

<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>2011</b>	<b>Том</b>		<b>Номер выпуска</b>	<b>5</b>	
<b>Название статьи</b>					<b>Страницы</b>	<b>Цит.</b>
<b>МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ</b>						
	<b>МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ</b> Веселов Ю.Г.				3-10	3
<b>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ</b>						
	<b>О РОЛИ ПРИВОДНОГО ВЕТРА ПРИ РАСЧЕТЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА АТЛАНТЭКС-90</b> Гранков А.Г.				11-14	1
	<b>НАБЛЮДЕНИЕ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР БАЛТИЙСКОГО МОРЯ С ПОМОЩЬЮ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ И РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ</b> Каримова С.С., Лаврова О.Ю., Соловьев Д.М.				15-23	6
	<b>ВОССТАНОВЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОПОГРАФИИ ЧЕРНОГО МОРЯ ДЛЯ АЛЬТИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ</b> Кубряков А.А., Станичный С.В.				24-30	5
	<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКИ В РАЙОНЕ НЕФТЕПРОМЫСЛОВ "НЕФТЯНЫЕ КАМНИ" В КАСПИЙСКОМ МОРЕ</b> Иванов А.Ю., Достовалов М.Ю., Синева А.А.				31-44	6
	<b>МЕЖГОДОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР СЕВЕРО-ВОСТОКА ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ</b> Елсаков В.В., Марущак И.О.				45-57	10
	<b>ИССЛЕДОВАНИЕ КРИОГЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ГРУНТА В ДЕЛЬТЕ РЕКИ СЕЛЕНГА С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВОЙ РСА-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ И НАЗЕМНОГО ГЕОРАДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ</b> Чимитдоржиев Т.Н., Захаров А.И., Татьков Г.И., Хаптанов В.Б., Дмитриев А.В., Будаев Р.Ц., Цыбенков Ю.Б.				58-63	9
	<b>ОЦЕНКА КОЛИЧЕСТВЕННЫХ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОСЕВОВ НАРКОСОДЕРЖАЩИХ КУЛЬТУР ПО ДАННЫМ АВИАЦИОННОГО ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ</b> Егоров В.В., Ильин А.А., Калинин А.П., Родионов А.И., Родионов И.Д.				64-69	3
	<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЕСНЫХ И ТОРФЯНЫХ ПОЖАРОВ ПО ДАННЫМ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО АЭРОЗОНДИРОВАНИЯ</b> Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Дмитриев Е.В., Каменцев В.П.				70-79	6
	<b>ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ЗАБРОШЕННЫХ ТОРФОРАЗРАБОТОК ПО МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫМ СПУТНИКОВЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ</b> Медведева М.А., Возбранная А.Е., Барталев С.А., Сирин А.А.				80-88	2
<b>КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ, СИСТЕМЫ И ПРОГРАММЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА</b>						
	<b>ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАЛОГО КА ДЗЗ "МОНИТОР-Э" И ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ЕГО УЛУЧШЕННОГО АНАЛОГА КА "МОНИТОР-2"</b> Михайлов Е.В., Михеев О.В., Положенцев А.Е., Судаков В.М.				89-96	2

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

### МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

© 2011 г. Ю. Г. Веселов

ВУНЦ ВВС "Военно-воздушная академия им. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина"

E-mail: vesel\_foto@mail.ru

Поступила в редакцию 22.12.2010 г.

В работе предложено для оценки технического состояния цифровых оптико-электронных систем и комплексов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) воспользоваться статистической теорией распознавания образов. Разработан подход к оценке эффективности системы распознавания технического состояния. Получено аналитическое выражение средней вероятности ошибки распознавания и показано, что на его основе, имеется возможность оценить качество признаков и решающего правила.

**Ключевые слова:** цифровые оптико-электронные системы дистанционного зондирования Земли, решающее правило, оценка технического состояния, показатели качества изображения, распознавание образов

#### ПРЕИМУЩЕСТВА ЭКСПЛУАТАЦИИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ПО СОСТОЯНИЮ

Современные цифровые технологии, обладая колоссальными возможностями по обработке, передаче и хранению огромных объемов информации, все активнее внедряются в самые разные сферы человеческой деятельности и прежде всего в те из них, где традиционно господствовали аналоговые.

Быстрое развитие цифровых технологий не могло не заинтересовать специалистов, занимающихся вопросами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), и уже в настоящее время цифровые технологии широко применяются в новых разработках аппаратуры ДЗЗ.

Неоспоримым преимуществом цифрового сигнала перед аналоговым являются удобство его компьютерной обработки (возможность автоматизированной обработки видеоданных с целью сокращения их избыточности, компенсации шумов и геометрических искажений), а также меньшая продолжительность времени получения видеoinформации потребителем с момента ее регистрации. Весомым аргументом в пользу цифрового представления видеoinформации является возможность сохранения последней в неизменном виде в течение практически неограниченного времени, что нельзя сказать о аналоговых снимках на фотопленке.

Известно, что эффективность применения оптико-электронных систем (ОЭС) ДЗЗ напрямую зависит от их технического состояния.

В последние годы приобретает все большую популярность метод эксплуатации аэрокосмической техники по техническому состоянию. С внедрением программ обслуживания и ремонта по состоянию появляются необходимая база и реальная возможность осуществления безресурсной эксплуатации большинства изделий аэрокосмической техники.

Адаптация программы эксплуатации по техническому состоянию к ОЭС и комплексам ДЗЗ не только позволяет сократить временные и материальные затраты на их эксплуатацию, но также дает возможность иметь постоянную систему контроля за их характеристиками с целью оценки эффективности применения в определенных условиях.

Исторически сложилась следующая система контроля технического состояния ОЭС ДЗЗ, включающая:

- оценку технического состояния ОЭС ДЗЗ посредством визуального контроля качества изображения;
- визуальный контроль качества изображения параллельно с использованием контрольно-проверочной аппаратуры;
- оценку технического состояния ОЭС ДЗЗ посредством автоматизированной оценки показателей качества изображения.

Отечественный и зарубежный опыт свидетельствуют, что эксплуатация ОЭС ДЗЗ, основанная на программе технического обслуживания по состоянию, наилучшим образом обеспечивает заданные уровни надежности, готовности и эффективности применения средств ДЗЗ по назначению при оценке их технического состояния на основе способов автоматизированного контроля качества изображения параллельно с использованием систем встроенного контроля.

ОЭС ДЗЗ в настоящее время представлены широким классом систем, работающих во всех областях оптического диапазона (ультрафиолетовый, видимый и инфракрасный), и имеют различные принципы формирования изображения (кадровые, линейного сканирования, панорамные и т.д.).

Реализация стратегии эксплуатации по состоянию возможна только при наличии достоверной информации о текущем техническом состоянии объекта контроля (диагностирования), причем средства и методы контроля должны обеспечивать оценку технического состояния по возможности без демонтажа оборудования с летательного аппарата и с применением минимального количества контрольно-проверочной аппаратуры.

С учетом этих требований основными способами оценки технического состояния при техническом обслуживании по состоянию могут являться контроль бортовой аппаратуры средств ДЗЗ с помощью встроенных систем контроля и по материалам их применения.

Цифровая съемка новая, исключительно быстро развивающаяся, область техники. Особенности конструкции цифровых ОЭС ДЗЗ и принципы получения изображения выдвигают несколько иные требования к оценке показателей качества получаемых изображений и встроенному контролю. Также анализ алгоритмов функционирования встроенных систем контроля оптико-электронных комплексов ДЗЗ показал, что они не обеспечивают требуемой достоверности оценки их технического состояния. Таким образом, наиболее приемлемым способом оценки технического состояния цифровых ОЭС ДЗЗ является способ оценки технического состояния по материалам применения.

#### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОЭС И КОМПЛЕКСОВ ДЗЗ

Оценка технического состояния ОЭС ДЗЗ по материалам применения основывается на определении качества получаемых аэрокосмических снимков, посредством анализа значений показателей качества изображения. Таким образом, по-

казатели качества являются параметрами контроля технического состояния ОЭС ДЗЗ. Под качеством будем понимать свойство изображения, характеризующее его способность нести в себе сведения о геометрических и фотометрических характеристиках и параметрах объектов. Показатель качества изображения - это величина, служащая конкретным индикатором этого свойства. К показателям качества изображения предъявляется ряд требований: они должны однозначно характеризовать свойства изображения и их изменение, быть применимыми для анализа каждого звена и оптико-электронной системы в целом.

Проблема выбора контролируемых параметров (признаков технического состояния) из полного набора показателей качества изображения является одной из ключевых в постановке задачи по оценке технического состояния ОЭС ДЗЗ. Контролируемые параметры должны быть наиболее информативными параметрами контролируемой системы.

Наиболее информативный параметр ОЭС ДЗЗ – это такой параметр, который оказывает наибольшее влияние на качество получаемого этой системой изображения.

При эксплуатации ОЭС ДЗЗ по состоянию основной задачей является идентификация вида технического состояния объекта эксплуатации. Для более объективной оценки состояния используются, как правило, несколько параметров (признаков) контроля, желательно не коррелированных друг с другом. Для оценки технического состояния ОЭС ДЗЗ в силу случайности параметров контроля целесообразно воспользоваться статистической теорией распознавания образов. В качестве объектов распознавания будем рассматривать виды технического состояния цифровых ОЭС ДЗЗ (например: работоспособное, предотказное, частично неработоспособное, полностью неработоспособное (ГОСТ 27.002-89..., 1990)), а в качестве признаков объектов распознавания параметры (признаки) объекта контроля.

Часто достоверная информация об априорных сведениях отсутствует. В этом случае в качестве решающего правила классификации, по которому расчетные значения вектора признаков сравниваются с эталонными, выберем критерий максимума функции правдоподобия.

Необходимо также отметить, что одной из особенностей ОЭС ДЗЗ является то, что в получаемых ими материалах содержится информация не только об их техническом состоянии, но и об условиях съемки. Причем влияние внешних условий настолько велико, что может ухудшить значения контролируемых параметров до значений, соответствующих неработоспособному состоянию ОЭС, хотя объективно исследуемая система находится в работоспособном состоянии. Таким

образом, разрабатываемая система оценки технического состояния должна быть адаптивна под различные условия и задачи применения, посредством формирования эталонных признаков для каждой задачи и условий применения.

Учесть влияние внешних условий на значение контролируемых параметров позволяет математическая модель ОЭС ДЗЗ, базирующаяся на линейной теории ОЭС и реализующая аналитический способ оценки разрешающей способности, а также специализированная методика оценки возможностей рассматриваемых систем ДЗЗ (Веселов и др., 2003).

Во время разработки системы распознавания определяются эталонные признаки объектов для каждого класса. Причем эталонные признаки могут формироваться с использованием собранного статистического материала по результатам эксплуатации контролируемых систем (если он имеется), а также с использованием сильных методов решения задач – экспертных систем. Простейшая структура экспертной системы, используемая для таких целей, представлена на рис. 1.

Рассматриваемый в работе вероятностный подход предполагает знание оценок математических ожиданий вектора признаков и разброс или связи внутри класса, задаваемые ковариационной матрицей. Из априорных данных формируется полное множество гипотез по классам. Расчетные признаки сравниваются с эталонными признаками. По минимуму расстояния принимается решение о принадлежности наблюдения к гипотезе (Белоглазов, Казарин, 1998).

Рассмотрим математическую модель наблюдения вектора признаков

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$$

$$\tilde{x} = x + \xi, \tag{1}$$

где  $\tilde{x}$  – наблюдения вектора признаков, например,  $\tilde{x} = (\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_m)$ ;  $\xi$  – центрированный случайный вектор погрешностей.

Причем количество элементов вектора признаков для оптико-электронного комплекса ДЗЗ равно сумме элементов для каждого средства входящего в состав рассматриваемого комплекса.

К примеру, для оценки технического состояния цифровых кадровых ОЭС ДЗЗ, работающих в видимом диапазоне, в качестве параметров контроля используются такие, как (Веселов и др., 2007) разрешающая способность  $R$ , количество передаваемых градаций яркости  $m$ , количество дефектных элементов фоточувствительного прибора с зарядовой связью (ФПЗС) или КМОП (комплемментарная структура металл–оксид–полупроводник) приемника излучения  $k$  и составляющие дисторсии по координатным осям  $\delta x_{вд}$ ,  $\delta y_{вд}$ . Вектор признаков будет иметь вид  $x = (R, m, k, \delta x_{вд}, \delta y_{вд})$ .



Рис. 1. Структура экспертной системы для определения эталонных признаков.

Для инфракрасной (ИК) системы в качестве параметров контроля используются угловое разрешение  $\gamma$ , энергетическое разрешение  $\Delta T$ , количество дефектных элементов многоэлементного приемника излучения  $k$  и составляющие дисторсии по координатным осям  $\delta x_{ИК}$ ,  $\delta y_{ИК}$ , вектор признаков  $x = (\gamma, \Delta T, k, \delta x_{ИК}, \delta y_{ИК})$ . Вектор параметров контроля технического состояния оптико-электронного комплекса ДЗЗ, состоящего из двух систем цифровой кадровой ОЭС ДЗЗ, работающей в видимом диапазоне, и ИК-системы ДЗЗ, будет иметь вид  $x = (R, m, k, \delta x_{вд}, \delta y_{вд}, \gamma, \Delta T, k, \delta x_{ИК}, \delta y_{ИК})$ .

Сформулируем задачу идентификации вектора состояния объекта контроля  $x$  следующим образом.

Для оценки вида технического состояния с использованием предлагаемой методики, посредством определения наиболее вероятных вектора математических ожиданий  $M_x$  и ковариационной матрицы  $R_x$  вектора  $x$ , необходимо иметь единственную реализацию  $\tilde{x}$  (она формируется с использованием специализированного методического обеспечения оценки параметров контроля технического состояния) и методику оценки эталонных признаков для каждого вида технического состояния с учетом условий применения.

Для решения задачи определим полное множество гипотез  $G = \{\Omega_0, \dots, \Omega_k, \dots, \Omega_{l-1}\}$ ,  $i = 0, \dots, l - 1$  и предположим, что вектор  $x$  характеризуется

условной нормальной многомерной плотностью распределения

$$P(x/\Omega_\nu) \in N\{M(x/\Omega_\nu), R(x/\Omega_\nu),\} \quad (2)$$

зависящей от гипотезы  $\Omega_\nu$ , которая имеет место во время проведения измерения. В определении (2) с помощью  $M(x/\Omega_\nu)$  обозначен вектор математических ожиданий эталонных признаков, с помощью  $R(x/\Omega_\nu)$  обозначена ковариационная матрица вектора признаков.

Пусть во время измерений имеет место произвольная гипотеза  $\Omega \in G$  тогда  $x$  можно представить в виде

$$\tilde{x} = M(x/\Omega) + \xi,$$

где,  $R(x/\Omega_k)$  – ковариационная матрица централизованного случайного вектора погрешностей, а  $M(x/\Omega_k)$  – вектор математических ожиданий эталонных признаков или образов, имеющих в системе наблюдения.

Таким образом,  $x$  является случайным вектором, принадлежащим одной из  $l$ -совокупностей (гипотез), причем  $x$  распределен нормально, с плотностью

$$P(x/\Omega_k) = (2\pi)^{-m/2} |R(x/\Omega_k)|^{-1/2} \times \exp\left[-\frac{1}{2}(\tilde{x} - M(x/\Omega_k))^T R^{-1}(x/\Omega_k)(\tilde{x} - M(x/\Omega_k))\right]. \quad (3)$$

Разумно отнести наблюдение  $\tilde{x}$  к той гипотезе, для которой функция правдоподобия максимальна. Максимум функции правдоподобия достигается минимизацией функционала  $J_k = \|\tilde{x} - M(x/\Omega_k)\|_{R(x/\Omega_k)^{-1}}^2$ , где  $\|\tilde{x} - M(x/\Omega_k)\|_{R(x/\Omega_k)^{-1}}^2$  – квадратичная форма вектора  $\tilde{x} - M(x/\Omega_k)$ , взвешенная с матрицей  $R^{-1}(x/\Omega_k)$ , т.е.

$$\begin{aligned} & \|\tilde{x} - M(x/\Omega_k)\|_{R(x/\Omega_k)^{-1}}^2 = \\ & = (\tilde{x} - M(x/\Omega_k))^T R^{-1}(x/\Omega_k)(\tilde{x} - M(x/\Omega_k)). \end{aligned}$$

Для решения задачи отыскивается минимальный функционал  $J_k$ . Наиболее вероятный вектор математических ожиданий  $M(x/\Omega_k)$  и наиболее вероятная ковариационная матрица  $M(xx^T)$  определяются наиболее вероятной гипотезой  $\Omega_k$ , выбранной в результате операции  $\min_k J_k$ .

В дальнейшем  $J_k$  будем называть оценочным функционалом, или просто функционалом

$$J_k = (\tilde{x} - M_k)^T R_k^{-1}(\tilde{x} - M_k), \quad (4)$$

где  $R_k = R(x/\Omega_k)$ ,  $M_k = M(x/\Omega_k)$ .

## ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ КЛАССИФИКАЦИИ СОСТОЯНИЙ ЦИФРОВЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ И КОМПЛЕКСОВ ДЗЗ

Оценим погрешность классификации состояний средней вероятностью ошибки (Фукунага, 1979), позволяющей заранее оценить качество признаков и решающего правила для любого количества гипотез. Для вычисления средней вероятности ошибки  $P_{\text{ош}}$  рассмотрим следующие величины:  $P_{kq}$  – условные вероятности того, что при наличии гипотезы  $\Omega_q$  принята гипотеза  $\Omega_k$ ;  $\Pi_{kq}$  – потери неправильного решения.

Запишем математическое ожидание потерь

$$R_n = M(\Pi_{kq}) = \sum_{k=0}^{l-1} \sum_{q=0}^{l-1} \Pi_{kq} P_{kq},$$

которое обычно называют средним риском. Для простой функции потерь

$$\Pi_{kq} = \begin{cases} 0, & k = q \\ 1, & k \neq q \end{cases}$$

риск равен средней вероятности ошибки  $P_{\text{ош}}$  неправильного решения

$$P_{\text{ош}} = \sum_{k=0}^{l-1} \sum_{q=0}^{l-1} P_{kq}, \quad \text{при } k \neq q. \quad (5)$$

Для нахождения вероятностей  $P_{kq}$  необходимо знать условное совместное распределение  $P(J/\Omega_q)$  вектора оценочных функционалов

$$J = (J_0, \dots, J_k, \dots, J_{l-1}), \quad (6)$$

тогда

$$P_{kq} = \int_{-\infty}^{+\infty} dJ_k \int_{-\infty}^{J_k} \dots \int_{-\infty}^{J_k} P(J/\Omega_q) \times dJ_0 \dots dJ_{k-1} dJ_{k+1} \dots dJ_{l-1}. \quad (7)$$

Рассмотрим произвольный функционал  $J_k$  как случайную величину

$$J_k = (\tilde{x} - M_k)^T R_k^{-1}(\tilde{x} - M_k). \quad (8)$$

Условное распределение  $P(J/\Omega_q)$  имеет место, когда

$$\tilde{x} = M_q + \xi, \quad M_q = M(\Omega_q). \quad (9)$$

“Ошибочный” функционал  $J_k^q$  (вместо  $q$ -й гипотезы рассматривается  $k$ -я гипотеза) получается при подстановке (9) в (8)

$$J_k^q = [M_q - M_k + \xi]^T R_k^{-1}[M_q - M_k + \xi].$$

Раскроем квадратичную форму

$$J_k^q = (M_q - M_k)^T R_k^{-1} (M_q - M_k) + 2\xi^T R_k^{-1} (M_q - M_k) + \xi^T R_k^{-1} \xi.$$

Пусть для всех гипотез совпадают ковариационные матрицы  $R_k = R(\Omega_k)$ , т.е. предположим, что дисперсии различных признаков слабо зависят от гипотез. Тогда в обозначении  $R_k$  можно убрать индекс  $k$ , а слагаемое  $\xi^T R_k^{-1} \xi$  не влияет на положение экстремума  $J_k$  по  $\Omega_k$ . Для вывода плотности  $P(J/\Omega_k)$  это слагаемое можно отбросить и рассмотреть соотношение

$$J_k^q = M_{k/q} + \eta,$$

где

$$M_{k/q} = [(M_q - M_k)]^T R^{-1} [(M_q - M_k)], \quad (10)$$

$$\eta = 2\xi^T R^{-1} (M_q - M_k).$$

Возмущение  $\eta$  нормально распределено, центрировано, поэтому случайная величина  $J_k^q$  распределена по нормальному закону, следовательно,  $l$ -мерная условная плотность вектора  $J = (J_0, \dots, J_k, \dots, J_{l-1})$  имеет вид

$$P(J/\Omega_q) = [(\sqrt{2\pi})^l \sqrt{\det K_J}]^{-1} \times \exp\left[-\frac{1}{2}(J - M_J)^T K_J^{-1} (J - M_J)\right],$$

где  $M_J = [M_{0/q}, M_{1/q}, \dots, M_{k/q}, \dots, M_{l-1/q}]^T$ ;  $K_J$  – условная ковариационная матрица вектора  $J$

$$K_J = [K_{k,n/q}] = [M((J_k^q - M_{k/q})(J_n^q - M_{n/q})^T)].$$

На основании (10) получим

$$M_{n/q} = (M_q - M_n)^T R^{-1} (M_q - M_n),$$

$$K_{k,n/q} = 4M\{\xi^T R^{-1} (M_q - M_k)\}[\xi^T R^{-1} (M_q - M_n)]^T\}.$$

Для упрощения дальнейших преобразований обозначим

$$(M_q - M_k) = m_k, \quad (M_q - M_n) = m_n. \quad (11)$$

Теперь запишем

$$K_{k,n/q} = 4M\{\xi^T R^{-1} m_k\}[\xi^T R^{-1} m_n]/\Omega_q\} = 4M\{[\xi^T R^{-1} m_n]^T [\xi^T R^{-1} m_k]/\Omega_q\} = 4M\{m_n^T R^{-1} \xi \xi^T R^{-1} m_k/\Omega_q\} = 4m_n^T R^{-1} M\{\xi \xi^T/\Omega_q\} R^{-1} m_k = 4m_n^T R^{-1} m_k.$$

С учетом обозначений (11) окончательно имеем

$$K_{k,n/q} = 4(M_q - M_n)^T R^{-1} (M_q - M_k); \quad (12)$$

$$k, n = 0, 1, \dots, l-1.$$

Диагональные элементы ковариационной матрицы  $[K_{k,n/q}]$  необходимо рассчитывать для  $k = n \neq q$ . Это условие определяется физическим смыслом “ошибочных” функционалов  $J_k^q$ .

Для вычисления интеграла (7) переведем координаты вектора  $J$  в ортонормированный базис с помощью преобразования Карунена–Лоева (Корн, Корн, 1984):

$$I = CJ,$$

где матрица  $C$  составлена по столбцам из ортонормированных собственных векторов ковариационной матрицы  $K_J$ . Важно, что матрица

$$\Lambda = CK_J C^T$$

диагональна, причем, на диагонали расположены собственные числа матрицы  $K_J$ . Обозначим их  $\lambda_{k/q}$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots, l-1$ .

Справедливо равенство плотностей

$$P(J/\Omega_q) = [(\sqrt{2\pi})^l \sqrt{\det K_J}]^{-1} \times \exp\left[-\frac{1}{2}(J - M_J)^T K_J^{-1} (J - M_J)\right] = [(\sqrt{2\pi})^l \sqrt{\det(CK_J C^T)}]^{-1} \times \exp\left\{-\frac{1}{2}[C(J - M_J)]^T [CK_J C^T]^{-1} [C(J - M_J)]\right\} = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^l \sqrt{\prod_{s=1}^{l-1} \lambda_{s/q}}} \exp\left[-\frac{1}{2} \sum_{\substack{s=0 \\ s \neq q}}^{l-1} \frac{(I_s - \tilde{M}_{s/q})^2}{\lambda_{s/q}}\right] = P(I/\Omega_q),$$

где

$$\tilde{M}_{s/q} = [C(M_q - M_s)]^T [CRC^T]^{-1} [C(M_q - M_s)];$$

$I_s$  – координаты вектора  $I = CJ$ ;  $\tilde{M}_{s/q}$  – координаты вектора  $M_I = CM_J$ ;  $\lambda_{s/q}$  – собственные числа условной ковариационной матрицы  $K_J$  (элементы  $K_J$  определены выражением (12)). Алгебраические преобразования позволили заменить плотность  $P(J/\Omega_q)$  на плотность  $P(I/\Omega_q)$ , система координат  $\{I_0, \dots, I_k, \dots, I_{l-1}\}$  повернута так, что функционалы  $I_k$ , принимающие значения на своих осях координат, статистически независимы. Благодаря этому необходимо вычислить интеграл

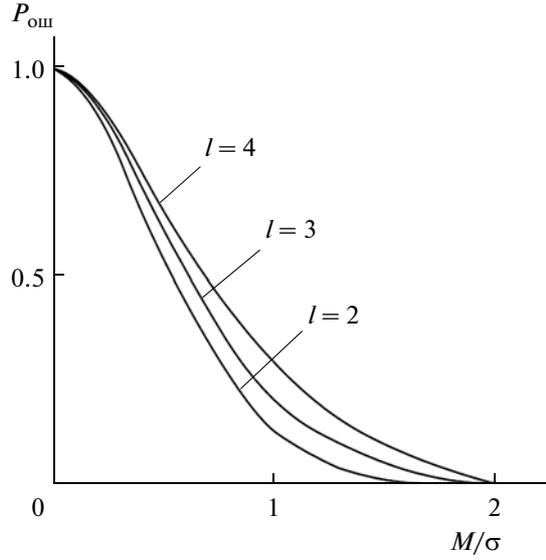


Рис. 2. Зависимость вероятности ошибочного распознавания от числа проверяемых гипотез.

$$P_{kq} = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^l} \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{s=1}^{l-1} \lambda_{s/q} \int_{-\infty}^{I_k} \dots \int_{-\infty}^{I_k} \times \exp \left[ -\frac{1}{2} \sum_{\substack{s=0 \\ s \neq q}}^{l-1} \frac{(I_s - \tilde{M}_{s/q})^2}{\lambda_{s/q}} \right] dI_0 \dots dI_{k-1} dI_{k+1} \dots dI_{l-1} \quad (13)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi\lambda_{0/q}}} \int_{-\infty}^{I_k} e^{-\frac{(I_0 - \tilde{M}_{0/q})^2}{2\lambda_{0/q}}} dI_0 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{I_0 - \tilde{M}_{0/q}}{\sqrt{\lambda_{0/q}}}} e^{-\frac{u_0^2}{2}} du_0 = \Phi \left( \frac{I_0 - \tilde{M}_{0/q}}{\sqrt{\lambda_{0/q}}} \right).$$

Преобразуем (13)

$$P_{kq} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\lambda_{k/q}}} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi\lambda_{0/q}}} \int_{-\infty}^{I_k} e^{-\frac{(I_0 - \tilde{M}_{0/q})^2}{2\lambda_{0/q}}} \times \right.$$

$$\times dI_0 \dots \frac{1}{\sqrt{2\pi\lambda_{k-1/q}}} \int_{-\infty}^{I_k} e^{-\frac{(I_{k-1} - \tilde{M}_{k-1/q})^2}{2\lambda_{k-1/q}}} dI_{k-1} \frac{1}{\sqrt{2\pi\lambda_{k+1/q}}} \times$$

$$\times \int_{-\infty}^{I_k} e^{-\frac{(I_{k+1} - \tilde{M}_{k+1/q})^2}{2\lambda_{k+1/q}}} dI_{k+1} \dots \frac{1}{\sqrt{2\pi\lambda_{l-1/q}}} \times$$

$$\left. \times \int_{-\infty}^{I_k} e^{-\frac{(I_{l-1} - \tilde{M}_{l-1/q})^2}{2\lambda_{l-1/q}}} dI_{l-1} \right\} e^{-\frac{(I_k - \tilde{M}_{k/q})^2}{2\lambda_{k/q}}} dI_k.$$

В каждом интеграле в фигурных скобках сделаем замену переменных  $I_s - \tilde{M}_{s/q} = u_s \sqrt{\lambda_{s/q}}$ ,  $s \neq k$ . Для примера рассмотрим первый интеграл

Аналогичным образом вычисляются остальные интегралы. После вычислений окончательно запишем

$$P_{kq} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\lambda_{k/q}}} \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{\substack{s=0 \\ s \neq k}}^{l-1} \Phi \left( \frac{I_k - \tilde{M}_{s/q}}{\sqrt{\lambda_{s/q}}} \right) e^{-\frac{(I_k - \tilde{M}_{k/q})^2}{2\lambda_{k/q}}} dI_k = \quad (14)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{y^2}{2}} \prod_{\substack{s=0 \\ s \neq k}}^{l-1} \Phi \left( \frac{y\sqrt{\lambda_{s/q}} + \tilde{M}_{s/q} - \tilde{M}_{k/q}}{\sqrt{\lambda_{s/q}}} \right) dy,$$

где  $y = \frac{I_k - \tilde{M}_{k/q}}{\lambda_{k/q}}$ ,  $\Phi(\cdot)$  определяется выражением

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt.$$

Таким образом, выражения (14), (6), (5) можно использовать для оценки значимости параметров контроля комплекса ОЭС ДЗЗ, а так же заранее

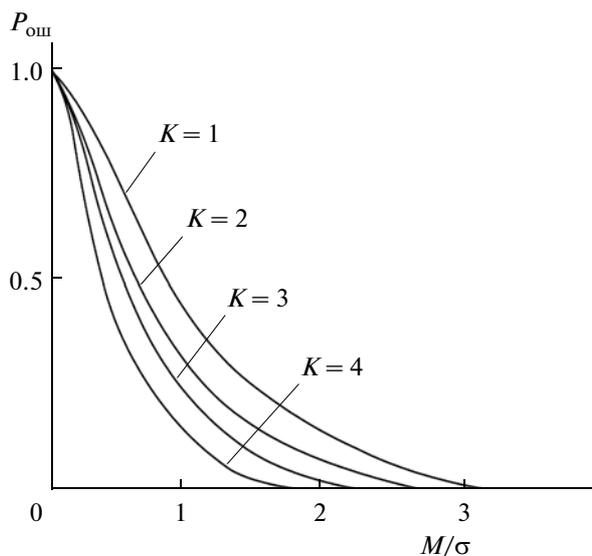


Рис. 3. Зависимость вероятности ошибочного распознавания от числа признаков.

рассчитать среднюю вероятность ошибки для любого количества гипотез.

В качестве вывода можно отметить, что в предложенной работе рассмотрены современные способы оценки технического состояния ОЭС ДЗЗ. Предложено для оценки технического состояния ОЭС и комплексов ДЗЗ воспользоваться статистической теорией распознавания образов.

Оценку эталонных признаков для каждого вида технического состояния предлагается осуществлять с использованием собранного статистического материала по результатам эксплуатации контролируемых систем, а также с использованием сильных методов решения задач – экспертных систем. Коррекцию полученных эталонных признаков под условия применения возможно выполнять на основе физико-аналитических исследований.

В работе предложена теория оценки эффективности системы распознавания технического состояния ОЭС ДЗЗ. Показано, что на основе аналитического выражения средней вероятности ошибки имеется возможность оценить качество признаков и решающего правила для любого количества гипотез и признаков рис. 2, 3. Анализ кривых, приведенных на рис. 2, показывает, что с увеличением числа проверяемых гипотез вероятность ошибочного распознавания увеличивается (имеется возможность оценить динамику изменения вероятности ошибочного распознавания). Зависимости на рис. 3 демонстрируют целесообразность использования нескольких признаков (параметров контроля) технического состояния.

По оси абсцисс на графиках отложена величина

$$M/\sigma = \sum_{q=0}^{l-1} \sum_{\substack{s=0 \\ s \neq k}}^{l-1} \left( \frac{|\tilde{M}_{s/q} - \tilde{M}_{k/q}|}{\sqrt{\lambda_{s/q}}} \right),$$

которая характеризует информативность признаков.

Для развития разработанного метода необходимо детально проработать вопрос оценки информативности параметров контроля технического состояния (показателей качества изображения) ОЭС ДЗЗ с целью выбора наиболее информативных.

Оценку информативности параметров контроля технического состояния, скорее всего, необходимо связать с величиной воздействия каждого параметра на эффективность применения ОЭС и комплексов ДЗЗ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белоглазов И.Н., Казарин С.Н. Совместное оптимальное оценивание, идентификация и проверка гипотез в дискретных динамических системах // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1998. № 4. С. 26–43.
- Веселов Ю.Г. и др. Исследование характеристик цифровых фотоаппаратов // Техника кино и телевидения. 2003. № 6. С. 39–41.
- Веселов Ю.Г., Тихонычев В.В., Халтобин В.М. Оценка технического состояния иконических оптико-электронных средств на основе теории распознавания образов. М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2007. С. 16–17.
- ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: 1990. 22 с.
- Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука, 1984. 588 с.
- Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов / Под ред. А.А. Дорофеева. М.: Наука, 1979. 66 с.

## **The Model for Evaluation of Technical Condition of Optical-Electronic Systems for Earth Remote Sensing**

**Yu. G. Veselov**

*MECS of the Air Forces "N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin Air Force Academy", Moscow*

In this paper we proposed to use statistical pattern recognition theory to evaluate the technical condition of digital optical-electronic systems and systems of remote sensing, worked out the approach to evaluating the effectiveness of the recognition technical condition system. An analytical expression of the average probability of error detection and showed that on its basis, it is possible to evaluate the quality of evidence and the decision rule.

**Keywords:** digital optical-electronic systems, Earth remote sensing, technical condition, theory of pattern recognition

---

---

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ  
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

---

---

О РОЛИ ПРИВОДНОГО ВЕТРА ПРИ РАСЧЕТЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ  
НА ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА  
АТЛАНТЭКС-90

© 2011 г. А. Г. Гранков

*Фрязинский филиал Учреждения Российской академии наук Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино Московской обл.*

*E-mail: agrankov@inbox.ru*

Поступила в редакцию 13.10.2010 г.

Рассматриваются и сопоставляются два варианта упрощенных (укороченных) параметризаций классических формул тепло- и влагообмена между океаном и атмосферой (балк-формулы) на основе анализа данных эксперимента АТЛАНТЭКС-90 в Ньюфаундлендской зоне Северной Атлантики. Один из них базируется на связи потоков суммарного (явного и скрытого) тепла с разностью температур воды и воздуха — ключевым параметром, фигурирующим в балк-формулах. Другой вариант учитывает влияние дополнительного фактора — скорости приводного ветра, также учитываемого в этих же формулах. И те, и другие оценки тепловых потоков сравниваются с их оценками, полученными из балк-формулы. Показано, что в Северной Атлантике ветровой фактор очень важен при анализе тепло- и влагообмена между поверхностью океана и приводным слоем атмосферы в синоптическом диапазоне временных масштабов в отличие от среднемесячных масштабов временного усреднения, используемых при изучении сезонной динамики тепловых потоков в океане. Учет ветрового фактора позволяет существенно снизить расхождение между результатами расчета тепловых потоков по балк-формулам и по их укороченным параметризациям, более удобным для анализа теплового взаимодействия океана и атмосферы с помощью спутниковых СВЧ-радиометрических средств.

**Ключевые слова:** приводной ветер, тепловые потоки, тропические циклоны, СВЧ-радиометрия

В статье рассмотрен вопрос о влиянии скорости приводного ветра в Ньюфаундлендской зоне Северной Атлантики во время проведения эксперимента АТЛАНТЭКС-90 на связь потоков суммарного (явного и скрытого) тепла с разностью температур воды и воздуха. Данные этого эксперимента, а также проведенного ранее эксперимента НЬЮФАЭКС-88, послужили основой в свое время для изучения возможностей использования СВЧ-радиометрических методов и их обработки для анализа теплового взаимодействия океана и атмосферы из космоса (Гранков, Мильшин, 2004), (Grankov, Milshin, 2009).

Здесь мы постараемся решить вопрос, какие параметры в контактном слое системы “океан-атмосфера” (СОА), являющиеся наиболее существенными в тепло- и влагообмене между поверхностью океана и приводным слоем атмосферы, доступны для их определения спутниковыми СВЧ-радиометрическими средствами. Уникальные и дорогостоящие эксперименты НЬЮФАЭКС-88 и АТЛАНТЭКС-90, проведенные в советское время, позволяют нам ответить на этот вопрос; похоже, что нам — специалистам по дистанционному зондированию океана из космоса — придется опираться на данные этих экспериментов еще долгое время.

Мы попытаемся применить в скором времени опыт, накопленный в 1990-х годах по изучению связи собственного СВЧ-излучения СОА с интенсивностью тепло- и влагообмена между поверхностью океана и атмосферой в средних широтах Атлантики в районах активной деятельности циклонов (антициклонов), к тропическим широтам. Эта работа проводится в настоящее время в рамках проекта МНТЦ № 3827 “Разработка технологий диагностики зарождения тропических ураганов в океане на основе методов дистанционного зондирования” в Институте радиотехники и электроники РАН (ИРЭ РАН) при участии ведущих специалистов Института океанологии РАН, Института космических исследований РАН и Росгидрометцентра.

Между среднеширотными и тропическими ураганами много общего — сильный приводной ветер ( $30\text{--}35\text{ м с}^{-1}$ ) и высокое влагосодержание атмосферы (до  $50\text{ кг м}^{-2}$ ) в средних и (до  $70\text{ кг м}^{-2}$ ) в южных широтах океана. Также значительна роль вертикальных турбулентных потоков тепла и влаги на границе раздела океана и атмосферы как характеристик СОА, реагирующих на прохождение среднеширотных циклонов (Гулев и др., 1994), (Лаппо и др., 1990), так и факторов, необходимых для анализа условий возникновения тропических циклонов (ТЦ) (Голицын, 2008). Именно эти параметры атмо-

сферы надежно определяются с помощью современных спутниковых СВЧ-радиометрических средств в миллиметровом и сантиметровом диапазонах длин волн. Поэтому мы рассматриваем наш опыт спутниковых исследований циклонических явлений в средних широтах океана как “трамплин” для изучения ТЦ, прежде всего, для изучения причин их появления с помощью методов математического моделирования и дистанционного зондирования.

Суть данной работы заключается в определении роли (ранжировании) основных параметров, определяющих интенсивность тепло- и влагообмена между океаном и атмосферой, — разности температур воды и воздуха, разности фактической влажности воздуха  $e$  и влажности насыщения  $e_0$  и скорости приповерхностного (приводного) ветра. Известно, что именно эти параметры являются ключевыми при расчетах вертикальных турбулентных потоков явного ( $qh$ ) и скрытого тепла ( $qe$ ) и фигурируют на первом месте в известных формулах тепло- и влагообмена — так называемых балк-формулах (Лаппо и др., 1990), полученных на основе глобального аэродинамического метода (Global Bulk Aerodynamic Method). В соответствии с этим подходом величины  $qh$  и  $qe$  характеризуются следующими соотношениями:

$$qh = c_p \rho C_T (T_n - T_a) V; \quad (1)$$

$$qe = L_p (0.622/Pa) C_E (e - e_0) V, \quad (2)$$

т.е. выражаются через следующие параметры СОА: температуру ( $T_a$ ), упругость водяного пара ( $e$ ) и скорость ветра ( $V$ ) в приводном воздухе, а также через температуру поверхности океана ТПО ( $T_n$ ) и максимальную для данной величины ТПО влажность воздуха ( $e_0$ ). В качестве коэффициентов пропорциональности в соотношениях (1) и (2) служат коэффициенты обмена теплом  $C_T$  (число Шмидта) и влагой  $C_E$  (число Дальтона), а также удельная теплота испарения ( $L$ ), удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении ( $c_p$ ) и его плотность ( $\rho$ ) (Лаппо и др., 1990).

Здесь анализируется связь интенсивности вертикальных турбулентных потоков суммарного (явного и скрытого) тепла у поверхности океана с разностью температур воды и воздуха в средних широтах Северной Атлантики. На эту тему опубликовано много статей в нашей стране и за рубежом. В то же время слабо исследован эффект влияния скорости приводного ветра на связь потоков суммарного тепла с разностью температур водной поверхности и приводного воздуха атмосферы в синоптическом диапазоне временных интервалов. Полученные результаты оказались неожиданными даже для нас, судя по нашим прежним результатам — исследованиям влияния скорости ветра на яркостную температуру СОА, — эффект ветрового волнения со среднемесячным усреднением данных измерений показался нам не столь значительным (Гранков, Мильшин,

2004). На синоптических же масштабах времени этот эффект оказался очень существенным для оценки тепло- и влагообмена между поверхностью океана и приводной атмосферой.

Результаты работы получены на основе данных долговременных измерений в районах Северной Атлантики, характеризующихся активной циклонической деятельностью и сильной изменчивостью параметров поверхности океана и приводного слоя атмосферы, — например, в марте—апреле 1990 г. над Гольфстримом образовалось семь фронтальных циклонов (Гулев и др., 1994).

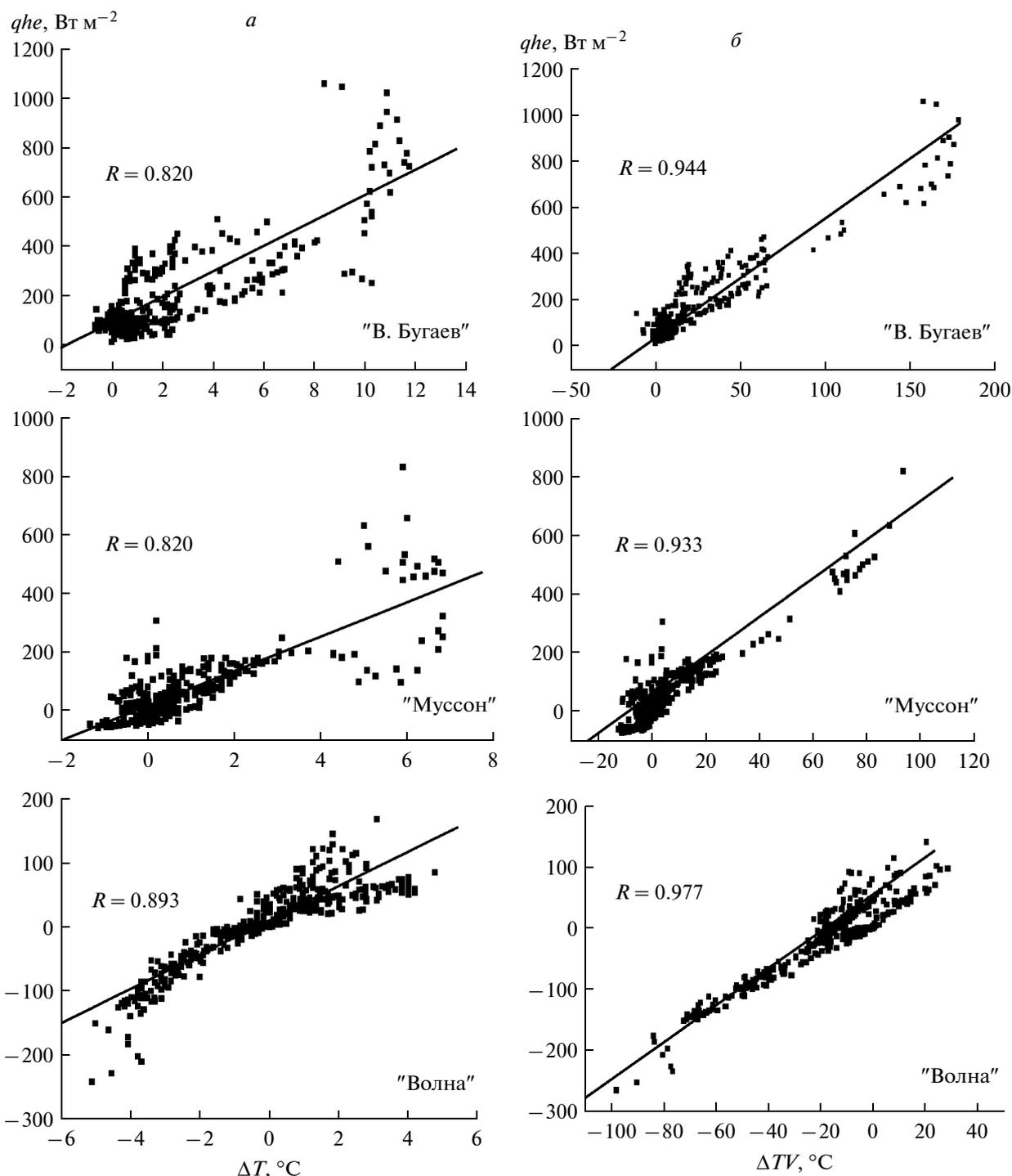
Значения потоков явного, скрытого и суммарного тепла вычислены с помощью данных ежечасных измерений температуры поверхности океана, температуры и влажности воздуха в приводном 10-метровом слое, скорости приводного ветра с научных судов погоды (НИСП “Виктор Бугаев”, “Муссон” и “Волна”, которые получены в эксперименте АТЛАНТЭКС-90 в апреле 1990 г. и переданы нам С.К. Гулевым.

НИСП в этот период времени проводили измерения в трех точках дельты Гольфстрима: в южной периферии основной струи Гольфстрима (42.3° с.ш., 46° з.д. — НИСП “Виктор Бугаев”), в южной ветви Гольфстрима (41.3° с.ш., 41° з.д. — НИСП “Муссон”) и в восточной ветви Лабрадорского течения (48.2° с.ш., 46° з.д. — НИСП “Волна”).

Процессы тепло- и влагообмена в районах расположения указанных судов погоды в период измерений отличаются качественно: например, для НИСП “Виктор Бугаев” и “Муссон” (теплые воды Гольфстрима) наблюдается отдача тепла в атмосферу, тогда как в районе расположения НИСП “Волна” (холодные воды Лабрадорского течения) атмосфера отдает тепло океану. Также очень сильно различаются в этих районах и количественные характеристики теплового взаимодействия океана и атмосферы — значения вертикальных турбулентных потоков явного, скрытого и суммарного тепла на границе их раздела (Гулев и др., 1994). В частности, амплитуда колебаний величины суммарного потока тепла достигает 800 Вт/м<sup>2</sup> для НИСП “Виктор Бугаев”, 500 Вт/м<sup>2</sup> для НИСП “Муссон” и 350 Вт/м<sup>2</sup> для НИСП “Волна”.

