезни, условия влажности, выпадение града и др.) вызывают очень схожие изменения спектра отражения и смещение местоположения

красного края. Поэтому, несмотря на то, что данные ДЗЗ позволяют обнаруживать изменения состояния растительности, их специфическая причина не всегда может быть определена исключительно из данных ДЗЗ. В этой связи, используется вспомогательная информация (как правило, наземная – погодные условия, фаза развития, севооборот и др.).

В диапазоне 395–1010 нм оптимальными для дистанционного мониторинга состояния растительности являются следующие 16 узких каналов (ширина канала 14.3 нм):  $\lambda_1 = 418$ ,  $\lambda_2 = 461$ ,  $\lambda_3 = 489$ ,  $\lambda_4 = 518$ ,  $\lambda_5 = 547$ ,  $\lambda_6 = 575$ ,  $\lambda_7 = 604$ ,  $\lambda_8 = 661$ ,  $\lambda_9 = 675$ ,  $\lambda_{10} = 704$ ,  $\lambda_{11} = 718$ ,  $\lambda_{12} = 846$ ,  $\lambda_{13} = 875$ ,  $\lambda_{14} = 904$ ,  $\lambda_{15} = 918$ ,  $\lambda_{16} = 975$  нм. Наилучшие четыре канала: 547, 675, 718 и 904 нм. В диапазоне 395–2500 нм оптимальными являются следующие 22 узких канала (при отсутствии упоминания ширина канала составляет 10 нм):  $\lambda_1 = 495$ ,  $\lambda_2 = 555$ ,  $\lambda_3 = 645–665$ ,  $\lambda_4 = 675–695$ ,  $\lambda_5 = 705$ ,  $\lambda_6 = 735$ ,  $\lambda_7 = 885$ ,  $\lambda_8 = 915–935$ ,  $\lambda_9 = 985$ ,  $\lambda_{10} = 1085$ ,  $\lambda_{11} = 1135$ ,  $\lambda_{12} = 1215$ ,  $\lambda_{13} = 1235–1255$ ,  $\lambda_{14} = 1275–1285$ ,  $\lambda_{15} = 1445–1455$ ,  $\lambda_{16} = 1675–1705$ ,  $\lambda_{17} = 1715–1735$ ,  $\lambda_{18} = 1985–2015$ ,  $\lambda_{19} = 2025–2045$ ,  $\lambda_{20} = 2235$ ,  $\lambda_{21} = 2275–2295$  и  $\lambda_{22} = 2315–2345$  нм. Наилучшие четыре канала: 675, 1245, 2005 и 2345 нм. Различия между оптимальными каналами диапазонов 350–2500 и 395–1010 нм обусловлены главным образом разной шириной каналов и расширением диапазона. Оптимальная ширина спектральных каналов отличается для разных областей спектра. В области красного края и начала ближней ИК-области спектра оптимальная ширина составляет 5–10 нм, тогда как в областях 500–700 и 800–900 нм – до 25 нм.

Узкие каналы определенных областей спектра имеют большую чувствительность (чем широкие каналы) к биофизическим характеристикам растительности, улучшают делимость и точность классификации ее видов. Значительное улучшение может быть достигнуто с использованием

большого количества каналов видимой/ближней ИК-областей спектра, либо с использованием меньшего количества каналов видимой/ближней ИК/средней ИК-областей спектра.