На рисунке приведены результаты сопоставления разности температуры воды и воздуха с вертикальными потоками суммарного тепла и влаги в Ньюфаундлендской энергоактивной зоне Северной Атлантики, наблюдаемых с НИСП “Виктор Бугаев”, “Муссон” и “Волна” с временным разрешением в 1 ч.

Из рисунка видно (группа *a*), что учет скорости приводного ветра приводит к более жесткой связи между потоками суммарного тепла и разностью температур воды и воздуха в Северной Атлантике. Например, коэффициент корреляции между интенсивностью вертикальных турбулентных потоков суммарного (явного и скрытого) тепла и параметрами  $\Delta T = T_n - T_a$  и  $\Delta T \times V$  при переходе от левой группы рисунков (*a*) к правой (*b*) возрастает от 0.82 до



Результаты сопоставления разности температуры воды и воздуха с вертикальными потоками суммарного тепла и влаги в Ньюфаундлендской энергоактивной зоне Северной Атлантики, наблюдаемыми с НИСП "Виктор Бугаев", "Муссон" и "Волна" с временным разрешением в 1 ч.

0.944 ("Виктор Бугаев"), от 0.82 до 0.933 ("Муссон"), и от 0.893 до 0.977 ("Волна").

Заметим, что вывод о целесообразности учета приводного ветра при расчете интенсивности теплообмена между океаном и атмосферой на синоптических масштабах времени был сделан

также в работе (Гранков, Новичихин, 1997), где мы на основе данных измерений с НИСП "Волна" рассматривали возможность реконструкции (упрощения) балк-формулы без особого ущерба для определения потоков явного и скрытого тепла на границе раздела СОА.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что в Северной Атлантике ветровой фактор очень важен при анализе тепло- и влагообмена между поверхностью океана и приводным слоем атмосферы в синоптическом диапазоне временных масштабов в отличие от среднемесячных масштабов временного усреднения, используемых при изучении сезонной динамики тепловых потоков в океане. Согласно результатам анализа судовых данных эксперимента АТЛАНТЭКС-90, учет этого фактора позволяет существенно снизить расхождение между результатами расчета тепловых потоков по балк-формулам и по их укороченным параметризациям, более удобным для анализа теплового взаимодействия океана и атмосферы с помощью спутниковых СВЧ-радиометрических средств.

Скорость приводного ветра является легко доступным параметром для его определения СВЧ-радиометрическими методами с ИСЗ, т.к. существует прямая физическая связь интенсивности собственного теплового радиоизлучения (яркостной температуры) СОА с интенсивностью волнения водной поверхности, тесно связанной с параметром  $V$ . Более сложной задачей является определение с ИСЗ разности  $\Delta T$  между температурой поверхности океана и температурой приводного слоя атмосферы, так как связь между яркостной температурой СОА и температурой приводного воздуха является косвенной. Анализ возможностей использования спутниковых СВЧ-радиометрических методов для определения тепловых потоков выходит за рамки данного сообщения. Отметим лишь, что существующая благодаря мощному горизонтальному переносу тепла и влаги в средних широтах Северной Атлантики тесная связь температуры и влажности приводной атмосферы с ее интегральным (полным) влагосодер-

жанием, определяемым с ИСЗ в линии резонансного поглощения (излучения) водяного пара 1.35 см (22.235 ГГц), позволяет оценивать тепловые потоки *прямо* с относительной точностью ~10% (Гранков, Мильшин, 2004), (Grankov, Milshin, 2009). При этом нет необходимости опираться на балк-формулы (1) и (2), включающие числа Шмидта и Дальгона, неопределенность которых и дала название этим формулам как “полуэмпирические”. Как указывается специалистами (Гулев др., 1994), уточнение этих коэффициентов является одной из задач натуральных экспериментов, подобных эксперименту АТЛАНТЭКС-90.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Голицын Г.С. Ураганы, полярные и тропические, их энергия и размеры, количественный критерий возникновения // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 6. С. 579–589.
- Гранков А.Г., Новичихин Е.П. Об использовании формул теплообмена между океаном и атмосферой при усвоении спутниковых радиометрических измерений // Метеорология и гидрология. 1997. № 1. С. 81–90.
- Гранков А.Г., Мильшин А.А. Взаимосвязь радиоизлучения системы океан–атмосфера с тепловыми и динамическими процессами на границе раздела. М.: Физматлит, 2004. 168 с.
- Гулев С.К., Колинко А.В., Ланто С.С. Синоптическое взаимодействие океана и атмосферы в средних широтах. СПб.: Гидрометеиздат, 1994. 320 с.
- Ланто С.С., Гулев С.К., Рождественский А.Е. Крупномасштабное тепловое взаимодействие в системе океан–атмосфера и энергоактивные области Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 336 с.
- Grankov A.G., Milshin A.A. Microwave radiation of the ocean–atmosphere: Boundary heat and dynamic interaction. Springer, 2009. 160 p.

## On the Role of the Near-Surface Wind Speed when Calculating the Surface Heat Fluxes in the Ocean with the Data of the Experiment Atlantex-90

A. G. Grankov

*Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, Fryazino, Moscow Region*

Two variants of simplified (short-cut) parameterizations of the classic formulas of heat and moisture exchange between the ocean and atmosphere (bulk-formulas) are considered and compared here basing on the data of experiment ATLANTEX-90 in the Newfoundland zone of the North Atlantic. One of them is based on relations between the total (sensible and latent) heat and the air-sea temperature difference, which is appeared as the key parameter in the bulk-formulas. Another variant considers an influence of an additional factor - the near surface wind speed. These estimates of heat fluxes are compared with those derived from the bulk-formulas. It was shown that in the North Atlantic the wind factor is very important for an analysis of heat and moisture exchange between the ocean surface and near surface atmosphere in the *synoptic* range of time scales unlike the *month mean* scales of time averaging used for studying the seasonal dynamics of heat fluxes in the ocean. An account of the wind factor let us to reduce essentially a discrepancy between results of computing the heat fluxes with the bulk formulas and with their short-cut parameterizations, which are more suitable for an analysis of the ocean–atmosphere heat interaction with the aid of satellite microwave radiometric means.

**Keywords:** near-surface wind, surface heat fluxes, tropical cyclones, satellite microwave radiometry

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

### НАБЛЮДЕНИЕ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР БАЛТИЙСКОГО МОРЯ С ПОМОЩЬЮ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ И РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

© 2011 г. С. С. Каримова<sup>1\*</sup>, О. Ю. Лаврова<sup>1</sup>, Д. М. Соловьев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Учреждение Российской академии наук Институт космических исследований РАН, Москва

<sup>2</sup>Морской гидрофизический институт Национальной академии наук Украины, Севастополь

\*E-mail: feba@list.ru

Поступила в редакцию 03.09.2010 г.

В данной работе рассматриваются вопросы проявления мезомасштабных и субмезомасштабных вихревых элементов поверхностных течений Балтийского моря на спутниковых изображениях, различных по физической природе и пространственному разрешению. Исследование основано на радиолокационных изображениях (РЛИ) высокого разрешения Envisat ASAR и ERS-2 SAR, полученных в 2008–2009 гг. для различных участков акватории Балтийского моря, при использовании радиометрических изображений видимого спектра Envisat MERIS и Landsat ETM+. Рассмотрены возможные механизмы проявления вихревых структур на РЛИ акватории Балтийского моря. В результате совместного анализа указанных данных выявлены особенности проявления на спутниковых изображениях вихревых структур с учетом изменчивости оптических характеристик поверхностных вод Балтийского моря во время летнего цветения цианобактерий и весеннего цветения диатомовых водорослей.

**Ключевые слова:** радиолокация, Envisat ASAR, ERS-2 SAR, радиометрические данные, Envisat MERIS, Landsat ETM+, вихревые элементы, поверхностные течения, цианобактерии, диатомовые водоросли, Балтийское море

#### ВВЕДЕНИЕ

Спутниковые данные в настоящее время представляют собой весьма важный источник информации о динамике и циркуляции поверхностных вод океанов и морей.

Благодаря наличию в воде различных трассеров, на изображениях, получаемых в видимом и ИК-диапазонах спутниковыми спектрорадиометрами, находит отражение мезомасштабная изменчивость поверхностных течений, которая составляет для Балтийского моря самую энергетическую часть динамики его вод. Исследование мезомасштабных элементов поверхностных течений необходимо для понимания механизмов перемешивания и циркуляции вод бассейна, которые в значительной степени определяют метеорологические, гидродинамические и экологические условия как в открытых районах моря, так и в прибрежной зоне, что особенно актуально в условиях значительного антропогенного стресса.

Радиолокационные изображения (РЛИ), получаемые с помощью спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны, благодаря их высокому пространственному разрешению, способны визуализировать как мезомасштабные, так и мелкомасштабные гидродинамические структуры с

характерным размером вплоть до 1 км. Механизмы генерации последних, их характеристики и вклад в перенос и перемешивание вод до сих пор остаются до конца невыясненными.

Данная работа продолжает исследования особенностей отображения вихревых гидродинамических структур на спутниковых изображениях и оценку на их основе вихревой активности бассейнов Черного и Балтийского морей, результаты которых изложены в работах (Лаврова, 2005; Митягина, Лаврова, 2009; Lavrova et al., 2008; Shcherbak et al., 2008).

В работе рассматриваются вопросы проявления мезомасштабных и субмезомасштабных вихревых элементов поверхностных течений Балтийского моря на спутниковых изображениях различной физической природы и с различным пространственным разрешением. В качестве таковых используются следующие данные: 1) РЛИ, полученные со спутников Envisat ASAR и ERS-2 SAR для различных районов Балтийского моря за 2009 г. и частично за 2008 г.; 2) цветосинтезированные изображения Envisat MERIS, Terra/Aqua MODIS и Landsat ETM+. Особенности визуализации гидродинамических структур на изображениях анализируются в связи с гидрометеорологи-



**Рис. 1.** Область субмезомасштабной завихренности поля поверхностных течений в Балтийском море. Envisat ASAR WSM, 25.04.2009 г. 09:09 GMT. Пространственное разрешение 150 м.

ческими и гидробиологическими условиями во время проведения космической съемки.

В разделах статьи последовательно рассматриваются следующие вопросы: возможные механизмы проявления вихревых структур на РЛИ акватории Балтийского моря; механизмы визуализации гидродинамических структур на радиометрических изображениях видимого диапазона; проявление вихревых структур на спутниковых изображениях во время летнего цветения цианобактерий и весеннего цветения диатомовых.

#### МЕХАНИЗМЫ ПРОЯВЛЕНИЯ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР НА РЛИ

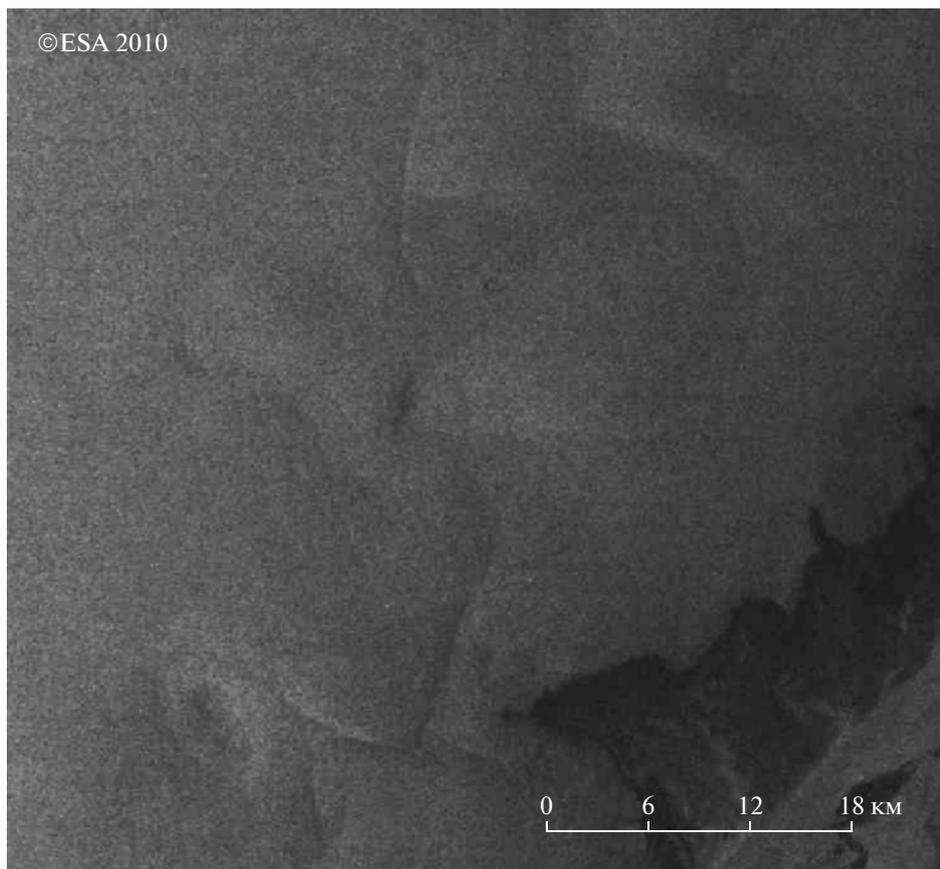
С целью изучения особенностей проявления вихревых структур на РЛИ был проанализирован массив данных, полученных радиолокаторами с синтезированной апертурой антенны, функционирующих на спутниках ENVISAT и ERS-2. Всего было получено и проанализировано около 320 изображений среднего пространственного разрешения (150 м) для различных участков акватории Балтийского моря за период 2008–2009 гг.

В результате проведенного анализа было установлено, что вихревые структуры проявляются на РЛИ этой акватории благодаря трем различным механизмам. Рассмотрим более подробно каждый из них.

#### *Пленочный механизм*

Первый и наиболее распространенный механизм обусловлен подавлением гравитационно-капиллярных волн поверхностными пленками естественного происхождения, которые в результате конвергенции образуют на поверхности воды нитевидные слики, закручивающиеся в спирали (Alpers, Huhnerfuss, 1989; Dokken, Wahl, 1996; Espedal et al., 1998; Johannessen et al., 1994; Johannessen et al., 2005). Этот механизм наиболее хорошо известен и изучен. На рис. 1 представлен пример проявления субмезомасштабной завихренности поля поверхностных течений в юго-восточной части Балтийского моря (к северу от Куршского залива) с помощью спирально закручивающихся сликов.

Одним из характеристических признаков проявляющихся спиральных вихрей является сравнительно небольшая толщина проявляющих их на РЛИ нитевидных сликов (Yamaguchi, Kawamura, 2009). В (Eldevik, Dysthe, 2002) указывается, что эта толщина ~100 м, а расстояние между сликами составляет, как правило, величину ~1 км. Однако в некоторых из рассмотренных нами случаев наблюдалось значительное увеличение толщины сликов. В частности, на рис. 1 можно заметить, что на отдельных участках толщина сликов сопоставима с расстоянием между сликами и достигает значений 1 км и более. Учитывая прибрежное положение акваторий, в которых наблюдалось такое расширение сликов, можно предпо-



**Рис. 2.** Фрагмент РЛИ Envisat ASAR, полученного 09.01.2010, 19:57 GMT в юго-восточной части Ботнического залива, визуализирующий цепочку вихревых структур.

ложить, что оно обусловлено повышенными количествами пленок биогенного происхождения в связи с цветением фитопланктона. Что касается расстояния между снимками, то с уменьшением диаметра вихрей оно так же уменьшается и может составлять несколько сотен метров.

Указанный механизм проявляется при скоростях ветра около 3–5 м/с, при которых короткие гравитационно-капиллярные волны, вызывающие брэгговское рассеяние РЛ-сигнала, уже появляются, а ветер еще не оказывает разрушительного воздействия на поверхностные пленки (Dokken, Wahl, 1996).

Проведенный анализ показал, что с помощью этого механизма проявляется около 70% вихревых структур, обнаруживаемых на РЛИ в акватории Балтийского моря. Диаметр обнаруженных вихрей варьировал в пределах от 1 до 34 км с максимальной повторяемостью 3–5 км.

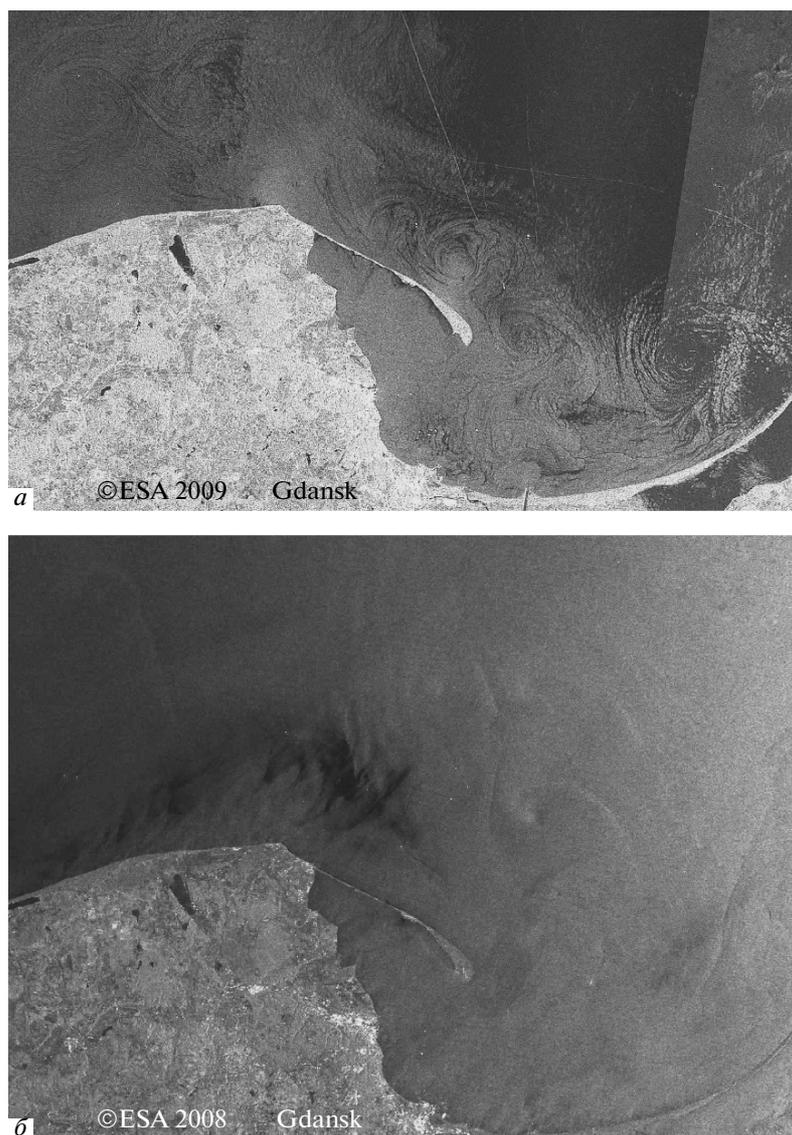
#### *Сдвигово-волновой механизм*

Второй механизм связан с взаимодействием волн и течений в области циклонического сдвига течения (в дальнейшем для краткости сдвигово-

волновой механизм) и проявляется в виде закрученных в спирали или дуги областей повышенного рассеяния сигнала (Johannessen et al., 1994). В различных случаях этот механизм проявляется по-разному в зависимости от геометрии съемки, интенсивности сдвигового течения, скорости ветра и пр.

Благодаря сдвигово-волновому механизму вихревые структуры могут проявляться на РЛИ при скоростях ветра до 12 м/с (Dokken, Wahl, 1996). В работе (Lavrova et al., 2010) рассмотрены некоторые случаи проявления на РЛИ вихрей в различных частях Балтийского моря посредством этого механизма; практически все рассмотренные случаи соответствовали скорости ветра 5–9 м/с.

На рис. 2 показан фрагмент РЛИ Envisat ASAR, полученного 09.01.2010 г. в 19:57 GMT (разрешение 150 м). На этом фрагменте, отражающем акваторию в юго-восточной части Ботнического залива, благодаря сдвигово-волновому механизму проявилась цепочка вихрей, протянувшаяся вдоль кромки льда. Область пониженного рассеяния сигнала в юго-восточной части рисунка соответствует морской поверхности, покрытой молодым льдом. Вихревые структуры на этом изобра-



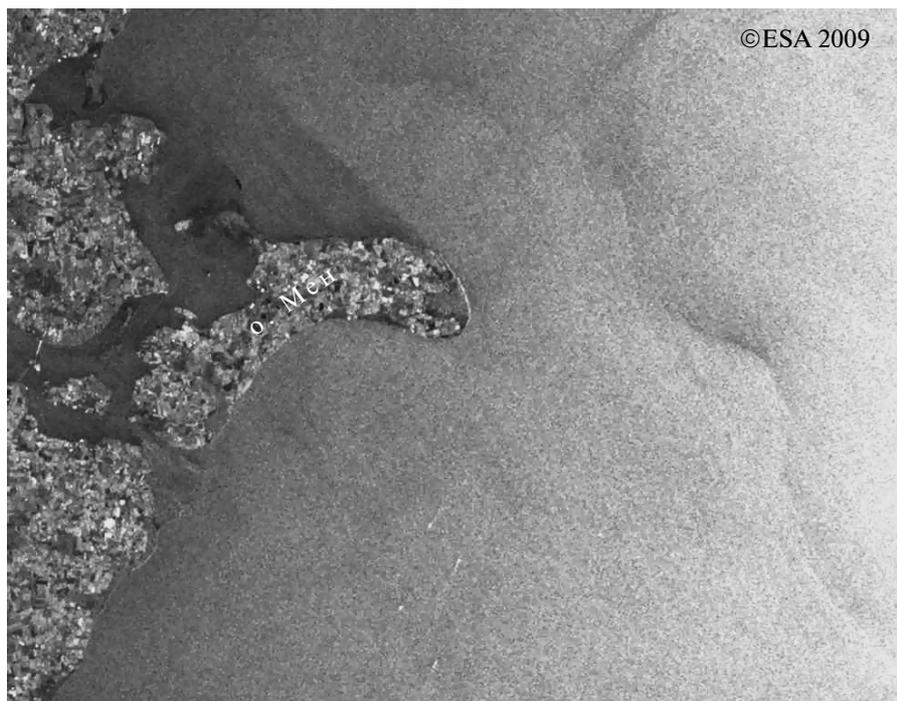
**Рис. 3.** Проявление вихревых структур в юго-восточной части Балтийского моря: *a* – с помощью пленочного механизма Envisat ASAR 24.08.2009, 09:08 GMT; *б* – с помощью сдвигово-волнового взаимодействия Envisat ASAR 05.04.2008, 09:12 GMT.

жения имеют более или менее четко выраженную  $\lambda$ -образную форму, характерную для данного механизма визуализации вихрей.

На рис. 3 представлен пример визуализации вихревых структур в одной и той же части Балтийского моря – в районе Гданьского залива, но с помощью различных механизмов. Как можно заметить, сдвигово-волновой механизм (рис. 3б) отличается значительно меньшей детальностью отображения линий тока по сравнению с пленочным механизмом (рис. 3а). В данном случае на рис. 3б вихри проявились с помощью дугообразных фронтальных структур, закручивающихся в центре вихрей; в некоторых случаях в центральных частях вихрей наблюдаются вариации рассе-

яния сигнала, и эти области приобретают эффект трехмерности изображения.

В некоторых случаях визуализирующие вихри фронтальные структуры обозначают не весь вихрь целиком, а только его часть, образуя, таким образом, некоторую огибающую цепочки вихрей. На рис. 4 представлен фрагмент изображения Envisat ASAR от 06.12.2009 г. 09:40 GMT, представляющий акваторию в юго-западной части моря в районе о. Мен. На изображении отчетливо проявилась волнообразная структура, вытянутая по направлению юго-восток–северо-запад, т.е. по направлению преобладающих в этом районе течений – в сторону пр. Зунд.



**Рис. 4.** Фрагмент РЛИ Envisat ASAR, полученного 06.12.2009, 09:40 GMT в юго-западной части Балтийского моря, визуализирующий огибающую цепочку вихревых структур.

Проведенный анализ показал, что с помощью сдвигово-волнового механизма проявляется около 30% вихревых структур, обнаруживаемых на РЛИ в акватории Балтийского моря. Диаметр обнаруженных вихрей, визуализированных таким образом, находится в пределах 2–27 км с максимальной повторяемостью 6 км.

Помимо юго-восточной части моря в районе Гданьского залива, частые проявления этого механизма были отмечены в юго-западной части моря, в Датских проливах, в Финском заливе и в проливе между двумя суббассейнами Ботнического залива. Таким образом, указанные ареалы распространения этого типа визуализации вихрей свидетельствуют о том, что проявлению этого механизма помимо значительной скорости приповерхностного ветра (5–9 м/с) способствуют также значительные скорости поверхностных течений.

В (Dokken, Wahl, 1996) указано, что проявления двух названных выше механизмов не встречаются на одном и том же РЛИ, и это выступало в качестве подтверждения того, что оба механизма суть проявления одного и того же явления при различной скорости ветра. Однако, следуя этой логике, можно заключить, что оба механизма могут проявляться на одном и том же изображении при условии, что скорость ветра в пределах этого изображения будет значительно варьировать. Наши наблюдения показывают, что на РЛИ, полученных над акваторией Балтийского моря, это происходит довольно часто, и потому “черные”

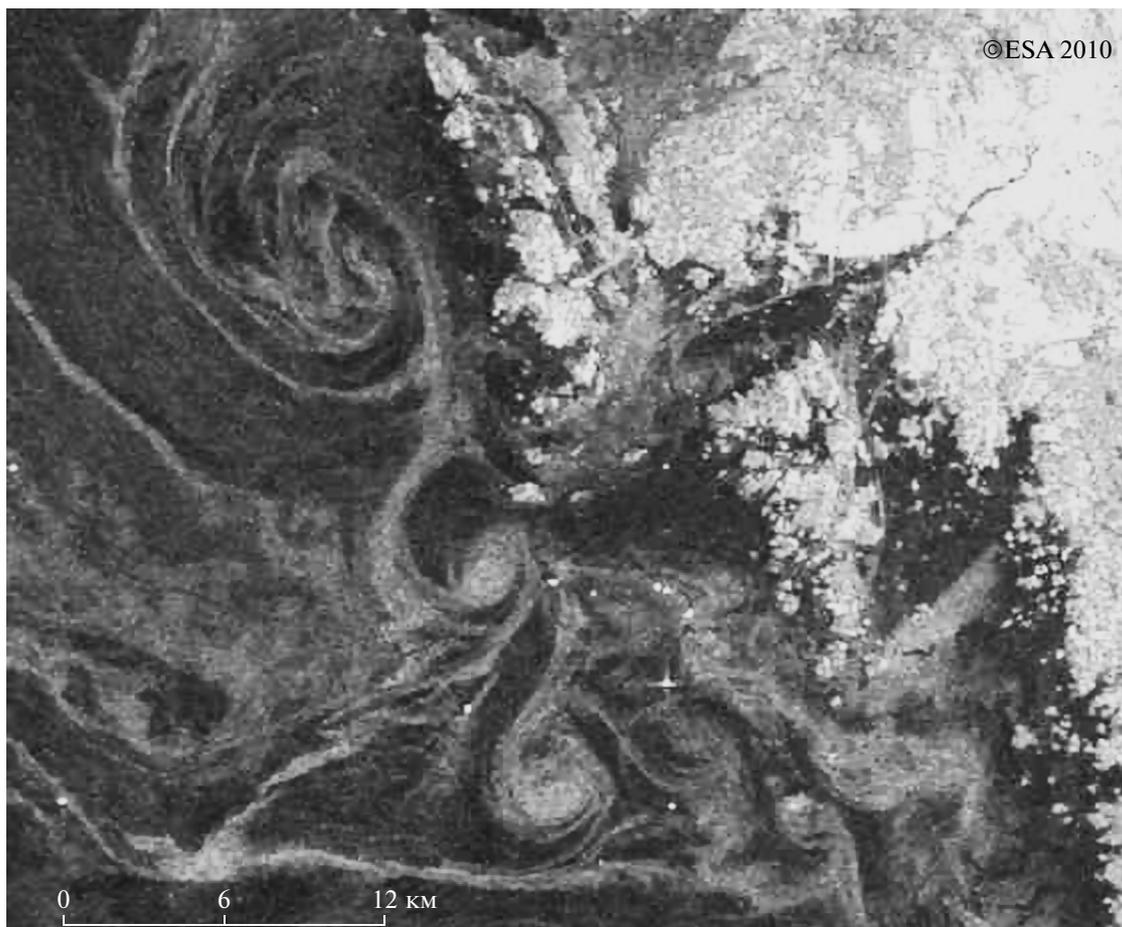
вихри (чье проявление обусловлено сликами) и “белые” (визуализированные сдвигово-волновым взаимодействием) могут непосредственно соседствовать на таких изображениях.

#### *Термический механизм*

Существует также третий возможный механизм проявления вихревых гидродинамических структур на РЛИ, связанный с изменением характеристик атмосферного пограничного слоя в области гидрологического термического фронта, а, следовательно, и скорости ветра в этой области (Dokken, Wahl, 1996; Johannessen et al., 1994). Проявление этого механизма в данной работе не рассматривалось.

#### *Ледовый механизм*

Мы указали механизмы, присущие практически исключительно РЛ-методам зондирования. Однако на РЛИ вихревые структуры могут визуализироваться и подобно тому, как это происходит на радиометрических изображениях видимого диапазона, если на поверхности воды или в ее близи находятся какие-либо трассеры, например, лед. На рис. 5 представлен пример визуализации льдом цепочек циклонических вихрей в проливе Каттегат. РЛИ Envisat ASAR получено 26.01.2010 г. в 09:36 GMT с разрешением 150 м.



**Рис. 5.** Фрагмент РЛИ Envisat ASAR от 26.01.2010, 09:36 GMT, на котором с помощью ледовых трассеров отчетливо проявлены вихревые структуры в проливе Каттегат.

Ограничивающим фактором для действия данного механизма является требование к наличию трассеров – кусочков льда, поэтому отображаемые льдом вихри проявляются в тех частях моря, где либо возможно ледообразование, либо происходит вынос льда. Таким образом, наиболее часто “ледовые” вихри наблюдались в Ботническом, Финском и Рижском заливах, проливах Каттегат и Скагеррак.

#### ПРОЯВЛЕНИЕ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР НА РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Спутниковые данные в оптическом и ИК-диапазонах могут быть успешно использованы для идентификации течений, вихрей, струй и других мезомасштабных динамических структур.

Восстановленные по ИК-данным карты температуры поверхности моря (ТПМ) для различных сезонов показывают наличие в структуре ТПМ фронтальных зон, формируемых полем поверхностных течений. Типичные контрасты в та-

ких фронтальных зонах составляют  $0.2^{\circ}$ – $1^{\circ}$ С, что способствует уверенному отображению мезомасштабных структур на картах ТПМ.

Сигнал, регистрируемый датчиками в оптическом диапазоне, определяется рассеянием на гидрозолье (фитопланктоне и взвешенных минеральных частицах), а также отражением солнечного излучения от морской поверхности, в наибольшей степени проявляющемся в зоне солнечного блика. Гидрозоли можно рассматривать как пассивные трассеры поверхностных течений, и формируемые ими фронтальные зоны, как правило, соответствуют линиям тока. Таким образом, анализ снимков позволяет выделить основные гидродинамические структуры, определяющие мезомасштабную изменчивость поля течений в изучаемом районе. Использование последовательных изображений для одной и той же акватории позволяет получить уникальную информацию о поле поверхностных течений с точностью, недостижимой для современных гидродинамических моделей.

На рис. 6 (на цветных вклейках) представлены результаты частичной реконструкции поля тече-

ний по последовательным изображениям, полученным спектрорадиометром Terra MODIS над одной и той же акваторией Балтийского моря с суточным интервалом. На более раннем изображении (рис. 6а, 28.07.2004 г.) были выбраны характерные элементы циркуляции (вихри, диполи, струи и пр.), которые могли быть распознаны также на последующем изображении (29.07.2004 г.). В пределах этих узнаваемых элементов были выбраны опорные точки; на рис. 6а они показаны синим цветом. С помощью второго изображения (от 29.07.2004 г.) были определены новые положения опорных точек (на рис. 6а отмечены красным). По расстоянию между положением синей точки и соответствующей красной можно оценить скорость перемещения частиц на рассматриваемом участке. Как можно заметить по рис. 6а, в период 28.07.2004–29.07.2004 отмечалась максимальная средняя скорость течений до 10 м/с.

На рис. 6б (на цветн.вклейках) показаны результаты аналогичных исследований, но в отношении трех последовательных изображений MODIS: 04.08.2004 г. (зеленые точки), 05.08.2004 (розовые точки) и 06.08.2004 г. (красные точки).

При определенных обстоятельствах динамические структуры могут быть непосредственно зарегистрированы на снимках оптического диапазона в зоне солнечного блика. В этом случае сигнал формируется неоднородностями морской поверхности, например, поверхностными пленками, которые выступают в качестве трассеров подобно тому, как это происходит на РЛИ.

Таким образом, использование данных оптических и тепловых сканеров позволяет получать информацию о мезомасштабных процессах и связанных с ними полях скоростей поверхностных течений, а при необходимости и осуществлять инерционный прогноз динамики вод поверхностного слоя.

### ПРОЯВЛЕНИЕ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В ПЕРИОДЫ ЦВЕТЕНИЯ ФИТОПЛАНКТОНА И ЦИАНОБАКТЕРИЙ

Изображения оптического диапазона становятся особенно информативными в плане отображения ими динамических структур в периоды бурного развития фитопланктона или других фотосинтезирующих организмов. Как известно, функционирование экосистемы Балтийского моря характеризуется двумя основными пиками цветения фитопланктона: весенним цветением диатомовых водорослей и динофлагеллят и летним цветением цианобактерий. Рассмотрим подробнее особенности проявления вихревых структур на спутниковых изображениях различной природы во время этих периодов.

### *Цветение цианобактерий*

Цианобактерии – группа прокариотных фототрофных организмов, за способность к фотосинтезу в прошлом ошибочно называемых также синезелеными водорослями. Массовое развитие цианобактерий случается в особенно теплые периоды, когда формируется устойчивая термическая стратификация вод и происходит обеднение поверхностных вод неорганическими соединениями азота. В периоды с длительной безветренной и солнечной погодой цианобактерии объединяются в агрегаты, которые всплывают к поверхности, образуя поверхностные или подповерхностные скопления. Под воздействием ветра и течений эти скопления переносятся как пассивные трассеры, прорисовывая, таким образом, поверхностные течения (Siegel, Gerth, 2008).

Принимая во внимание факт близкоповерхностного расположения агрегатов цианобактерий, было сделано предположение, что визуализированные ими вихревые структуры должны совпадать с вихрями, проявленными на РЛИ. С целью проверки этой гипотезы было проведено сопоставление полученных квазисинхронно изображений Envisat ASAR и Envisat MERIS, а также Landsat ETM+ за июль 2008 г., т.е. в период максимального развития цианобактерий.

Сопоставление было проведено для четырех случаев. Результаты одного из них продемонстрированы на рис. 7 (на цветн.вклейках). На рис. 7а представлена часть РЛИ Envisat ASAR (разрешение 150 м), полученного 23.07.2008 г. На этом изображении отчетливо проявились спиральные вихревые структуры к северо-западу от о. Готланд. В акватории к востоку от Готланда наблюдались значительные скорости ветра, а к юго-западу от него, напротив, отмечались штилевые условия; и то, и другое воспрепятствовало проявлению вихрей в этих районах. На рис. 7б представлено синтезированное в естественных цветах (композит каналов 7, 5 и 2) изображение Envisat MERIS для той же акватории, полученное примерно через 13.5 часов после РЛИ. В отличие от РЛИ (рис. 7а) наличие трассеров (агрегатов цианобактерий) позволило проявиться вихреподобным структурам на всем рассматриваемом участке изображения. На рис. 7б показан тот же фрагмент РЛИ с наложением на него наиболее ярких пикселей изображения MERIS, которые соответствуют положению вихревых структур на этом изображении. Можно заметить, что положения вихревых структур и на том, и на другом снимках находятся в очень хорошем соответствии.

Рассмотрение аналогичного случая для изображений ASAR и MERIS Envisat, полученных с суточным интервалом 01.08.2008 г. и 31.07.2008 г. (рис. 8 на цветн.вклейках), дает те же результаты.

В период летнего цветения 2009 г. было произведено сопоставление изображений Envisat ASAR и Landsat ETM+, полученных 17.07.2009 г. для юго-восточной части Балтийского моря (рис. 9 на цветн.вклейках). В этом случае можно заметить некоторые отличия в проявлении вихревых структур на том и другом изображениях. Так, прежде всего следует отметить, что вихревые структуры в западной части Гданьского залива лучше проявились на РЛИ (рис. 9а), чем на радиометрическом изображении (рис. 9б), в то время как к северу от Гданьского залива ситуация противоположная (вследствие вариаций скорости приповерхностного ветра в момент РЛ-съемки). Примечательно, что на РЛИ отчетливо проявился спиралевидный вихрь к северо-востоку от м. Таран, а на изображении ETM+ выражена только огибающая этого вихря. Это может послужить косвенным свидетельством того, что агрегаты цианобактерий и поверхностные пленки, визуализирующие вихревые структуры на РЛИ, являются взаимонезависимыми трассерами.

#### *Цветение диатомовых*

В отличие от летнего цветения, весеннее цветение обусловлено нетоксичными холодолюбивыми диатомовыми водорослями и динофлагеллятами. Эти планктонные организмы распространяются по акватории Балтийского моря в период половодья, когда в море поступает большое количество холодных речных вод.

Чтобы выяснить особенности проявления гидродинамических структур на спутниковых изображениях во время цветения диатомовых, были проанализированы изображения Envisat ASAR и Envisat MERIS за апрель 2009 г.

На рис. 10а (на цветн.вклейках) представлен фрагмент РЛИ, полученного 25.04.2009 г. над юго-восточной частью Балтийского моря. Многочисленные мелкомасштабные закручивающиеся сликовые структуры с характерным диаметром около 5 км обнаруживаются в северо-восточной части изображения, и более крупные – в его центре. На изображении Envisat MERIS, полученном за сутки до того (рис. 10б), из всех гидродинамических структур проявились лишь две цепочки циклонических вихрей: одна из более крупных вихрей в центральной части изображения, которая частично нашла отражение и на РЛИ, и другая – из более мелких, протянувшаяся от устья р. Висла к Хельской косе (на РЛИ она выражена менее четко). В центральной части Гданьского залива на обоих изображениях также проявился антициклонический вихрь.

Таким образом, в отличие от летнего цветения цианобактерий, во время весеннего цветения диатомовых в приповерхностном слое морских вод

присутствует недостаточное количество клеток, которые могли бы быть хорошими трассерами для того, чтобы отобразить все многообразие гидродинамических структур.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа РЛИ Envisat ASAR и ERS-2 SAR, полученных в различных районах Балтийского моря в 2008–2009 г., рассмотрены механизмы, благодаря которым на них могут проявляться вихревые структуры. Установлено, что основным механизмом, благодаря которому визуализируются около 70% всех вихрей, детектируемых на РЛИ этой акватории, является сликовый механизм. При определенных условиях (значительная скорость приводного ветра – в диапазоне 5–9 м/с – и высокие скорости поверхностных течений) вступает в действие сдвигово-волновой механизм, визуализирующий на РЛИ около 30% вихревых структур. Во время холодного сезона в Ботническом, Финском и Рижском заливах, а также в проливах Каттегат и Скагеррак вихри могут проявляться на РЛИ с помощью ледовых трассеров.

Проведен совместный анализ изображений Envisat ASAR и Envisat MERIS, полученных квазисинхронно в периоды летнего цветения цианобактерий и весеннего цветения фитопланктона. В результате этого анализа для случая цветения цианобактерий было установлено, что, несмотря на различия в механизмах формирования исследуемых изображений и в их пространственном разрешении, вихревые структуры, отображаемые на этих изображениях, находятся в поразительно хорошем соответствии и, следовательно, могут быть признаны объективной реальностью.

Другой важный вопрос касается источников поверхностных пленок, благодаря которым происходит проявление гидродинамических структур на РЛИ. Отмеченные в результате проведенных наблюдений случаи несоответствия в проявлении одних и тех же структур на РЛИ и на радиометрических изображениях позволили заключить, что поверхностные агрегации цианобактерий не могут служить непосредственным источником таких пленок. Таким образом, можно сделать вывод, что агрегаты цианобактерий и поверхностные пленки, визуализирующие вихревые структуры на РЛИ, являются взаимонезависимыми трассерами.

В случае с цветением диатомовых водорослей было установлено, что на радиометрических изображениях видимого диапазона в это время проявляются только наиболее крупные вихревые структуры из тех, что могут быть обнаружены на квазисинхронных РЛИ.

Работа была частично поддержана грантами РФФИ №10-05-00428 и № 11-07-12025-офи-М.

Данные Envisat ASAR и MERIS были получены в рамках проектов ЕКА АО Bear 2775 и С1Р6342.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лаврова О.Ю.* Стики как индикаторы вихревой активности в прибрежной зоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов / Под. ред. Лупяна Е.А., Лавровой О.Ю. Вып. 2. Т. 2. М.: GRANP polygraph, 2005 С. 118–123.
- Митягина М.И., Лаврова О.Ю.* Спутниковые наблюдения вихревых и волновых процессов в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 5. С. 72–79.
- Alpers W., Huhnerfuss H.* The damping of ocean waves by surface films: A new look at an old problem // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. № C5. P. 6251–6265.
- Dokken S.T., Wahl T.* Observations of spiral eddies along the Norwegian Coast in ERS SAR images // FFI Report 96/01463. 1996.
- Eldevik T., Dysthe K.B.* Spiral eddies // J. Phys. Oceanogr. 2002. V. 32. № 3. P. 851–869.
- Espedal H.A., Johannessen O.M., Johannessen J.A., Dano E., Lyzenga D., Knulst J.C.* COASTWATCH'95: A tandem ERS-1/2 SAR detection experiment of natural film on the ocean surface // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 24969–24982.
- Johannessen J.A., Digranes G., Espedal H., Johannessen O.M., Samuel P., Browne D., Vachon P.* SAR ocean feature catalogue // ESA Publication Division, ESTEC. Noordwijk, Netherlands, 1994. 106 p.
- Johannessen J.A., Kudryavtsev V., Akimov D., Eldevik T., Winther N., Chapron B.* On radar imaging of current features: 2. Mesoscale eddy and current front detection // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. № C07017. doi:10.1029/2004JC002802.
- Lavrova O., Karimova S., Mityagina M.* Eddy activity in the Baltic Sea retrieved from satellite SAR and optical data // Proc. Third Int. Workshop SeaSAR 2010. 25-29 January 2010. ESRIN, Frascati, Italy.
- Lavrova O., Mityagina M., Bocharova T., Gade M.* Multi-channel observation of eddies and mesoscale features in coastal zones // Remote sensing of the European Seas / Eds. Barale V., Gade M. Springer Verlag, 2008. P. 463–474.
- Shcherbak S.S., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I. et al.* Multi-sensor satellite monitoring of seawater state and oil pollution in the northeastern coastal zone of the Black Sea // Int. J. Rem. Sens. 2008. V. 29. № 21. P. 6331–6345.
- Siegel, H., Gerth, M.* Optical remote sensing applications in the Baltic Sea // Remote sensing of the European Seas / Eds. Barale V., Gade M. Springer Verlag, 2008. P. 91–102.
- Yamaguchi S., Kawamura H.* SAR-imaged spiral eddies in Mutsu Bay and their dynamic and kinematic models // J. Oceanogr. 2009. V. 65. № 4. P. 525–539.

## Observations of Eddy Structures in the Baltic Sea by Satellite Radar and Radiometer Data

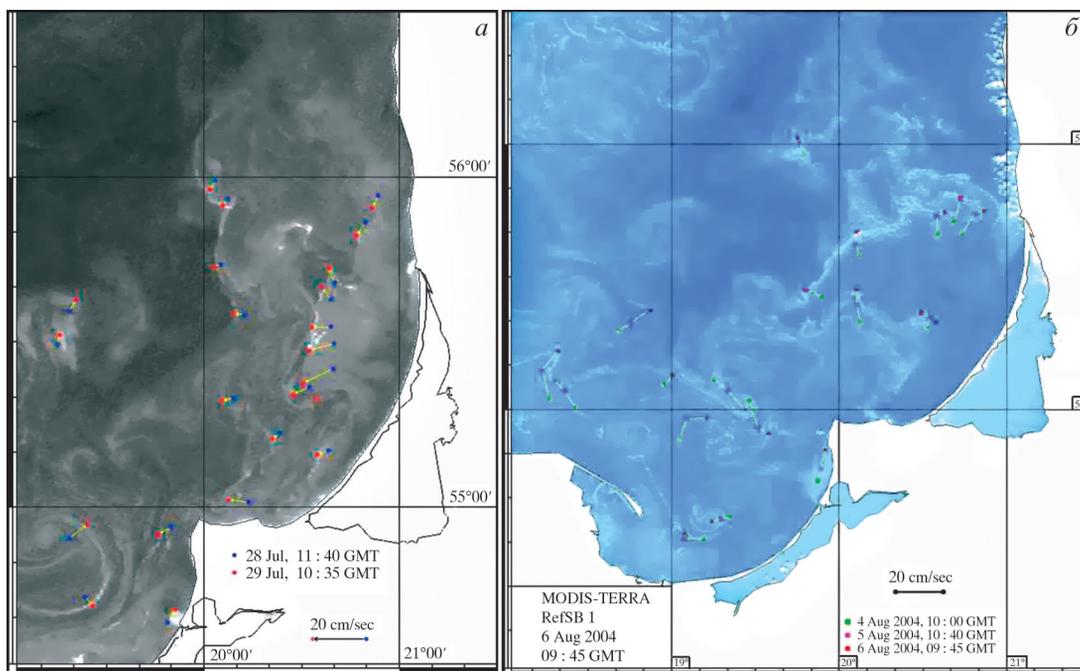
S. S. Karimova<sup>1</sup>, O. Yu. Lavrova<sup>1</sup>, D. M. Soloviev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

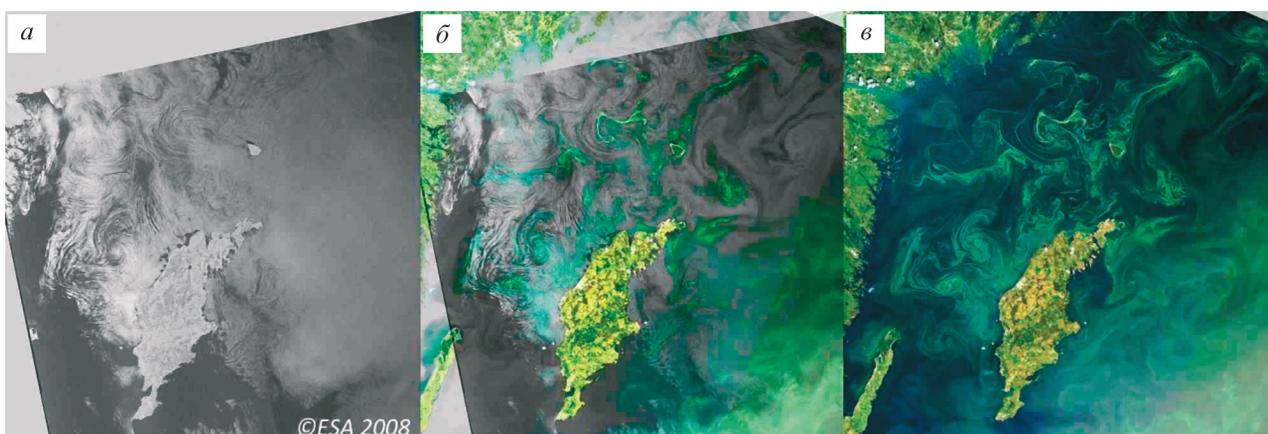
<sup>2</sup>Marine Hydrophysical Institute, National Academy of Sciences of Ukraine, Sevastopol

The Baltic Sea meso- and submesoscale eddies manifestations in satellite images different in physical nature and spatial resolution are considered. For this purpose Envisat ASAR, ERS-2 SAR, Envisat MERIS, Aqua/Terra MODIS and Landsat ETM+ images obtained in 2008–2009 in different parts of the Baltic Sea were used. Possible mechanisms of eddy manifestation in the Baltic Sea SAR images are scrutinized. As a result of combined analysis of the satellite data mentioned above some eddy manifestation peculiarities were revealed in dependence on different hydrometeorological, hydrobiological and optical characteristics of the surface layer. Special attention was paid to the phytoplankton and cyanobacteria blooms occasions.

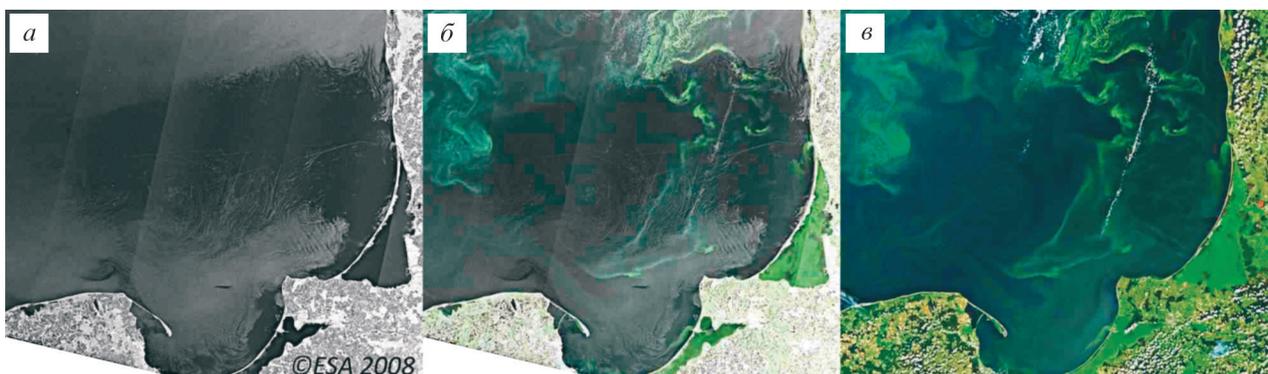
**Keywords:** Envisat ASAR, ERS-2 SAR, Envisat MERIS, Aqua/Terra MODIS, Landsat ETM+ images, eddy/manifestations, cyanobacteria blooms, Baltic Sea



**Рис. 6.** Реконструкции поля течений в юго-восточной части Балтийского моря, выполненные: *а* – по паре снимков Terra MODIS за 28.07.2004 и 29.07.2004; *б* – по трем снимкам Terra MODIS за 04.08.2004, 05.08.2004 и 06.08.2004 ([http://www.lukoilkmn.com/ecology/luk\\_kosmos.pdf](http://www.lukoilkmn.com/ecology/luk_kosmos.pdf)).

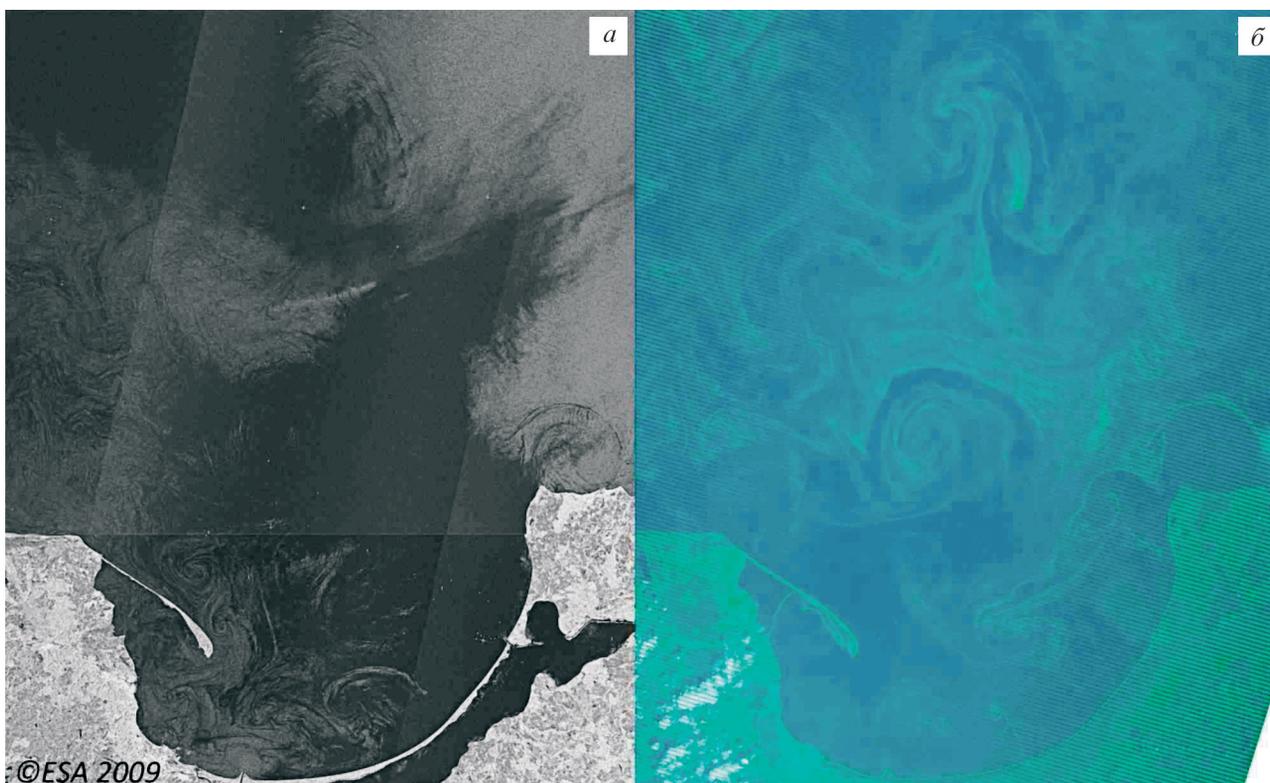


**Рис. 7.** Проявление вихревых структур в районе о. Готланд: *а* – Envisat ASAR от 23.07.2008, 20:11 GMT; *б* – РЛИ, совмещенное с наиболее яркими пикселями изображения MERIS, соответствующим положению вихревых структур; *в* – Envisat MERIS от 24.07.2008, 09:53 GMT.

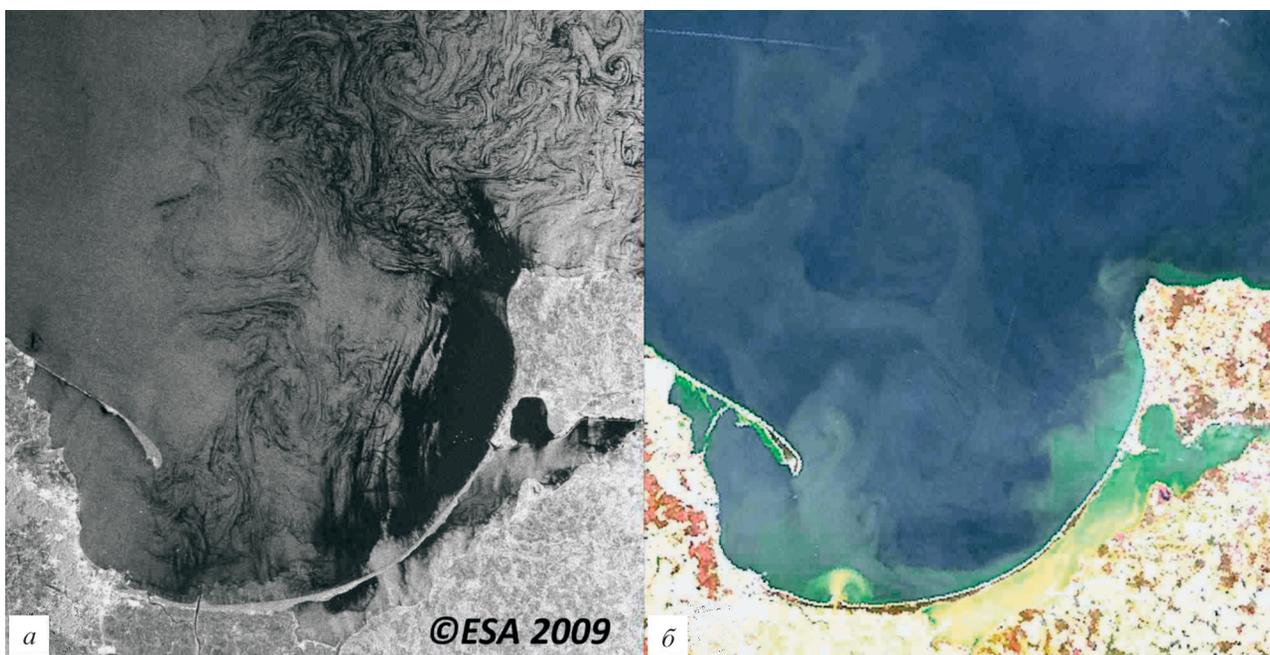


**Рис. 8.** Проявление вихревых структур в юго-восточной части Балтийского моря: *а* – Envisat ASAR от 01.08.2008, 09:03 GMT; *б* – РЛИ, совмещенное с наиболее яркими пикселями изображения MERIS, соответствующим положению вихревых структур; *в* – Envisat MERIS от 31.07.2008, 09:34 GMT.





**Рис. 9.** Проявление вихревых структур в юго-восточной части Балтийского моря на полученных квазисинхронно спутниковых изображениях различной природы: *a* – Envisat ASAR от 17.07.2009, 09:01 GMT; *б* – цветосинтезированное изображение Landsat ETM+ от 17.07.2009, 09:33 GMT (каналы 3, 2, 1).



**Рис. 10.** Проявление вихревых структур в юго-восточной части Балтийского моря: *a* – Envisat ASAR от 25.04.2009, 09:09 GMT; *б* – синтезированное в естественных цветах изображение Envisat MERIS от 24.04.2009, 09:42 GMT.



## ВОССТАНОВЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОПОГРАФИИ ЧЕРНОГО МОРЯ ДЛЯ АЛЬТИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

© 2011 г. А. А. Кубряков, С. В. Станичный

Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь

\*E-mail: arskubr@gmail.com

Поступила в редакцию 01.10.2010 г.

В работе применен новый подход для восстановления средней динамической топографии Черного моря. При этом были использованы контактные наблюдения — измерения SVP — дрейфтеров и данные вертикального зондирования температуры и солености совместно с измерениями аномалий уровня моря, полученными по данным спутниковой миссии Topex/Poseidon. Абсолютный уровень моря, восстановленный по альтиметрическим данным с использованием средней динамической топографии, полученной в работе, был сопоставлен с динамическим уровнем, полученным по независимым судовым съемкам. Сопоставление показало, что представленная в работе методика позволяет более точно определять динамическую топографию Черного моря по сравнению с работами предыдущих авторов. Результаты этой работы будут полезны для восстановления полей геострофических течений по данным спутниковой альтиметрии.

**Ключевые слова:** альтиметрические спутниковые данные, динамическая топография, аномалии уровня моря, Черное море

### ВВЕДЕНИЕ

Современные спутниковые альтиметрические миссии дают возможность получать регулярные данные об уровне Черного моря. Такого рода данные могут быть использованы для изучения особенностей мезомасштабных процессов при прямом анализе (Коротчаев et al., 2001), усвоении альтиметрических измерений в динамических моделях (Коротчаев и др., 1998) и для расчета скоростей геострофических течений по наклону уровня моря относительно поверхности геоида. Однако невысокая точность измерений геоида не позволяет прямым методом по измерениям альтиметра восстанавливать динамическую топографию морской поверхности. Вместо этого для анализа изменчивости уровня моря используется аномалия уровня поверхности (АУП) от осредненного за период 1993–1999 гг. поля уровня моря, полученного на основе измерений спутниковых альтиметров миссии Topex/Poseidon (Hernandes et al., 2000). Основные сложности использования альтиметрических данных для изучения динамики поверхностного слоя связаны с проблемой восстановления динамической топографии на основе измерений АУП. Целью данной работы является построение средней динамической топографии (СДТ) — поля, которое необходимо прибавить к АУП для восстановления мгновенной динамической топографии.

Существует несколько основных подходов к решению задачи об определении СДТ: расчет средней топографии на основе климатических данных (Lev-

itus et al., 2001); топография, рассчитываемая на основе моделирования циркуляции океана (Кныш и др., 2002); использование спутниковой гравиметрии для расчета точного геоида и построения абсолютной динамической топографии на его основе (Johannessen et al., 2003); “синтетическая” климатология (Rio, 2003). В нашей работе используется методика, основанная на “синтетическом” подходе: СДТ определяется на основе сопоставления данных контактных и альтиметрических измерений. Этот подход в настоящее время считается наиболее перспективным (Hernandez et al., 2001). В качестве контактных измерений использовались данные дрейфтеров и судовых гидрологических съемок. Восстановленная в работе топография была сопоставлена с независимыми океанографическими съемками. Результаты валидации были сравнены с результатами, полученными с использованием топографии, восстановленной с помощью модели динамики моря (Кныш и др., 2002).

### СИНТЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД

Синтетический метод восстановления средней динамической топографии базируется на основе комбинации контактных и альтиметрических измерений. Для оценки СДТ  $H(r)$  в точке  $r$  в момент времени  $t$  из полной динамической топографии  $h_{is}(t, r)$ , рассчитанной по контактными измерениям, вычита-

ют аномалию  $h'(t, r)$ , полученную по данным альтиметрии (Rio, Hernandez, 2004)

$$h_{is}(t, r) - h'(t, r) = H(r). \quad (1)$$

Отметим, что хотя оба измерения содержат часть сигнала, отвечающую за временную изменчивость уровня моря, их разность содержит только стационарную во времени часть – среднюю динамическую топографию. Благодаря этому для расчетов СДТ можно использовать весь массив контактных данных, существующий после 1992 г. – даты запуска высокоточных альтиметрических миссий Torex/Poseidon и ERS-1 (Rio, Hernandez, 2004).

Для определения СДТ “синтетическим методом” в качестве контактных данных можно также использовать измерения скоростей. Зная полную геострофическую скорость  $u_{is}(r, t)$ ,  $v_{is}(r, t)$  и аномалии компонент скоростей  $u'(r, t)$ ,  $v'(r, t)$ , вычисленных из аномалии уровня по формуле (1), можно получить оценку средней геострофической скорости в точке  $U(r)$ ,  $V(r)$ :

$$v_{is}(t, r) - v'(t, r) = V(r),$$

$$u_{is}(t, r) - u'(t, r) = U(r).$$

И далее, используя уравнения геострофического баланса, можно определить градиенты средней динамической топографии  $H(r)$ :

$$U(r) = -\frac{g}{f} \frac{\partial H(r)}{\partial y}, \quad V(r) = \frac{g}{f} \frac{\partial H(r)}{\partial x}, \quad (2)$$

здесь  $U(r)$ ,  $V(r)$  – компоненты средней геострофической скорости,  $g$  – ускорение свободного падения,  $f$  – параметр Кориолиса. Интегрируя соотношения (2) получим оценки средней динамической топографии  $H(r)$ .

### МАССИВЫ ДАННЫХ

Из банка океанографических данных Морского гидрофизического института Национальной академии наук Украины (МГИ НАНУ) были отобраны данные вертикального зондирования температуры и солёности за период с 1992 по 2003 гг. После этого из профилей температуры и солёности с помощью программы “Гидролог” (Belokorytov, 2005) динамическим методом были получены динамические высоты уровня моря. Всего было использовано более 3100 зондирований.

В работе использовались данные дрейфтеров с 1999 по 2005 гг. Основным инструментом является SVP-В дрейфтер и его модификации (Motuzhev, et al., 2000). Дрейфтер имеет вертикальный подводный парус цилиндрической формы с центром действия на глубине 15 м, сопротивление которого примерно в 40 раз больше, чем у связанного с ним поверхностного поплавка вместе с тросовой линией. Таким образом, влияние поверхностных волн и дрейфовых течений на горизонтальное перемещение дрейфтера

не является существенным, т.к. он переносится вместе с водной массой, окружающей его парус. Определение местоположения дрейфтера производится спутниками системы “Argos” с разрешением не хуже нескольких сотен метров. Всего использовались данные 65 дрейфтеров ~107000 измерений. Исходное временное разрешение данных составляет 1–6 час. Для дальнейшего анализа дрейфтерные измерения были проинтерполированы на одночасовую сетку.

Данные спутниковой альтиметрии были получены в виде аномалий уровня вдоль треков спутников Torex/Poseidon и Jason-1. Над Черным морем за период 1992–2002 гг. проходит девять треков спутника Torex/Poseidon, за 2002–2004 гг. проходит десять сдвинутых треков спутника Torex/Poseidon и девять треков спутника Jason-1 (рис. 1). Пространственное разрешение данных – 7 км, временное ~10 дней.

Данные были получены из отделения космической океанографии Collecte Localisation Satellites (CLS). В работе использовался региональный массив данных, разработанный специально для Черного моря. Его основное отличие от глобального массива – возможность получать альтиметрические измерения ближе к берегу и более высокое разрешение данных (<http://www.aviso.oceanobs.com>).

При создании массивов в исходные альтиметрические данные были введены традиционные для таких измерений поправки на ошибки измерения орбиты спутника, коррекции на инструментальные ошибки, на возмущения за счет влажной тропосферы, сухой тропосферы, ионосферных эффектов (Fu, Cazenave, 2001).

### МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ ОЦЕНОК СДТ

По данным о местоположении дрейфтеров  $r(t)$  были вычислены полные скорости течений  $v$

$$v_{i+1/2} = \frac{r_{i+1} - r_i}{t_{i+1} - t_i}$$

Изменение скорости дрейфтера, описываемое уравнением

$$\frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{k} \times f\vec{v} = -g\nabla h + \frac{1}{\rho} \frac{d\tau}{dz} + A, \quad (3)$$

вызвано градиентами динамической топографии – первое слагаемое правой части; напряжением трения ветра – второе слагаемое правой части и высокочастотной агеострофической компонентой  $A$ , связанной в основном с инерционными колебаниями; здесь  $\tau$  – касательное напряжение трения ветра,  $\rho$  – плотность,  $z$  – глубина.

Инерционная компонента скорости были отфильтрованы с помощью КИХ-фильтра (фильтр с конечной импульсной характеристикой). Окно

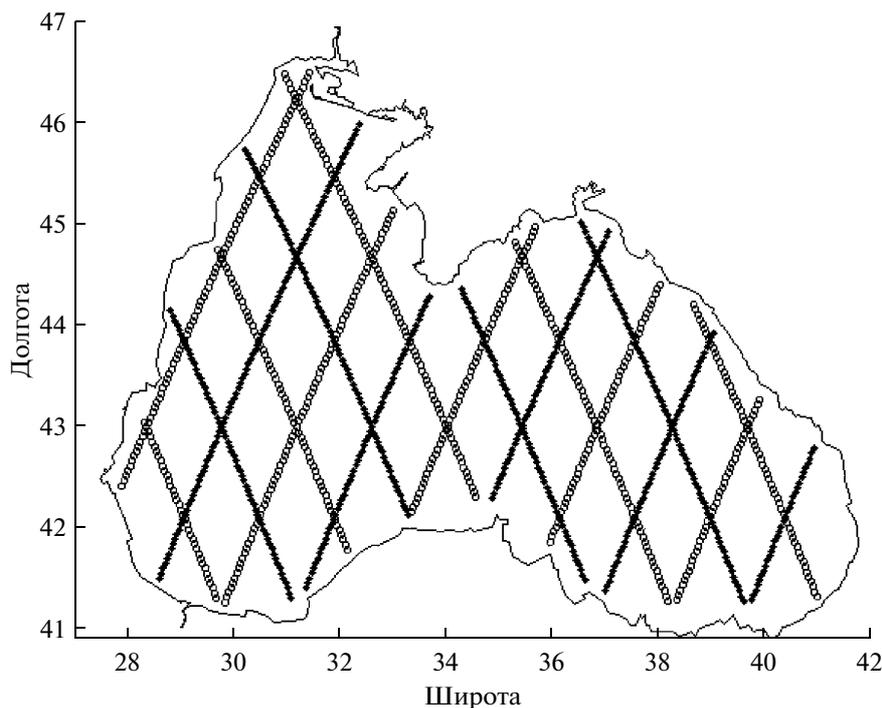


Рис. 1. Положение альтиметрических треков спутниковых миссий Topex/Poseidon.

фильтра выбиралось так, чтобы оно совпадало с периодом инерционных колебаний в Черном море, определяющимся по формуле

$$T = 12 / \sin \varphi,$$

здесь  $\varphi$  — широта, для Черного моря  $\varphi$  лежит в диапазоне  $41^\circ$ – $48^\circ$ .

Для того чтобы исключить экмановскую дрейфовую компоненту скорости, из массива данных были отброшены измерения, которые приходились на ситуации с сильным ветровым воздействием. При этом предполагалось, что дрейфовая компонента на глубине залегания паруса дрейфера — 15 м пренебрежимо мала, если скорость ветра в момент времени в точке измерения не превосходила 5 м/с. Дрейферные измерения при скорости ветра, больше 5 м/с, не учитывались. Для этого использовались данные NCEP (National Centers for Environmental Prediction) о ветре на 1-градусной равномерной сетке с шестичасовым интервалом за период 1998–2005 гг. (<http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/Ancillary/Meteorological/>).

Для получения оценок градиента средней динамической топографии в точке были выбраны квазисинхронные измерения скоростей дрейферов и аномалий уровня моря с параметрами выборки  $\Delta r = 25$  км,  $\Delta t = 5$  дней. Эти параметры приблизительно соответствуют основным масштабам пространственной и временной синоптической изменчивости для Черного моря. По данным альтиметрических измерений АУП, используя уравнения геострофического

баланса, были вычислены проекции аномалий геострофических скоростей  $\vec{v}'$  на направление, перпендикулярное направлению трека спутника. После этого были вычислены разности между геострофическими скоростями дрейферов  $\vec{v}$ , спроецированными на направление  $\vec{v}'$ , и аномалиями  $\vec{v}'$ . Оценки  $\vec{V}(r)$  — средней геострофической скорости были получены для каждой точки альтиметрических треков, в которых существовали квазисинхронные измерения альтиметрии и скоростей дрейферов. При наличии двух или более квазисинхронных измерений в точке оценка  $\vec{V}(r)$  определялась как среднее от всех выбранных разностей.

Полученные значения градиента средней динамической топографии были аппроксимированы вдоль треков полиномами различных степеней. На рис. 2 изображены распределения скоростей для нескольких различных треков спутника Topex/Poseidon. Для перехода от градиентов уровня  $V(r)$  к уровню  $H(r)$  полученные полиномы были проинтегрированы (рис. 3).

Константы интегрирования  $C_{1...N}$  (здесь  $N$  — число треков) определялись из условия минимума разностей уровня в точках пересечения треков. Для определения  $C_{1...N}$  был разработан алгоритм, основанный на работе рекурсивной функции. Пусть для каждой точки пересечения треков  $i$  и  $j$  задан уровень  $l_{ij}$ . На нулевом шаге ( $m = 0$ ) работы алгоритма набор констант  $C_{1...N}$  ( $t = 0$ ) определяется как осредненное

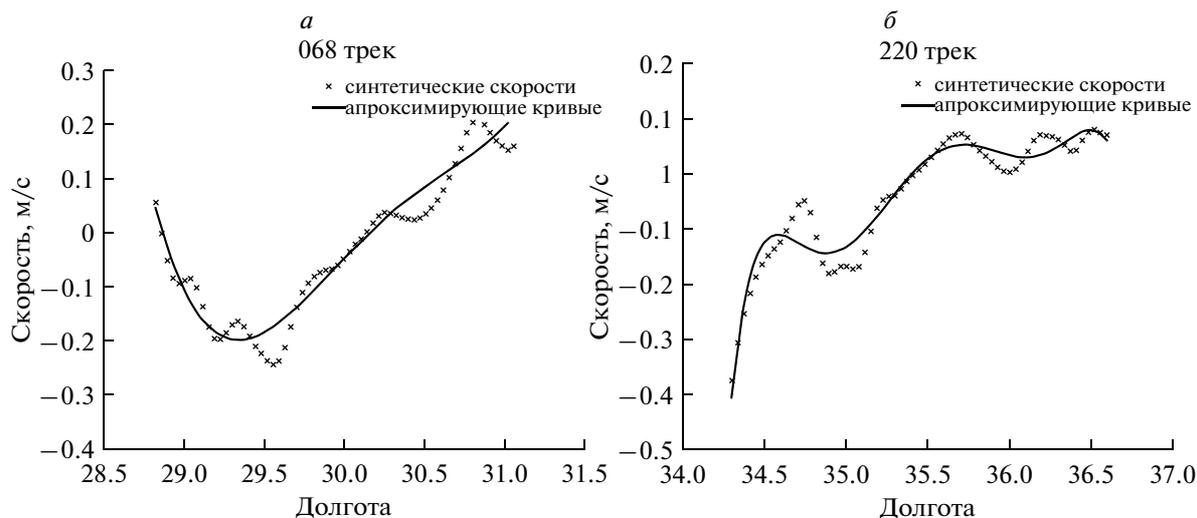


Рис. 2. Изменчивость “синтетической” скорости по данным дрейфтеров и соответствующие аппроксимирующие кривые: *a* – для 68 трека; *б* – для 220 трека спутника Jason-1 в Черном море.

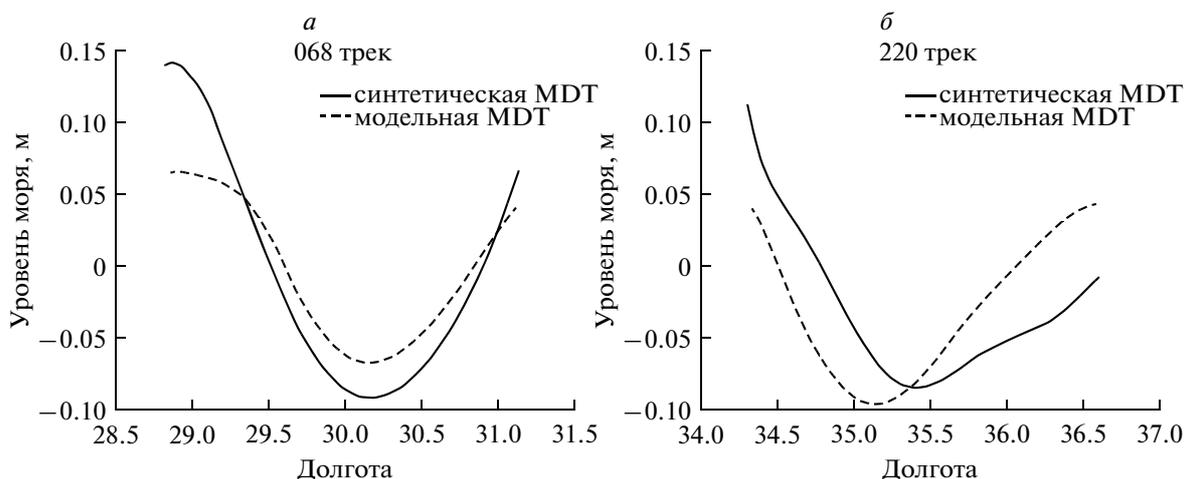


Рис. 3. Изменчивость “синтетической” и модельной средней динамической топографии, полученные по данным дрейфтеров: *a* – для 68 трека; *б* – для 220 трека спутника Jason-1 в Черном море.

значение сигнала по каждому треку. Задача сводится к нахождению таких  $C_i$ , при которых сумма  $D$  по всем трекам суммарной разности уровня  $S_i$  в точках пересечения треков минимальна.

$$D = \sum_i^N S_i = \sum_i^N \sum_j^N ((l_{ij} + C_i) - (l_{ji} + C_j)).$$

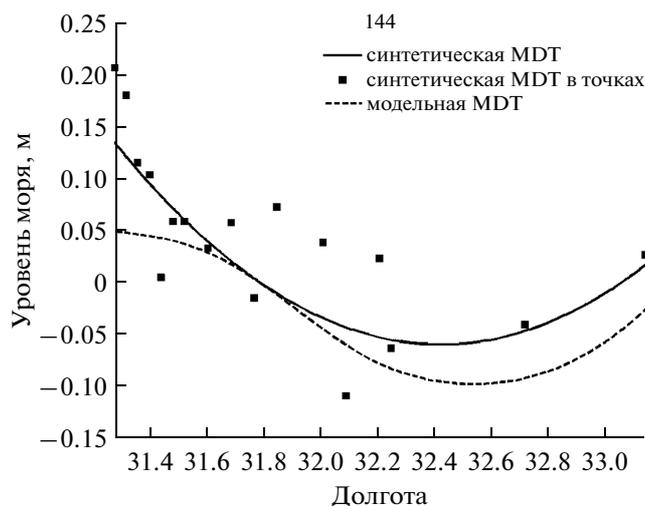
Для решения этой задачи на каждом шаге  $m$  рассчитывались значения  $S_i$  и определялся номер трека  $n$ , для которого  $S_i$  максимальна. Константа  $C_n$  определялась как

$$C_n(m) = C_n(m-1) - \langle S_i(m-1) \rangle.$$

Полученный набор коэффициентов  $C_{1...n...N}$  использовался для дальнейшего расчета сумм  $S_i$  и кор-

ректировки коэффициентов на следующем шаге. На шаге  $m = 1000$  значения сумм  $S_i$  и  $D$  не превышают  $10^{-5}$  м.

Для определения средней динамической топографии по данным вертикального зондирования температуры и солёности динамическим методом была восстановлена топография  $h$ , относительно глубины 300 м. Предполагалось, что ниже этой глубины скорости движения жидкости пренебрежимо малы по сравнению с движениями в верхних слоях. Используя те же параметры выборки, были отобраны квазисинхронные измерения альтиметрии  $h'$  и получены оценки  $H(r) = h(t, r) - h'(t, r)$ . Для каждого трека полученные значения были аппроксимированы полиномами 5–7 степеней (рис. 4).



**Рис. 4.** Изменчивость “синтетической” и модельной средней динамической топографии, полученные по данным судовых съемок на 144 трассе.

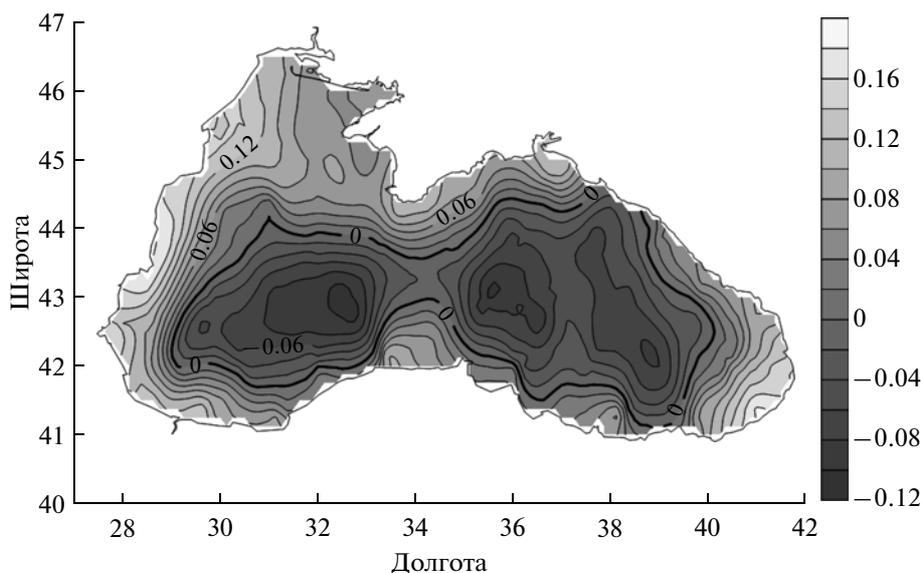
Усредняя профили СДТ, полученные по судовым съемкам и по дрейферным данным были построены разрезы средней динамической топографии Черного моря вдоль трекков. Далее эти значения были интерполированы (экстраполированы) на сетку  $0.125^\circ \times 0.125^\circ$  для всего бассейна Черного моря с помощью кригинг-интерполяции (рис. 5).

#### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как показали результаты расчетов, полученное поле отражает основные особенности динамики Черного моря, но и имеет ряд отличий по сравнению с данными топографии, восстановленной с по-

мощью модели динамики моря (Кныш и др., 2002) (рис. 6). Отметим, что эти отличия могут быть результатом не только особенностей поля течений в Черном море, но и спецификой получения альтиметрических данных. Полученное поле СДТ является, в общем смысле, некоторым полем, при добавлении к которому значений АУП, можно наилучшим образом восстановить абсолютную динамическую топографию.

Так как основные данные о СДТ были получены для глубоководной части, а значения СДТ в прибрежных районах в основном получены в результате экстраполяции, именно в прибрежных районах следует ожидать максимальных ошибок, и коррек-



**Рис. 5.** “Синтетическая” средняя динамическая топография.

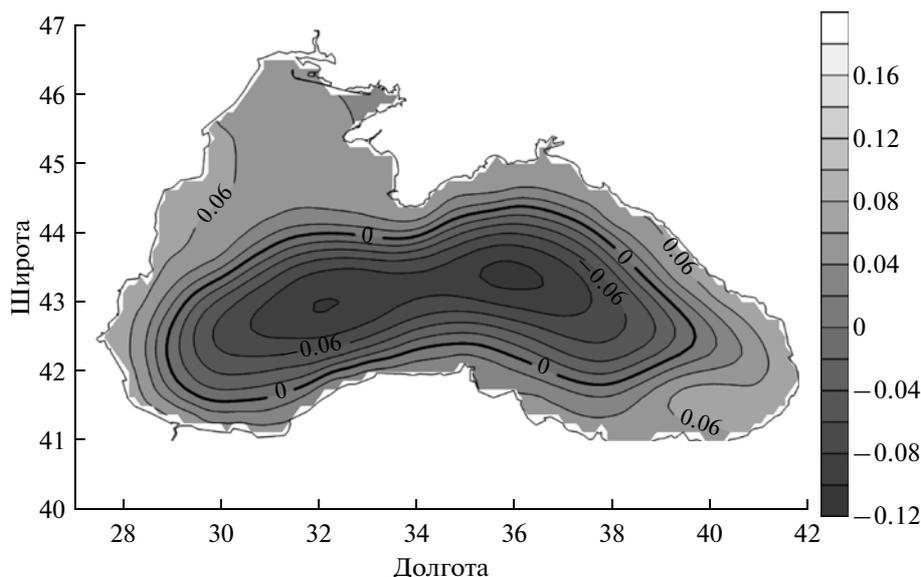


Рис. 6. “Модельная” средняя динамическая топография (Кныш и др., 2002).

ция СДТ в этих зонах требует приложения дополнительных исследований.

Для проверки точности СДТ было проведено сопоставление альтиметрических данных с динамической топографией, рассчитанной по неиспользуемым ранее при построении СДТ вертикальным профилям плотности, полученным в ходе судовых зондирований. Общая выборка квазисинхронных измерений состояла из 28 профилей полученных в различных районах моря в разные сезоны. На рис. 7 представлены диаграммы рассеяния между спутниковыми и судовыми измерениями с использовани-

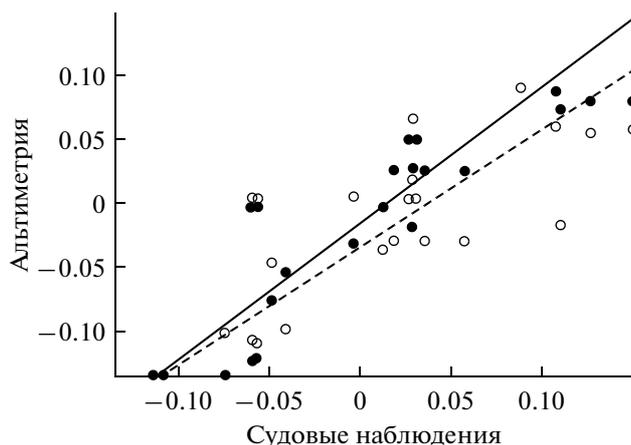


Рис. 7. Диаграммы рассеяния измерений динамической топографии, восстановленной по спутниковым и судовым измерениям и соответствующие линии регрессии с использованием “синтетической” СДТ (сплошная линия и маркеры) и средней модельной топографии (пунктирная линия, пустые маркеры). Коэффициенты корреляции  $k_1 = 0.87$ ,  $k_2 = 0.79$ . Дисперсия  $d_1 = 0.048$  м;  $d_2 = 0.055$  м.

ем синтетической СДТ и средней модельной топографии.

Вычисленные коэффициенты регрессии равны 0.92 и 1.06, коэффициенты корреляции равны 0.79 и 0.87, дисперсия отклонений 0.055 м и 0.048 м для модельной и “синтетической” средней динамической топографии, соответственно. Таким образом, “синтетическая” СДТ позволяет восстанавливать поля динамической топографии и геострофических скоростей с большей точностью.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе была реализована методика восстановления средней динамической топографии на основе совместного анализа контактных и альтиметрических данных, с помощью которой была получена “синтетическая” СДТ для Черного моря.

Сопоставление альтиметрического уровня моря с независимыми измерениями динамических высот показало увеличение корреляции и уменьшение дисперсии для “синтетической” СДТ по сравнению с топографией, полученной в более ранних работах.

Таким образом, полученная в нашей работе СДТ может быть применена для восстановления полей динамической топографии и геострофических скоростей с большей точностью.

Основные направления дальнейшей работы по улучшению качества восстановления уровня моря на основе данных об альтиметрических аномалиях уровня будут сосредоточены на проблемах восстановления СДТ в прибрежных районах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кныш В.В., Демьяшев С.Г., Коротаев Г.К.* Методика реконструкции климатической сезонной циркуляции Черного моря на основе ассимиляции гидрологических данных в модели // Морской гидрофиз. журн. 2002. № 2. С. 36–52.
- Коротаев Г.К., Саенко О.А., и др.* Точность, методология и некоторые результаты ассимиляции альтиметрических данных ТОРЕХ/POSEIDON в модели общей циркуляции Черного моря // Исслед. Земли из космоса. 1998. № 3. С. 3–17.
- Belokopytov V.* Ocean Station Tool: Software package for processing and analysis of oceanographic data // Proc. Intern. Marine Data and Information Conference – IMDIS. May 31 – June 3, 2005. Brest, France. 2005. P. 67.
- Fu L.L., Cazenave A.* Satellite Altimetry and Earth Sciences // A handbook of techniques and applications. Int. Geophys. Series. Academic Press, 2001. V. 69.
- Hernandez F., Calvez M.H. et al.* Surface Moyenne Océanique: Support scientifique à la mission altimétrique Jason-1, et à une mission micro-satellite altimétrique // Rapport d'avancement. Rapport n°CLS/DOS/NT/00.313. édité par CLS, 2000.
- Hernandez F., Schaeffer P. et al.* Mean dynamic topography for satellite altimetry: Two approaches, from oceanographic data or satellite gravimetry // Journees luxembourgeoises de geodynamique. № 89. Munsbach, Luxembourg, 2001. P. 19–25.
- Johannessen J.A., Balmino G., et al.* The European Gravity field and Steady-state ocean circulation explorer satellite mission: its impact on geophysics // Survey Geophys. 2003. № 24. С. 339–386.
- Korotaev G., Saenko O., Koblinsky C.* Satellite altimetry observations of the Black Sea level // J. Geophys. Res. 2001 V. 106. № C1. P. 917–933.
- Levitus S., Antonov J.I., Boyer T.P.* World Ocean Database // National Oceanogr. Data Center. 1998.
- LeGrand P., Schrama E.J.O., Tournadre J.* An inverse estimate of the dynamic topography of the ocean // Geophys. Res. Lett. 2003. № 30. P. 1062.
- Motyzhev S.V., Poulain P.M., Zatsepin A.G. et al.* New phase of drifter experiment in the Black Sea // DBCP Techn. Doc. Ser. WMO, Geneva, 2000. № 17. P. 116–128.
- Rio M.H.* Combinaison de données in situ, altimétriques et gravimétriques pour l'estimation d'une topographie dynamique moyenne globale. 2003 // Ed. CLS. PhD Thesis, University Paul Sabatier (Toulouse III, France), 2003. P. 260.
- Rio M.H., Hernandez F.* A mean dynamic topography computed over the world ocean from altimetry, in situ measurements, and a geoid model // J. Geophys. Res. 2004. № 109.
- Rio M.H., Poulain P.M. et al.* A Mean Dynamic Topography of the Mediterranean Sea computed from altimetric data, in-situ measurements and a general circulation model // J. Marine Systems. 2007. № 65. P. 484–508.

## Reconstruction of Mean Dynamic Topography of the Black Sea for Altimetry Measurements

A. A. Kubryakov, S. V. Stanichny

*Marine Hydrophysical Institute, National Academy of Sciences of Ukraine, Sevastopol*

In this study we determine Mean Dynamic Topography (MDT) of Black Sea for reconstruction of dynamic topography and geostrophic circulation from altimetry data. The method based on combine usage of SVP-drifters, hydrological profiles and sea level anomalies, received from Topex/Poseidon mission. Validation of generated MDT show greater correlation with independent in-situ measurements compare to previous versions of MDT.

**Keywords:** satellite altimetry data, dynamic topography, sea level anomalies, Black Sea

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ  
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ  
ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ  
РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКИ В РАЙОНЕ НЕФТЕПРОМЫСЛОВ  
“НЕФТЯНЫЕ КАМНИ” В КАСПИЙСКОМ МОРЕ

© 2011 г. А. Ю. Иванов<sup>1\*</sup>, М. Ю. Достовалов<sup>2</sup>, А. А. Синева<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Учреждение Российской академии наук Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт точного приборостроения, Москва

<sup>3</sup> Московский физико-технический институт, Долгопрудный Московской обл.

\*E-mail: ivanoff@ocean.ru

Поступила в редакцию 25.08.2010 г.

На основе обработки и анализа радиолокационных изображений (РЛИ) спутника Radarsat-2, полученных летом 2009 г. на район промыслов “Нефтяные Камни” в Каспийском море, показано, что они являются полноценными продуктами, позволяющими получать информацию о динамике нефтяных загрязнений, их параметрах, а при определенных допущениях — оценки объемов технологических сбросов. Для картографирования пространственно-временного распределения пятен лучше всего подходят обзорные режимы радиолокатора с синтезированной апертурой Radarsat-2 с вертикальной соосной поляризацией (VV) сигнала; на перекрестных поляризациях мощность сигнала для этих задач недостаточна. Использование поляризационных съемок само по себе не улучшает обнаружение и идентификацию нефтяных загрязнений. Специальный квадрополяризационный режим съемки в данных экспериментах не выявил существенных преимуществ; максимальные контрасты наблюдались на вертикальной поляризации. Получены оценки объемов разливов.

**Ключевые слова:** Radarsat-2, радиолокатор с синтезированной апертурой, радиолокационные изображения, нефтяные загрязнения, “Нефтяные Камни”, Каспийское море

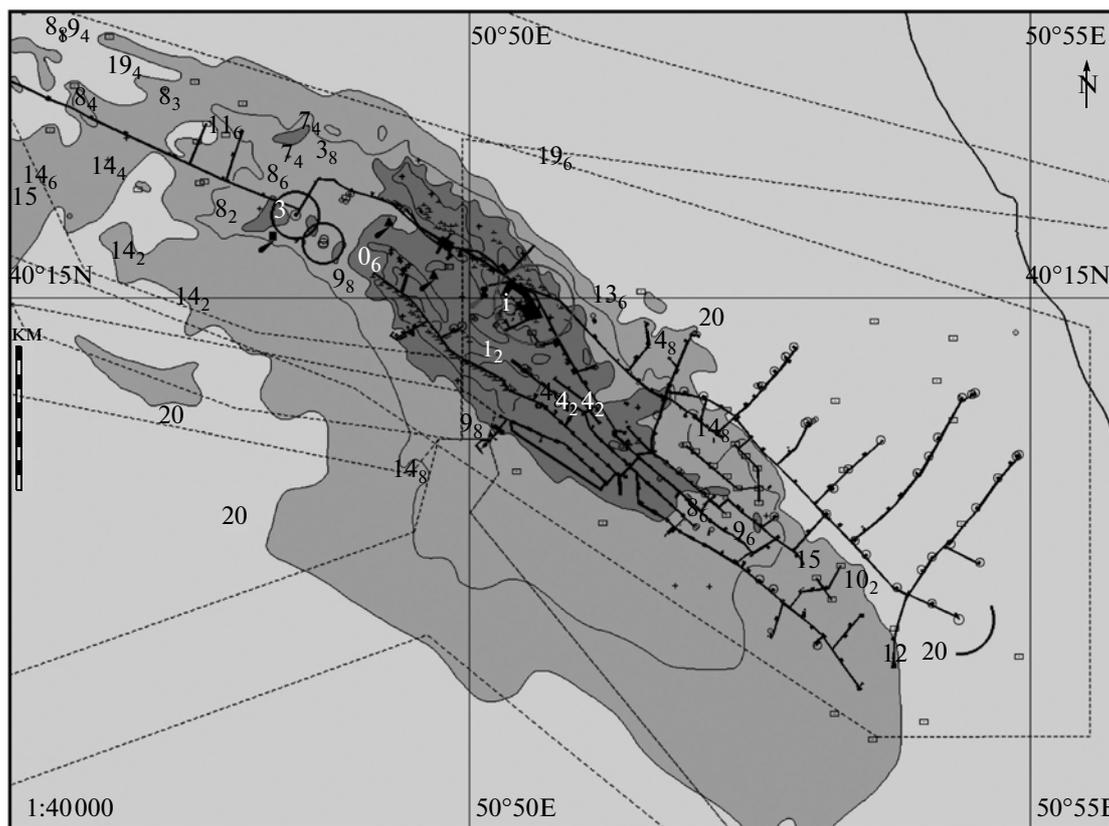
ВВЕДЕНИЕ

Как неоднократно отмечалось, космическая радиолокация является эффективным инструментом дистанционного зондирования (ДЗ) с целью обнаружения разливов нефти, причем радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА), формирующий радиолокационные изображения (РЛИ) поверхности моря, является одним из наилучших решений (van der Sandven, Thomas, 2004; Brekke, Solberg, 2005; Иванов, 2007). С одной стороны, РСА как инструмент наблюдения пленочных загрязнений является наиболее эффективным средством ДЗ, но, с другой стороны, существует проблема определения ряда параметров нефтяной пленки с его помощью, например ее толщины (и в итоге объемов разливов) (van der Sandven, Thomas, 2004; Иванов, 2007). На сегодняшний день измерение геометрических характеристик и площадей пятен на РЛИ не представляет практических затруднений (Иванов и др., 2004; Иванов и др. 2005; Иванов и др., 2007), однако для оценки толщины пленки приходится пользоваться данными других дистанционных датчиков (ИК/УФ-сканерами, лазерными флуориметрами, СВЧ-радиометрами) (Fingas, Brown, 2000) или косвенной информацией и методами.