Важность каналов определенных областей спектра для дистанционного мониторинга состояния растительности признана их включением в последовательность специализированных (разработанных для приложений сельского хозяйства) сенсоров нового поколения. Так, в сенсор WorldView-2 MS помимо традиционных спектральных каналов (450–510, 510–580, 630–690, 770–895 нм) включены четыре дополнительных: 400–450, 585–625, 700–730, 860–1040 нм. А в сенсорах RapidEye MS дополнительно к традиционным каналам (440–510, 520–590, 630–690, 760–880 нм) включен канал области красного края 690–730 нм.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Apan A., Chandler O., Young F., Maraseni T.* Opportunities and limitations of remote sensing for crop loss (hail damage) assessment in the insurance industry // Proc. SSC 2005 Spatial Intelligence, Innovation and Praxis. Melbourne, Australia, 2005. P. 19–28.
- Asner G.P.* Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance // Rem. Sens. Environ. 1998. V. 68. P. 234–253.
- Ayala-Silva T., Beyl C.A.* Changes in spectral reflectance of wheat leaves in response to specific macronutrient deficiency // Adv. Space Res. 2005. V. 35. № 2. P. 305–317.
- Blackburn G.A.* Hyperspectral remote sensing of plant pigments // J. Exp. Botany. 2007. V. 58. № 4. P. 855–867.
- Bravo C.* Automatic foliar disease detection in winter wheat // Ph. D. Diss.: Katholieke Universiteit Leuven Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen. Leuven, Belgium, 2006. 258 p.
- Chandler O., Apan A., Pullinger R., Bullen B.* Quantifying hail damage for crop loss assessment: Techniques using remote sensing and geographic information systems // Proc. 11<sup>th</sup> Australian Rem. Sens. and Photogram. Conf. Brisbane, 2002. P. 412–421.
- Chandler O., Young F.R., Apan A.* Assessment of hail damage to crops using satellite imagery and handheld hyperspectral data // Proc. 12<sup>th</sup> Australian Rem. Sens. and Photogram. Conf. Fremantle, 2004. 10 p.
- Franke J.* Spatiotemporal dynamics of stress factors in wheat analysed by multisensoral remote sensing and geostatistics // Ph. D. Diss.: Universitaets und Landesbibliothek Bonn, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät. Bonn, Germany, 2007. 150 p.
- Gitelson A.A., Chivkunova O.B., Merzlyak M.N.* Nondestructive estimation of anthocyanins and chlorophylls in anthocyanic leaves // Am. J. Botany. 2009. V. 96. № 10. P. 1861–1868.
- Gröll K.* Use of sensor technologies to estimate and assess the effects of various plant diseases on crop growth and development // Ph. D. Diss.: Universität Hohenheim, Fakultät Agrarwissenschaften. Stuttgart, Germany, 2008. 183 p.
- Li Z.-C., Zhou Q.-B., Lü X., Lin H.-R., Li S.* Hyperspectral features of winter wheat after frost stress at jointing stage // Acta Agronom. Sin. 2008. V. 34. № 5. P. 831–837.
- Merzlyak M.N., Chivkunova O.B., Solovchenko A.E., Naqvi K.R.* Light absorption by anthocyanins in juvenile, stressed, and senescing leaves // J. Exp. Botany. 2008. V. 59. № 14. P. 3903–3911.
- Penuelas J.* Reflectance indices indicative of changes in water and pigment contents of peanut and wheat leaves // Photosynthetica. 1999. V. 36. № 3. P. 355–360.
- Ray S.S., Jain N., Miglani A., Singh J.P., Singh A.K., Panigrahy S., Parihar J.S.* Defining optimum spectral narrow bands and bandwidths for agricultural applications // Curr. Sci. 2010. V. 98. № 10. P. 1365–1369.
- Steddom K., Jones D., Rush C.* A picture is worth a thousand words // Am. Phytopathol. Soc. Saint Paul, USA, 2005. 7 p.
- Stilwell A.R.* Remote sensing to detect the movement of wheat curl mites through the spatial spread of virus symptoms, and identification of thrips as predators of wheat curl mites // Ph. D. Diss.: University Nebraska, Lincoln, USA, 2009. 192 p.
- Thenkabail P.S., Enclona E.A., Ashton M.S., Van Der Meer B.* Accuracy assessments of hyperspectral waveband performance for vegetation analysis applications // Rem. Sens. Environ. 2004. V. 91. № 3–4. P. 354–376.
- Thenkabail P.S.* Optimal hyperspectral narrowbands for discriminating agricultural crops // Rem. Sens. Rev. 2001. V. 20. № 4. P. 257–291.
- Ustin S.L., Gitelson A.A., Jacquemoud S., Schaepman M., Asner G.P., Gamon J.A., Zarco-Tejada P.* Retrieval of foliar information about plant pigment systems from high resolution spectroscopy // Rem. Sens. Environ. 2009. V. 113. P. 67–77.
- Wrolstad R.E.* Current protocols in food analytical chemistry. John Wiley & Sons Inc, 2000. 1000 p.
- Xiaoping W., Zhang G.N., Hong K.Z.* Hyperspectral reflectance and their relationships with spring wheat growth status characteristics in rained agricultural areas of Loess Plateau // Proc. Photogram. Rem. Sens. and Spatial Inf. Sci. (ISPRS). Beijing, China, 2008. V. 37. Part B7. P. 403–408.
- Young F.R., Apan A., Chandler O.* Crop hail damage: insurance loss assessment using remote sensing // Proc. Rem. Sens. and Photogram. Society Annual Conf. (RSPSoc2004). Aberdeen, UK, 2004. 10 p.
- Zhang J.H., Xu Y., Yao F.M., Wang P.J., Guo W.J., Li L., Yang L.M.* Advances in estimation methods of vegetation water content based on optical remote sensing techniques // Sci. China Ser. E-Tech. Sci. V. 53. № 5. 2010. P. 1159–1167.
- Zur Y., Gitelson A.A., Chivkunova O.B., Merzlyak M.N.* The spectral contribution of carotenoids to light absorption and reflectance in green leaves // Proc. 2nd Int. Conf. Geospatial Information in Agriculture and Forestry. Buena Vista, 2000. V. 2. P. 17–23.

## **Optimal Spectral Channels of Aerospace Equipment for Vegetation Remote Sensing Monitoring (Foreign Publications Review by the Problem)**

**S. L. Kravtsov, D. V. Golubtsov, A. M. Lisova**

*United Institute of Informatics Problems, Belarus, Minsk*

The basic pigments of plants, the biophysical and biochemical factors determining absorption and reflection spectra of vegetation are characterized. Influence of growth stage, deficiency of mineral elements, frosts, diseases, hail damage and conditions of humidity on a vegetation reflection spectrum is considered. Optimal narrow spectral channels in the ranges of 395–1010 and 350–2500 nm, and also their width are presented for vegetation remote sensing monitoring. Comparison the data of narrow and wide channels for vegetation remote sensing monitoring is made. This work is correspond systematization of foreign publications by the stated questions.

**Keywords:** optimal spectral channels, remote sensing monitoring, vegetation