Для решения этой проблемы был предложен геоинформационный (ГИС) подход (Иванов, Затягалова, 2007), позволяющий выявлять пленочные/нефтяные загрязнения и с достаточно высокой достоверностью идентифицировать источники загрязнения. Он успешно применялся для мониторинга ряда российских акваторий (Иванов, Затягалова, 2007; Иванов, 2010а). Информацию о применении космической радиолокации для мониторинга пленочных загрязнений моря можно найти в (Иванов, 1997; Иванов и др., 2004; Иванов и др., 2005; Иванов, 2007; Иванов и др., 2007; Иванов, Затягалова, 2007; Иванов и др., 2008; Иванов, 2010б).

Одним, своего рода “естественным” полигоном для отработки технологий ДЗ нефтяных загрязнений, привлекающим исследователей, является пгт Нефтяные Камни, расположенный в Каспийском море в 42 км к востоку от п-ова Апшерон (рис. 1). Он построен на металлических эстакадах, сооруженных в 1949 г. с началом добычи нефти на банке Черные Камни (название из-за нефти, сочащейся из естественных источников на дне).

Месторождение “Нефтяные Камни” входит в Южно-Каспийскую нефтегазоносную провинцию и приурочено к крупной антиклинали, разбитой си-



**Рис. 1.** Нефтепромыслы «Нефтяные камни» на фрагменте навигационной карты № 35072 (прямоугольниками и кружками обозначены буровые вышки).

стемой разрывных нарушений; наиболее продуктивны отложения среднего плиоцена. Глубина залежей составляет 260–1590 м, эффективная мощность до 100 м. Нефть содержит 13–32% легких фракций, 0,2–2,4% парафина, сера отсутствует; плотность нефти составляет 853–929 кг/м<sup>3</sup>. Оператор – Нефтегазодобывающее управление (НГДУ) «Нефтяные Камни». На месторождении пробурено более 2 тыс. скважин, причем во времена СССР здесь добывалось до 10 млн. т нефти в год, или 60% всей морской нефти (Бабаев, Зонн, 2005). В настоящее время месторождение находится в конечной стадии разработки. В конце 1990-х гг. насчитывалось всего 421 действующая скважина. Современный среднесуточный уровень добычи – 1800–2000 т нефти (Зонн, 2004). Нефть поступает на материк по подводному нефтепроводу длиной 78 км. По разным оценкам, остаточные извлекаемые запасы нефти на месторождении составляют от 20 до 180 млн. т (данные Госнефтекомпании Азербайджана (ГНКАР)). Тем не менее бурение новых скважин в ближайшее время будет продолжено с целью повышения общих объемов добычи с 800 тыс. т до 1,2 млн. т нефти в год (ГНКАР).

Одним из характерных признаков «Нефтяных Камней» являются пятна плавающей нефти. Ос-

новная причина загрязнений – хронические утечки при добыче и транспортировке из неисправных систем и трубопроводов (Нефть и газ..., 2002; Голь, 2003; Зонн, 2004). Ремонт и замена таких коммуникаций требует больших капиталовложений, но поскольку эти вложения не приведут к увеличению добычи нефти, ГНКАР рассматривает их как нецелесообразные (Нефть и газ..., 2002). Бакинская бухта в связи с постоянными утечками здесь и на др. промыслах Азербайджана является одной из наиболее загрязненных акваторий в мире – в ней образовалась так называемая мертвая зона. По данным (Бабаев и Зонн, 2005), мощность донных отложений, загрязненных нефтью, с концентрацией токсичных веществ, превышающей максимально допустимую в 100 раз, здесь составляет 8–10 м. Время от времени обширные акватории покрываются нефтяной пленкой, препятствующей растворению кислорода в воде и губительно действующей на морскую флору и фауну. В районе НДГУ «Нефтяные камни» пленка на поверхности моря может покрывать площади от 200 до 1000 км<sup>2</sup> (Море проблем, 2001; Зонн, 2004) и даже 1500 км<sup>2</sup> (Голь, 2003), а отдельные производственные выбросы – составлять от 0,5 до 300 т и более (Голь, 2003).

**Таблица 1.** Характеристики SGX продуктов Wide и Standard Quadro-Pol

Режим съемки	Ширина кадра, км	Размер пиксела (дальность × азимут), м	Пространственное разрешение по азимуту, м	Поляризация	Кол-во возможных кадров в полосе обзора
Wide	150	10 × 10	24.7	ВВ и ВГ или ГВ и ГГ	3
Standard Quadro	25	8 × 3.1	7.6	ВВ, ВГ, ГВ и ГГ	31

**Таблица 2.** Съемки пгт “Нефтяные Камни” со спутника Radarsat-2

Дата	Виток	Время, UTC	Режим съемки	Углы падения, град	Поляризация
11.07.2009	8218	14:29	Wide 2	31-39	ВВ, ВГ
12.07.2009	8225	02:43	То же	То же	То же
28.07.2009	8460	14:33	»	»	»
29.07.2009	8468	02:47	»	»	»
21.08.2009	8803	14:33	Standard Quadro 18	37-39	ВВ, ВГ, ГВ, ГГ
То же	То же	То же	То же	То же	То же
22.08.2009	8811	02:47	Standard Quadro 10	29-31	»
То же	То же	То же	То же	То же	»
21.09.2009	9246	14: 29	Wide 2	31-39	ВВ
22.09.2009	9254	02: 43	То же	То же	То же

В настоящей статье на основе обработки и анализа РЛИ спутника Radarsat-2 получены параметры разливов нефти в районе НГДУ. Проведена оценка поляризационных возможностей РСА Radarsat-2, а также выполнено сравнение полученных оценок с оценками независимых источников и оценками работ (Боев, Матвеев, 2005; Боев, Матвеев, 2008; Белоброва и др., 2009), которые авторы посчитали явно завышенными.

### РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ

РЛИ спутника Radarsat-2 были получены в рамках программы Канадского космического агентства “Scientific Opportunity and Research” (SOAR), проект № 648 “Oil slicks in Radarsat-2 SAR multi-polarization images” в виде стандартных продуктов Wide (W) и Standard Quadro-Pol (SQ). Они представляют собой синтезированные изображения с некогерентным накоплением по азимуту и дальности, с динамическим диапазоном 16 бит, разрешением 8 и 25 м и полосой обзора 25 и 150 км (табл. 1). Изображения поставлялись в виде продуктов SGX (SAR Georeferenced Extra Fine Resolution) и SLC (Single Look Complex), причем последний использовался для расчета поляризационных характеристик.

Продукты спутника Radarsat-2 поставляются в специальном формате и поддерживаются свободно распространяемыми программами для обработки данных радиолокации, такими, как NEST (Next

ESA SAR Toolbox) и PolSARPro (Polarimetric SAR Data Processing and Educational Tool). Основные характеристики РЛ-продуктов Radarsat-2 приведены в табл. 1., а в табл. 2 – перечень полученных и проанализированных съемок. На рис. 2 показано покрытие “Нефтяных Камней” съемками Radarsat-2 в июле, августе и сентябре 2009 г. по данным программы Radarsat Swath Planner Application, а на рис. 3–6 – сами РЛИ.

Обработка РЛИ выполнялась с использованием стандартных и специальных алгоритмов. Всего в рамках эксперимента было получено, обработано и проанализировано 10 РЛИ (табл. 2).

### ОБРАБОТКА РЛИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Обработка с помощью программы NEST 3С, помимо стандартных процедур, включала калибровку снимков в децибелах и фильтрацию для подавления спекл-шума, присущему РЛИ высокого разрешения. Кроме того, фильтрация способствовала уменьшению шума при построении профилей распределения интенсивности рассеяния вдоль направлений азимута и дальности.

Расчет поляризационных характеристик проводился с помощью программы PolSARPro v.4.0. Для исследования вклада поляризаций в формирование РЛ-образов нефтяных пленок использовался метод декомпозиции Паули, декомпозиция на основе эн-

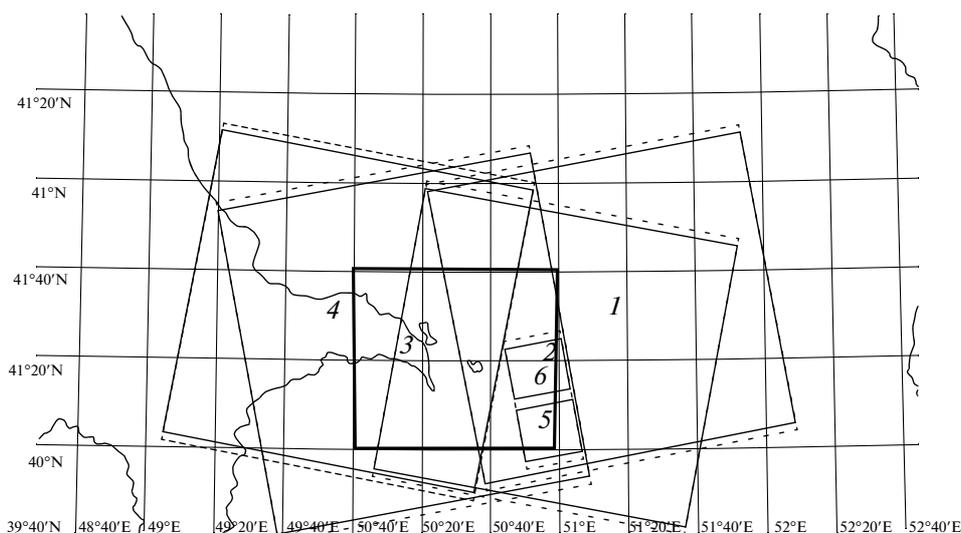


Рис. 2. Покрытие съемками спутника Radarsat-2 промыслов “Нефтяные Камни” в июне, августе и сентябре 2009 г.

тропии и угла поворота плоскости поляризации  $\alpha$  и др. параметры (Cloude, Pottier, 1996; Cloude, Pottier, 1997).

В методе поляриметрической декомпозиции Паули, используется разложение матрицы рассеяния на компоненты  $|\alpha^2|$ ,  $|\beta^2|$  и  $|\gamma^2|$ , которые соответствуют определенным механизмам рассеяния (Cloude, Pottier, 1996). Компонент  $|\alpha^2|$  соответствует матрице рассеяния сферы, плоскости или трехгранного отражателя. В частности, величина коэффициента  $|\alpha^2|$  определяет мощность, рассеянную от объектов, характеризуемых однократным или случайным рассеянием. Компонент  $|\beta^2|$  описывает механизм рассеяния на отражателях, ориентированных под углом  $0^\circ$ , а компонент  $|\gamma^2|$  соответствует механизму рассеяния на отражателях, ориентированных под углом  $45^\circ$ . Комбинирование перечисленных компонент может быть использовано для извлечения соответствующей физической информации.

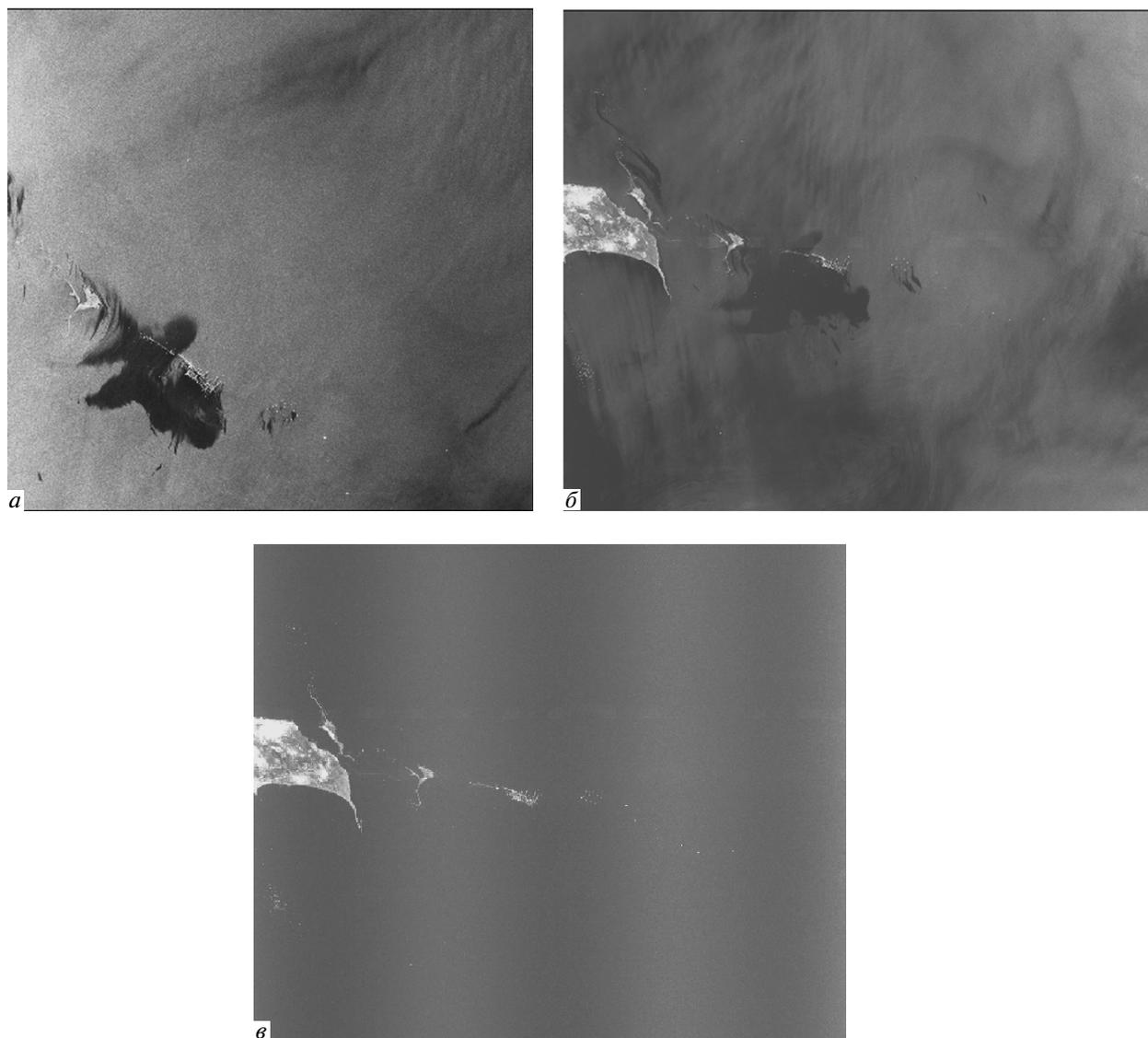
Другой метод поляриметрической декомпозиции, основанный на вычислении энтропии рассеяния ( $H$ ) и угла  $\alpha$  (Cloude, Pottier, 1997; Захарова, Захаров, 2009), также широко применяется для классификации механизмов рассеяния. В основе метода лежит анализ собственных чисел и собственных векторов матрицы когерентности, для чего вычисляются параметры  $H$  и  $\alpha$ .

Расчет контрастов также проводился с помощью пакета NEST. Значения удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) на откалиброванных и отфильтрованных изображениях вертикальной поляризации восстанавливались вдоль разрезов по азимуту и дальности. Пример РЛИ с указанными

разрезами и графики УЭПР приведен на рис. 7. На графиках (рис. 7б, 7в) линиями показаны средние значения УЭПР для отдельных участков морской поверхности: участкам, покрытым нефтяной пленкой, соответствуют меньшие по абсолютному значению, а чистым участкам — большие (меньшие по модулю значения). Контраст определялся как разность в дБ между значениями УЭПР в пятне и на чистой воде.

Для дальнейшего анализа использовался ГИС-подход (Иванов, Затягалова, 2007). Одним из его преимуществ является возможность интегрирования и накопления информации о нефтяном загрязнении, отображения ее в удобной форме, определения геометрических и пространственно-временных характеристик обнаруженных пятен. Для дальнейшего анализа в ГИС пятна на изображениях были векторизованы и трансформированы в формат данных, поддерживающий соответствующую географическую привязку и систему координат.

На рис. 8 показан пример подобного анализа в ГИС. В ней, помимо разнообразных данных на район интереса (батиметрия, судоходные трассы и др.), были интегрированы векторные слои, содержащие контуры нефтяных пятен. В результате была получена карта разливов и определены площади пятен. На рис. 8 хорошо видна пространственно-временная динамика разливов. Очевидно, что на размер и пространственное положение пятен относительно пгт Нефтяные Камни влияет ветер и поверхностные течения. Так, при слабом ветре пятна растекаются и имеют достаточно большие площади (рис. 8, 9), покрывая не только район, расположенный непосредственно у нефтедобывающих эстакад и платформ. При сильном ветре пятна имеют значительно мень-



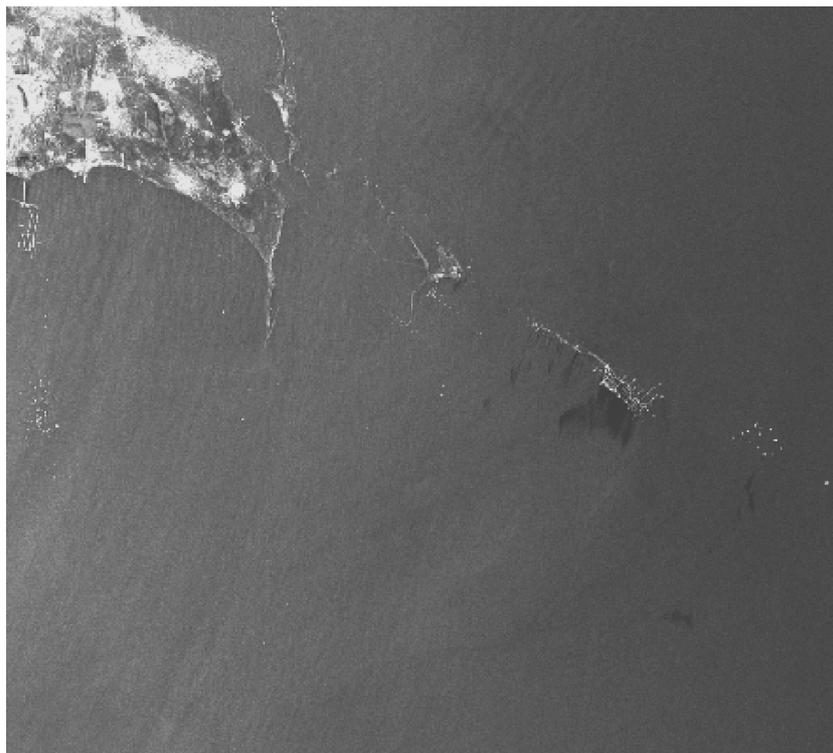
**Рис. 3.** “Нефтяные камни” на РЛИ Radarsat-2, полученных в широком обзорном режиме W-2: *a* – 11 июля 2009 г., 14:29 UTC; *б* – 12 июля 2009 г., 02:43 UTC на вертикальной (ВВ) и *в* – 12 июля 2009 г., 02:43 UTC на перекрестной (ВГ) поляризациях. © CSA/MDA.

шую площадь и локализованы, главным образом, вблизи месторождения.

Для определения объемов разливов по данным космической радиолокации применяется косвенный подход, в котором по площади пятен на РЛИ имеется возможность оценки объемов разлива (Иванов и др., 2007). Для решения этой задачи необходимо знать толщину пленки, которую можно получить из физических соображений, связывающих визуальный цвет пленок при дневном освещении с их толщинами (Bonn Agreement..., 2009). Согласно наблюдениям, толщина антропогенных средних и тонких нефтяных пленок в общем случае варьирует в широком диапазоне от  $0.04$  до  $200 \times 10^{-3}$  мм ( $0.00004$ – $0.2$  см), а цвет визуально – от

серебристо-серого до темно-коричневого (Bonn Agreement..., 2009).

Содержание нефти, согласно (Bonn Agreement..., 2009), в пятнах серебристо-серого цвета толщиной от  $0.04$  до  $0.3 \times 10^{-3}$  мм может быть от  $40$  до  $300$  л/км<sup>2</sup>, а в радужной пленке толщиной от  $0.3$  до  $5.0 \times 10^{-3}$  мм –  $300$ – $5000$  л/км<sup>2</sup>. Однако при оценках обычно выбирают пограничное значение в  $300$  кг/км<sup>2</sup>, которое достаточно хорошо согласуется с экспериментальными оценками ( $300$ – $350$  кг/км<sup>2</sup>) отечественных работ (см. (Проблемы химического загрязнения..., 1989)) и достаточно хорошо совпадает с данными наблюдений (Голь, 2003). С учетом значений толщин пленки  $0.3 \times 10^{-3}$  и  $5.0 \times 10^{-3}$  мм получены ми-



**Рис. 4.** “Нефтяные камни” на РЛИ Radarsat-2, полученном в широком обзорном режиме W-2: 28 июля 2009 г., 14:33 UTC. © CSA/MDA.

нимальные и максимальные оценки, приведенные в табл. 3.

### ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ РЛИ

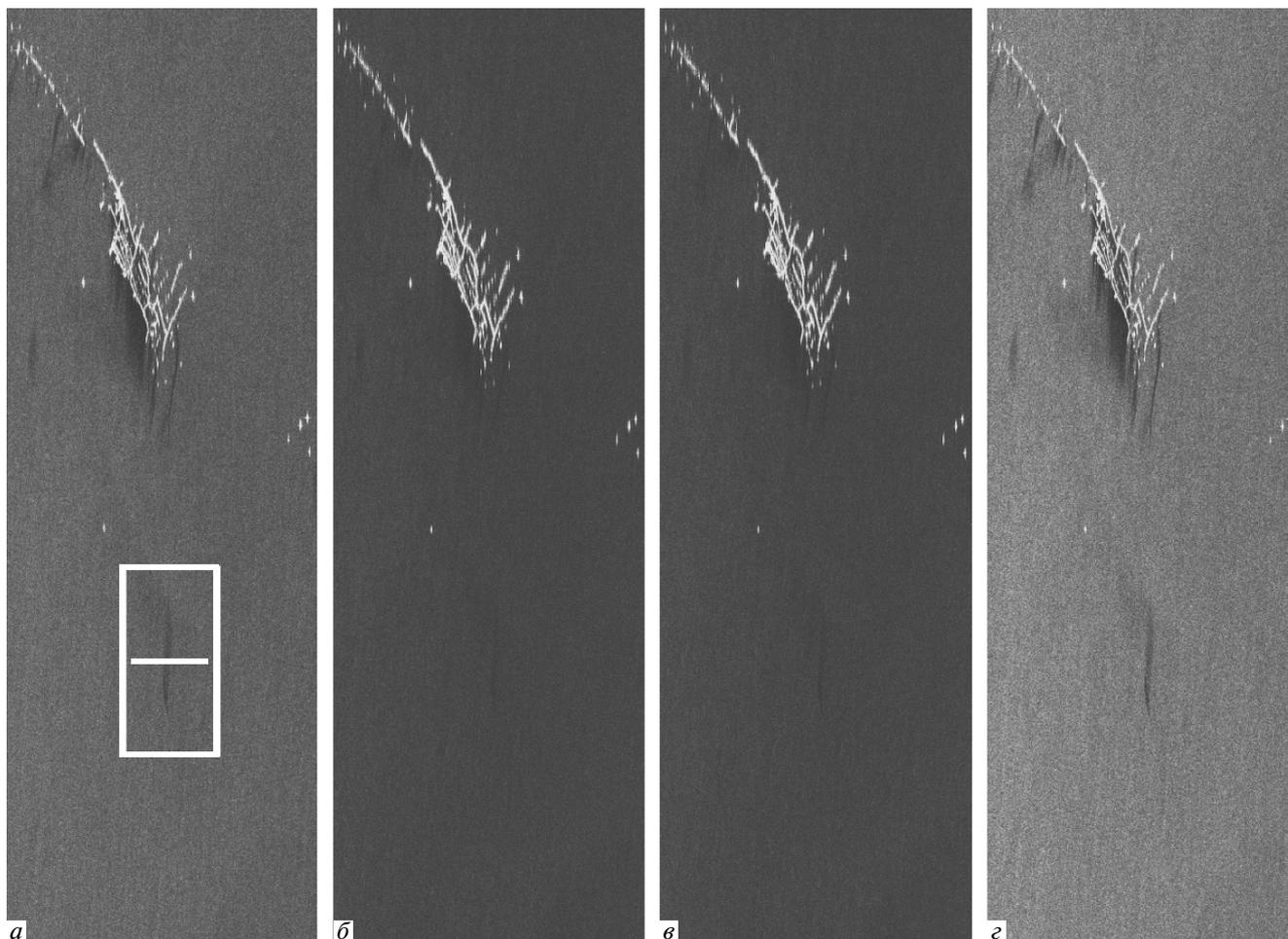
Во время РЛ-съемки достаточно часто используют поляриметрию или метод ДЗ, основанный на измерении и изучении поляризационных характеристик обратного рассеяния, таких как степень поляризации электромагнитных волн, угол поворота плоскости поляризации и ряда др. Поляриметрические РСА позволяют регистрировать сигналы, которые в результате рассеяния изменяют энергию и поляризацию падающего сигнала как, например, в случае морской поверхности. Кроме того, они позволяют регистрировать изменения состояния морской поверхности, которые могут быть привязаны к физическим параметрам среды или представлены как функции, связывающие излученный и принятый поляризационный сигналы.

В первых работах, посвященных изучению поляризационных свойств пленочных снимков, использовались РЛИ мультиспектрального (Х-, С- и L-диапазоны) и мультиполяризационного РСА SIR-C/Х (Gade et al., 1998). Анализ этой и др. работ, посвященных разработке алгоритмов распознавания нефтяных загрязнений моря (см., например, (Lombardo, Oliver, 2000; Fortuny-Guasch, 2003)), показал, что взгляд на эту проблему был скорее оптимисти-

чным. Свидетельство тому — анализ отображения нефтяных пятен на поляризационных РЛИ Radarsat-2, полученных в нашем эксперименте на соосной и перекрестной поляризации (ВВ и ВГ) и в квадро-режиме (ВВ, ГГ, ВГ и ГВ), который выявил два интересных момента.

Во-первых, перекрестные комбинации (ВГ и, очевидно, ГВ) в режиме Wide не пригодны для обнаружения пленочных загрязнений из-за отсутствия полезного сигнала от морской поверхности (рис. 3б, 3в). Это связано с тем, что перекрестная компонента, как правило, на порядок (10 дБ) ниже соосной компоненты в зависимости от состояния подстилающей поверхности и углов съемки (Migliaccio et al., 2007). Кроме того, поверхность моря характеризуется поверхностным рассеянием — с низкой энтропией и малыми углами  $\alpha$  — т.е. малыми вкладами в перекрестные компоненты. Для их усиления, как правило, используют режимы съемки при небольших углах падения.

В широкообзорных режимах (Wide и ScanSAR) ситуация дополнительно усложняется тем, что в них формирование РЛИ происходит из нескольких полос по дальности (т.е. в небольшой полосе доплеровского спектра). Если, например, РЛИ формируется из четырех полос, то на каждую полосу приходится не более 0.25 части спектра, а фактически — еще меньше, в связи с чем энергетика существенно ухудшается. В результате интенсивность отражения

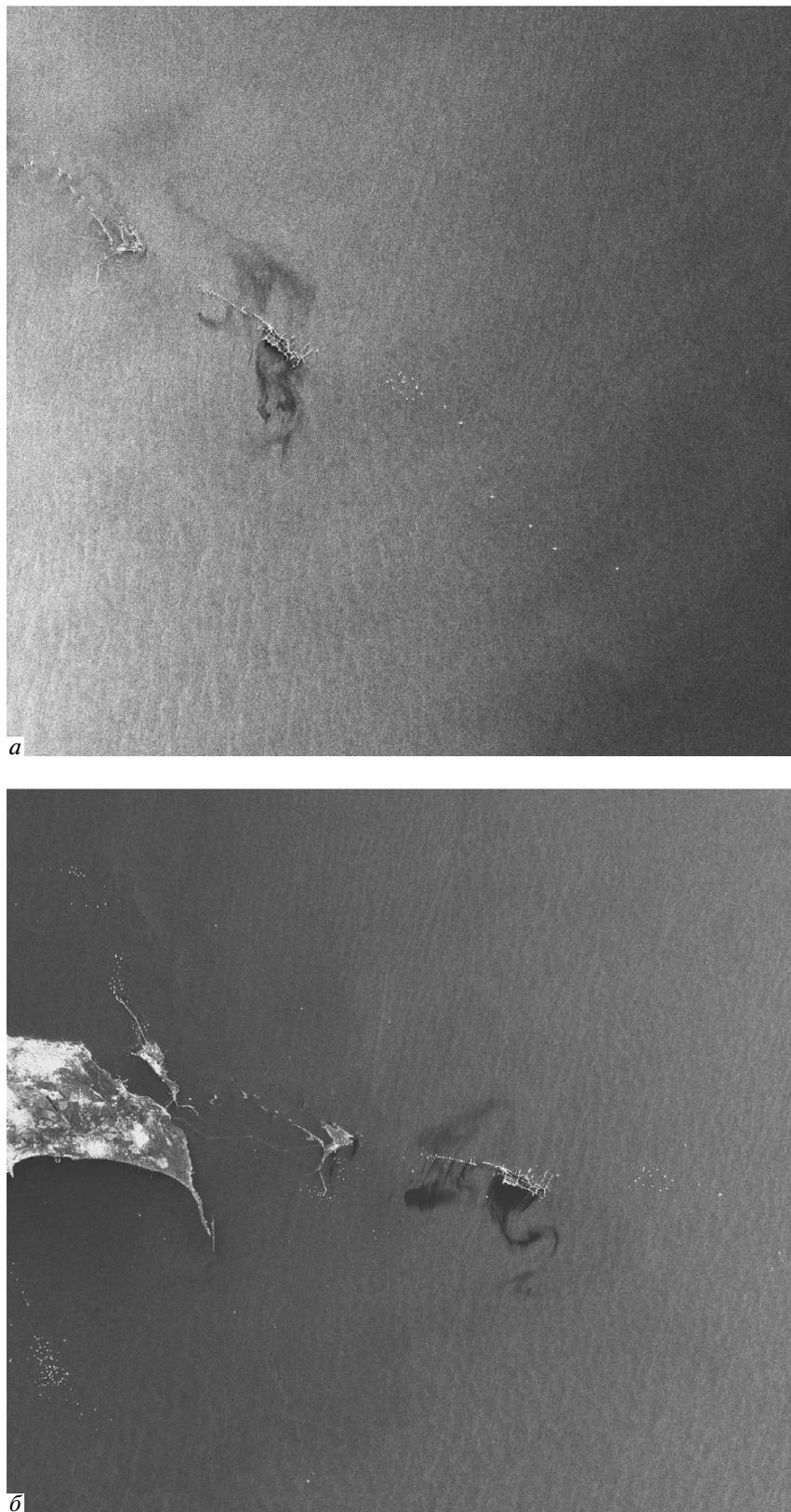


**Рис. 5.** “Нефтяные камни” на РЛИ Radarsat-2 от 21 августа 2009 г., 14:34 UTC, полученных в стандартном квадрополяризационном режиме (мода SQ-18): *а* – ГГ; *б* – ГВ; *в* – ВГ; *г* – ВВ. Отрезком прямой линии показано положение радиометрического разреза, а прямоугольником – место, где рассчитывались поляриметрические характеристики. © CSA/MDA.

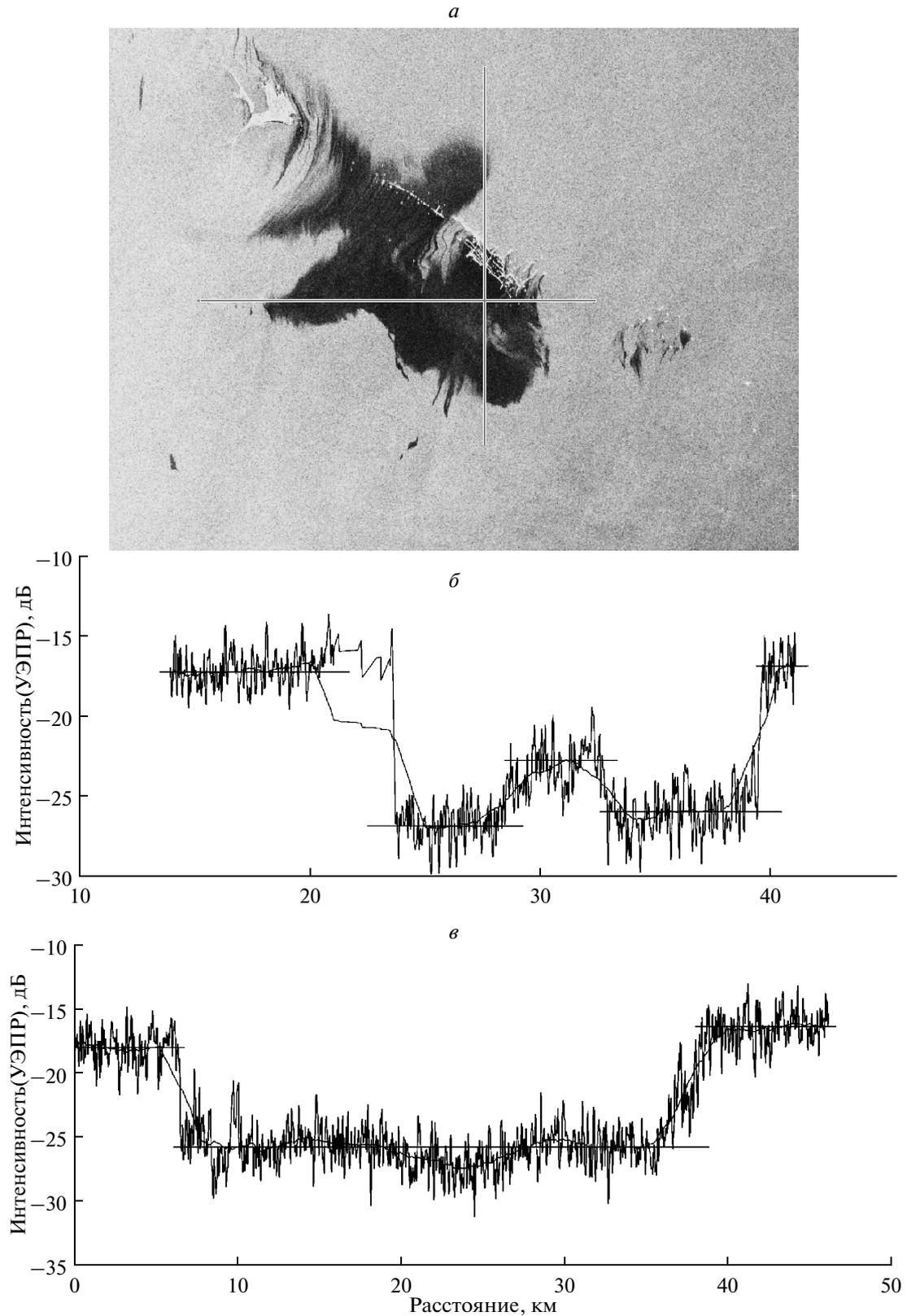
от поверхности моря на перекрестных компонентах уходит на уровень шумов. Поэтому на широкообзорных РЛИ перекрестных поляризаций неоднородности морской поверхности не отображаются, тогда как в узкополосных режимах съемки полезный сигнал имеется.

Во-вторых, в связи с этим анализ поляризационных характеристик оказался возможен только в стандартном квадрополяризационном SQ-режиме с набором поляризаций ВВ, ВГ, ГВ и ГГ. Однако съемки в этом режиме имеют узкую полосу обзора (25 км), что делает его не пригодным для мониторинговых задач. Тем не менее, обработка РЛИ от 21 августа 2009 г. позволила получить набор поляризационных характеристик (коэффициенты декомпозиции по методу Паули, анизотропию ( $A$ ), энтропию ( $H$ ), угол  $\alpha$ ) и ряд поляризационных соотношений. Эти результаты не приводятся, ибо обработка не выявила каких-либо значимых эффектов, позво-

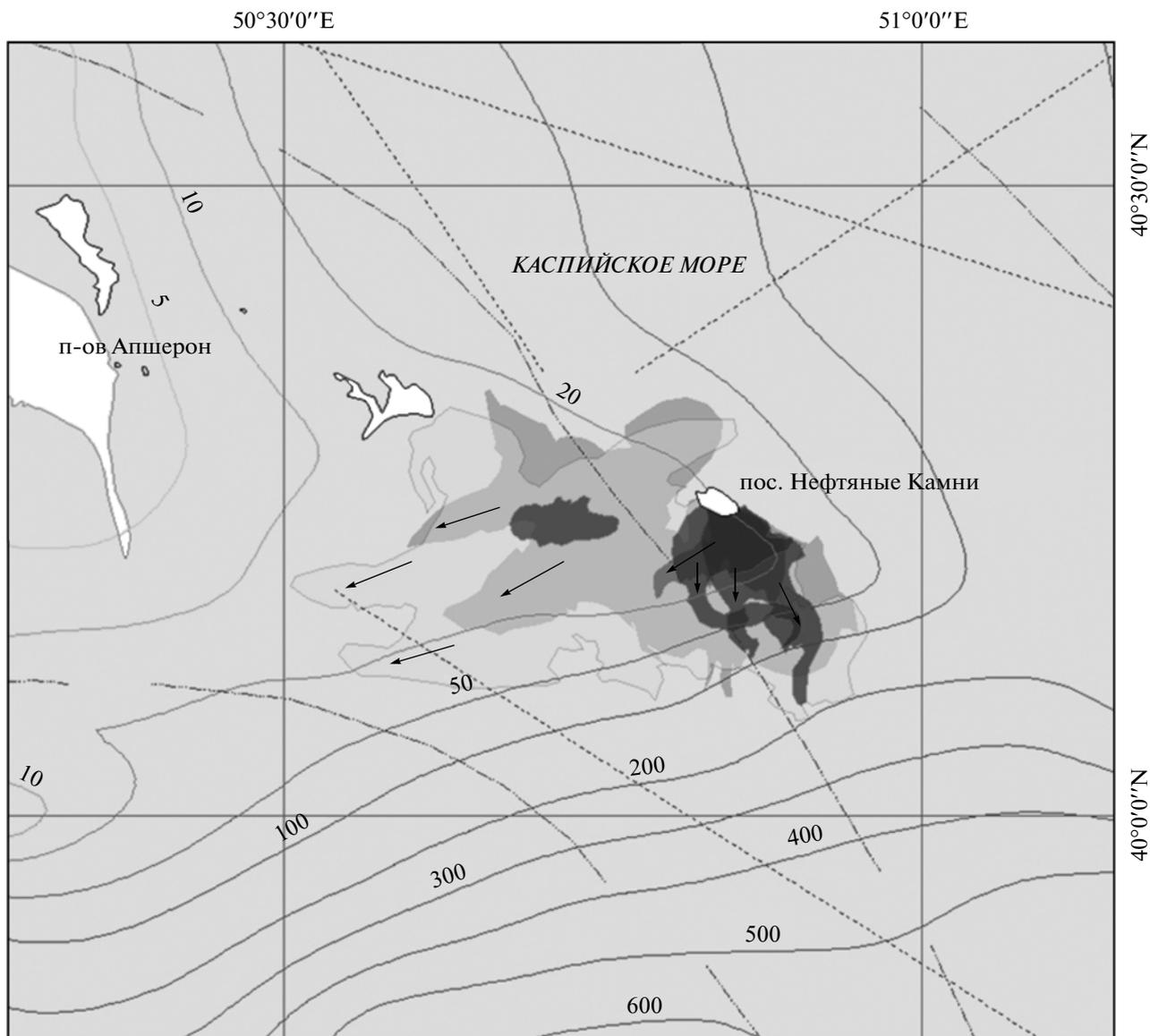
ляющих улучшить идентификацию нефтяных загрязнений и использовать комбинации соосной и перекрестной поляризаций в практической работе. С одной стороны, это, возможно, связано с тем незначительным влиянием поляризации на интенсивность рассеяния радиолокационного сигнала морской поверхностью при наличии нефтяной пленки (Touzi et al., 1992; Touzi, Charbonneau, 2002). С другой стороны, квадрополяризационные РЛИ были получены при больших углах падения и сильном ветре (табл. 3), что могло также повлиять на конечный результат. Сравнение РЛИ, приведенных на рис. 5, показывает, что максимальный контраст наблюдается на ВВ-поляризации, что также подтвердил расчет контрастов (табл. 3) и что неоднократно отмечалось ранее (Touzi et al., 1992; Gade et al., 1998; Wismann et al., 1998).



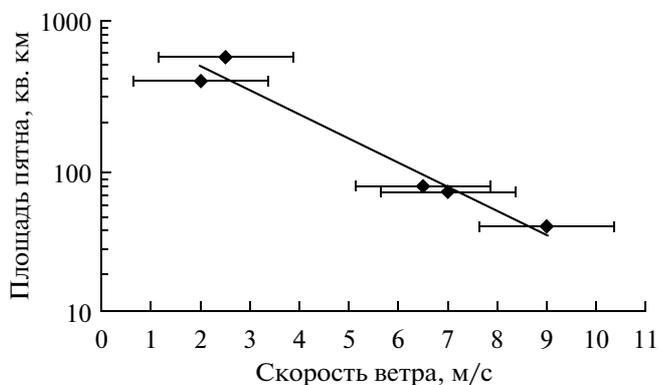
**Рис. 6.** “Нефтяные камни” на фрагментах РЛИ Radarsat-2, полученных в широком обзорном режиме (мода W2): *a* – 21 сентября 2009 г., 14:29 UTC; *б* – 22 сентября 2009 г., 02:43 UTC. © CSA/MDA.



**Рис. 7.** Пример определения контраста на радиолокационном изображении; *a* – положение разрезов на фрагменте РЛИ Radarsat-2 от 11 июля 2009 г.; *б, в* – графики распределения УЭПР, построенные по разрезам (вертикальные и горизонтальные линии) вдоль направлений азимута и дальности.



**Рис. 8.** Сводная карта нефтяных пятен, обнаруженных и исследованных на РЛИ Radarsat-2, в окне географической информационной системы. Стрелками показано южное и юго-западное направление дрейфа нефтяных пятен.



**Рис. 9.** Зависимость площади пятен от скорости ветра, полученная в данном эксперименте.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Суть взаимодействия электромагнитной волны с шероховатой поверхностью заключается в следующем. При падении элементарного пучка на элементарную площадку происходит его френелевское отражение. При этом в отраженном излучении колебания вектора напряженности имеют определенную ориентацию, т.е. отраженное излучение поляризуется. При взаимодействии с шероховатой поверхностью элементарные сигналы отражаются от площадок, имеющих разные размеры неоднородностей и различную пространственную ориентацию. Вследствие этого отраженные сигналы, будут иметь различные поляризационные характеристики, а сум-

Таблица 3. Результаты обработки и анализа РЛИ

Дата	Ветер, м/с	Площадь пятен, км <sup>2</sup>	Контраст, дБ (ВВ-поляризация)	Минимальные и максимальные оценки объемов разлива, тонн
11.07.2009	переменный, слабый	384.0	9.5	115.2–1920.0
12.07.2009	2–3	568.5	7	170.5–2842.5
28.07.2009	8–10	38.7	8	11.6–193.5
21.08.2009	10–11	–	6.2/5.5/2.2/2.0*	–
22.08.2009	10–12	–	–	–
21.09.2009	6–8	66.1	3.5	19.8–330.5
22.09.2009	6–7	72.6	7	21.8–363.0

Примечание. \* ВВ/ГГ/ГВ/ВГ – поляризации

марная энергия отраженного излучения будет характеризовать шероховатость некоего участка морской поверхности. Во время работы с перекрестной поляризацией (излучение на вертикальной, прием на горизонтальной) вклад каждой элементарной площадки приводит к ослаблению суммарной интенсивности рассеяния по сравнению, например, с соосной поляризацией (излучение и прием на вертикальной или на горизонтальной). В результате перекрестные режимы становятся мало пригодными для детектирования пленочных загрязнений моря.

Поляризационная классификация в свою очередь основана на изучении комбинации параметров анизотропии, энтропии и угла  $\alpha$ . В случае морской поверхности свободной от нефтяной пленки береговскую модель можно считать доминирующим механизмом рассеяния; оно характеризуется низкими значениями энтропии ( $0 < H < 0.5$ ). В области связанных значений  $A$ ,  $H$  и  $\alpha$  береговское рассеяние также характеризуется низкими значениями анизотропии и угла  $\alpha$ :  $A < 0.5$  и  $0 < \alpha < 45^\circ$ . Участки поверхности, покрытые нефтяной пленкой, начинают характеризоваться высокими значениями  $H$ , что подразумевает механизм(ы) рассеяния отличные от береговского (Migliaccio et al., 2007; Nunziata, 2008). В наших экспериментах в области нефтяного пятна значения  $H$  изменялись в диапазоне 0.40–0.65, что может говорить о наличии второго, альтернативного механизма рассеяния. Однако из-за отсутствия статистической выборки делать какие-либо выводы преждевременно.

Наконец, первые эксперименты, проведенные с искусственными пленками (в том числе с имитирующими естественные слики) и мультиполяризационной радиолокацией, показали, что поляризационный коэффициент  $\chi$  невелик, а комбинирование поляризаций в общем случае дает незначительный вклад в рассеяние радиолокационного сигнала морской поверхностью при наличии пленки (Gade et al., 1998). Поэтому в рамках береговской модели в случае наличия нефтяной пленки на поверхности моря многие поляризационные подходы могут быть

не применимы (van der Sandven, Thomas, 2004; Nunziata, 2008).

Важное влияние на распространение нефтяных пятен в Каспийском море оказывает скорость и направление ветра (Голь, 2003). Анализ РЛИ, полученных в нашем эксперименте, показал зависимость сигнатур на РЛИ от скорости ветра. Даже из визуального анализа изображений на рис. 3–6 следует, что слабый ветер благоприятствует активному растеканию нефти по морской поверхности, что приводит к образованию пятен больших размеров. Наоборот, сильный ветер, разрушая и диспергируя тонкие нефтяные пленки, начинает препятствовать этому процессу, не давая нефтяному пятну покрывать большие площади. В условиях слабого ветра пятна в районе НГДУ достигают 400–500 км<sup>2</sup> (табл. 3), что говорит о серьезном хроническом нефтяном загрязнении. Аналогичные результаты получены в (Лаврова и др., 2010). Зависимость размера пятен от скорости ветра, полученная в данном эксперименте, показана на рис. 9. Очевидно, она построена при условии постоянства выбросов и отнюдь не претендует на универсальность.

Специфика течений в Среднем Каспии приводит к тому, что распространение нефтяных загрязнений происходит главным образом в сторону Бакинской бухты и побережья Апшеронского залива (Иванов и др., 2004). В отличие от мелководной северной части моря, течения Среднего и Южного Каспия отличаются значительной устойчивостью и циклонической завихренностью. Причем наиболее четко связь между течениями должна проявляться в условиях слабого ветра или штиля. При соответствующих гидрометеорологических условиях (при ветрах северных румбов) нефтяная пленка может достигнуть побережья Южного Азербайджана или распространиться далее на юг, а при слабых ветрах сохраняться на поверхности моря несколько дней.

Как видно из табл. 3, контрасты изменялись от 3.5 дБ (21 сентября 2009 г.) до 9.5–10 дБ (11 июля 2009 г.). Анализ РЛИ Radarsat-2 показал, что участки с наибольшими контрастами в основном располагаются в непосредственной близости от источников

загрязнений — эстакад и нефтяных вышек. Такие участки могут быть покрыты свежей нефтяной пленкой, что согласно (Боев, Матвеев, 2005) может означать более высокую толщину, концентрацию и активность пленки, чем на участках с более низкими значениями контраста. Однако в связи со сложной зависимостью контраста от факторов среды (скорости ветра, состояния поверхности моря) и параметров самой нефтяной пленки (Wismann et al., 1998; Боев, Матвеев, 2005), а также с расхождением теоретических и экспериментальных оценок (модельные контрасты сликов существенно меньше наблюдаемых — см. (Кудрявцев и др., 2008)), его значения для оценок не использовались.

В итоге анализ нефтяных пятен на РЛИ Radarsat-2 в режиме Wide показал, что они имеют достаточное разрешение при ширине полосы съемки 150 км и вполне пригодны для регионального мониторинга нефтяных загрязнений — на вертикальной поляризации в этом режиме фиксировались нефтяные пятна размером до 500 км<sup>2</sup>.

В заключение остановимся на сравнении наших оценок (табл. 3) с оценками, приведенными в работах (Боев, Матвеев, 2005; Боев, Матвеев, 2008; Белоброва и др., 2009). Очевидно, в них получены завышенные оценки толщины пленки (0.02–0.17 см) и, соответственно, объемов разлива от 32000 т (62 т/км<sup>2</sup>) в (Боев, Матвеев, 2005) до 43925 т в (Белоброва и др., 2009). Чтобы понять, насколько, они завышены, обратимся к цифрам реальной добычи и реальных выбросов, которые имеются в литературных источниках. Итак:

1. В 2009 г. на «Нефтяных Камнях» добывалось в среднем 2400 т нефти в сутки или от 10 до 60 т в день из одной скважины (информация НГДУ «Нефтяные Камни»). С учетом того, что добыча нефти (см. выше) медленно падала, можно предположить, что во время экспериментов в 1990 г. на НГДУ добывалось максимум 2500–3000 т в сутки.

2. По оценкам нефтяников/экологов выбросы нефти в окружающую среду при ее добычи, приходящиеся на одну тонну добываемой нефти, составляют в среднем около 5 кг, а максимальные — до 15 кг (www.caspio.ru).

3. Наконец, по данным (Проблемы химического загрязнения..., 1989), среднее содержание нефти в нефтяной пленке, плавающей на поверхности моря, может составлять 300–350 кг/км<sup>2</sup>.

В итоге получаем: по п. 1 — максимально возможный гипотетический сброс на НГДУ «Нефтяные камни» может быть 2500 т (т.е. вся добытая в этот день нефть); по п. 2 — всего лишь  $3000 \times 5/15 \text{ кг} = 1000 \text{ т}$ , а по п. 3 —  $200...1000 \text{ км}^2 \times 300 \text{ кг/км}^2 = 60...300 \text{ т}$ . И соответственно в среднем возможные катастрофические выбросы нефти по разным оценкам не превышают 200 т нефти в день.

Кроме того, оценки, приведенные в (Иванов, Сокольский, 2000; Поль, 2003; Зонн, 2004; Лебедев, 2009) и на сайте www.caspio.ru, говорят о том, что в 1990-х гг. нефтяное загрязнение Каспийского моря с учетом всех источников, включая основной — речной сток (80–85%), оценивалось в 100–120 тыс. т в год, типичные толщины пленок в Каспийском море по данным наблюдений варьировали от  $0.03 \times 10^{-3}$  до 0.16 мм, а площади разливов при выбросах нефти от 0.5 до 4 тыс. т — от 1 до 1500 км<sup>2</sup> (Поль, 2003).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью обработки РЛИ спутника Radarsat-2 и использования геоинформационного подхода был проведен анализ динамики и объемов выбросов на НГДУ «Нефтяные камни» в июле и сентябре 2009 г. Полученные РЛИ были обработаны и проанализированы с целью выявления пятен нефтяных загрязнений. В результате обработки РЛИ была создана карта распределения пятен нефти около месторождения (рис. 8). Ее анализ еще раз подтвердил неблагоприятную экологическую обстановку в районе нефтепромыслов «Нефтяные Камни», так как характерной чертой данной акватории являются пятна нефтяных разливов больших размеров около буровых и эстакад. Очевидно, ситуация кардинально не изменилась со времени анализа первых РЛИ «Алмаз-1» и ERS-1 в 1991–1992 гг.

Полученная карта была проанализирована на предмет выявления динамики загрязнений. Анализ показал, что имеется определенная корреляция между площадью пятен и силой ветра. Особое географическое положение «Нефтяных Камней» приводит к тому, что в зависимости от скорости и направления ветра нефть может распространяться в различных направлениях. В частности, наибольших размеров нефтяные разливы достигают при ветровых условиях близких к штилевым. Специфика течений в Среднем Каспии приводит к тому, что распространение нефтяных загрязнений под действием преобладающих течений происходит, главным образом, в сторону Апшеронского залива и Бакинской бухты. При ветрах северных румбов нефтяная пленка может достигнуть побережья Азербайджана и распространиться далее в юго-западную часть Каспийского моря.

Расчитанные значения контрастов находятся в соответствии с экспериментальными данными и теоретическими представлениями, и так или иначе могут охарактеризовать нефтяное пятно. Максимальные контрасты, как и ожидалось, наблюдались на ВВ-поляризации. Однако в теоретических построениях и модельных расчетах ими надо пользоваться осторожно, так как контрасты зависят от скорости ветра, состояния поверхности моря, типа нефти и толщины пленки. Следует также учиты-

вать, что наблюдаемые контрасты часто существенно выше модельных (Кудрявцев и др., 2008).

Несмотря на оптимизм первых работ, посвященных поляризационной радиолокации (Fortuny-Guasch, 2003), наши эксперименты показали, что ее конкретные возможности зависят от режима съемки. Так, съемки на перекрестной поляризации в режиме Wide (а также, очевидно, и в ScanSAR) не пригодны для обнаружения пленочных загрязнений моря из-за отсутствия полезного сигнала от морской поверхности. В режиме Standard Quadro поляризационная съемка не выявила каких-либо значимых эффектов, позволяющих существенно улучшить обнаружение и идентификацию нефтяных загрязнений, а также использовать поляризационные характеристики в практической работе. По-видимому, разработка альтернативных моделей взаимодействия РЛ-сигнала с поверхностью моря при наличии нефтяного загрязнения может принести определенный успех в свете использования поляризационных характеристик для идентификации пленочных загрязнений (Schuler et al., 2002; van der Sandven, Thomas, 2004). Тем не менее, в серии работ (Migliaccio et al., 2007; Gambardella, 2007; Nunziata, 2008) показано, что учет поляризационных и фазоразностных соотношений на соосных ВВ- и ГГ-поляризациях может быть полезен для различения пятен нефти и биогенных пленочных сликов. Вниманию следует обратить и на анализ на основе поляризационной энтропии (характеризующей механизмы рассеяния и изменение поляризационных свойств) при различении антропогенных и биогенных пятен. В связи с этим эксперименты, учитывающие поляризационные характеристики нефтяных пятен, несомненно, должны быть продолжены.

Оценки объемов разливов (табл. 3) были получены с использованием методики (Bonn Agreement..., 2009) и геоинформационного подхода. Они находятся в соответствии с данными независимых источников об исследуемом месторождении, что говорит об адекватности применяемого подхода. Оценки, полученные в данной работе, более соответствуют реальному состоянию дел, чем оценки, приведенные Боевым и Матвеевым (2005), Боевым и Матвеевым (2008) и Белобровой и др. (2009), завывающие объемы разливов более чем на два порядка.

РЛ-данные спутника Radarsat-2, использованные в работе, были получены в рамках программы Канадского космического агентства SOAR, проект 648 из MDA Corporation (www.mda.com), сотрудникам которой авторы выражают свою благодарность. Помощь специалистов ООО “Гео-Альянс” в обработке РЛИ также отмечается с благодарностью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабаев А.Г., Зонн И.С. Природопользование в регионе Каспийского моря // Вестн. РАН. 2005. Т. 75. № 8. С. 715–719.
- Белоброва М.В., Боев А.Г., Кабанов А.В. и др. Оперативное картографирование и диагностика нефтяных загрязнений морской поверхности по данным многочастотного радиолокационного зондирования // Космична наука і технологія. 2009. Т. 15. № 5. С. 24–33.
- Боев А.Г., Матвеев А.Я. Оценка количества разлитой нефти на акватории каспийского промысла “Нефтяные Камни” по данным многочастотного радиолокационного зондирования // Радиофизика и радиоастрономия. 2005. Т. 10. № 2. С. 178–188.
- Боев А.Г., Матвеев А.Я. Радиолокационный метод оценки параметров нефтяных загрязнений морской поверхности // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 5. С. 29–36.
- Голь А.К. Проблема загрязнения Каспийского моря. Баку: “Муаллим Нешриййаты”, 2003.
- Захарова Л.Н., Захаров А.И. Результаты поляриметрической обработки данных ALOS PALSAR для исследования земных покровов в различных климатических условиях / Тр. XXV Всерос. симп. Радиолокационное исследование природных сред. СПб., 2009.
- Зонн И.С. Каспийская энциклопедия. М.: Международные отношения, 2004. 464 с.
- Иванов А.Ю. Нефтяные загрязнения моря на радиолокационных изображениях КА “Космос-1870” и “Алмаз-1” // Исслед. Земли из космоса. 1997. № 6. С. 70–80.
- Иванов А.Ю. Стики и пленочные образования на космических радиолокационных изображениях // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 3. С. 73–96.
- Иванов А.Ю. О восстановлении параметров морской среды по данным космических РСА // Исслед. Земли из космоса. 2010а. № 3. С. 77–92.
- Иванов А.Ю. Нефтепроявления на поверхности озера Байкал // Исслед. Земли из космоса. 2010б. № 2. С. 75–87.
- Иванов А.Ю., Востоков С.В., Ермошкин И.С. Картографирование пленочных загрязнений морской поверхности по данным космической радиолокации (на примере Каспийского моря) // Исслед. Земли из космоса. 2004. № 4. С. 82–92.
- Иванов А.Ю., Голубов Б.Н., Затыгалова В.В. О нефтегазоносности и разгрузке подземных флюидов в южной части Каспийского моря по данным космической радиолокации // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 2. С. 62–81.
- Иванов А.Ю., Ермошкин И.С., Фанг М. и др. Использование космической радиолокации широкого обзора для картографирования нефтяных загрязнений моря // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 5. С. 78–95.
- Иванов А.Ю., Затыгалова В.В. Картографирование пленочных загрязнений моря с использованием космической радиолокации и географических информационных систем // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 6. С. 46–63.
- Иванов А.Ю., Литовченко К.Ц., Затыгалова В.В. Аварийный разлив мазута в Керченском проливе: радиолокационный мониторинг и результаты моделирования // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 4. С. 62–76.
- Иванов В.П., Сокольский А.Ф. Научные основы стратегии защиты биологических ресурсов Каспийского моря от нефтяного загрязнения. Астрахань: КаспНИРХ, 2000. 181 с.

- Кудрявцев В.Н., Иванова Н.А., Гущин Л.А., Ермаков С.А. Оценка контрастов спектра ветровых волн в снимках, вызванных биогенными и нефтяными пленками: Препринт № 765. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2008. 30 с.
- Лаврова О.Ю., Каримова С.С., Митягина М.И., Бочарова Т.Ю. Оперативный спутниковый мониторинг акваторий Черного, Балтийского и Каспийского морей в 2009–2010 годах / Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 168–185.
- Лебедев С.А. Оценка фонового загрязнения нефтепродуктами Черного и Каспийского морей с использованием данных дистанционного зондирования и модельных расчетов. 2009. (mkgtu.ru/docs/konf\_sem/lebedev.pdf).
- Море проблем: Опыт системного исследования Каспийского региона. М.: СОПС, 2001. 183 с.
- Нефть и газ за рубежом / Под ред. Вачнадзе Г.Н. М.: ПИК ВИНТИ, 2002. 112 с.
- Проблемы химического загрязнения вод Мирового океана. Т. 8. Методы и средства борьбы с нефтяным загрязнением вод Мирового океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 208 с.
- Bonn Agreement Aerial Operations Handbook. 2009.
- Brekke C., Solberg A.H.S. Oil spill detection by satellite remote sensing // Rem. Sens. Environ. 2005. 95. P. 1–13.
- Cloude S.R., Pottier E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 1996. V. 34. № 2. P. 498–518.
- Cloude S.R., Pottier E. An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 1997. V. 35. № 1. P. 68–78.
- Fingas M., Brown C. Oil-spill remote sensing – An update // Sea Technol. 2000. V. 41. P. 21–26.
- Fortuny-Guasch J. Improved oil slick detection and classification with polarimetric SAR / Proc. POLinSAR-2003 Workshop, 14–16 Jan. 2003, Frascati, Italy (ESA SP-529).
- Gade M., Alpers W., Hühnerfuss H. et al. Imaging of biogenic and anthropogenic ocean surface films by the multifrequency/multipolarization SIR-C/X-SAR // J. Geophys. Res. 1998. 103. P. 18851–18866.
- Gambardella A. Oil spill detection by means of synthetic aperture radar. University of Cagliari, 2007.
- Lombardo P., Oliver C.J. Optimum detection and segmentation of oil-slicks with polarimetric SAR data / Proc. IEEE 2000 Int. Radar Conf., 7–12 May 2000. Alexandria, USA. P. 122–127.
- Migliaccio M., Gambardella A., Tranfaglia M. SAR polarimetry to observe oil spills // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2007. V. 45. № 2. P. 506–511.
- Nunziata F. Single- and multi-polarization electromagnetic models for SAR sea oil slick observation. Ph.D. Thesis, University of Napoli, 2008.
- Schuler D., Lee J.S., Kasilingam D., Nesti G. Surface roughness and slope measurements using polarimetric SAR data // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2002. V. 40. № 3. P. 687–698.
- Touzi R., Charbonneau F. Polarimetric workstation user guide. Canada Centre for Remote Sensing, 2002. 13 p.
- Touzi R., Goze S., Le Toan T., Lopes A., Mougin E. Polarimetric discriminators for SAR images // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 1992. V. 30. № 5. P. 973–980.
- van der Sandven J.J., Thomas S.J. Application potential of Radarsat-2. Supplement 1. Natural Resources Canada, 2004.
- Wismann V., Gade M., Alpers W., Hühnerfuss H. Radar signatures of marine mineral oil spills measured by an airborne multi-frequency multi-polarization microwave scatterometer // Int. J. Rem. Sens. 1998. V. 19. P. 3607–3623.

## Determination of Oil Spill Parameters Around the “Oil Stones” Production Site in the Caspian Sea Using Spaceborne Polarimetric SAR Images

A. Yu. Ivanov<sup>1</sup>, M. Yu. Dostovalov<sup>2</sup>, A. A. Sineva<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Research Institute of Precision Instruments, Moscow

<sup>3</sup> Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region

Based on processing and analysis of the Radarsat-2 synthetic aperture radar (SAR) images acquired in summer 2009 over the Neftyaneye Kanmi (Oil Stones) oil field in the Caspian Sea, it is shown that the Radarsat-2 data are suitable for retrieval of some parameters of oil spills and oil pollution in the sea. They are reliable information products allowing obtaining information on extent, areas, and under certain assumptions – volumes of technological oil releases. For oil spill mapping it is better to use the wide-swath modes of Radarsat-2 on vertical (VV) polarization. Backscattering signal on cross polarization in general is insufficient for this purpose. Use of polarimetric SAR imagery itself does not improve detection and identification of oil spills. For example imaging in standard quadro-polarization mode has not revealed essential advantages; the maximum contrasts were observed on vertical polarization. On the basis of SAR image analysis estimates of volumes of oil released into the marine environment are obtained.

**Keywords:** Radarsat-2, synthetic aperture radar, SAR images, oil spills, “Oil Stones”, Caspian Sea

---

---

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ  
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

---

---

МЕЖГОДОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР  
СЕВЕРО-ВОСТОКА ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ

© 2011 г. В. В. Елсаков, И. О. Марущак

Учреждение Российской академии наук Институт биологии Коми научного центра УрО РАН, Сыктывкар

E-mail: [elsakov@ib.komisc.ru](mailto:elsakov@ib.komisc.ru)

Поступила в редакцию 08.07.2010 г.

Выявлены основные тренды изменений термокарстовых озер в широтном градиенте распределения многолетнемерзлых пород (ММП) на Европейском Северо-востоке России по спутниковым изображениям периода 1973–2009 гг. Максимальное проявление наблюдаемых изменений на модельных участках районов прерывистого и островного размещения ММП (до 80%) относится к периоду 1973–1988 гг. и связано с дренированием озер. Районы сплошного распространения ММП в этот период сохраняли большую устойчивость к изменениям, для них максимальные изменения количества озер приходятся на более поздние сроки 1988–2002 гг. Тенденция к снижению интенсивности изменений показателя прослеживается на всех участках после 2002 г. Интенсивность выявленных изменений падает к южным границам криолитозоны.

**Ключевые слова:** динамика термокарстовых озер, спутниковый мониторинг, климатические изменения

## ВВЕДЕНИЕ

Изменение количества и площадей зеркал термокарстовых озер в областях распространения многолетнемерзлых пород (ММП) в большинстве случаев связывается с региональными и глобальными климатическими трансформациями и воспринимается многими исследователями в качестве одного из интегрирующих показателей, демонстрирующих интенсивность и направленность проявления криогенных процессов. Такие исследования широко проведены в Арктическом регионе на территории Скандинавии (Luoto, Seppälä, 2003), Западной Сибири (Smith et al., 2005; Брыскина и др., 2005; Днепровская и др., 2009), Аляски (Fitzgerland, Roridan, 2004; Robert et al., 2005), Канады (Vallée, Payette, 2007). Обобщения на межрегиональном уровне, выполненные для территории России (Кравцова, Быстрова, 2009), показывают существенные различия в протекании процессов, что связывается исследователями с неоднородностью геокриологической зоны, развитием эрозионных процессов, антропогенным влиянием. Несмотря на широкомасштабные по географическому охвату исследования, однозначных заключений в оценке интенсивности и направленности проявления данных процессов не наблюдается, что обусловлено как географическим своеобразием сравниваемых регионов, так и методологическими подходами, используемыми в проведении данного рода сравнений. В числе последних: построение алгоритмов выявления изменений преимущественно по изображениям, полученным только для крайних лет на-

блюдений, использование при сравнении сенсоров различного разрешения и диапазонов электромагнитного спектра, методик предварительной обработки изображений.

Между тем результаты исследований интенсивности и направленности процессов изменений криогенных ландшафтов активно принимаются во внимание при проектировании и строительстве инженерных сооружений и коммуникаций (инженерно-геологические условия территории), представляющих экологическую опасность. Особенности распределения ММП активно учитываются при анализе распределения нефтяных загрязнений в слое сезонного оттаивания (Ананьева и др., 2003), построении моделей эмиссии и потребления парниковых газов арктическими экосистемами и возможных смещений баланса углерода под влиянием климатических изменений.

Цель настоящего исследования заключалась в: 1) разработке алгоритмов выявления изменений термокарстовых озер по материалам спутниковых изображений высокого разрешения Landsat; 2) выполнении учета их количества и площади зеркал для трех временных периодов разной продолжительности, ограниченных датами съемки, выполненной в 1973 (1974) г.–1988 (1989) гг., 2000–2002 гг. и 2007–2009 гг. в широтном градиенте распределения ММП; 3) выявлении основных наблюдаемых трендов изменений за анализируемый период.

**Таблица 1.** Использованные материалы спутниковой съемки на модельные участки

Участки	Временные интервалы			
	1973–1974	1988	1999–2002	2007–2009
“Югорский”	25.06.1973	05.08.1988	27.07.2002	16.08.2009
“Каратаиха”		11.07.1988	21.07.2000	13.07.2009
“Воркута”	25.06.1973	13.07.1988	07.07.2000	03.07.2007
“Харьяга”	22.06.1974	11.07.1988	26.06.2000	29.06.2007
“Инта”	25.06.1973	27.06.1988–13.07.1988	03.07.1999	01.07.2007

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основными материалами, использованными в анализе трендов изменения количества и площади зеркал термокарстовых озер, стали временные серии изображений 1973–2009 гг., полученные при съемке высокого разрешения Landsat (радиометры MSS, ТМ и ЕТМ+) (табл. 1), и подобранные для пяти модельных участков, различающихся по мерзлотным условиям (рис. 1). Выбор и форма модельных участков определялись доступностью сцен, полученных из свободных архивов, расположением участка в градиенте широтных условий распространения ММП (сплошное, массивно-островное и прерывистое) и геоботанических зон, отсутствием в пределах сцен облачного покрова. Последнее условие является особо важным, поскольку большую часть дней в году для наблюдаемой территории составляют периоды с полярным и пасмурным состоянием неба. К примеру, для территории Ненецкого автономного округа вероятность пасмурного состояния неба – по данным метеостанции Пустозерск (Нарьян-Мар) – в среднем варьирует от 62% в июле до 78% в сентябре (Климатологический..., 1932).

Привлечение изображений разных лет позволило охватить три временных периода протяженностью в 14–15 лет (1973(1974)–1988 гг.); 12–14 лет (1988–2000(2002) гг.) и 7–9 лет (2000–2007(2009) гг.).

Обработка снимков, перевод растровых элементов изображения в векторные объекты, организация, подготовка и аналитическая обработка пространственно-совмещенной базы данных водных объектов были выполнены с использованием программных пакетов Erdas Imagine 9.0 и ArcView 3.3. Выделение водных объектов на рассматриваемых изображениях после процедуры географической привязки проводились по генерированным значениям шкал “Brightness”, “Greenness” и “Wetness” преобразования Tasseled Cap (ТС) с использованием общепринятого (King, 2001; Huang, 2001) отношения

$$“Br, Gr, W” = aD_1 + bD_2 + cD_3 + dD_4 + eD_5 + fD_7, \quad (1)$$

где “Br, Gr, W” – значения соответствующих шкал;  $D_1–D_7$  – величины отраженного излучения соответ-

ственно для каналов снимков Landsat;  $a–f$  – коэффициенты преобразования ТС для сенсоров ЕТМ+ и ТМ.

Полученные значения обработаны с использованием принципов декомпозиции спектральных смесей (метод SMA – Spectral Mixed Analysis), исходя из положения, что спектр каждого пиксела есть линейная комбинация спектров “чистых компонент” (Барталев и др., 2009). Это допущение позволяет количественно оценить вклад отдельных компонент в отражательную способность элементов изображения. В качестве “чистых компонент” использованы контрастные по спектральным характеристикам объекты: водные поверхности, растительный покров, лишенные растительности участки. Общий принцип оценки доли отдельных компонент для линейного смешивания спектров проводили согласно выражения

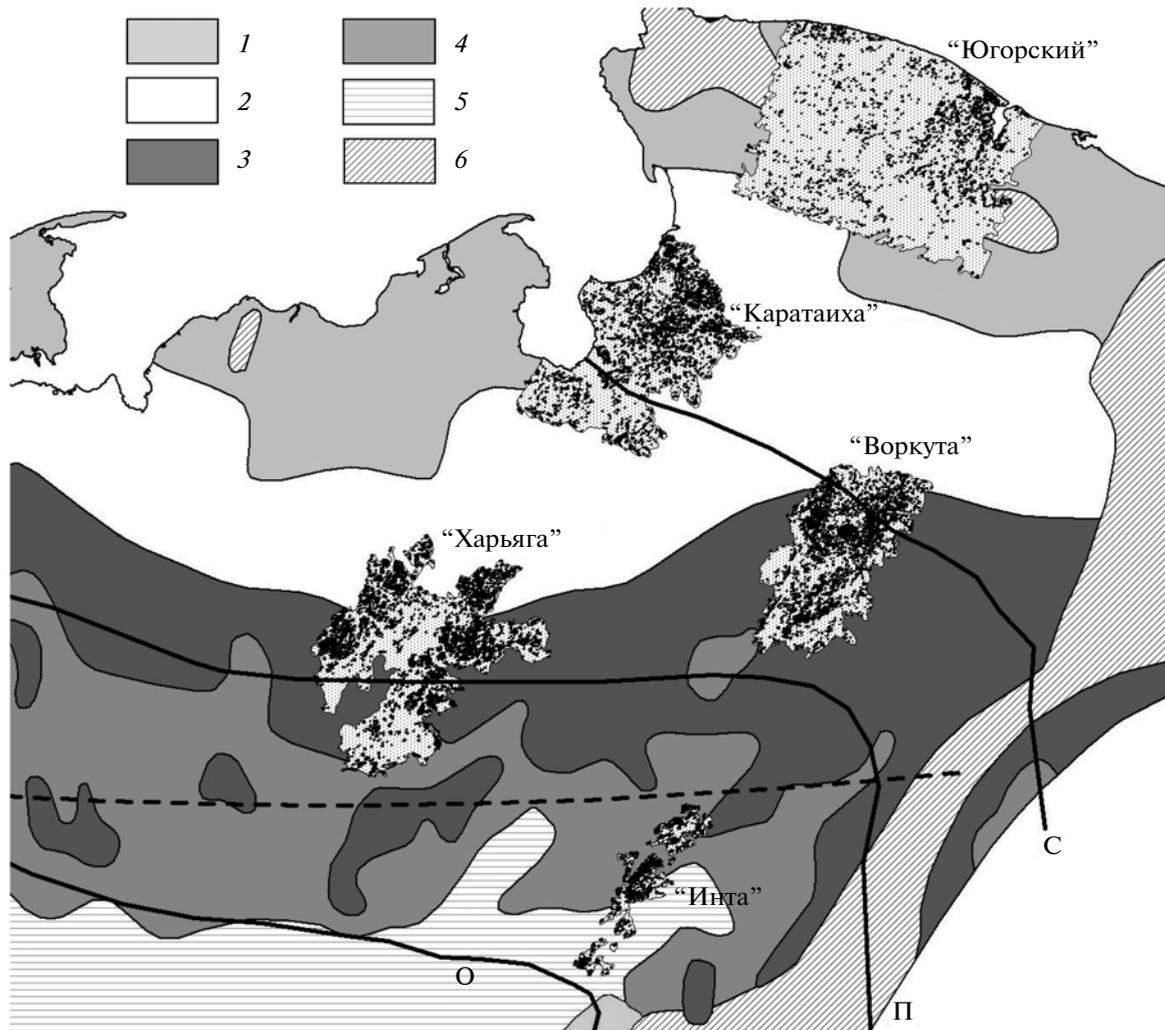
$$DN_c = \sum_{i=1}^n F_i DN_{i,c} + E_c, \quad (2)$$

учитывая ограничения

$$\sum_{i=1}^n F_i = 1 \quad 0 \leq F_i \leq 1, \quad (3)$$

где  $DN_c$  – числовое выражение значения пиксела в канале  $c$ ;  $F_i$  – доля  $i$ -го эталона в смеси;  $DN_{i,c}$  – числовое выражение значений  $i$ -го эталона в канале  $c$ ;  $n$  – количество эталонов;  $E_c$  – ошибка оценки для канала  $c$ .

Проведение SMA-преобразования позволило получить однозональный тематический растр, где выделенная водная компонента варьировала от 0 (отсутствие воды) до 100% (полностью водная поверхность). Анализ площадей водных поверхностей модельного участка Воркутинской тундры, выполненный по спектральному изображению QuickBird (2.44 м) и Landsat ТМ одного сезонно-временного периода (03.07.2007 и 07.07.2007), показал, что максимальная сходимость площадей водных поверхностей между изображениями достигается при выборе порогового значения доли площади компоненты воды, полученной при SMA анализе снимков Landsat ТМ, выше 0.48. При вы-



**Рис. 1.** Локализация участков проведения работ в пределах территории. Представлены участки выполнения работ и их названия, используемые в тексте, границы распространения сплошных (С), массивно-островных (О) и прерывистых (П) ММП. Обозначения геоботанических зон: 1 – северные типичные тундры; 2 – мелкоерниковые южные кустарниковые тундры; 3 – крупноерниковые южные (кустарниковые) тундры; 4 – предтундровые редколесья в сочетании с южными тундрами; 5 – зона крайне-северной тайги; 6 – горные тундры и редколесья.

делении пикселей водных поверхностей принимали во внимание элементы изображения, в которых содержание “водной компоненты” превышало 0.48, остальные элементы отсекали и в дальнейшем анализе и обработке не использовали. Сопоставление значений площадей озер для опорного (QuickBird) и контрольного (Landsat TM) изображений демонстрирует высокий уровень согласованности результатов, полученных из независимых источников (рис. 3). Сравнительный анализ величин площадей озер, полученных по данным изображениям, показал, что увеличение размеров наблюдаемых озер приводит к росту точности определения показателя. Для озер с площадью более 0.01 км<sup>2</sup> погрешность определения составила 15%, более 0.03 км<sup>2</sup> порядка 10%. Для озер с размерами менее 0.01 км<sup>2</sup> значения

показателя увеличивались до 70%. Поэтому в дальнейшем для сравнения модельных участков преимущественно использовали озера с размерами зеркала более 0.01 км<sup>2</sup>.

Полученные серии снимков стали основой для присвоения элементам изображения, составляющим разделенные водные объекты, персональных идентификаторов (ID), расчета средних значений доли водной поверхности для отдельных водных объектов, векторизации и учета площадей озер, организации реляционной базы данных по озерам модельных участков.

Для выполнения обозначенных процедур составляли бинарные (вода/не вода), пространственно совмещенные разногодовые многослойные серии. Перекрывающиеся водные объекты разновре-

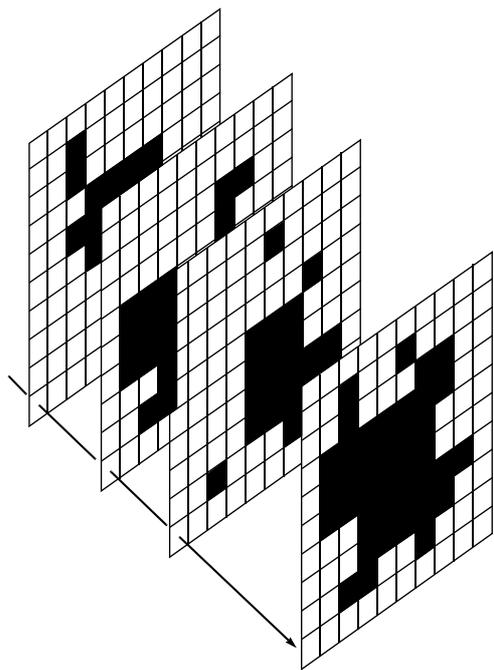


Рис. 2. Формирование общей маски озера по перекрывающимся разновременным изображениям при присвоении идентификационного номера.

менных сцен позволили подготовить общую маску отдельных озер (рис. 2). Сформированным водным объектам итоговой маски с помощью операции объединения (“Clump” из набора Interpreter пакета Erdas Imagine 9.0) присваивался *ID*, в результате чего его получил каждый пиксел обособленного водного объекта. Построенная маска далее была использована для решения обратной задачи – присвоения *ID* отдельным озерам изображений разных лет, перекрывающихся с общей маской.

Полученные изображения с присвоенными значениями *ID* были использованы при расчете среднего значения доли водной компоненты для отдельных озер по материалам SMA-анализа (функция расчета “зонального среднего” в Erdas Imagine 9.0). После этого водные объекты разновременных изображений были векторизованы, на их основе с помощью модуля X-Tools (ArcView 3.3) проведен учет площадей озер-полигонов, исключены объекты-водотоки (реки, ручьи) и видимые “шумы” визуальной экспертной обработкой.

В качестве показателя изменений площади озер был предложен к использованию Нормализованный разностный индекс поверхности зеркала озер (Normalized Differences Lake Surfaces Index, NDLSI), выраженный как

$$\text{NDLSI} = (S_1 - S_2) / (S_1 + S_2), \quad (4)$$

где  $S_1$  and  $S_2$  – площади зеркал озер на период наблюдаемых лет. Крайние значения величин индекса в пределах от  $-1$  до  $1$  демонстрируют полное исчезновение или новообразование озер соответственно. Полученные величины позволяют наглядно оценить интенсивность и направленность процессов изменения водоемов, дать количественную оценку этим изменениям.

Итогом выполненной работы являлась пространственно-организованная база данных, включающая в себя полигональные объекты – векторные слои зеркал озер модельных участков и связанную с ними через *ID*-базу атрибутивных данных, – в которой были представлены следующие характеристики: номер персонального идентификатора, скорректированная площадь поверхности для каждого года съемки, значения NDLSI для разных временных интервалов.

Для удобства количественного учета все озера были разбиты на классы по площади поверхности

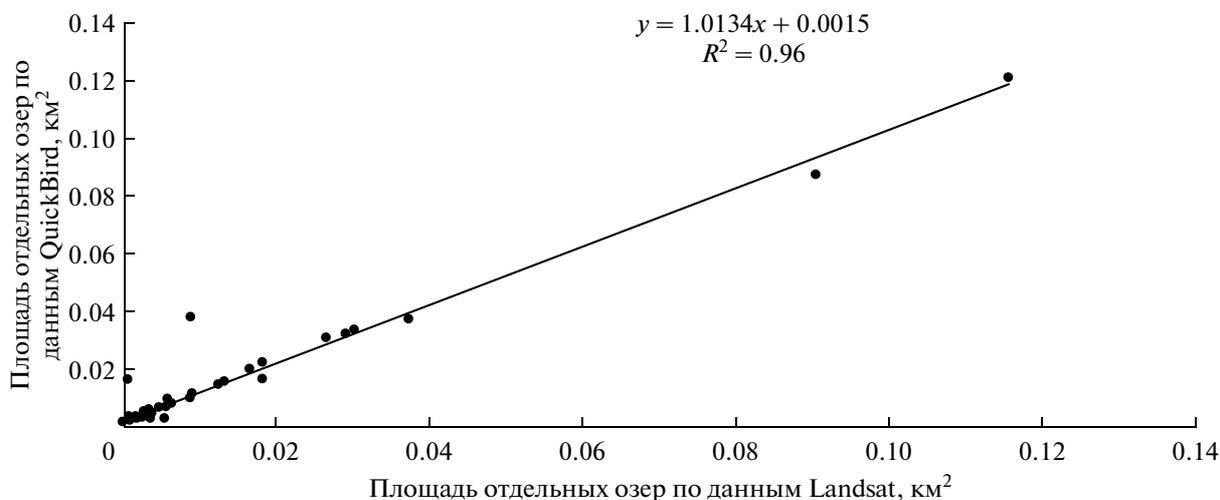


Рис. 3. Сравнение площадей выделенных озер по данным Landsat TM и QuickBird.

зеркал (Голдина, 1972):  $<0.01 \text{ км}^2$ ,  $0.01\text{--}0.05 \text{ км}^2$ ,  $0.05\text{--}0.1 \text{ км}^2$ ,  $0.1\text{--}0.5 \text{ км}^2$ ,  $0.5\text{--}1 \text{ км}^2$ ,  $>1 \text{ км}^2$ . В качестве изменившегося озера понимали полное его дренирование или значительное изменение его площади (более чем в 4 раза –  $\text{NDLSI} < 0.6$ ) (рис. 4.), при этом, принимали, что “исчезнувшие” озера не появлялись повторно на последующих изображениях, что снизило вероятность ошибки из-за сезонных изменений, особенно актуальной для озер с небольшой глубиной.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### Общая характеристика распределения озер на модельных участках

Тундровые озера востока Большеземельской тундры разнообразны по очертаниям и размерам, но среди них преобладают небольшие озера площадью менее  $0.1 \text{ км}^2$  (Голдина, 1972), что позволяет отнести исследуемый регион к районам повсеместного распространения преимущественно малых и средних озер (Кравцова, Быстрова, 2009). Представленность озер на участках неравномерная, показатели озерности в пределах модельных территорий варьируют от 2.6 до 13.4% при среднем значении 7.9% (табл. 2). В целом полученные показатели отражают отмеченную ранее закономерность распределения озер на территории восточной части Большеземельской тундры (Голдина, 1972), связанную с тектоническим строением территории: наблюдается увеличение числа озер с востока на запад

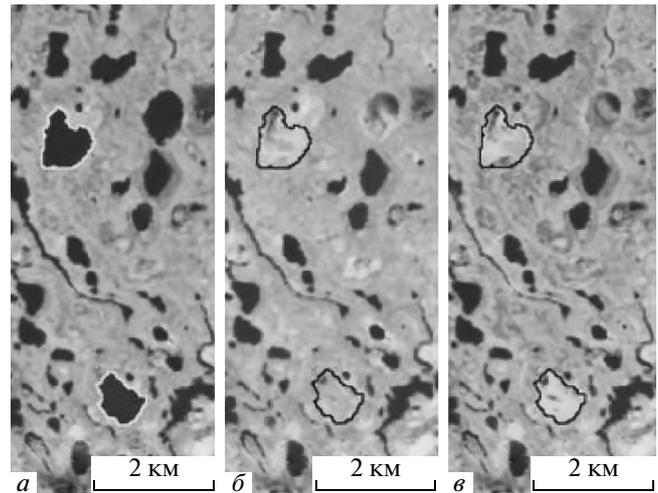


Рис. 4. Пример дренирования озер во временном интервале 1988–2000 гг. на участке “Каратаиха”: а – 11.07.1988, б – 21.07.2000 и в – 13.07.2009.

и с юга от р. Уса к центральной части. Далее на север к морскому побережью озерность территории уменьшается. Полученные величины площадей водной поверхности озер в пределах отдельных территорий могут быть достаточно важными показателями, в частности, при анализе роли термокарстовых озер в формировании баланса парниковых газов модельных участков. Так, эмиссия углерода за весь летний период наблюдений 2001 г., измеренная нами для озер Воркутинских тундр, составила  $517.5 \text{ кг/км}^2$  (Heikkinen et al., 2003).

Таблица 2. Общая характеристика участков выполнения работ

№	Название модельного участка, характеристика	Тип ММП	$S$ , $\text{км}^2$	$S_{\text{O}_3}$ , $\text{км}^2$	$K_{\text{O}_3}$ , %
1	“Югорский” – сев. часть Югорского п-ова, охватывает нижнюю часть басс. р. Кара, расположен в пределах геоботанической зоны северных типичных тундр с доминированием моховых лишайниковых и полигональных тундр, с юга переходит в горные тундры Пай-Хоя.	С	10491.4	245.1	2.34
2	“Каратаиха” – участок басс. р. Морею (западная часть) и р. Коротайха (восточная часть), относящийся к приморской части территории с мелкоерниковыми южными (кустарниковыми) тундрами.	С-О	5370.6	344.6	6.42
3	“Воркута” – участок басс. р. Уса (северная часть) и Коротайха (южная часть), с доминированием крупноерниковых южных (кустарниковых) тундр.	П	4130.3	325.4	7.88
4	“Харьяга” – Участок басс. р. Колва и р. Адзьва (западная часть), расположен в границах крупноерниковых и мелкоерниковых подзон южных (кустарниковых) тундр.	О-П	5809.1	458.6	7.89
5	“Инта” – Участок водораздела басс. р. Косью (северная часть) и р. Уса (южная часть), включает приграничные территории между зонами предтундровых редколесий в сочетании с южными тундрами (сев. часть) и участки крайне-северной тайги (южная часть).	О	962.4	109.8	11.4

Примечание. Сокращенные обозначения ММП: границы распространения сплошных (С), массивно-островных (О) и прерывистых (П) ММП.  $S$  – общая площадь модельной территории ( $\text{км}^2$ );  $S_{\text{O}_3}$  – площадь водной поверхности озер ( $\text{км}^2$ );  $K_{\text{O}_3}$  – коэффициент озерности (%).

Таблица 3. Общая характеристика водоемов территории

Модельный участок	Характеристики	Классы озер по размерам зеркал поверхности, км <sup>2</sup>					
		>1	1–0.5	0.5–0.1	0.1–0.05	0.05–0.01	<0.01
“Югорский”	количество озер, н/в % к общему	$\frac{18}{0.31}$	$\frac{48}{0.82}$	$\frac{472}{8.06}$	$\frac{534}{9.12}$	$\frac{2171}{37.1}$	$\frac{2612}{44.6}$
	площадь озер, км <sup>2</sup> /% к общей площади озер	$\frac{31.7}{12.9}$	$\frac{31.9}{13.0}$	$\frac{91.5}{37.3}$	$\frac{34.1}{13.9}$	$\frac{44.6}{18.2}$	$\frac{11.3}{4.6}$
“Каратаиха”	количество озер, число/в % к общему	$\frac{9}{0.058}$	$\frac{69}{0.45}$	$\frac{746}{4.84}$	$\frac{833}{5.40}$	$\frac{3498}{22.7}$	$\frac{10256}{66.5}$
	площадь озер, км <sup>2</sup> /% к общей площади озер	$\frac{12.2}{3.6}$	$\frac{42.3}{13.6}$	$\frac{138.2}{42.6}$	$\frac{54.4}{16.5}$	$\frac{72.8}{21.9}$	$\frac{24.7}{7.5}$
“Воркута”	количество озер, число/в % к общему	$\frac{24}{0.26}$	$\frac{36}{0.38}$	$\frac{525}{5.61}$	$\frac{641}{6.84}$	$\frac{2839}{30.3}$	$\frac{5305}{56.6}$
	площадь озер, км <sup>2</sup> /% к общей площади озер	$\frac{112.3}{34.5}$	$\frac{20.5}{6.3}$	$\frac{85.6}{26.3}$	$\frac{39.5}{12.1}$	$\frac{53.3}{16.3}$	$\frac{14.3}{4.4}$
“Харьяга”	количество озер, число/в % к общему	$\frac{76}{0.81}$	$\frac{111}{1.18}$	$\frac{703}{7.48}$	$\frac{563}{5.98}$	$\frac{2213}{23.5}$	$\frac{5737}{61.0}$
	площадь озер, км <sup>2</sup> /% к общей площади озер	$\frac{168.0}{36.6}$	$\frac{68.4}{14.9}$	$\frac{132.1}{28.8}$	$\frac{34.3}{7.47}$	$\frac{41.9}{9.13}$	$\frac{14.0}{3.06}$
“Инта”	количество озер, число/в % к общему	$\frac{17}{0.39}$	$\frac{15}{0.35}$	$\frac{130}{3.01}$	$\frac{138}{3.19}$	$\frac{767}{17.8}$	$\frac{3254}{75.3}$
	площадь озер, км <sup>2</sup> /% к общей площади озер	$\frac{47.1}{42.9}$	$\frac{9.8}{8.96}$	$\frac{23.8}{21.7}$	$\frac{8.38}{7.64}$	$\frac{13.9}{12.7}$	$\frac{6.7}{6.1}$

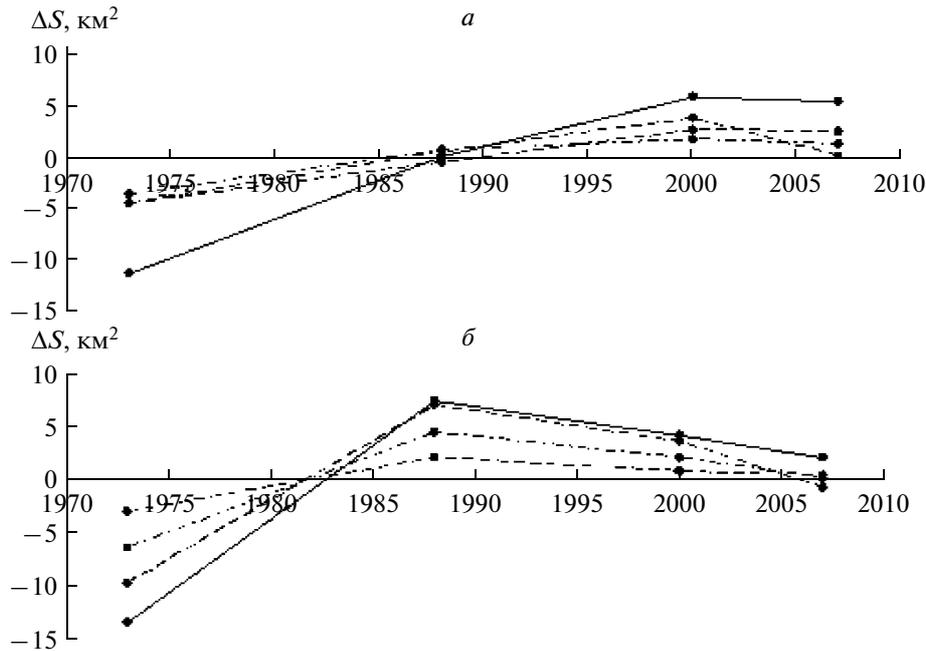
На модельных участках отмечено присутствие значительного количества озер, имеющих не только термокарстовое (в большинстве), но и ледниковое, пойменное и др. происхождение. Нередко к классу водных объектов были отнесены участки водных поверхностей с незначительными размерами в пределах болотных комплексов, такие полигоны исключали из анализа в ходе визуального дешифрирования. Данные объекты характеризовались незначительными размерами. Основное скопление озер термокарстового происхождения приурочено к аккумулятивно-денудационным равнинам смешанного (морского, ледникового или водно-ледникового) происхождения, болотным аккумулятивным формациям плоских равнин, дренирующихся по краям участками пойм рек и ручьев водосборными проточными понижениями.

Термокарстовые типы озер образуют групповые скопления, имеют округлую форму (удлиненная, лопастная или овально-круглая) и небольшие размеры. На модельных участках чаще представлены

озера размером менее 0.01 км<sup>2</sup> (табл. 3), их доля в общем количестве озер превышает 57%, однако занимаемая поверхность незначительна (в среднем 4–6% всей площади). Наибольший вклад в показатель озерности вносят группы озер размером 0.5–0.1 км<sup>2</sup> (37–43% для участка “Югорский” и “Каратаиха”), для остальных участков – с размерами более 1 км<sup>2</sup> (более 34%). В связи с тем, что корректная визуальная оценка сравнительного состояния озер была ограничена разрешающей способностью использованного сенсора MSS, межгодовые изменения водных объектов выполняли для озер, имеющих площадь более 0.05 км<sup>2</sup>.

*Межгодовая динамика водных поверхностей  
модельных участков*

Основной тип питания водных объектов территории – снеговой со сравнительно небольшим участием дождевого питания (Атлас Арктики, 1985), в результате чего наибольший водный объем озера имеют в весенний период, когда их уровень на 0.2–0.5 м превышает меженные отметки (Голдина,



**Рис. 5.** Межгодовые изменения суммарной площади водной поверхности для озер разных классов, представленные относительно среднего межгодового значения ( $\text{км}^2$ ) на участках “Воркута” (а), “Харьяга” (б). Условные обозначения классов озер, имеющих размеры: I – 0.05–0.1  $\text{км}^2$ , II – 0.1–0.5  $\text{км}^2$ ; III – 0.5–1.0  $\text{км}^2$ ; IV – более 1.0  $\text{км}^2$ . ■ – I –♦– II –●– III –▲– IV.

1972). Для озер, расположенных на модельных участках, характерно разнонаправленное изменение размеров в течение разных сезонов/лет наблюдений. Это, с одной стороны, вызвано различиями во времени съемки, влияющими на изменение гидрологического режима в течение периода года и режима питания. Так, на примере о. Шпицберген показаны (Zwolicki et al., 2007) двукратное понижение уровня воды озера в первый летний период (6.7–31.7) и постепенное его повышение в 1.4 раза во второй половине (31.7–30.8). С другой стороны, причиной существенных различий было привлечение для сравнительного анализа данных Landsat разного разрешения (MSS и ETM/TM). Изменение суммарной водной площади отдельных классов озер на изображениях разных лет происходит синхронно в пределах рассмотренных участков и не имеет выраженных общих трендов. Даже на изображениях, полученных для периодов приближенных друг к другу дат, для разных участков наблюдаются разнонаправленные тренды изменений (рис. 5). Отмечено завышение показателя площади зеркал на сценах, по времени съемки приближенных к завершению периода снеготаяния и имеющих более низкое пространственное разрешение.

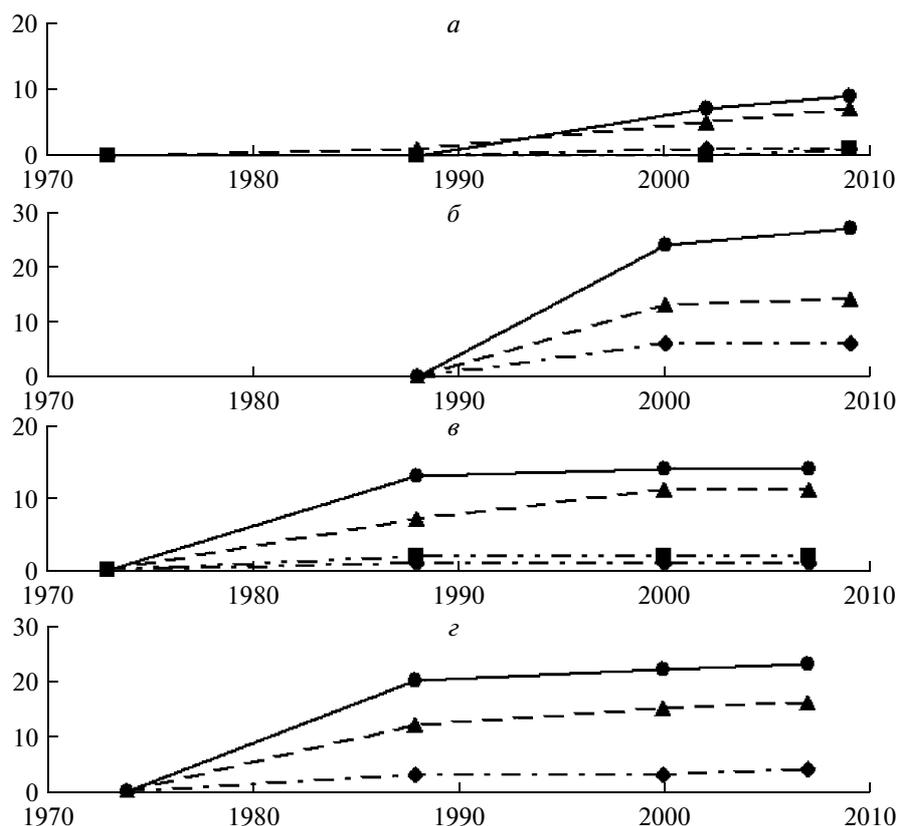
#### *Изменение количества термокарстовых озер на модельных участках*

Выбранные для анализа модельные участки имели разные размеры (отношение показателей  $\frac{\text{макс}}{\text{мин}}$  площадей для рассмотренных участков составляло

11 раз), входили в состав ландшафтных районов, сложенных элементарными фациями, с варьирующими их соотношениями и комбинациями. На территории отмечено снижение числа озер за счет их дренирования и перехода в обезвоженные, иногда заболоченные хасыреи. Использование сцен данного разрешения и временного интервала не позволило выявить новообразований озер, возможно, имеющих незначительные по площади размеры и межгодовые увеличения ее прироста.

Наибольшее количество изменений за 36-летний период наблюдений (1973–2009 гг.) отмечено на участках “Харьяга” и “Каратаиха” (57 и 47 озер соответственно), более низкие значения отмечены для участков “Воркута” и “Югорский” (28 и 18), минимальное количество выявлено для участка “Инта” (два озера). Однако по представленности изменений на единицу площади рассмотренные участки могут быть выстроены в следующий ряд (по убыванию показателя): “Харьяга” ( $0.98 \text{ оз}/\text{га}$ ) → “Каратаиха” ( $0.87 \text{ оз}/\text{га}$ ) → “Воркута” ( $0.68 \text{ оз}/\text{га}$ ) → “Инта” ( $0.42 \text{ оз}/\text{га}$ ) → “Югорский” ( $0.17 \text{ оз}/\text{га}$ ). Анализ представленности изменений на общее количество озер учтенной группы с зеркалом поверхности более  $0.05 \text{ км}^2$  позволяет получить схожий ряд: “Харьяга” (3.0% от рассмотренных озер) → “Каратаиха” (2.8%) → “Воркута” (2.3%) → “Югорский” (1.7%) → “Инта” (0.7%).

Наибольшие изменения в выделенных группах озер в пределах модельных участков наблюдали для



**Рис. 6.** Накопление изменений в разных группах озер за период наблюдений 1973–2009 гг.: *а* – “Югорский”, *б* – “Каратайха”, *в* – “Воркута”, *з* – “Харьяга”. По оси ординат – количество дренированных озер, абсцисс – годы съемки. Условные обозначения соответствуют рис. 5.

класса с размерами 0.1–0.5 км<sup>2</sup> (50–57%), менее изменчивыми были озера класса 0.05–0.1 км<sup>2</sup> (29–39%). Около 3–12% всех дренированных озер приходилось на группу 0.5–1 км<sup>2</sup>. Изменения зеркал озер размерами более 1 км<sup>2</sup> отмечены на участке “Воркута” – два озера за временной интервал 1973–1988 гг. и “Югорский” – одно озеро за период 2002–2009 гг.

Анализ межгодовых изменений количества дренированных озер в пределах модельных участков, контрастно различающихся по типам залегания ММП, показал отсутствие синхронной динамики и большую сходимость в проявлении изменений для рядом расположенных районов.

Наименьшие изменения показателя отмечены на участке “Инта”, расположенном в пределах южной границы залегания ММП массивно-островного типа. На территории значимых изменений в анализируемых показателях за период 1973–2000 гг. не выявлено, отмечено дренирование двух озер за последовательные периоды 15- (1973–1988 гг.) и 12-летних наблюдений (1988–1999 гг.) (0.13 км<sup>2</sup> и 0.22 км<sup>2</sup>). Их близость к участкам с расположенными промышленными объектами позволяет предположить и возможную техногенную природу измене-

ний. Сходные с участком “Инта” результаты, характеризующиеся отсутствием видимых изменений, были получены и для показателей количества и размеров озер за периоды 1988–2000 и 1980–2001 гг. территории правобережья р. Мезень (южнее границы ММП) и участка в нижнем течении р. Печора, расположенном в зоне массивно-островного распространения ММП (Кравцова, Быстрова, 2009).

Основное количество изменений для периода наблюдений 1973(1974)–1988 гг. приходится на участки “Воркута” и “Харьяга”, расположенные в пределах границы прерывистого и островного расположения ММП (рис. 6). На данный временной интервал в 13 и 14 лет наблюдений соответственно приходится большая часть изменений озер: 82.1% всех отмеченных изменений озер участка “Воркута” и 61.4% участка “Харьяга”. Наибольшие изменения на рассмотренных участках испытывают озера с площадью зеркал 0.1–0.5 км<sup>2</sup> (35–46% от всех изменений). За следующий временной интервал 12 лет (1988–2000 гг.) количество изменений снизилось в 4.5 (“Воркута”) и 1.9 раза (“Харьяга”) и составило 17.9 и 31.6% изменений. В период 2000–2007 гг. интенсивность изменений продолжала снижаться до 7.0% на участке “Харьяга”, в Воркутинском районе изменений не было выявлено.

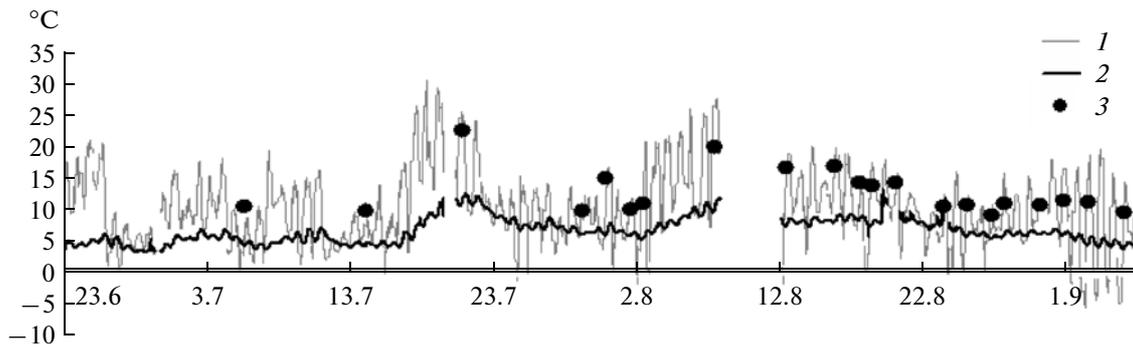


Рис. 7. Температурный режим приземного слоя воздуха (1), внутрипочвенной температуры берега на глубине 5–10 см (2) и температуры верхней толщи термокарстового озера Воркутинской тундры (3) для летнего периода наблюдений 2001 г.

Для районов, расположенных на участках сплошного залегания ММП, общий тренд изменений смещен во времени и связан с изменениями в период 1988–2000(2002) гг. Так, для участка “Югорский” выявленные в данный период изменения затронули до 66.7% всех дренированных озер. Снижение темпов изменений отмечено в последующий период 2002–2009 гг. (27.7%), при этом наименьшее их количество пришлось на период 1973–1988 гг. (5.6%). Для участка “Каратаиха” была доступна более короткая серия временных изображений, составленная с 1988 г. На 12-летний период (1988–2000 гг.) пришлось 91.5% изменений, из них наибольшее количество приходится на озера с размером зеркала 0.1–0.5 км<sup>2</sup> (51.1%). Период 2000–2007 гг. характеризовался снижением данного показателя до 8.5%.

#### *Роль климатических показателей в изменении характеристик озер*

Географическое размещение термокарстовых озер имеет унаследованный характер и отражает палеогеографическое прошлое Большеземельской тундры (Голдина, 1972) и современные процессы их трансформации. Среди наиболее важных причин, влияющих на изменение в расположении озер в районах распространения ММП, выделяются климатические условия, влияющие на мощность развития сезонно-талого слоя (СТС) и деградацию ММП, эрозионная деятельность вод, создающая возможность дренирования озер, или их комбинации (Шур, 1977; Кравцова, Быстрова, 2009). Однако современное наличие значительного количества термокарстовых озер на модельных участках демонстрирует протекание растянутых во времени процессов деградации ММП.

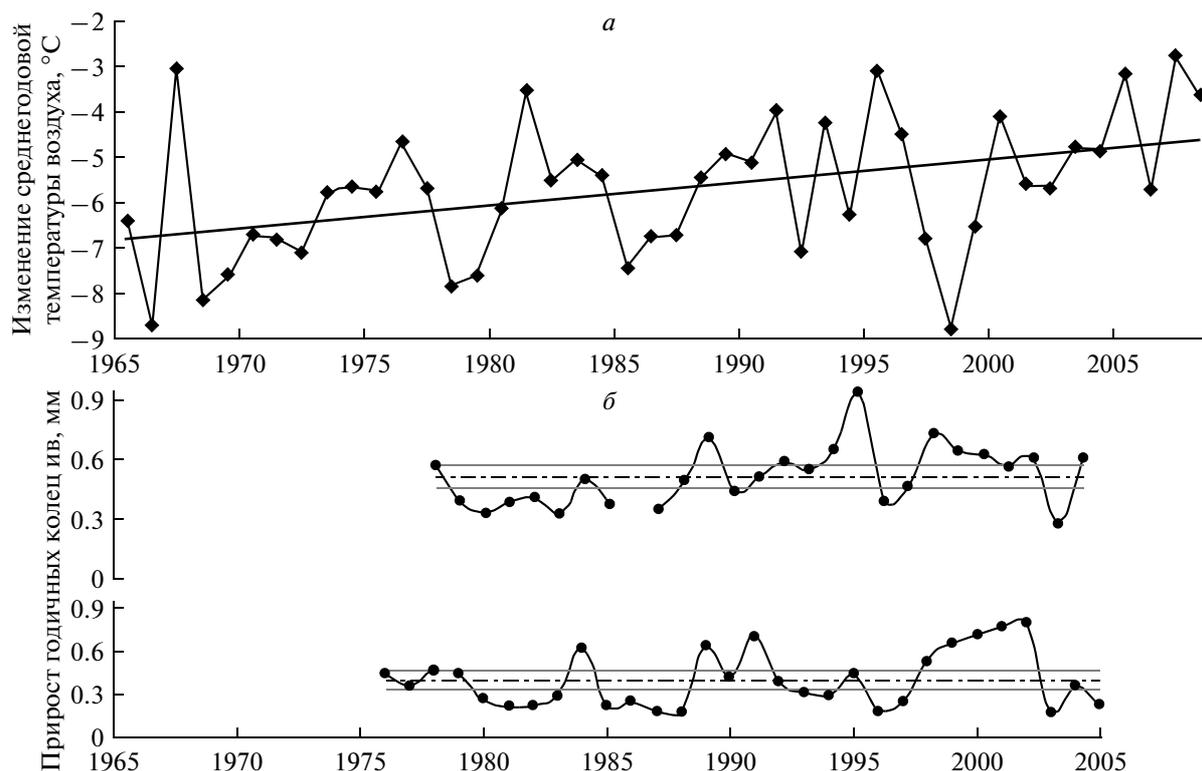
Рассмотренный временной промежуток 36 лет (1973–2009 гг.) позволяет установить общие тренды изменений территории, развивающиеся в настоящее время. Принятые в настоящей работе допущения связаны с тем, что отклонение интенсивности и направленности значений рассмотренных величин от средних межгодовых значений и их корреляция с наблюдаемыми изменениями климатических пока-

зателей характеризует процессы трансформации участков криолитозоны Европейского Севера. Относительно устойчивым показателем современных мерзлотно-климатических изменений является соотношение между трендами изменений температуры почвы и воздуха (Павлов, 2008).

Выполненные ранее обобщения по Западной Сибири (Днепровская и др., 2009), сделанные в результате анализа показателей изменения суммарной площади термокарстовых озер отдельных участков и индивидуальных озер, показали возможность их привлечения в качестве величин, характеризующих климатические изменения. Однако для рассмотренной в данной работе территории данные показатели не нашли возможности использования. Несмотря на то, что отклонение от средней многолетней величины уровня озер определяется преимущественно соотношением климатических факторов за эти годы и составляющими водного баланса (Голдина, 1972), различия, связанные с сезонными особенностями доступных периодов наблюдений, не позволяют выделить устойчивых межгодовых трендов изменений.

Среди водоемов рассмотренных участков преобладают мелководные термокарстовые озера, характеризующиеся хорошим перемешиванием вод по вертикали. Общий температурный режим толщи отражает общее поступление прямой солнечной радиации на земную поверхность и тесно коррелирует с температурой приземного слоя воздуха. Так, температура верхних толщ воды (20–30 см) достигает максимальных значений после нескольких, следующих друг за другом, периодов ежедневных прогреваний в июле (рис. 7). Водные толщи оказывают значительное тепляющее влияние на контактирующие с ними грунты, а интенсивность сезонного оттаивания определяется в данном случае чередованием и комбинацией следующих друг за другом периодов, благоприятствующих или препятствующих развитию термокарста.

Рассмотренный в работе временной период охватывает интервал 1973–2009 гг. Метеорологиче-



**Рис. 8.** Изменение среднегодовой температуры воздуха за период 1965–2008 гг.: *a* – общий тренд изменений параметра ( $y = 0.05x - 6.85$ ;  $R^2 = 0.18$ ); *б* – сравнение величин прироста годичных колец двух экземпляров ивы филиколистной из проточных депрессий термокарстовых озер (мм/год). Пунктиром обозначены средние значения, сплошной линией – доверительный интервал средних значений ( $p = 0.95$ ).

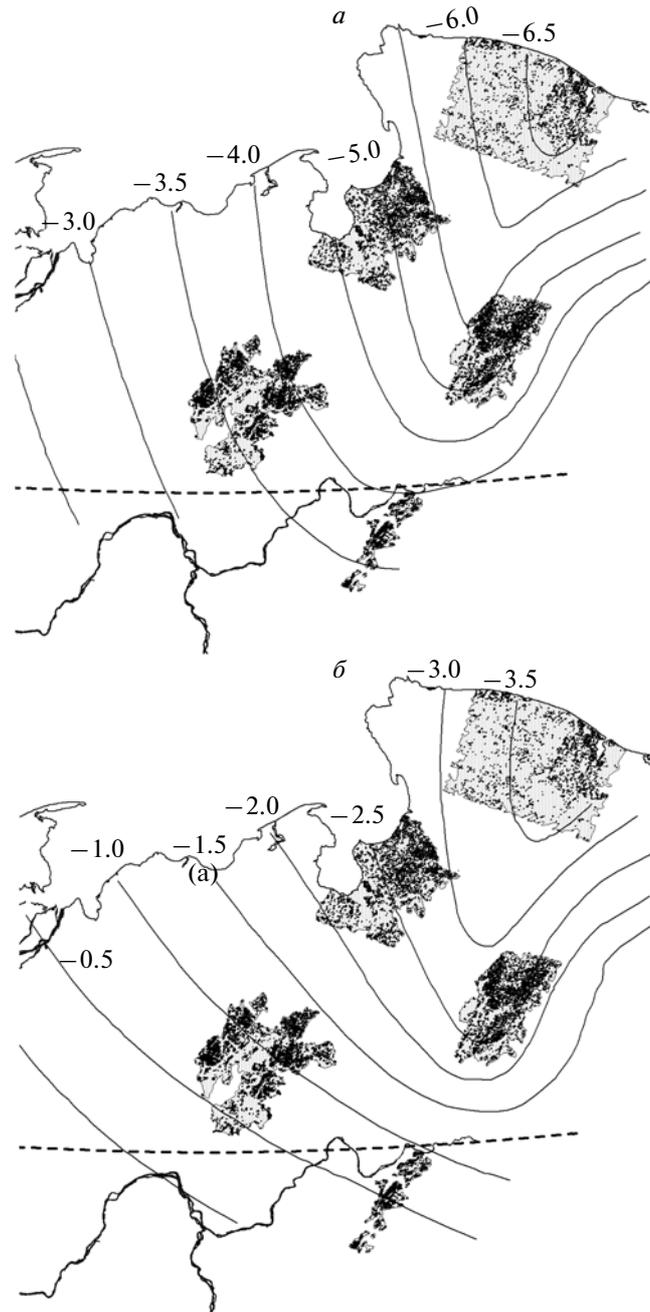
ские наблюдения, выполненные для Европейского Северо-востока России, демонстрируют наличие тренда потепления, начинающегося во второй половине 1960-х – середине 1970-х гг., с наибольшей скоростью потепления в 1980-х гг. Во второй половине 1990-х гг., а также в 2001–2005 гг., потепление оценивается как очень слабое (Павлов, 2008; Мельников и др., 2007). Однако анализ метеорологических данных, полученных для метеостанции Воркута (База данных по климату Института биологии, сост. Г.Г. Мажитова), показывает наличие тренда увеличения среднегодовой температуры для всего периода наблюдений (рис. 8*a*).

По данным скважинных температурных измерений, современное потепление мерзлых грунтов распространяется до глубины 80–110 м (Мельников и др., 2007), при этом на примере Воркутинского района показано (Каунов, Павлов, 1997; Каунов, 1980), что периоды 1968–1972 гг. и 1995–1996 гг. представлены периодами наименьших и максимальных величин, ограничивающих диапазон варьирования температуры грунтов.

Согласно проведенного обобщения, выполненного для европейского северо-востока России (Природная..., 2005), минимальные температуры грунтов в слое годовых теплооборотов 10 м харак-

терны для района побережья северо-восточной части территории (участок “Югорский”) (см. рис. 9).

Развитие термокарста определяется величиной критической глубины СТС (Шур, 1977), при которой среднегодовая температура грунтов под слоем воды/растительного покрова равна нулю, при этом величина критической глубины снижается с продвижением на север. В силу данных особенностей участки северных территорий региона могут рассматриваться как сохраняющие большую устойчивость и инерционность в поддержании амплитуды температурного баланса грунтов. Совпадение “благоприятных” для развития термокарста условий в летний и зимний периоды или нескольких следующих друг за другом лет, способно оказать существенные изменения на глубину протаивания СТС. В частности, такие увеличения за период наблюдений могут быть связаны с периодами 1976–1977 гг., 1981–1984, 1989–1991, 1995–1996, 1998–2002 и 2003–2009 гг., для которых наблюдается превышение температурных показателей и количества осадков летнего периода над средними значениями. На данные временные периоды приходятся и превышающие средние значения прироста годичных колец ивы филиколистной, измеренные на приборе Lintab-5 (RINNTech). Растения были собраны нами из локальных проточных депрессий участка с



**Рис. 9.** Распространение на территории Европейского Северо-востока России минимальных температур грунтов в слое годовых теплооборотов 10 м: *a* – в период минимальных температур 1968–1972 гг., *б* – в период максимальных температур 1994–1996 гг. Представлены термоизогипсы на глубине 10 м. (Природная..., 2005).

термокарстовыми озерами (Воркутинская тундра окр. п. Седа) (рис. 8б, 8в). Несмотря на различия в амплитуде прироста, наблюдается синхронная реакция в отклике прироста в пределах отдельных лет наблюдений. Именно для периодов максимальных приростов возможны и максимальные появления изменений.

Среди рассмотренных показателей наиболее важным параметром, демонстрирующим измене-

ния термокарстовых озер на модельных участках, является величина количества и интенсивности дренирования озер за отдельные временные интервалы (рис. 6). Отсутствие новообразований озер на территории за рассмотренный период позволяет склониться к тому, что современный термокарст является преимущественно наследием более древних времен (Шур, 1977). Отсутствие полевых наблюдений на большинстве участков, прилегающих к дре-

нированным озерам, не позволяет оценить роль локальных факторов в их формировании, а корреляция с данными температурных наблюдений воздуха и грунтов, подтверждает климатическую природу наблюдаемых изменений.

Ответная реакция криолитозоны на потепление, наблюдаемая на основании анализа интенсивности дренирования термокарстовых озер, позволяет установить внутрорегиональные различия, связанные с ее ослаблением в широтно-долготном градиенте по направлению от массивно-островной зоны к южным границам распределения ММП и запаздыванием временного отклика в направлении распределения прерывистых—сплошных ММП. Наибольшее проявление изменений проявилось на участках прерывистых и островных ММП в 1973—1988 гг. Обращает на себя внимание отсутствие тренда дальнейшего роста количества дренированных озер для рассмотренных участков.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ “Влияние климатических изменений на биоценозы ненарушенных территорий российского Севера” (проект № 10-04-92514-ИК\_a).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ананьева Г.В., Дроздов Д.С., Инстанес А., Чувилин Е.М.* Нефтяное загрязнение слоя сезонного оттаивания и верхних горизонтов многолетнемерзлых пород на опытной площадке “мыс Болванский” в устье р. Печора // Криосфера Земли. 2003. Т. VII. № 1. С. 49—59.
- Атлас Арктики.* М.: ГУГК при СМ СССР, 1985. С. 97—98.
- Барталев С.А., Ховратович Т.С., Елсаков В.В.* Использование спутниковых изображений для оценки потерь углерода лесными экосистемами в результате вырубок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов / Под ред. Лупяна Е.А., Лавровой О.Ю. Вып. 6. Т. 2. М.: Азбука-2000, 2009. С. 343—352.
- Брыскина Н.А., Евтюшкин А.В., Полищук Ю.М.* Изучение динамики изменений термокарстовых форм рельефа с использованием космических снимков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов / Под ред. Лупяна Е.А., Лавровой О.Ю. Вып. 4. Т. 2. М.: Азбука-2000, 2007. С. 123—128.
- Голдина Л.П.* География озер Большеземельской тундры. Л.: Наука, 1972. 102 с.
- Днепровская В.П., Брыскина Н.А., Полищук Ю.М.* Изучение изменений термокарста в зоне прерывистого распространения вечной мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 4. С. 88—96.
- Какунов Н.Б.* Климатические изменения и динамика водно-тепловых условий почво-грунтов и растительности Большеземельской тундры в естественном и нарушенном состоянии // Геология разведки. 1980. № 7. С. 134.
- Какунов Н.Б., Павлов А.В.* Оценка и прогноз термического режима криогенных почв на Север России в связи с ожидаемым потеплением климата / Криопедология 97. Тез. докл. II междунар. конф. 5—8 августа 1997 г. Сыктывкар, 1997. С. 12.
- Климатологический справочник по СССР. Вып. I. Европейская часть СССР. Л.: Главная геофизическая обсерватория, 1932. 118 с.
- Кравцова В.И., Быстрова А.Г.* Изучение динамики термокарстовых озер России // Геоинформатика. № 1. 2009. С. 44—51.
- Мельников В.П., Павлов А.В., Малкова Г.В.* Геокриологические последствия современных изменений глобального климата // География и природные ресурсы. 2007. № 3. С. 19—27.
- Павлов А.В.* Тренды современных изменений температуры почвы на севере России // Криосфера Земли. 2008. Т. XII. № 3. С. 22—27.
- Природная среда в условиях открытой разработки угля (на примере Юньягинского месторождения) / Под ред. Гецен М.В. Сыктывкар, 2005. 246 с.
- Шур Ю.Л.* Термокарст (к теплофизическим основам учения о закономерностях развития процесса). М.: Недра, 1977. 80 с.
- Burn C.R.* Tundra lakes and permafrost, Richards Island, western Arctic coast, Canada // Can. J. Earth Sci. 2002. V. 39. P. 1281—1298.
- Fitzgerald D., Riordan B.A.* Permafrost and ponds. Remote sensing and GIS used to monitor Alaska wetlands at the landscape level // Agroborealis. 2003. V. 35. № 1. P. 30—35.
- Frohn R.C., Hinkel K.M., Eisner W.R.* Satellite remote sensing classification of thaw lakes and drained thaw lake basins on the North Slope of Alaska // Rem. Sens. Environ. 2005. V. 97. № 1. P. 116—126.
- Heikkinen J.E.P., Virtanen T., Huttunen J., Elsakov V., Martikainen P.* Carbon balance in East European tundra // Global Biogeochem. Cycles. 2004. V. 18. № GB1023. doi: 10.1029/2003GB002054. P. 1—13.
- Huang Ch.* Derivation of a Tasseled Cap transformation based on Landsat 7 satellite reflectance / Eds. Huang Ch., Wylie B., Yang L., Homer C., Zylstra G. Raytheon ITSS, USGS EROS Data Center Sioux Falls, USA. 2001. 10 p.
- Kennedy R.E., Cohen W.B.* Automated designation of tie-points for image-to-image coregistration // Int. J. Rem. Sens. 2003. V. 24. P. 3467—3490.
- King R.* Tasseled Cap transformation Mississippi coastal corridor July 24, 2000 / Eds. King R., O’Hara Ch., Wang L. CGTS, Mississippi State University, 2001.
- Luoto M., Seppälä M.* Thermokarst ponds as indicators of the former distribution of Palsas in Finnish Lapland // Permafrost Periglac. Process. V. 14. 2003. P. 19—27.
- Smith L.C., Sheng Y., MacDonald G.M., Hinzman L.D.* Disappearing arctic lakes // Science. 2005. № 308. P. 142.
- Vallée Sh., Payette S.* Collapse of permafrost mounds along a subarctic river over the last 100 years (northern Québec) // Geomorph. 2007. V. 90. P. 162—170.
- Zwolicki Z., Rachlewicz G., Mazurek M., Paluszkiwicz R.* The geoecological model for small tundra lakes, Spitsbergen // Landform Analysis. 2007. V. 5. P. 113—118.

## **The Inter-Year Changes of Thermokarst Lakes on North-East Part of European Russia**

**V. V. Elsakov, I. O. Maruschak**

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

The main trends of thermokarst lakes dynamic were studied in latitudinal gradient of permafrost soils zones on East-Europe Russia with Landsat satellite data per period of 1973–2009. The maximum observed changes for lakes were related with drainage of lakes at the area of discontinue permafrost zone. Near 80% of changes at this zone were fixed for period 1973–1988. The area of continues permafrost zone was most stable for changes until 1988. The main changes of lakes were observed for this zone in period of 1988–2002. The changes intensity was increased in direction to the south border of discontinues cryolitozone and for all permafrost area after 2002. These changes can be associated with climatic warming noted after 1970-ths.

**Keywords:** thermokarst lakes dynamic, satellite monitoring, climatic changes

---

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ  
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

---

**ИССЛЕДОВАНИЕ КРИОГЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ГРУНТА  
В ДЕЛЬТЕ РЕКИ СЕЛЕНГА С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВОЙ  
РСА-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ И НАЗЕМНОГО ГЕОРАДАРНОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ**

© 2011 г. Т. Н. Чимитдоржиев<sup>1\*</sup>, А. И. Захаров<sup>2</sup>, Г. И. Татьков<sup>3</sup>, В. Б. Хаптанов<sup>1</sup>,  
А. В. Дмитриев<sup>1</sup>, Р. Ц. Будаев<sup>3</sup>, Ю. Б. Цыбенков<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Учреждение Российской академии наук Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ

<sup>2</sup> Фрязинский филиал Учреждения Российской академии наук Института радиотехники  
и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино Московской обл.

<sup>3</sup> Учреждение Российской академии наук Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ

<sup>4</sup> Учреждение Российской академии наук Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, Улан-Удэ

\*E-mail: tchimit@pres.bscnet.ru

Поступила в редакцию 29.09.2010 г.

В работе рассмотрена возможность использования данных радиолокационной интерферометрии для оценки локальных деформаций грунта вследствие морозного пучения глинистых почв. Качественная валидация интерферометрических измерений была проведена при помощи георадарного исследования и лабораторного анализа гранулометрического состава и влажности почвы. Показано, что радарная интерферометрия позволяет оценить ареалы возникновения криогенных деформаций и амплитуду вертикальных смещений подстилающих покровов.

**Ключевые слова:** радиолокационная интерферометрия, георадарное зондирование, криогенные деформации, глинистые почвы

## ВВЕДЕНИЕ

Методы радиолокационной (РЛ) интерферометрии развиваются в мире на протяжении последних 20 лет. Этот метод дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) использует информацию о разности фаз эхо-сигналов, зарегистрированных в съемках одного и того же участка местности одноантенной РЛ-системой с повторяющихся орбит носителя (интерферометр с мягкой базой) (Rosen et al., 2000). Получаемый методом дифференциальной радиолокационной интерферометрии (ДРИ) измерительный материал, как правило, предоставляет детальную площадную картину радиальных перемещений отражающей поверхности в пределах РЛ-снимка, а не отдельные профили или точечные измерения. Измеряемые мелкомасштабные смещения имеют различную природу и могут быть следствием тектонической активности, оползневых и карстовых процессов, хозяйственной деятельности человека и др. Возможности ДРИ впервые продемонстрированы в (Gabriel et al., 1989) на примере просянок с.-х. полей. Яркие примеры деформации земной поверхности в результате землетрясений приведены в (Zebker et al., 1994; Xia Ye, 2005). Проседание участков

земной поверхности в районах нефтедобычи описано в (Fielding et al., 1998). Из отечественных работ можно упомянуть (Захаров, Тугаринов, 1998; Кучерявенкова, Захаров, 2002) с описанием наблюдений динамики водных поверхностей водоемов, проявлявшейся в колебаниях уровня ледовых и прибрежных почвенных покровов.

Несмотря на значительное количество работ по данной тематике в целом, в известной нам литературе нет сведений о применении радарных интерферометрических методов для изучения столь важного явления, как локальные деформации грунтов вследствие криогенных процессов, хотя напряжения, возникающие при морозном пучении почвы, способны вызвать разрыв корневой системы растений, деформацию и смещение оснований зданий и сооружений (Киселев, 1985). В настоящее время в связи с хозяйственным освоением слабообжитых районов Прибайкалья, Забайкалья, Якутии и других территорий, расположенных в зоне вечной мерзлоты, представляется актуальным использование этого метода для уточнения ареалов развития и оценки интенсивности криогенных деформаций.

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ

Тестовый полигон для оценки возможностей метода спутниковой ДРИ при изучении и картировании криогенных процессов располагается в сухопутной части Байкальской рифтовой зоны – Усть-Селенгинской депрессии, отличающейся высокой динамикой подстилающей поверхности. При впадении в оз. Байкал р. Селенга сформировала одну из крупнейших озерных дельт площадью около 1120 км<sup>2</sup>, состоящую из множества протоков и островов. Ежегодно р. Селенга сбрасывает в оз. Байкал в среднем 2.7 млн. тонн твердого стока, постоянно наращивая площадь дельты. В рельефе дельтового участка преобладают аккумулятивные террасы низкого и среднего высотных уровней, старичные озера, береговые валы и лагуны. Верхняя часть инженерно-геологического разреза, представленная рыхлыми четвертичными отложениями, характеризуется значительной изменчивостью мощности, состава, литологического строения, уровня грунтовых вод, что, несомненно, влияет на развитие сезонных криогенных процессов.

Для обнаружения деформаций подстилающей поверхности в дельте р. Селенга использовались данные радара L-диапазона PALSAR (с длиной волны 23 см), установленного на спутнике ALOS (Японское аэрокосмическое агентство, JAXA). Радар предназначен для круглосуточного и всепогодного наблюдения Земли и позволяет в зависимости от режима сканирования (FBS, FBD, ScanSAR, PLR и режим прямой передачи данных) получать изображения с пространственным разрешением от 10 до 100 м в полосе съемки шириной от 40–70 км до 250–350 км. Основным преимуществом радара PALSAR перед другими современными спутниковыми радарными (ERS-1, 2) является его функционирование в более длинноволновом диапазоне, что в большинстве случаев решает проблему временной декорреляции отраженных сигналов, вызванной изменениями растительного и снежного покровов, а также флуктуациями электрических свойств атмосферы. При этом режим съемки PALSAR PLR (поляриметрическая съемка) позволяет повысить уровень когерентности отраженных сигналов за счет подбора оптимальных видов поляризации сигнала. Данные режима FBS (однополяризационные – HH или VV-режимы съемки) характеризуются наиболее высоким пространственным разрешением (порядка 7 м), что обеспечивает наиболее детальную картину смещений участков поверхности. Можно утверждать, что данные ALOS PALSAR характеризуются наиболее высокой детальностью и большей интерферометрической когерентностью по сравнению с данными других спутниковых радаров, несмотря на то, что минимально возможный временной интервал

между двумя последовательными съемками равен 46 дням.

Для изучаемого участка (рис. 1а) была подобрана интерферометрическая пара (начало января и конец февраля 2009 г.) снимков ALOS PALSAR, полученная в режиме FBS на согласованной горизонтальной поляризации. Этот режим с высокой разрешающей способностью является основным рабочим режимом, в том числе и для интерферометрических наблюдений. Съемка выполнена в зимний период, характеризующийся наибольшей динамикой сезонно-мерзлого слоя на побережье оз. Байкал. Интерферометрическая база радара (с мягкой базой) составляла около 350 м.

При построении интерферограммы для участка Усть-Селегинской впадины в полосе размером 50 × 70 км (рис. 1б) выполнялись следующие стандартные этапы обработки сигнала: совмещение изображений; формирование интерферограммы; построение карты когерентности; вычитание фазового набега, характерного для гладкой Земли (выглаживание интерферограммы); фильтрация шумов интерферограммы; развертка фазы, необходимая для построения рельефа местности. При формировании дифференциальной интерферограммы использована модель SRTM, довольно точно характеризующая равнинный рельеф дельты Селенги.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В центральной части Усть-Селенгинской впадины на интерферограмме выделяются локальные поднятия линейной формы – предположительно ареалы морозного пучения грунта (указаны стрелками на рис. 1б). Один из таких участков линейного поднятия расположен в долине р. Шумиха – палеорусле р. Селенга. В ходе миграции основного русла Селенги к северо-востоку данная протока была “отшнурована” песчаной пересыпью в районе верхнего окончания и превратилась в старицу. Современное питание р. Шумиха происходит за счет атмосферных осадков и подземного стока по древнему руслу; большая часть современной поймы заболочена. Информация о вертикальных перемещениях земной поверхности за 46 дней между съемками кодирована на интерферограмме в градациях серого (рис. 1б). На представленной неразвернутой интерферограмме для участка горного обрамления Усть-Селенгинской впадины рельеф не скорректирован, поэтому при вариациях высот рельефа, превышающих 150 м, наблюдаются интерферометрические полосы из-за 2 $\pi$  неоднозначности фазовых измерений.

При наземных геоморфологических обследованиях тестового участка предполагаемые ареалы распространения криогенных деформаций пучения

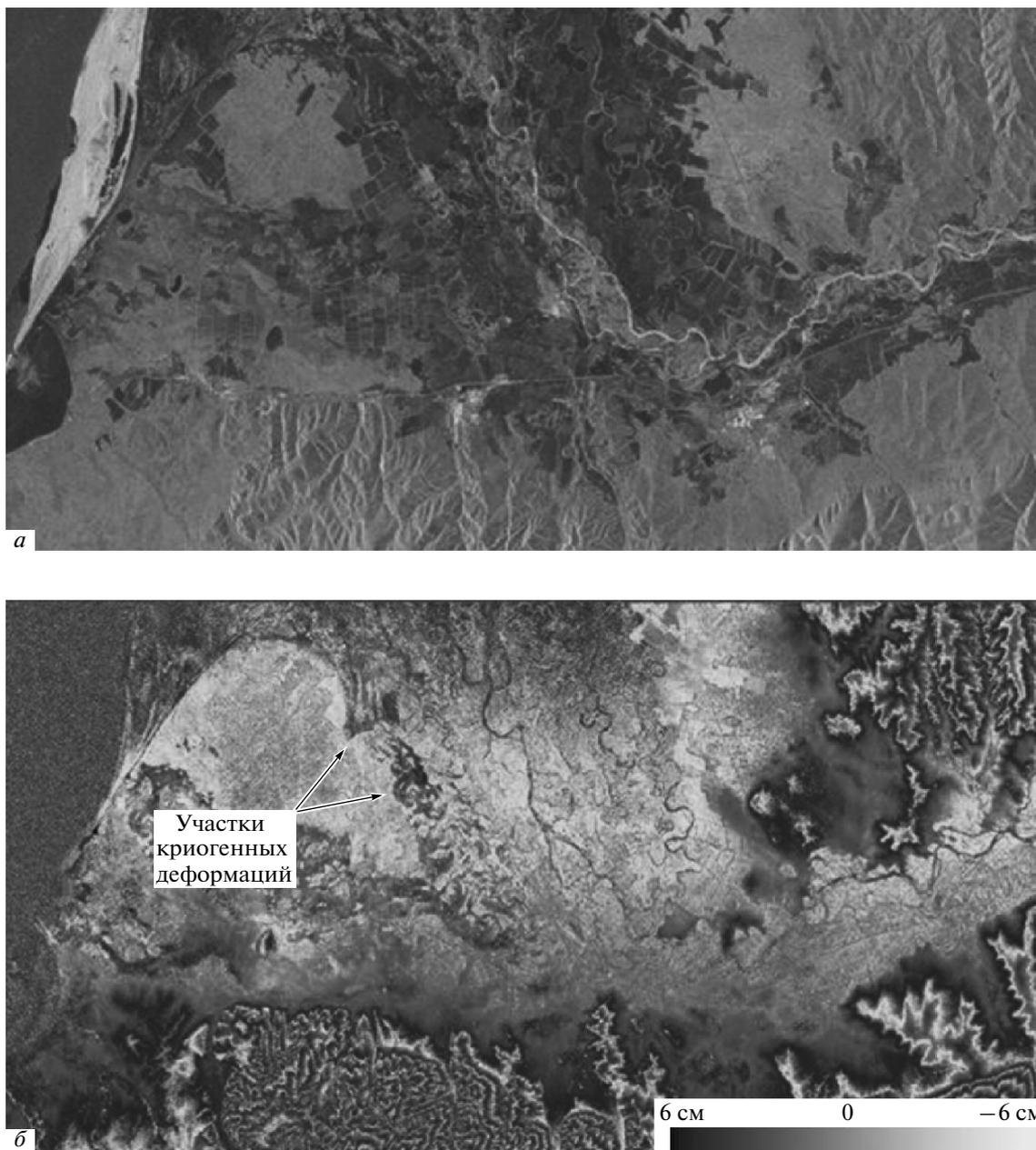


Рис. 1. Амплитудное изображение (а) и интерферограмма (б) для тестового полигона в дельте р. Селенга.

идентифицированы как локальные понижения местности – заболоченная пойма р. Шумиха. Для оценки уровня грунтовых вод на тестовом участке в феврале 2010 г. при мощности снежного покрова до 0.4 м проведены георадарные зондирования. Зондирование выполнено георадаром “Око-2” с антенным блоком АБ-400, имеющим центральную частоту спектра зондирующего импульса 400 МГц и глубину зондирования до 5 м (Радиотехнический прибор, 2009). Георадарный профиль длиной 220 м пересекает пойму и надпойменную террасу р. Шумиха, разность высот которых в среднем составляет

4 м. При выполнении георадарного зондирования использовалась навигационная спутниковая GPS система с точностью определения координат в плане  $\pm 30$  м, что вполне достаточно для позиционирования профиля и совмещения его с данными спутниковой интерферометрии, поскольку точность привязки последних несколько хуже. Профиль вертикальных смещений грунта, полученный по интерферограмме, представлен на рис. 2а.

По георадарным данным, мощность приповерхностного мерзлого грунта в пойменной части достигает 1 м; в террасовой – мощность слоя промерз-

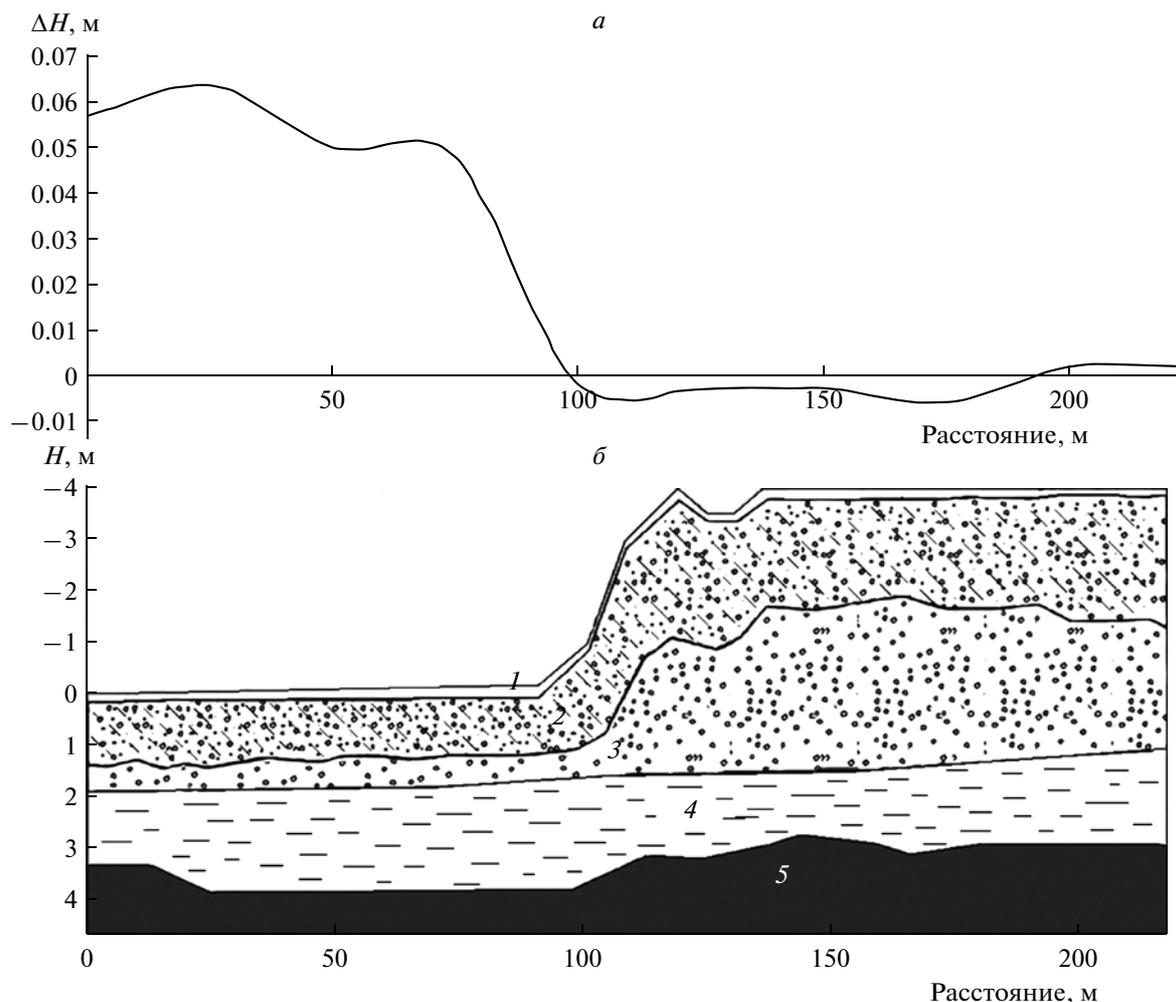


Рис. 2. Результаты измерений по данным спутниковой РЛ-интерферометрии (а) и интерпретационная модель (б) георадарного профиля “Колесово”.

шего грунта возрастает вдвое (рис. 2б). Значительные различия мощности слоя мерзлого грунта объясняются тепляющим влиянием обводненного горизонта, залегающего в пределах поймы на глубине 1.5 м от поверхности, в то время как на террасе водоносный горизонт залегаєт на глубине около 5 м от поверхности. Подошва водоносного слоя прослеживается не на всем протяжении профиля. Можно оценить мощность обводненного горизонта – до 4–5 м в масштабе глубин исходной георадарограммы (принятую для диэлектрической проницаемости  $\epsilon = 4$ ). Реальная толщина обводненного слоя с поправкой на диэлектрическую проницаемость воды составляет 1.5–2 м (рис. 2б).

Сопоставлением вертикальных смещений поверхности рельефа, вычисленных по данным спутниковой дифференциальной РЛ-интерферометрии за период 13 января – 28 февраля 2009 г., с интерпретационной моделью георадарного профиля “Колесово”

установлено, что максимальные значения криогенных деформаций поверхности рельефа достигают +6 см в пойменной части р. Шумиха (рис. 2а). На надпойменной террасе вертикальные смещения незначительны и находятся в пределах

Результаты анализа почвы на исследуемом профиле

Глубина, см	Удельный вес	Гигровлага, %	Влажность, %
0–10	2.03	5.25	100
10–20	1.79	6.76	65.5
20–30	2.06	4.23	74
30–35	То же	4.79	67.5
35–44	»	0.46	16
45–50	2.49	2.22	14
50–60	2.58	0.57	То же

погрешности интерферометрических измерений, которые оцениваются в  $\pm 1$  см.

Цифрами на рис. 2б обозначены: 1 – снег; 2 – мерзлый слой грунта; 3 – талый слой грунта; 4 – обводненный слой грунта; 5 – водоупорный горизонт.

Для определения гранулометрического состава и влажности почвы слоя 2 (см. рис. 2б), на исследуемом профиле были взяты почвенные пробы до глубины 60 см. В пойменной части слоя на глубинах 0–40 см характерно распространение тяжелосуглинистых и глинистых почв, с преобладанием пылеватой и илистой фракции, содержание физической глины достигает 45.8%. Высокая влагоемкость и низкая водопроницаемость затрудняют дренаж почвы и приводят к переувлажнению верхней части разреза (таблица). С увеличением глубины отмечается преобладание песков и супесей, и, как следствие, снижается влажность разреза.

Таким образом, сочетание глинистого и суглинистого состава почв с водным и термическим режимами создают наиболее благоприятные условия для развития процесса морозного пучения верхней части разреза пойменных отложений. Наблюдаемое на интерферограмме формирование криогенных деформаций следует рассматривать как следствие массивного распучивания увлажненных пойменных супесчано-песчаных отложений, суглинков и глины (Шерстнев, 2005).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наземная заверка ареалов короткопериодных (с начала января по конец февраля) деформаций поверхности рельефа Усть-Селенгинской депрессии подтвердила хорошее разрешение РЛ-интерферометрии при картировании областей распространения опасных инженерно-геологических – криогенных – процессов, в частности, деформаций пучения. Исходя из климатических особенностей района, где наибольшее сезонное промерзание грунтов наблюдается в феврале-начале марта, и наземных георадарных измерений, можно предположить, что в конце февраля 2009 г. завершилось промерзание грунтов на всю мощность (до 2.5–3.5 м). Переувлажненность исследуемых участков в пойме р. Шумиха, их удаленность от основного русла Селенги на 3–6 км способствовали формированию линейных зон криогенных деформаций – в основном за счет массивного распучивания пойменных отложений суглинистого и глинистого состава, а не в результате подъема поверхности рельефа при формировании сезонно-напорных вод.

Отсутствие аналогичных поднятий земной поверхности на более обводненных участках, в частности, в пределах рукавов современной дельты Селенги, связано, вероятно как с преобладанием в

сезонно-мерзлом слое хорошо дренируемых супесчано-песчаных отложений, так и с отепляющим действием водного потока и оз. Байкал.

Исследования криогенных деформаций увлажненных грунтов методом спутниковой дифференциальной радарной интерферометрии могут быть полезны при планировании строительства, оценки интенсивности и прогноза криогенных процессов на больших площадях, при составлении инженерно-геологических карт, зонировании территорий в целях землеустройства и земельного кадастра, составлении генпланов поселений.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 08-05-98038, 08-02-98010-р) и междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 20.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Захаров А.И., Тугаринов П.В.* Исследование динамики ледовых покровов побережья Антарктиды по данным интерферометрической съемки РСА “Алмаз-1” // Радиотехника. 1998. № 12. С. 63–67.

*Кучерявенкова И.Л., Захаров А.И.* Применение радарной интерферометрии для исследования динамики земных покровов и тропосферы // Исслед. Земли из космоса. 2002. № 3. С. 35–43.

Радиотехнический прибор подповерхностного зондирования (георадар) ОКО-2. Техническое описание. Инструкция по эксплуатации. Версия 2.6. 2009 г. / <http://www.logsys.ru/>

*Киселев М.Ф.* Предупреждение деформации грунтов от морозного пучения. Л.: Стройиздат, 1985. 130 с.

*Шестернев Д.М.* Криогенные процессы Забайкалья. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 262 с.

*Fielding E.J., Blom R.G., Goldstein R.M.* Rapid subsidence over oil fields measured by SAR interferometry // Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25. № 17. P. 3215–3218.

*Gabriel A.K., Goldstein R.M., and Zebker H.A.* Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. P. 9183–9191.

*Rosen P.A., Hensley S., Joughin I.R., Li F.K., Madsen S.N., Rodrigues E., Goldstein R.M.* Synthetic aperture radar interferometry // Proc. IEEE. 2000. V. 88. № 3. P. 333–382.

*Xia Ye.* Bam earthquake: Surface deformation measurement using radar interferometry // Acta Seismol. Sinica. 2005. V. 18. № 4. P. 451–459.

*Zebker H.A., Rosen P.A., Goldstein R.M., Gabriel A., Werner C.L.* On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. P. 19617–19634.

## **Study of Soils Cryogenic Deformation in Selenga River Delta by Means of SAR Interferometry and Georadar Sounding**

**T. N. Chymitdorzhiev<sup>1</sup>, A. I. Zakharov<sup>2</sup>, G. I. Tatkov<sup>3</sup>, V. B. Haptanov<sup>1</sup>, A. V. Dmitriev<sup>1</sup>,  
R. C. Budaev<sup>3</sup>, J. B. Cybenov<sup>4</sup>.**

*<sup>1</sup>Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude*

*<sup>2</sup>Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, Fryazino, Moscow Region*

*<sup>3</sup>Geological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude*

*<sup>4</sup>Institute of General and Experimental Biology, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude*

An assessment of INSAR technique applicability for clayey soils local deformations because of frosts heave was made. Qualitative validation of radar interferometric measurements by means of soils georadar sounding and laboratory analysis of soil granulometric composition and moisture was carried out. It is shown that INSAR technique allows the detection of areas of cryogenic deformations and estimation of the deformations amplitude.

**Keywords:** radar interferometry, georadar sounding, cryogenic deformations, clayey soils

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

### ОЦЕНКА КОЛИЧЕСТВЕННЫХ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОСЕВОВ НАРКОСОДЕРЖАЩИХ КУЛЬТУР ПО ДАННЫМ АВИАЦИОННОГО ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

© 2011 г. В. В. Егоров<sup>1\*</sup>, А. А. Ильин<sup>2</sup>, А. П. Калинин<sup>3</sup>, А. И. Родионов<sup>2</sup>, И. Д. Родионов<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Учреждение Российской академии наук Институт космических исследований РАН, Москва

<sup>2</sup> ЗАО НТЦ “Реагент”, Москва

<sup>3</sup> Учреждение Российской академии наук Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

<sup>4</sup> Учреждение Российской академии наук Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва

\*E-mail: victor\_egorov@mail.ru

Поступила в редакцию 30.11.2010 г.

Рассматриваются вопросы методики оценки состояния наркосодержащих культур по данным авиационной гиперспектральной съемки с привлечением наземных измерений на тестовом полигоне. Для определения биометрических характеристик указанных культур применяется алгоритм нейронных сетей. Показано, что алгоритмы нейронных сетей обеспечивают приемлемые для практики точности оценки состояния наркосодержащих культур. Предлагаемая методика может использоваться для мониторинга посевов наркосодержащих растений с авиационных и космических носителей.

**Ключевые слова:** гиперспектрометр, конопля, нейросеть, биометрические характеристики, оценка состояния, точность, мониторинг

#### ВВЕДЕНИЕ

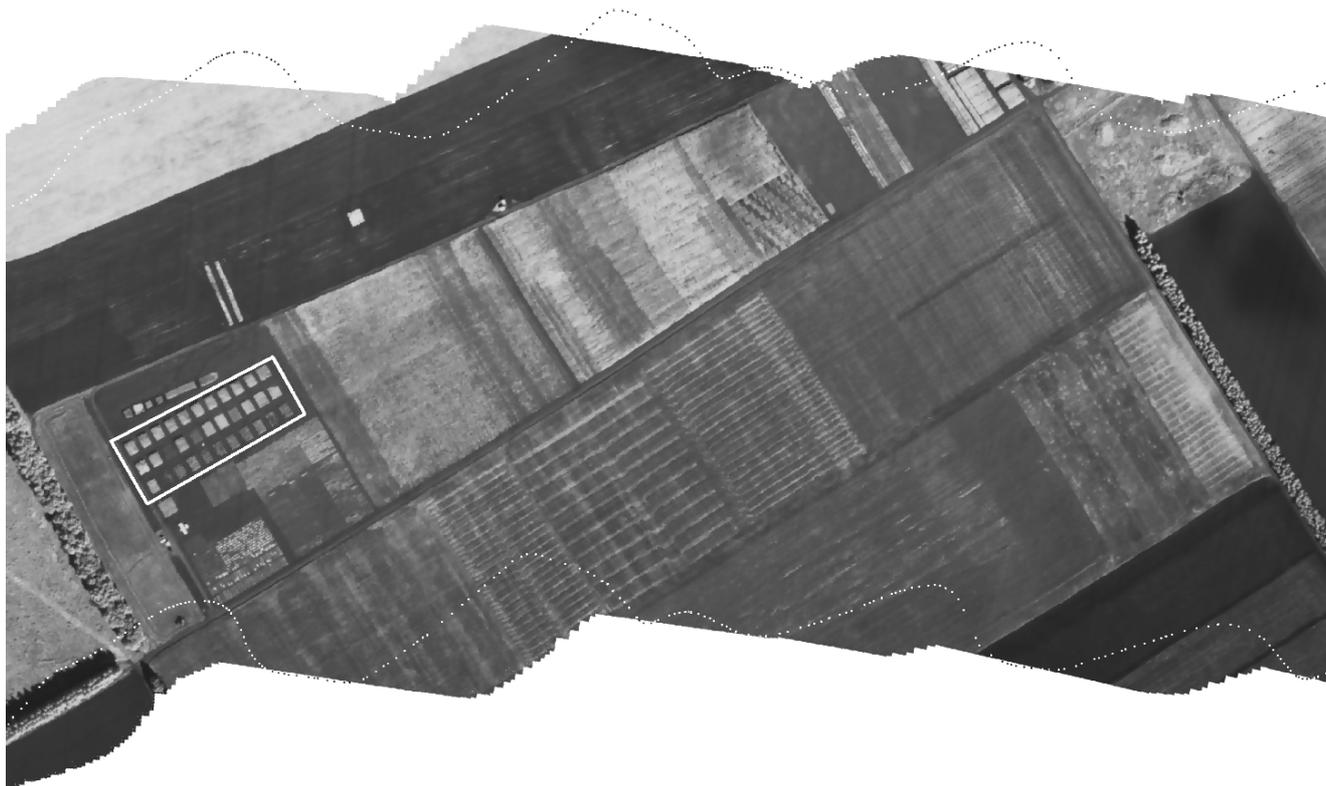
Вопросы оперативной оценки состояния посевов наркосодержащих культур по данным космического зондирования представляются весьма актуальными как с экономической и социальной точек зрения, так и с позиций обеспечения безопасности РФ. Однако сегодня многие технические и методические аспекты этой проблемы проработаны недостаточно полно. В частности, не определены наиболее рациональные методы и средства оперативного мониторинга территорий, на которых возможно наличие посевов наркосодержащих культур, отсутствуют надежные результаты оценки биометрических параметров таких культур, а также точностные характеристики подобных оценок. Наиболее привлекательными на сегодня выглядят методы и средства космического гиперспектрального мониторинга территорий на предмет обнаружения, распознавания и оценки состояния наркосодержащей растительности. Однако отсутствие адекватной методической базы сдерживает их широкое практическое применение и выдвигает на первый план проведение исследований с применением авиационных гиперспектральных средств, съемка с которых сопровождалась бы синхронными измерениями *in situ*. Разработанная и апробированная на результатах авиационной гиперспектральной съемки методика, адаптированная к данным космического мониторинга, найдет практическое

применение в задачах оперативного контроля выращивания наркосодержащих культур. В данной работе такие исследования проводились на примере посевов конопли.

Под биометрическими параметрами понимаются такие характеристики конопли, как проективное покрытие, высота растений, диаметр стебля, ширина листа, процентное содержание поскони и т.п. Посконью называются мужские растения конопли, содержащие меньшее количество дельта-9-тетрагидроканнабинола (ТГК). Обычно, говоря о наркотических веществах конопли, имеют в виду именно содержание ТГК.

В ряде научных исследований (Saich et al., 2000; Непобедимый и др., 2004; Балтер и др., 2008) проводилось изучение возможностей распознавания и оценки состояния фитоценозов, включая посевы наркосодержащих культур, по данным аэрокосмического многоспектрального и гиперспектрального дистанционного зондирования (ДЗ). Однако однозначных ответов на сформулированные выше вопросы в указанных работах не дано. Возможно, это связано со спецификой решаемой проблемы, а также с трудоемкостью проводимых исследований.

Цель настоящей работы — апробация и оценка эффективности методов оперативного определения состояния посевов наркосодержащих растений по данным авиационной гиперспектральной съемки и наземных измерений на примере исследований посевов конопли на фоне других фито-



**Рис. 1.** Видеосъемка фрагмента трассы на территории Пензенской области, включающего тестовый полигон (мира), выделенный белым прямоугольником.

ценозов, а также открытой почвы в Пензенской области.

### МЕТОДЫ И СРЕДСТВА

Для получения данных ДЗ о состоянии фитоценозов на территории Пензенской области использовался созданный в ЗАО НТЦ “Реагент” бортовой авиационный гиперспектрометр, прототип которого подробно описан в работе (Калинин и др., 2006).

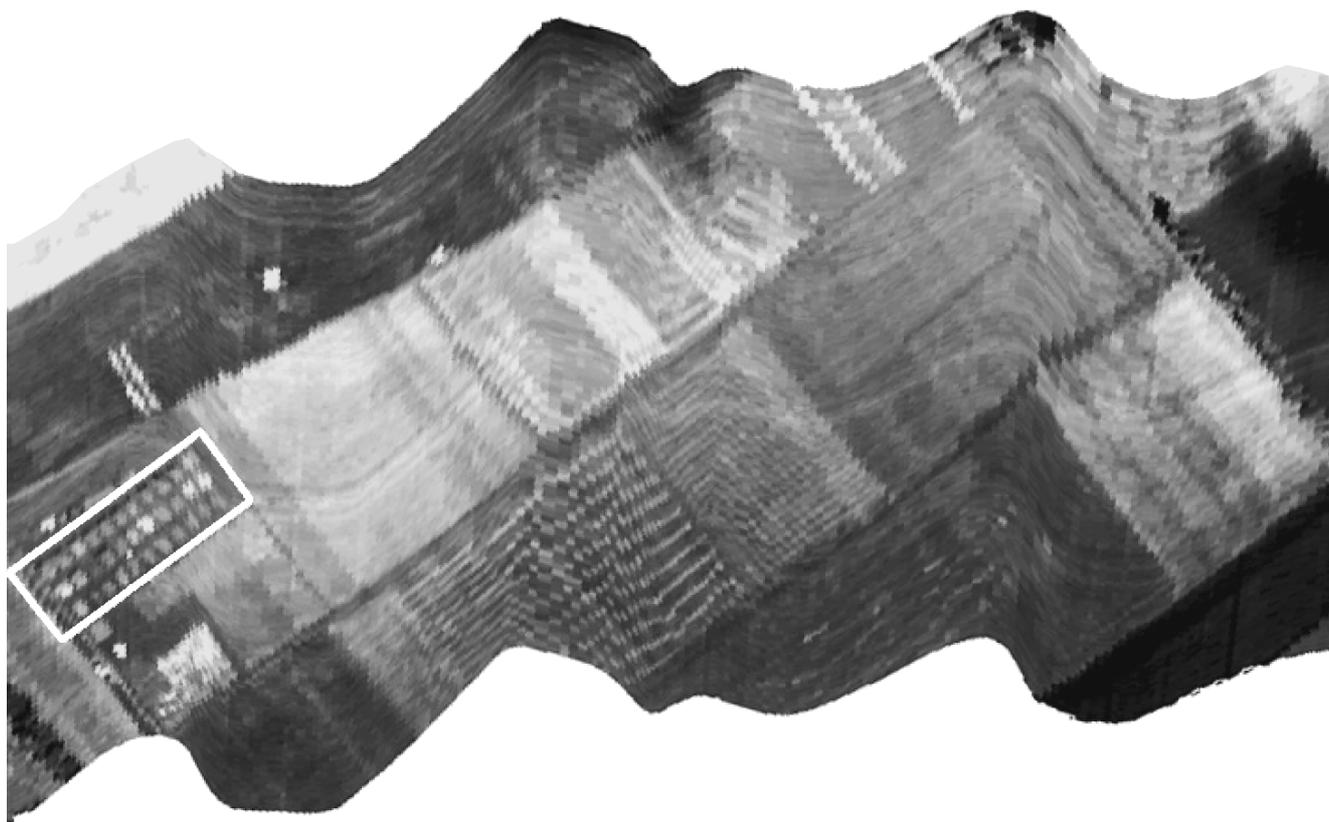
Основные характеристики гиперспектрометра:

– спектральный диапазон	500–900 нм
– спектральное разрешение	1–10 нм
– пространственное разрешение	$1 \times 10^{-3}$ рад
– число спектральных каналов	224
– отношение сигнал/шум	более 100

Гиперспектрометр устанавливался на вертолет Ми-8МТВ. Трассовая съемка местности производилась в безоблачную погоду в июле 2006 г. с высоты 1000 м при скорости полета 130 км/ч. Синхронно с гиперспектральной проводилась видеосъемка, результаты которой использовались для геометрической коррекции гиперспектральных изображений и их географической привязки к

местности (Балтер и др., 2007). На рис. 1 показан результат видеосъемки фрагмента трассы на территории Пензенской области, включающего тестовый полигон (мира) с 33 участками (размер участка  $10 \times 10 \text{ м}^2$ ), занятыми различными типами растительности (из них 11 участков, расположенных слева на трассе, были заняты посевами конопли). На всех этих участках проводились также наземные наблюдения. На рис. 2 приведено гиперспектральное изображение того же участка территории на длине волны 537 нм. Отметим, что при оценке биометрических характеристик растительности использовались данные всех 224 спектральных каналов. Результаты измерений *in situ* для участков, занятых коноплей, которые в дальнейшем были выбраны в качестве обучающих и тестовых, представлены в таблице. В ней приведены данные наземных измерений для трех биометрических характеристик, исследование которых проводилось в работе.

Основные задачи заключались: а) в получении радиометрически и геометрически исправленных гиперспектральных изображений с использованием синхронной гиперспектральной и видеосъемки; б) в проведении оценки состояния наркосодержащих культур с использованием нейросетевого алгоритма с прямой связью (feed-forward) по полученным гиперспектральным



**Рис. 2.** Гиперспектральное изображение фрагмента трассы на территории Пензенской области, включающего тестовый полигон (мира), полученное на длине волны 537 нм.

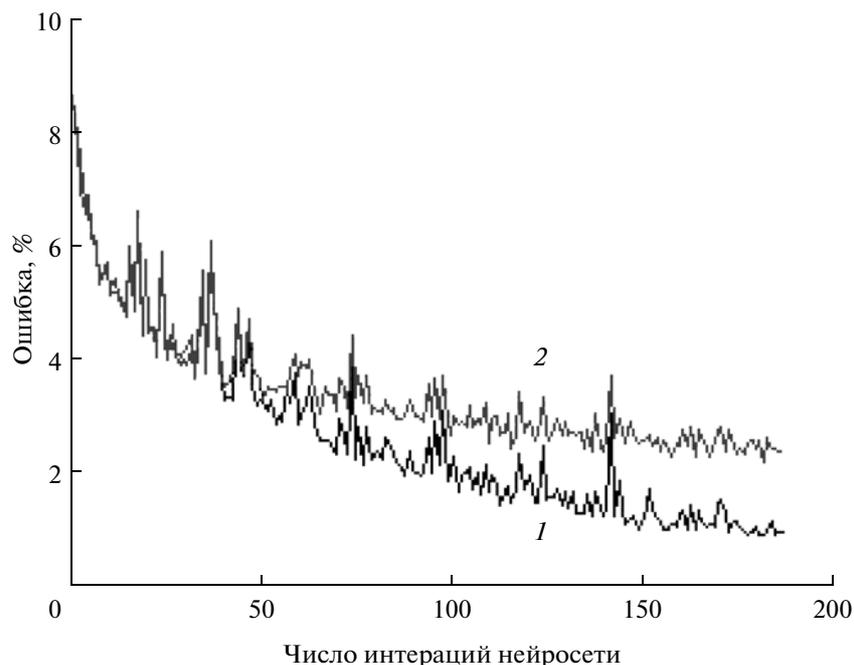
изображениям. Обучение нейросети проводилось по методу обратного распространения ошибки (backpropagation) (Priddy, Keller, 2005); в) в оценке точности определения биометрических характеристик наркосодержащих культур.

Некоторые биометрические характеристики участков мира с коноплей по данным наземных измерений

Номер участка	Средняя высота растений, см	Проективное покрытие, %	Содержание поскони, %
1	95	75	8
2	94	65	то же
3	67	55	30
4	98	75	5
5	92	80	9
6	105	85	6
7	80	65	5
8	87	75	2
9	то же	85	4
10	75	70	7
11	70	15	6

Решение проблемы оценки биометрических характеристик конопли на основе данных гиперспектральной съемки наиболее эффективно, по нашему мнению, на основе алгоритма искусственных нейронных сетей (нейросетей). Основное преимущество нейросетей – возможность значительного повышения скорости вычислений. В частности, для решения задачи оценки количественных характеристик растительности по спектральным данным могут применяться нейронные сети с прямой связью (feed-forward), обучаемые по методу обратного распространения ошибок (backpropagation). Используемым нейросетевым алгоритмом является перцептрон (Галушкин, 1999), а способ его обучения (метод обратного распространения ошибки) представляет собой градиентный алгоритм обучения, который используется для минимизации среднеквадратичного отклонения текущего выхода и желаемого выхода нейросети.

Для проведения оценки параметров состояния конопли 11 участков мира, занятых ею, были разбиты на ячейки. Их размеры соответствовали пикселям гиперспектрального изображения. Для каждого из 11 участков эти ячейки случайным образом распределялись на обучающие и тестовые (общее число ячеек равнялось 1100). Число обу-



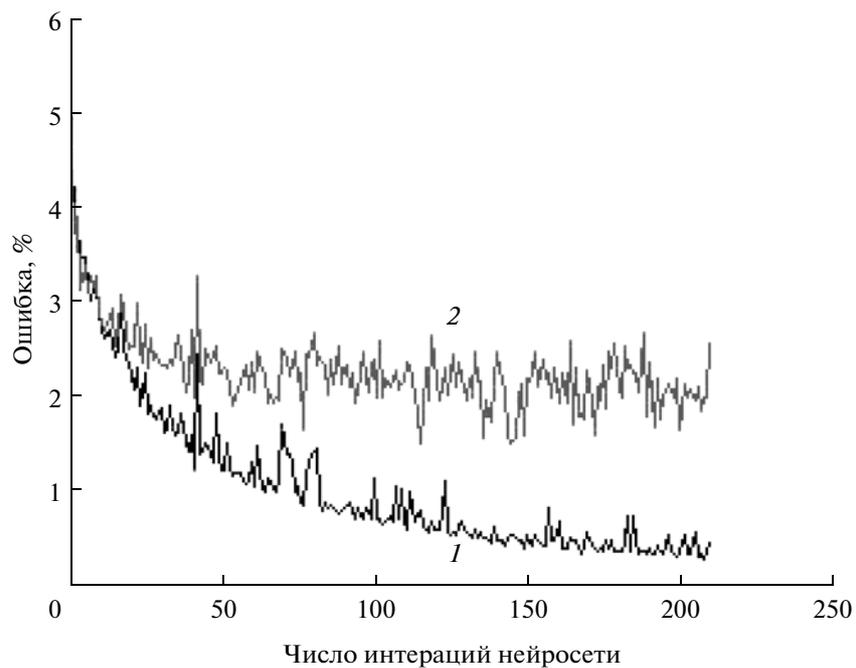
**Рис. 3.** Среднеквадратичная ошибка определения проективного покрытия почвы коноплей: 1 – по обучающим участкам, 2 – по тестовому участку.

чающих ячеек в 3 раза превосходило число тестовых. После этого проводилось обучение нейросети, для чего использовались наземные данные и спектральные характеристики для каждой из обучающих ячеек. Нейронная сеть обучалась следующим образом: случайным образом выбиралось небольшое число обучающих данных (гиперспектральные сигнатуры и биометрические характеристики растительности), и по этим входным данным подстраивались синоптические связи нейросети с использованием метода обратного распространения ошибки. В работе эта процедура названа итерацией. Затем выполнялась следующая аналогичная итерация и т.д. Для полного обучения нейросети необходимо осуществить некоторое количество таких итераций. Поскольку в каждой итерации используется небольшое число обучающих данных (порядка 20), то для достижения минимального значения ошибки определения биометрической характеристики растительности требуется достаточно большое число итераций. Обученная нейросеть применялась для оценки количественных характеристик конопли (на примере проективного покрытия, высоты растений и содержания поскони). После каждой итерации обучения проводилось оценка биометрических характеристик конопли по случайному набору небольшого числа тестовых данных.

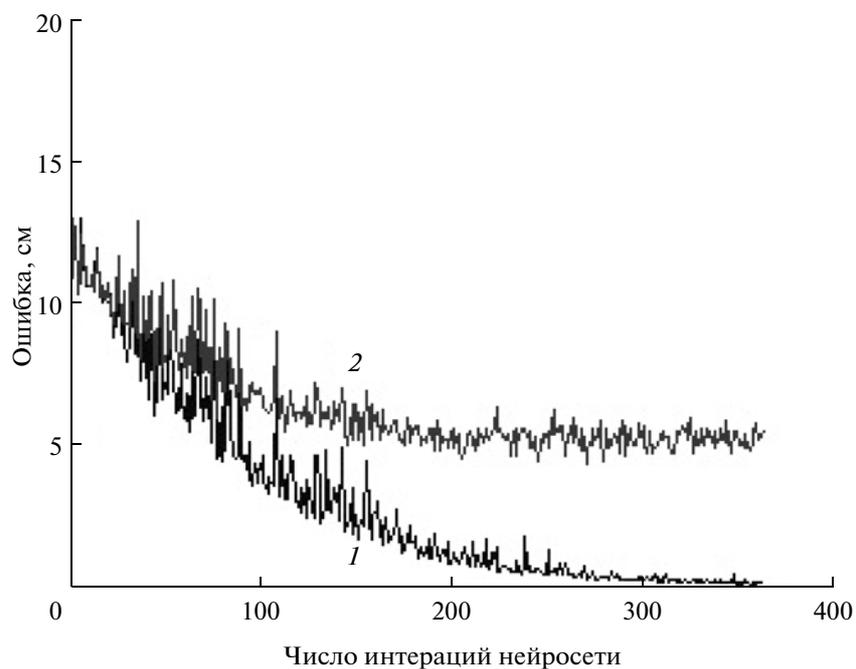
Кривая зависимости ошибки, полученная для тестовых данных, может, как убывать, так и возрастать. Как правило, кривая зависимости среднеквадратичной ошибки от шага итерации на

обучающих участках убывает. Убывание означает успешное протекание процесса обучения, а возрастание означает так называемое переобучение сети. В этом случае изменение параметров архитектуры нейросети может исправить ситуацию. Если же эта процедура не улучшает качество обучения, то следует брать обучаемую нейросеть в момент, предшествующий возрастанию ошибки на тестовых данных. При стабилизации ошибки на тестовых участках (или снижении ее величины ниже заранее заданного порогового значения) настройку нейросети прекращают, поскольку это означает, что процесс ее обучения успешно завершен.

На рис. 3–5 показаны графики хода стандартных ошибок в зависимости от числа итераций обучения нейросети. На рис. 3 и 4 показаны абсолютные значения ошибки (%), поскольку сами величины проективного покрытия и содержания поскони измеряются в процентах. На рис. 5 показана абсолютная ошибка в определении высоты в сантиметрах. Из этих рисунков видно, что, как и следовало ожидать, погрешность определения биометрических характеристик конопли на обучающих участках убывает быстрее и по абсолютной величине ниже погрешности оценки на тестовых участках. Ошибки на обучающих и тестовых участках на рис. 3–5 отображаются в зависимости от числа итераций (Priddy, Keller, 2005). Отметим, что реальная величина ошибки оценки биометрических характеристик конопли на тестовых участках при числе итераций больше 100 не превышает 6% (проективное покрытие и высота растений), что свидетельствует о



**Рис. 4.** Среднеквадратичная ошибка определения содержания поскони в посевах конопли: 1 – по обучающим участкам, 2 – по тестовому участку.



**Рис. 5.** Среднеквадратичная ошибка определения высоты конопли: 1 – по обучающим участкам, 2 – по тестовому участку.

сравнительно высокой потенциальной точности оценки этих характеристик. В то же время реальная относительная ошибка определения содержания поскони была значительной – в среднем порядка 30%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка методов распознавания и оценки биометрических характеристик посевов наркосодержащих растений по данным авиационной ги-

перспектральной съемки — первый этап в создании технологии оперативного контроля с космических и авиационных носителей за несанкционированным выращиванием наркосодержащей растительности. Используемые в них алгоритмы нейросетевой обработки гиперспектральных данных являются эффективным инструментом в решении задач оценки состояния растительных объектов.

Следует отметить, что настоящая работа носит методический характер и поэтому целесообразно продолжение данного исследования при разнесении обучающих и тестовых участков на большие расстояния.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Балтер Б.М., Егоров В.В., Ильин А.А., Калинин А.П., Орлов А.Г., Останний А.Н., Родионова И.П., Родионов И.Д.* Оценка возможностей гиперспектральной съемки для дистанционного обнаружения заданного типа растительности. Препринт № Пр-2134. М.: ИКИ РАН, 2007. 28 с.

*Балтер Б.М., Егоров В.В., Ильин А.А., Калинин А.П., Орлов А.Г., Родионов И.Д., Стальная М.В., Чекалина Т.И.* // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 6. С. 34–42

*Галушкин А.И.* Нейрокомпьютеры и их применение // Докл. 5-й Всерос. конф. М.: Радио и связь, 1999. 484 с

*Калинин А.П., Орлов А.Г., Родионов И.Д.* // Вестн. МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. Приборостроение. 2006. № 3. С. 11–24.

*Непобедимый С.П., Родионов И.Д., Воронцов Д.В., Орлов А.Г., Калашников С.К., Калинин А.П., Овчинников М.Ю., Родионов А.И., Шилов И.Б., Любимов В.Н., Осипов А.Ф.* // ДАН. 2004. Т. 397. № 1. С. 45–48.

*Priddy K.L., Keller P.E.* Artificial neural networks: an introduction. SPIE Press, 2005. 165 p.

*Saich P., Lewis P., Disney M., Thackrah G.* Comparison of HyMap/E-SAR data with models for optical reflectance and microwave scattering from vegetation canopies // Proc. Int. Symp. Retrieval bio- and geophysical parameters from SAR data for land applications. Sheffield, Sept. 2001 (ESA SP-475, Jan. 2000).

### Biometrical Features Seeds Estimation of Narcotic Culture on the Base of Aircraft Hyperspectral Remote Sensing

V. V. Egorov<sup>1</sup>, A. A. Ilyin<sup>2</sup>, A. P. Kalinin<sup>3</sup>, A. I. Rodionov<sup>2</sup>, I. D. Rodionov<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Space Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow

<sup>2</sup> Stock Company, Reagent Scientific Engineering Centre, Moscow

<sup>3</sup> Ishlinsky Institute of Problems in Mechanics of Russian Academy of Sciences, Moscow

<sup>4</sup> Semyonov Institute of Chemical Physics of Russian Academy of Sciences, Moscow

Estimation of vegetation status on the aviation hyperspectral data and *in situ* measurements are developed. For evaluation of biometrical characteristics neural network algorithm was used. It was shown that neural network algorithm provides acceptable for practical aims accuracy of biometrical characteristic estimation. The proposed method can be used for the practical control of cannabis crop from aviation and space platforms.

**Keywords:** hyperspectrometr, cannabis, classification, neural network, biometric characteristics, reliability, accuracy

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЕСНЫХ И ТОРФЯНЫХ ПОЖАРОВ ПО ДАННЫМ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО АЭРОЗОНДИРОВАНИЯ

© 2011 г. В. В. Козодеров\*, Т. В. Кондранин, Е. В. Дмитриев, В. П. Каменцев

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

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

Поступила в редакцию 02.03.2011 г.

Рассматриваются особенности аэрокосмической гиперспектрометрии при реализации методов классификации соответствующих изображений. Приводится описание существующих подходов к построению классификаторов (вычислительных процедур) для распознавания природно-техногенных объектов на гиперспектральных изображениях. Обосновывается эффективность разрабатываемых методов при уменьшении размерности признакового пространства исходных спектров и уменьшении объема обучающих выборок для выбранных классов объектов. По данным совмещенной гиперспектральной и аэрофотосъемки демонстрируются примеры спектрального хода дымов разной степени интенсивности от лесных и торфяных пожаров при наличии очагов возгорания и их отсутствии, задымления водных поверхностей, для лесной растительности, не тронутой пожарами на выбранной территории. Полученные примеры обучения классификаторов используются для распознавания иллюстрируемых сцен аэрозондирования в период летних пожаров на тестовой территории.

**Ключевые слова:** гиперспектральные аэрокосмические изображения, распознавание природно-техногенных объектов, вычислительные процедуры, лесные и торфяные пожары

#### ВВЕДЕНИЕ

С повышением разрешающей способности космических снимков, увеличением геометрической точности привязки и появлением составных ортофотомозаик данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса начинают играть инфраструктурную роль. Примером служат проекты Google Earth и др., доступность которых в сети Интернет способствует замещению традиционных картографических материалов данными космической съемки. Этот сегмент рынка все активнее осваивается компаниями с частным капиталом, поскольку создается высокоинтеллектуальный информационный продукт коммерческого использования. Инфраструктура пространственных данных (ИПД) как составная часть “электронного правительства” в кадастровых, геоинформационных и других системах имеет непосредственное отношение к оказанию услуг в сфере земельно-имущественных отношений, строительства, где велика роль бизнеса (Пространственные данные ..., 2010). При этом пакеты прикладных программ обработки данных гиперспектрального и многоспектрального зондирования (ERDAS, ENVI и др.), поставляемые зарубежными фирмами, содержат лишь некоторые стандартные процедуры классификации объектов по их аэрокосмическим изображениям.

Жесткая конкуренция разработчиков космических систем сверхвысокого пространственного

разрешения (менее 1 м, но с малым числом спектральных каналов) приводит к особой востребованности информационной продукции обработки данных именно такого разрешения со стороны пользователей для целей ИПД. Возможности космических систем гиперспектрального зондирования (Huregion и др.) до конца не ясны, как и создание вычислительных сред для развития возникающих новых приложений. Традиционные приложения развиваются в форме создания географических информационных систем (ГИС), интегрирующих базы данных различного назначения. В России основной акцент в ГИС сделан на среду ESRI (Environmental Systems Research Institute) – название дано американской компанией, которая существует на мировом рынке уже около 40 лет. Программная составляющая в этой среде невелика по сравнению с вкладом специалистов в области географии, геодезии, картографии и смежных наук. В то же время хорошо известна среда MATLAB, в которой сосредоточены основные приложения методов вычислительной математики. При обработке данных гиперспектрального зондирования, когда требуется оптимизация числа спектральных каналов в заданной предметной области, возрастает роль этой среды как связующего звена между традиционными подходами и новыми приложениями (Козодеров и др., 2010).

Приложения методов аэрокосмической гиперспектрометрии основаны на использовании следующих вычислительных процедур: выбор спектров объектов для обучения; рассмотрение признакового пространства исходных данных дистанционного зондирования; построение классификаторов для распознавания объектов. В данной публикации приводится краткий обзор построения классификаторов для распознавания природно-техногенных объектов по их гиперспектральным изображениям, рассматривается постановка задачи обучения по тестовой выборке, приводятся примеры спектров разных объектов. В развитие начального этапа исследований (Дмитриев и др., 2010) здесь основной акцент сделан на сравнении спектров районов, охваченных лесными и торфяными пожарами летом 2010 г. и не охваченных пожарами на тестовой территории Тверской обл.

### КРАТКИЙ ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ КЛАССИФИКАЦИИ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Одной из первой систем гиперспектрального аэрозондирования была аппаратура “Самолетный гиперспектрометр видимой и ближней инфракрасной области” (Airborne Visible Infra-Red Imaging Spectrometer/AVIRIS) (Green et al., 1998) со спектральным разрешением около 10 нм в области длин волн от 0.4 до 2.5 мкм. Обработка данных гиперспектрального зондирования приводит к усложнению математического формализма распознавания образов соответствующих объектов в сравнении с обработкой данных многоспектрального зондирования. Возникают специфические задачи классификации объектов и анализа спектральной смеси данных для объектов, попадающих в поле зрения аппаратуры. Большинство существующих приложений данных гиперспектрального зондирования основано на анализе спектральных, а не пространственных свойств обрабатываемых данных (Hsieh, Landgrebe, 1998).

Проблема обработки данных гиперспектрального аэрокосмического зондирования содержит два аспекта: требуется обрабатывать данные очень большого объема, хотя пространственная корреляция для соседних пикселей может быть очень высокой; высокое пространственное разрешение, которое может содержать тонкие детали интерпретации конкретной сцены, в некоторых приложениях может не улучшать результаты интерпретации такой сцены. Вследствие стремления к использованию малого объема обучающих выборок и большого числа характерных признаков в регистрируемых спектральных образах объектов возникают трудности надежной оценки параметров состояния этих объектов при их статистической классификации по данным гиперспектрального зондирования (Foody, Mathur, 2004). В результате

при ограниченной обучающей выборке точность классификации уменьшается, хотя число признаков (регистрируемого разнообразия кривых спектрального хода) возрастает.

Один из путей учета многомерности признакового пространства гиперспектральных данных – рассмотрение геометрических свойств разделения классов вместо их статистических свойств. Метод опорных векторов (Support Vector Machine/SVM) (Bruzzone et al., 2006) – пример преимуществ неполного обучения в сочетании с контекстуальной информацией. В методе опорных векторов акцент делается на изучение локальных вариаций спектральной энергии путем введения семейства пространственно инвариантных функций, называемых ядрами, для реализации соответствующего процесса обучения классификатора (Plaza et al., 2009). Исходный бинарный классификатор этого метода позволяет построить оптимальную гиперплоскость, которая для заданной обучающей последовательности максимизирует границу между классами при минимизации суммы ошибок классификации (Scholkopf et al., 1998). Решается так называемая проблема выпуклой оптимизации.

Введение понятия спрямляющего пространства позволяет использовать идеологию SVM для построения нелинейного классификатора. При этом производится преобразование скалярного произведения введением тех или иных ядерных функций. В качестве последних наиболее часто используются полиномиальные или гауссовские. Если есть априорная информация, позволяющая сделать удачное предположение относительно вида разделяющей поверхности, то ее учет в ядерной функции данного метода позволяет улучшить результаты классификации либо хотя бы сократить расчетное время.

Возможно расширение бинарного классификатора метода SVM на случай большого числа классов. При этом используются классические стратегии “один против одного” и “один против остальных”. Отличительная черта метода – достижение очень высокой точности классификации (порядка 90% и выше при построении полной матрицы ошибок) для любой из используемых ядерных функций, даже если число обучающих пикселей составляет всего несколько десятков. Достигаются такие высокие показатели за счет того, что при реализации классификатора контролируется попиксельная энергия спектров в соответствии с используемой нормой выделения границ между классами.

Стандартный подход рассматриваемых ядерных методов – декомпозиция проблемы множества классов на проблему пар классов (Hsu, Lin, 2002). Тогда стандартные SVM-классификаторы могут быть реализованы в параллельных расчет-

ных схемах. Но обычно число обучающих векторов в каждой паре классов неодинаково, что приводит к тому, что процессоры, для которых используется большое число обучающих векторов, будут отставать от остальных процессоров. Получается, что один из процессоров становится “хозяином” (master), а остальные – “рабами” (slaves, workers), с точки зрения реализации алгоритма параллельных вычислений на многопроцессорных компьютерах. В реальности ускорение расчетных процедур за счет использования нескольких процессоров по сравнению с одним из них не бесконечно и носит нелинейный характер, достигая при определенном их числе оптимальной производительности.

Достижения в производительности компьютеров кластерного типа или распределенных сетей (grids) с созданием специализированных программных модулей характеризуют реально высокий потенциал обработки данных гиперспектрального зондирования с акцентом на параллельные вычисления. Распознавание образов (pattern recognition) – обширная область прикладной математики, в которой исследуются особенности компьютерных систем выделять характерные признаки (features) объектов на окружающем их фоне (background) и принимать решения по возможной классификации образов этих объектов на основе сравнения выделенных признаков и текущих измерений состояния объектов. Типичными являются две разные процедуры распознавания образов объектов по данным ДЗ: классификация с обучением (supervised classification); классификация без обучения (unsupervised classification), т.е. использование свойства кластеризации объектов в пространстве признаков. Любая конструкция системы распознавания образов содержит следующие элементы: усвоение и предварительная обработка данных; принятие решений о принадлежности текущих элементов распознающей системы к тем или иным классам объектов. Любая система распознавания функционирует тем самым в двух модах: обучение (training) и классификация (testing). Терминология распознавания включает также: “обучение с учителем” (supervised learning) – с использованием помеченных выборочных данных (labeled training samples); “обучение без учителя” (unsupervised learning) – без помеченных выборочных данных (unlabeled training samples). Модель принятия решений обычно строится таким образом, чтобы добиться малых внутриклассовых вариаций и больших межклассовых вариаций (Jain et al., 2000).

Принципы статистического распознавания образов основаны на том, что каждый образ объекта отображается как вектор в признаковом пространстве. Задача состоит в том, чтобы добиться компактного размещения векторов в признаковом пространстве, принадлежащих разным клас-

сам. Эффективность алгоритма распознавания определяется тем, как разделяются эти классы. Имея набор обучающих образов для каждого класса, решается задача разделения границ между разными образами в признаковом пространстве. Задача разделения классов (дискриминантного анализа) формулируется как задача принятия решения на основе линейных или квадратичных функций и далее нахождения “наилучшей” разделяющей границы (используя, например, критерий среднеквадратичной ошибки) на основе обучающих образов. Нейронные сети рассматриваются как модели параллельных компьютерных систем с большим числом процессоров и взаимных связей, а также с некоторыми принципами организации (способность к обучению, адаптивность, т.е. возможность приспособления к новым связям, генерализация, т.е. возможность расширения отдельных результатов для общих случаев). Указанные модели применимы для нахождения самых общих связей, в том числе нелинейных, между входными и выходными данными в процедурах распознавания образов.

Возвращаясь к необходимости соответствия исходных (training) и тестовых (testing) наборов данных, следует иметь в виду, что чем меньше первый из этих наборов, тем меньшим обобщением (генерализацией) обладает классификатор. В этом случае говорят о его невысокой “робастности”. С другой стороны, если мал тестовый набор данных, то низкой оказывается статистическая значимость (уровень доверия) полученных результатов. Если же рассматривать процедуры “классификации без учителя”, то задача построения классификатора для обработки данных гиперспектрального зондирования сводится к нахождению свойств группирования (кластеризации) образов объектов в многомерном признаковом пространстве. Задача кластерного анализа в реальности очень сложна: образы в пределах определенной группы (кластера) должны обладать какими-то более сходными свойствами, чем образы, принадлежащие разным кластерам; каждый кластер должен иметь большее сгущение точек, чем в областях между этими кластерами. Наиболее часто используемые алгоритмы “*K*-средних” (разбиения области сгущения точек на *K*-кластеров на основе минимизации среднеквадратических отклонений) (Benz et al., 2004) не могут объяснить условия начального и последующих разбиений на кластеры, критерий остановки соответствующих разбиений.

В работе (Dalponte et al., 2009) показаны особенности использования данных гиперспектрального зондирования для классификации лесной территории с точностью около 90%. Аналогичная точность достигнута в работе (Clark et al., 2005) при изучении тропической растительности по данным гиперспектральной аппаратуры HYDICE с использованием трех разных классификаторов. В

исследованиях подобного типа используются вычислительные процедуры полного анализа матрицы ошибок, включая ошибку “ложной тревоги” и “пропуска цели” (Козодеров, Дмитриев, 2010). Стоит задача обоснования оптимального набора спектральных каналов, обеспечивающих решение конкретной прикладной задачи с определенной точностью.

Из представленных материалов обзора следуют два основных вывода, касающихся повышения эффективности распознавания гиперспектральных изображений: возможность уменьшения размерности признакового пространства; возможность минимизации числа обучающих пикселей для выбранных классов объектов. Первая из указанных возможностей реализуется на основе вычислительных процедур дискриминантного анализа (Bandos et al., 2009). Метод опорных векторов (Vapnik, Chapelle, 2000) способствует реализации второго подхода.

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ С ОБУЧЕНИЕМ ПО ТЕСТОВОЙ ВЫБОРКЕ

Каждый спектр гиперспектрального зондирования отображается в виде вектора в многомерном признаковом пространстве с размерностью, равной числу каналов, а множество текущих спектров отображается в виде отдельных точек кластеризации в этом пространстве. В процедурах распознавания двух классов объектов линейный дискриминантный анализ составляет поиск оптимальной в смысле байесовского подхода разделяющей плоскости между двумя множествами точек. Задача построения классификатора в этом случае сводится к линейному преобразованию  $\mathbf{G}$ , которое проектирует выборку из векторов  $\mathbf{x}$  исходного признакового пространства в пространство меньшей размерности. В иллюстрируемых ниже примерах размерность вектора  $\mathbf{x}$  соответствует числу используемых спектральных каналов (до 232). Указанное преобразование можно представить как

$$\mathbf{u} = \mathbf{G}^T \mathbf{x},$$

где  $\mathbf{x}$  – вектор размерности  $n$ ,  $\mathbf{u}$  – вектор отображения, имеющий размерность  $m < n$ ,  $\mathbf{G}$  – матрица размерности  $m \times n$ ,  $T$  – знак транспонирования матрицы. Строками матрицы  $\mathbf{G}^T$  служат  $m$  выбранных векторов-признаков, т.е. коэффициентов линейной связи исходных спектров и их отображения в признаковом пространстве. Здесь и далее векторы описания спектров в пространстве признаков обозначаются как  $\mathbf{x} = (x^1, \dots, x^n)$ , а векторы описания элементов обучающих выборок как  $x_i$  (также и для других рассматриваемых ниже

векторов), хотя для этих величин предполагается, что  $\mathbf{x}_i = (x_i^1, \dots, x_i^n)$ .

Задача отыскания матрицы преобразования в случае общего числа  $L$  классов состоит в том, чтобы выбрать направление  $\mathbf{d}$  в признаковом пространстве, вдоль которого расстояния средних векторов для каждого класса было максимальным, а вариации вокруг этих средних были минимальными, что соответствует критерию нахождения следующего максимума:

$$\text{Arg max}_{\mathbf{d}} (\mathbf{d}^T \mathbf{S}_b \mathbf{d} / \mathbf{d}^T \mathbf{S}_w \mathbf{d}),$$

где в соответствии с общей матрицей рассеяния  $\mathbf{S} = \mathbf{S}_b + \mathbf{S}_w$ , которая служит оценкой общей ковариационной матрицы гиперспектральных данных, введены обозначения:

– межклассовая вариация исходных векторов для каждой из групп классов ( $n_i$ )

$$\mathbf{S}_b = n^{-1} \sum_{i=1}^L n_i (\mu_i - \mu)(\mu_i - \mu)^T,$$

– внутриклассовая вариация

$$\mathbf{S}_w = n^{-1} \sum_{j=1}^L \sum_{i \in U_j} n_i (x_i - \mu_j)(x_i - \mu_j)^T,$$

где  $\mu_i$  – выборочные средние значения,  $U_j$  означает индексный набор признаков, принадлежащих классу  $j$ .

При предположениях нормального распределения образов  $i$ -го класса и равенства всех ковариационных матриц  $\mathbf{C}_1 = \mathbf{C}_2 = \dots = \mathbf{C}_M = \mathbf{C}$  для исходных спектров математическое ожидание ( $\mu_i^*$ ) их отображения  $\mathbf{u}$  можно записать как

$$\mu_i^* = \mathbf{G}^T \mu_i,$$

что позволяет представить ковариационную матрицу такого отображения в виде

$$\mathbf{V} = E \left\{ \left( \mathbf{u} - \mu_i^* \right) \left( \mathbf{u} - \mu_i^* \right)^T \right\} = \mathbf{G}^T E \{ \mathbf{z} \mathbf{z}^T \} \mathbf{G} = \mathbf{G}^T \mathbf{C} \mathbf{G},$$

так как  $E \{ \mathbf{z} \mathbf{z}^T \} = \mathbf{C}$  для  $\mathbf{z} = \mathbf{x} - \mu_i$  ( $E$  – символ математического ожидания).

В реальности для полученных квадратных матриц размерности  $m \times m$  требуется найти отклонение математического ожидания среднего квадрата общей матрицы  $\mathbf{Q}$  рассеяния спектров относительно квадрата среднего значения этой матрицы, что необходимо для решения задачи оптимальной делимости классов объектов по их спектральным признакам. Это отклонение определяется следом (trace) произведения ука-

занной матрицы  $\mathbf{Q}$  и матрицы  $\mathbf{V} = \mathbf{V}(\mathbf{u})$  дисперсий-ковариаций элементов вектора  $\mathbf{u}$  (Дрейпер, Смит, 1986):

$$\text{trace}(\mathbf{QV}) = E(\mathbf{V}^T \mathbf{QV}) - E\mathbf{V}^T \mathbf{Q} E\mathbf{V}.$$

След любой матрицы по определению равен сумме ее диагональных элементов. В нашем случае фигурирует квадратичная форма  $\mathbf{V} = \mathbf{G}^T \mathbf{S}_b \mathbf{G}$  для матрицы межклассового рассеяния спектров и аналогичная ей форма  $\mathbf{Q} = (\mathbf{G}^T \mathbf{S} \mathbf{G})^{-1}$  для обратной матрицы общего рассеяния спектров. Таким образом, окончательно записанный выше критерий разделимости классов можно записать в виде

$$\mathbf{G}^* = \text{Arg max}_{\mathbf{G}} \left\{ \text{trace}(\mathbf{G}^T \mathbf{S} \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{S}_b \mathbf{G} \right\}.$$

Полученное решение задачи классификации объектов в признаковом пространстве уменьшенной размерности (в сравнении с исходным многомерным пространством, равным числу каналов гиперспектрального зондирования) может быть упрощено, если разложить матрицу  $\mathbf{S}^{-1} \mathbf{S}_b$  по собственным векторам и выбрать главные компоненты изменчивости спектров.

В процедурах квадратичного дискриминантного анализа, получаемых на основе байесовского подхода, сохраняются основные возможности понижения размерности признакового пространства с отмеченными здесь следствиями нахождения оптимальных критериев разделимости классов. При построении классификатора делается предположение, что внутри каждого класса  $i$  (для каждого объекта) признаки имеют многомерное нормальное распределение  $D_i = N(m_i, S_i)$ , где  $m_i$  и  $S_i$  соответственно математические ожидания и матрицы ковариаций каждого класса. Наиболее вероятный класс  $i_{opt}$  определяется как

$$i_{opt} = \text{arg max}_i \left( \ln(P(x \sim D_i)) - \frac{1}{2}(x - m_i)^T \times \right. \\ \left. \times S_i^{-1}(x - m_i) - \frac{1}{2} \ln(\det(S_i)) \right).$$

Если ковариационные матрицы разных классов отличны друг от друга, то соответствующие разделяющие поверхности представляются полиномами второго порядка.

Дальнейшее повышение эффективности вычислительных процедур распознавания объектов на гиперспектральных изображениях связано с возможностью уменьшения длины обучающей выборки для каждого класса без ущерба для точности распознавания. При бинарной классификации задано пространство исходных спектров в виде векторов  $\mathbf{x}$  и множества предварительных ответов о разделении классов  $\mathbf{y}$  (например,  $-1$  и  $+1$ ). Для обучающей выборки задана целевая функция разби-

ения на классы, а требуется построить алгоритм, аппроксимирующий целевую функцию на всем пространстве обрабатываемых гиперспектральных данных. Для весовых векторов  $\mathbf{w}$ , линейно связывающих векторы  $\mathbf{x}$  и  $\mathbf{y}$ , и свободного члена  $b$ , характеризующего пересечение разделяющей плоскости с координатными осями, можно одновременно максимизировать зазор (margin) (минимизируется норма вектора  $\mathbf{w}$ ) и минимизировать суммы ошибок всех  $\xi_i$  объектов-нарушителей. Это те объекты, которые в процессе обработки данных могут попадать на другую сторону разделяющей гиперплоскости. При нелинейном отображении  $\Phi(\mathbf{x})$  решающее правило соответствует разделению классов по знаку

$$\text{sign}[a(\mathbf{x})],$$

где  $a(\mathbf{x}) = \langle \mathbf{w}, \Phi(\mathbf{x}) \rangle + b$ ,

$\langle \dots \rangle$  – символ скалярного произведения векторов.

В методе опорных векторов на объектах обучающей выборки  $\mathbf{x}_i$ ,  $i = 1, \dots, J$  решается оптимизационная задача (Dalponte et al., 2009):

$$1/2 \langle \mathbf{w}, \mathbf{w} \rangle + C \sum_i \xi_i \rightarrow \min | \mathbf{w}, b, \xi;$$

$$y_i (\langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle - b) \geq 1 - \xi_i, \xi_i \geq 0;$$

$C \geq 0$  – управляющий параметр регуляризации решения.

Построение оптимальной разделяющей гиперплоскости для общего случая линейно неразделимой выборки сводится к следующей задаче нелинейного программирования. Для всех векторов  $\mathbf{x}_i$  обучающей выборки задача сводится к минимизации квадратичной формы при следующих ограничениях-неравенствах (их общее число равно длине выборки):

$$\langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle + b \leq -1, \quad \text{если } y_i = -1;$$

$$\langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle + b \geq 1, \quad \text{если } y_i = +1.$$

В рассматриваемой постановке задача эквивалентна двойственной задаче поиска седловой точки функции Лагранжа:

$$L(\mathbf{w}, b, \xi, \alpha, \eta) = 1/2 \langle \mathbf{w}, \mathbf{w} \rangle - \\ - \sum_i \alpha_i (y_i (\langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle + b) - 1) - \sum_i \xi_i (\alpha_i + \eta_i - C),$$

где с учетом сделанных выше замечаний относительно векторов обучающих выборок предполагается:  $\alpha_i = (\alpha_1, \dots, \alpha_J)$  – вектор двойственных переменных решаемой минимаксной задачи (min по  $\mathbf{w}$  и  $b$ ; max – по  $\alpha$ ),  $\eta_i = (\eta_1, \dots, \eta_J)$  – вектор переменных, двойственных по отношению к переменным  $\alpha_i$ .

Учитывая то обстоятельство, что необходимое условие седловой точки – равенство нулю производных функции Лагранжа, можно получить яв-

ное выражение для вектора  $w$  и свободного члена  $b$ , а также соответствующие условия связи введенных векторов

$$\begin{aligned} \partial L / \partial w = w - \sum_i \alpha_i y_i x_i = 0 \rightarrow w = \sum_i \alpha_i y_i x_i, \\ b = y_i - \langle w, x_i \rangle; \end{aligned}$$

$$\partial L / \partial b = -\sum_i \alpha_i y_i = 0 \rightarrow \sum_i \alpha_i y_i = 0;$$

$$\partial L / \partial \xi_i = -\alpha_i - \eta_i + C = 0 \rightarrow \alpha_i + \eta_i = C.$$

Все объекты обучающей выборки  $x_i$  называются опорными векторами (support vector), если  $\alpha_i > 0$  и  $y_i = \langle w, x_i \rangle + b$ . Соответственно при так называемом отступе (margin)  $m_i = y_i - (\langle w, x_i \rangle + b)$  объектов  $x_i$  от границы классов все объекты делятся на три типа:

$\alpha_i = 0$ ;  $\eta_i = C$ ;  $\xi_i = 0$ ;  $m_i > 1$ . Объект  $x_i$  классифицируется правильно и находится далеко от разделяющей полосы. Это периферийные объекты;

$0 < \alpha_i < C$ ;  $0 < \eta_i < C$ ;  $\xi_i = 0$ ;  $m_i = 1$ . Объект  $x_i$  классифицируется правильно и лежит в точности на границе разделяющей полосы. Это опорные объекты;

$\alpha_i = C$ ;  $\eta_i = 0$ ;  $\xi_i > 0$ ;  $m_i < 1$ . Объект  $x_i$  либо лежит внутри разделяющей полосы, но классифицируется правильно ( $0 < \xi_i < 1$ ;  $0 < m_i < 1$ ), либо попадает на границу класса ( $\xi_i = 1$ ;  $m_i = 0$ ), либо относится к чужому классу ( $\xi_i > 1$ ;  $m_i < 0$ ). Это объекты-нарушители.

Итог рассмотренных вычислительных процедур: для быстрого нахождения всех векторов-коэффициентов  $w$  решается задача выпуклой оптимизации, имеющая единственное решение

$$\begin{aligned} \max_{\alpha} \left\{ \sum_i \alpha_i - 1/2 \sum_{i,j} \alpha_i \alpha_j y_i y_j \langle x_i, x_j \rangle \right\}; \\ 0 < \alpha_i < C; \quad \sum_i \alpha_i y_i = 0. \end{aligned}$$

Нелинейность вводится с помощью так называемых ядерных функций

$$K(x_i, x_j) = \langle \Phi(x_i) \Phi(x_j) \rangle,$$

что при отображении  $\Phi: X \rightarrow H$  расширяет пространство ( $X$ ) входных векторов на пространство ( $H$ ). Следствие – сведение задачи бинарной классификации к задаче квадратичного программирования, имеющей единственное решение, относительно двойственных переменных  $\alpha_i$ :

$$\begin{aligned} \max_{\alpha} \left\{ \sum_i \alpha_i - 1/2 \sum_{i,j} \alpha_i \alpha_j y_i y_j \langle \Phi(x_i), \Phi(x_j) \rangle \right\}; \\ 0 < \alpha_i < C; \quad \sum_i \alpha_i y_i = 0. \end{aligned}$$

Если перенумеровать объекты так, чтобы первые  $h$  объектов оказались опорными, то поскольку  $\alpha_i = 0$  для всех неопорных объектов,  $i = h + 1, \dots, J$ , при решающем правиле  $\text{sign}[a(x)]$  дискриминантная функция определяется суммированием следующего выражения только по опорным векторам используемой выборки ( $i = 1, \dots, h$ ):

$$a(x) = \sum_i \alpha_i y_i K(x_i, x) + b,$$

где ядерная функция должна быть симметричной  $K(x_i, x_j) = K(x_j, x_i)$  и неотрицательно определенной

$$\iint_{X \times X} K(x, x') g(x) g(x') dx dx' \geq 0$$

для любой функции  $g$ .

При этом следует иметь в виду, что этому соотношению удовлетворяют лишь некоторые из известных функций: полиномиальная, гауссовская и некоторые другие.

Переход от бинарной классификации к проблеме многих классов реализуется в соответствии с двумя возможными стратегиями:

– “каждый против каждого” – решается  $L(L - 1)/2$  бинарных проблем распознавания пары классов и неким “голосованием” определенным класс получает большинство из ансамбля бинарных классификаторов;

– “один против всех”, когда используется правило “победитель забирает все”, т.е. принимается решение, что ценность соответствующей дискриминантной функции наивысшая.

Ниже иллюстрируются приложения перечисленных вычислительных процедур классификации объектов на гиперспектральных изображениях с обучением по тестовой выборке.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 1 (см. на цветн. вклейках) приведен пример совмещенной аэрофотосъемки (а) и гиперспектральной (б) съемки выбранной территории, охваченной и не охваченной лесными и торфяными пожарами на дату съемки 31.07.2010 г. На рис. 1б приведено RGB-синтезированное по исходным 232 каналам изображение гиперспектрометра размерностью  $8262 \times 500$  пикселей. Такое синтезирование позволяет отобразить гиперспектральные данные аэрозондирования в виде пространственного распределения пикселей, близкого к естественным цветам.

Изображение рис. 1б охватывает большую часть исходных кадров аэрофотосъемки (рис. 1а). Слева направо на изображениях рис. 1 можно видеть объекты: дым над торфоразработками, дым над системой озер, отдельные очаги лесных пожаров, разные типы растительности (зеленого и жел-

того цвета) при отсутствии пожаров. На рис. 1а показаны: области закончившегося пожара, но с разной степенью обгорания и текущего задымления (1), фронт интенсивного горения (2), области изменения интенсивности шлейфа дыма (3), дым над поверхностью озер (4), область верхового лесного пожара (5). Видны также лесные массивы вблизи очагов горения (6) и массивы, не тронутые пожарами (7).

Иллюстрируемые ниже примеры демонстрируют исходные спектры в Вт/(см<sup>2</sup> мкм стер) в пределах выделенных контуров на изображениях рис. 1 вместе со стандартными отклонениями этих спектров, а также соответствующие им спектры в нм<sup>-1</sup>, нормированные на интегральную яркость, и их стандартные отклонения. Процедура нормирования спектров необходима для уменьшения влияния внешних факторов съемки (разные условия солнечного освещения, замутнения атмосферы и др.) при распознавании объектов по данным их гиперспектрального зондирования для разных сцен.

Цифры на изображениях рис. 2а–2г (на цветн. вклейках) и на последующих иллюстрациях соответствуют строкам и столбцам исходной матрицы рис. 1б. Пример рис. 2а характеризует самую правую область задымления над лесной растительностью от очага пожара, который можно наблюдать в нижней части рис. 1. Данные рис. 2б и рис. 2в относятся к области другого наблюдаемого очага пожара над лесной растительностью с сильным задымлением (б) и слабым задымлением (в). Данные рис. 2г характеризуют задымление растительности над полянами торфяных разработок (слева на рис. 1б), где видна типичная прямоугольная структура торфоразработок.

На рис. 2д (на цветн. вклейках) показаны спектры и их стандартные отклонения, характеризующие два указанных контура сильного задымления растительности (рис. 2а и рис. 2б), а также ее среднего (рис. 2в) и слабого задымления (рис. 2г). Данные рис. 2е (на цветн. вклейках) относятся к нормированным спектрам и их стандартным отклонениям.

Из данных рис. 2д можно сделать выводы, что типичное проявление сильного задымления — характерный максимум спектров в коротковолновой области (480–550 нм). Другой максимум замечен в области (750–800 нм) с минимумом между этими крайними длинами волн, обусловленным полосой поглощения кислорода (762 нм) в атмосфере. Можно видеть также наличие других полос поглощения во всей области (400–800 нм), а также воздействие полос поглощения водяного пара для длин волн более 800 нм. Если в коротковолновой области кривые рис. 2д пересекаются, то в области другого указанного максимума значения амплитуд спектров для двух выбранных контуров сильного задымления различаются. Различия касаются того,

что кривые красного цвета на рис. 2д характеризуют область, когда очаг горения с высокой температурой среды (пламя от пожара) находится на более близком расстоянии к выбранному контуру, чем в случае кривых зеленого цвета, когда такой очаг удален от оконтуренной области. По мере уменьшения атмосферного задымления зарегистрированные спектры становятся все более похожими на типичные спектры растительности (кривые черного цвета в сравнении с кривыми синего цвета на рис. 2д) с явным проявлением характерного минимума в полосе поглощения хлорофилла (вблизи 670 нм).

Кривые рис. 2е для нормированных спектров отличаются от аналогичных кривых рис. 2д для исходных спектров. Отличия можно заметить в том, что в области 400–700 нм амплитудные значения спектров для разных условий задымления сближаются между собой для разных длин волн. При этом кривые черного цвета (слабое задымление) на рис. 2е продолжают иметь самые низкие значения зарегистрированных яркостей, а кривые синего цвета (среднее задымление) по амплитуде даже превышают кривые красного цвета (сильное задымление). В области 750–800 нм амплитуда нормированных спектров максимальна при слабом задымлении (кривые черного цвета), а минимальна эта амплитуда для практически сливающихся кривых синего и зеленого цветов.

На рис. 3 (на цветн. вклейках) показаны изображения гиперспектрометра с выделенными контурами выборочных спектров, характеризующих фронт горения (а, б) самого правого очага на рис. 1 (с проглядывающей сквозь дым растительностью и при сплошной дымовой завесе, соответственно), а также открытое пламя верхового пожара (в). Выделенным контурам соответствуют исходные спектры, приведенные на рис. 3г, и нормированные спектры, приведенные на рис. 3д.

Из данных рис. 3г можно видеть, что амплитуды спектров фронта горения над растительностью (а) (кривые красного цвета) во всем диапазоне длин волн меньше соответствующих величин для дыма вблизи фронта горения (б) (кривые зеленого цвета). Здесь простое объяснение — дым становится более ярким во всем диапазоне длин волн вблизи очага горения в сравнении с дымом над растительностью от удаленного очага. В области длин волн 400–700 нм спектры для открытого очага горящего леса (кривые синего цвета) располагаются между этими кривыми, но для области 720–800 нм идут выше них. Еще более значительны амплитуды спектров в области 400–700 нм для уже рассмотренного примера контура рис. 2б очень сильного задымления над лесной растительностью (здесь этот пример представлен кривыми черного цвета, которые, как видно, фактически сливаются с кривыми синего и зеленого

цвета для длин волн более 720 нм). Из сказанного можно сделать вывод об определяющей роли именно коротковолновой области спектра при гиперспектральном отображении дымов разной интенсивности и в меньшей степени о зависимости амплитуды наблюдаемой длинноволновой моды от интенсивности пожара. Для нормированных спектров (рис. 3д) спектральные кривые все более стягиваются между собой, отображая факт их меньшей изменчивости для разных пикселей в сравнении с исходными спектрами. При этом максимальные значения в коротковолновой области имеют спектры, относящиеся к районам сильного задымления (черный цвет), минимальные — к районам открытого верхового пожара. В длинноволновой области, наоборот, горящий лес становится более ярким в сравнении с остальными объектами, особенно в случае их сильного задымления.

На рис. 3е представлены два вида уже рассмотренных спектральных кривых и их изменчивости (горящий лес, красный цвет, соответствует рис. 3в; для области сильного задымления над растительностью, зеленый цвет, соответствует рис. 2а). Видно, что кривые для горящего леса идут ниже кривых для области сильного задымления лесной растительности во всей области длин волн 400–1000 нм вопреки интуитивному предположению, что пламя горящего леса должно выглядеть более ярким, чем плотная дымовая завеса.

Примеры рис. 4 (на цветн. вклейках) демонстрируют спектральные свойства дымов разной интенсивности над водной поверхностью. Данные рис. 4а и рис. 4б относятся к большой озерной системе в центре рис. 1а, данные рис. 4в — к одному из маленьких озер, на которые дым не попал. Из сравнения данных рис. 4г можно видеть, что по мере увеличения задымления водных поверхностей увеличивается амплитуда спектров во всей области длин волн 400–900 нм. При этом в области максимума воздействия дымов (460–480 нм) амплитуда спектров при среднем задымлении возрастает почти в 3 раза при переходе от кривых синего цвета на рис. 4г к кривым красного цвета. В меньшей степени различаются между собой нормированные спектры (рис. 4д), хотя указанный максимум в коротковолновой области сохраняется и для этих кривых.

Данные рис. 4е демонстрируют исходные спектры нормально вегетирующей лесной растительности, не подверженной пожару (в правой части рис. 1). Типичный ход этих спектров для всех трех иллюстрируемых видов лесной растительности: максимум вблизи длины волны 550 нм; минимум в полосе поглощения хлорофилла (670 нм); основной максимум в области длин волн 720–800 нм с полосой поглощения кислорода (762 нм); полосы поглощения водяно-

го пара (820 нм, 940 нм). Видно, что различимость спектров этих трех видов лесной растительности в коротковолновом диапазоне длин волн незначительна, но эти спектры достаточно хорошо различаются в области 720–860 нм.

Данные рис. 5 (на цветн. вклейках) относятся к наблюдениям гарей от предшествующих пожаров при весьма малом воздействии текущих пожаров. Эти три участка гарей (а, б, в) расположены слева от второго из наблюдаемых на рис. 1 факелов интенсивных пожаров и дымовой завесы от них. Из данных рис. 5г можно видеть, что выгоревшие участки различаются по форме спектров в области длин волн от 480 нм до 1000 нм. Нормирование спектров на интегральную интенсивность (рис. 5д) приводит к тому, что спектры становятся различимы главным образом в области 480–600 нм, фактически перемешиваясь для разных участков в остальных диапазонах длин волн. Становятся более ярко выраженными, чем ранее, полосы поглощения кислорода (718 нм и 762 нм), водяного пара (820 нм, 940 нм) и др.

Интерес представляет сравнение нормированных спектров одного из участков гари и нормально вегетирующей лесной растительности вблизи очага текущего пожара и вдали от него (рис. 5е). Можно видеть существенное отличие спектрального хода участка гари (кривые красного цвета на рис. 5е) от двух других примеров спектров (кривые зеленого и синего цвета на рис. 5е). Спектр гари резко возрастает от длины волны 400 нм до 480 нм и затем плавно убывает при наличии отдельных пиков, обусловленных полосами поглощения соответствующих соединений атмосферы. Спектры растительности имеют уже упомянутые особенности: рост от длины волны 400 нм до 450 нм, незначительный минимум в области 500 нм, максимум в области 550 нм, полоса поглощения хлорофилла вблизи 670 нм, максимум в области 720–860 нм, убывание спектров для более длинных волн.

Данные рис. 2–5 можно применить в процедурах обучения классификаторов по выделенным контурам соответствующих объектов. Пример классификации гиперспектрального изображения рис. 1б по спектральным признакам показан на рис. 6а (см. рис. 6 на цветн. вклейках). Для распознавания выделенных типов природных объектов использовался квадратичный дискриминантный анализ. В процессе регуляризации решения рассматриваемой задачи проводилось объединение спектральных каналов. В случае, представленном на рис. 6а, использовалось 47 объединенных каналов с разрешением порядка 10 нм. При обучении были задействованы ансамбли выделенных эталонных спектров задымления трех градаций интенсивности над различными объектами.

Оценка степени задымления по грациям яркости осуществлялась в каналах фиолетовой области (коротковолновых каналах). Поскольку в исходных гиперспектральных данных каналы в этой области сильно зашумлены, то для уменьшения этого эффекта использовался “объединенный” канал с центральной длиной волны 414 нм и разрешением 30 нм. По этим данным были выделены наиболее заметные семь градаций яркости в диапазоне 0.023–0.11 Вт/(см<sup>2</sup> мкм стер). Качественно они соответствуют разным грациям плотности дымового шлейфа. Полученные градации степени задымления в виде черно-белых и серых градаций представлены на рис. 6б. Важно отметить, что контуры озер, лесных массивов, лугов и дорог не прослеживаются, поэтому в рамках данной сцены метод определения степени задымления по объединенным каналам фиолетовой области представляется разумным в том смысле, что полученные результаты отражают реальные градации прозрачности атмосферы.

Для облегчения восприятия распознаваемых классов на рис. 6а показаны 9 классов, полученных объединением по смысловому содержанию. Белым цветом отображено преобладание дымов сильной и средней интенсивности. На территории, которая охвачена практически сплошной дымовой завесой, выделены очаги возгорания (красный цвет). В областях слабого или почти отсутствующего задымления распознаются водные поверхности (синий цвет), гари и почвогрунты (черный цвет). Различные типы здоровой лесной растительности, не поврежденной лесными пожарами, находящиеся в правой части рис. 6а, отображены темно зеленым цветом. Редколесье и кустарники обозначены зеленым, пожелтевшая растительность обозначена желтым цветом. Растительность, находящаяся в непосредственной близости от очагов возгорания, подвергается негативному воздействию. На рис. 6а растительность различного типа, подверженная слабому и среднему воздействию пожаров при отсутствии задымления, обозначена сине-зеленым цветом, при слабом задымлении – светло-зеленым. Можно видеть характерные особенности классификации объектов (а) и уровней задымления территории (б).

Основным результатом проведенных исследований являются демонстрация особенностей спектрального хода дымов разной интенсивности, обоснование возможности автоматизации процесса обучения классификаторов по выделенным контурам объектов и реализация процедур распознавания этих объектов по данным их гиперспектрального аэрозондирования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аэрокосмическая гиперспектрометрия – новейшее достижение научно-технологических приложений в области использования оптических измерительных средств для решения прикладных задач. Были показаны особенности отображения лесных пожаров, других объектов природно-техногенной сферы по данным гиперспектрального зондирования и особенности разработки классификаторов (вычислительных процедур распознавания объектов) при обработке гиперспектральных изображений. Открываются перспективы создания новых программно-алгоритмических средств для распараллеливания вычислительных процессов по распознаванию образов наблюдаемых объектов.

Исследования выполняются при финансовой поддержке ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 годы, г/к № П349 и № 14.740.11.1091, проектов РФФИ № 09-05-00171, 11-07-00382, 11-07-12006-офи\_м.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дмитриев Е.В., Козодеров В.В., Кондранин Т.В.* Распознавание объектов для территорий, охваченных лесными пожарами, по данным авиационной гиперспектрометрии // Тр. МФТИ Аэрокосмические исследования, прикладная механика. 2010. Т. 2. № 3. С. 133–140.
- Дрейнер Н., Смит Г.* Прикладной регрессионный анализ. М.: Финансы и статистика, 1986. 366 с.
- Козодеров В.В., Дмитриев Е.В.* Аэрокосмическое зондирование почвенно-растительного покрова: модели, алгоритмическое и программное обеспечение, наземная валидация // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 1. С. 69–86.
- Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Райкунов Г.Г., Казанцев О.Ю., Белоцерковский А.В., Асташкин А.А., Бобылев В.И., Дмитриев Е.В., Каменцев В.П., Борзак В.В., Щербаков М.В., Лесуновский А.А.* Аэрокосмическая гиперспектрометрия: летные испытания аппаратуры, программно-алгоритмическое обеспечение обработки данных // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 5. С. 59–68.
- Пространственные данные в информационных, кадастровых и геоинформационных системах. М.: ГИС-Инфо, 2010. № 2. 80 с.
- Bandos T.V., Bruzzone L., Camps-Valls G.* Classification of hyperspectral images with regularized linear discriminant analysis // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2009. V. 47. № 3. P. 862–873.
- Benz U., Hofman P., Willhauck G., Lingenfelder I., Heynen M.* Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information // ISPRS J. Photogram. Rem. Sens. 2004. V. 58. P. 239–258.
- Bruzzone L., Chi M., Marconcini M.* A novel transductive SVM for the semisupervised classification of remote sensing images // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2006. V. 44. P. 3363–3373.

- Clark M.L., Roberts D.A., Clark D.B.* Hyperspectral discrimination of tropical rain forest tree species at leaf to crown scales // *Rem. Sens. Env.* 2005. V. 96. P. 375–398.
- Dalponte M., Bruzzone L., Vescovo L., Gianelle D.* The role of spectral resolution and classifier complexity in the analysis of hyperspectral images of forest areas // *Rem. Sens. Env.* 2009. V. 113. P. 2345–2355.
- Fauvel M., Gamba P., Gualtieri A., Marconcini M., Tilton J.C., Trianni G.* Recent advances in techniques for hyperspectral image processing // *Rem. Sens. Env.* 2009. V. 113. P. 110–122.
- Foody G. M., Mathur A.* Toward intelligent training of supervised image classifications: Directing training data acquisition for SVM classification // *Rem. Sens. Env.* 2004. V. 93. P. 107–117.
- Green R.O., Eastwood, M. L., Sarture, C. M., Chrien, T. G., Aronsson, M., Chippendale, B. J., et al.* Imaging spectroscopy and the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) // *Rem. Sens. Env.* 1998. V. 65. P. 227–248.
- Hsieh P.-F., Landgrebe D.* Lowpass filter for increasing class separability // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 1998. V. 36. P. 108–125.
- Hsu C.W., Lin C.J.* A comparison of methods for multiclass support vector machines // *IEEE Trans. Neural Networks.* 2002. V. 13. P. 415–425.
- Jain A.K., Duin R.P.W., Mao J.* Statistical Pattern Recognition: A Review // *IEEE Trans. pattern analysis and machine intelligence.* 2000. V. 22. № 1. P. 4–37.
- Plaza A., Benediktsson J.A., Boardman J.W., Brazile J., Bruzzone L., Camps-Valls G., Chanussot J., Fauvel M., Gamba P., Gualtieri A., Marconcini M., Tilton J.C., Trianni G.* Recent advances in techniques for hyperspectral image processing // *Rem. Sens. Env.* 2009. V. 113. P. 110–122.
- Schoolkopf B., Smola A., Muller K.R.* Nonlinear component analysis as a kernel eigenvalue problem // *Neural Computation.* 1998. V. 10. № 5. P. 1299–1319.
- Vapnik V., Chapelle O.* Bounds on error expectation for support vector machines // *Neural Computation.* 2000. V. 12. № 9. P. 2013–2036.

## Forest and Peat Fires Mapping Using Hyperspectral Airborne Remote Sensing Data

V. V. Kozoderov, T. V. Kondranin, E. V. Dmitriev, V. P. Kamentsev

*M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow*

Characteristic features of airspace hyperspectral remote sensing are considered to realize classification techniques for the relevant images. A description is given of the currently available approaches to construct classifiers (computational procedures) for the natural and anthropogenic objects recognition in hyperspectral images. Efficiency is accounted for the elaborated techniques while decreasing the dimensionality of the feature space and decreasing the sample volumes in supervising procedures for the selected object classes. Examples are revealed of the spectral distribution of smokes with various degree of their intensity from the forest and peat fires in the presence of fire sources and their absence, dust of fires under water bodies, for the forest vegetation that is not caused by the fires within the selected area. The obtained results of the supervising procedures are used for the pattern recognition and scene analysis in airborne images obtained for the test areas during forest fire season.

**Keywords:** hyperspectral airborne imagery, natural and anthropogenic objects recognition, computational procedures, forest and peat fires

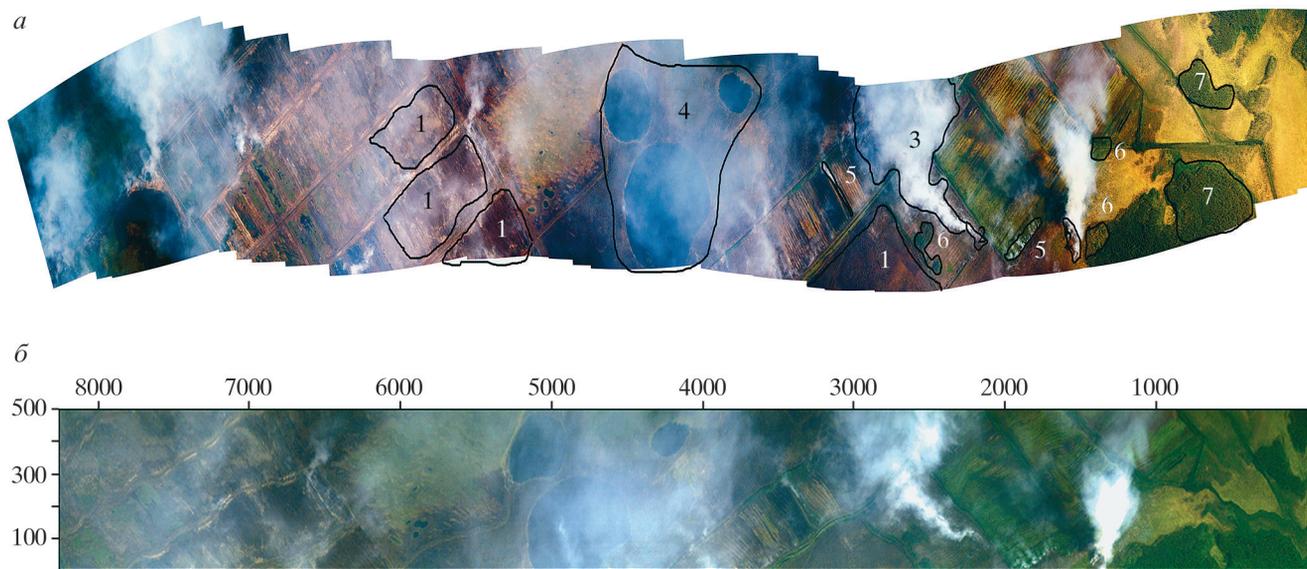


Рис. 1. Аэрофотоснимок иллюстрируемой территории (а) и гиперспектральное изображение этой территории (б).

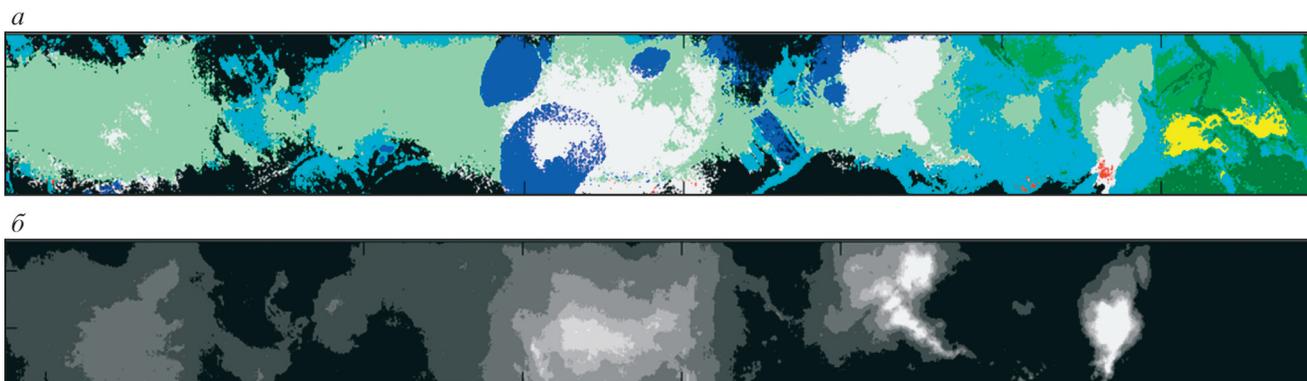


Рис. 6. Результаты тематической обработки гиперспектрального изображения рис.1б: классификация с использованием результатов квадратичного дискриминантного анализа (а) и градации (от черного к белому) степени задымления территории (б).



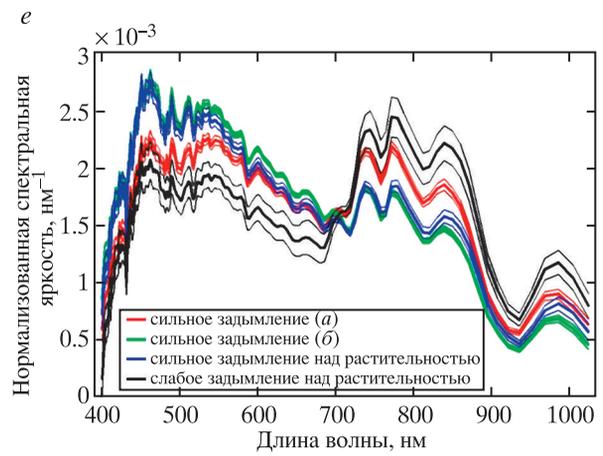
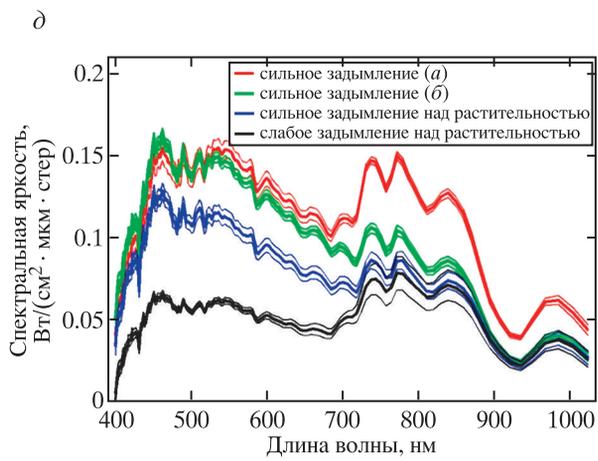
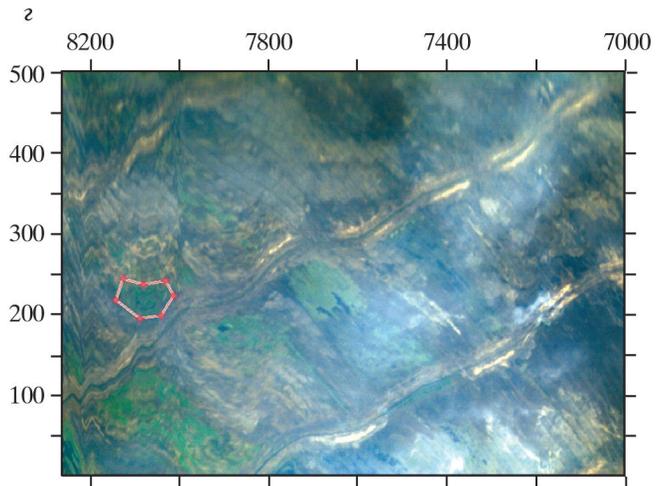
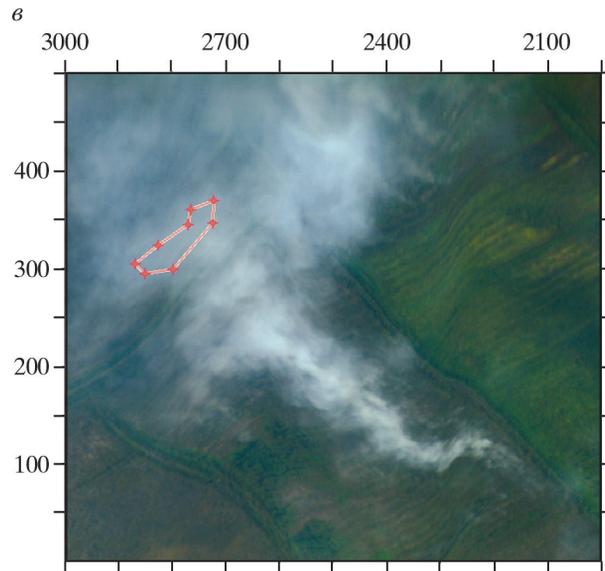
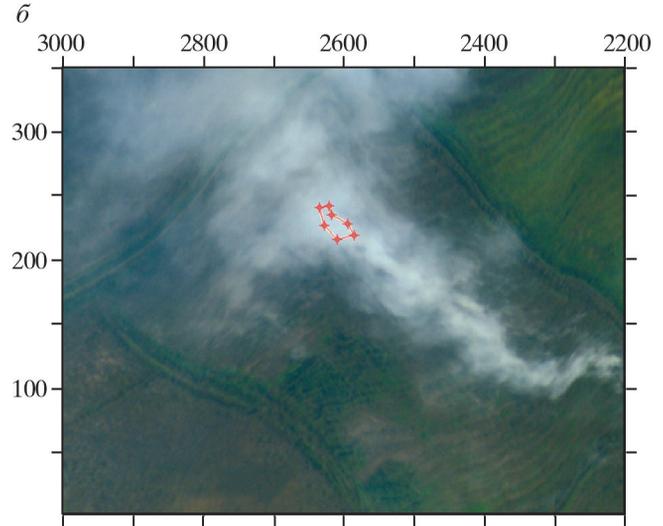
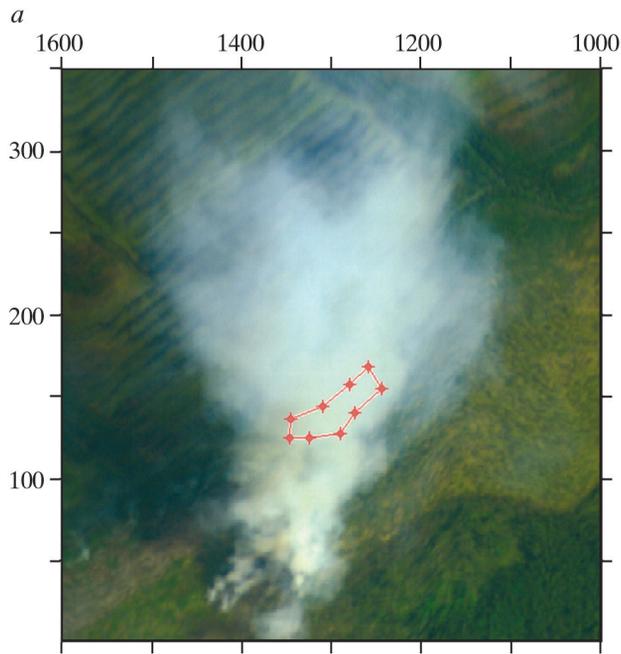
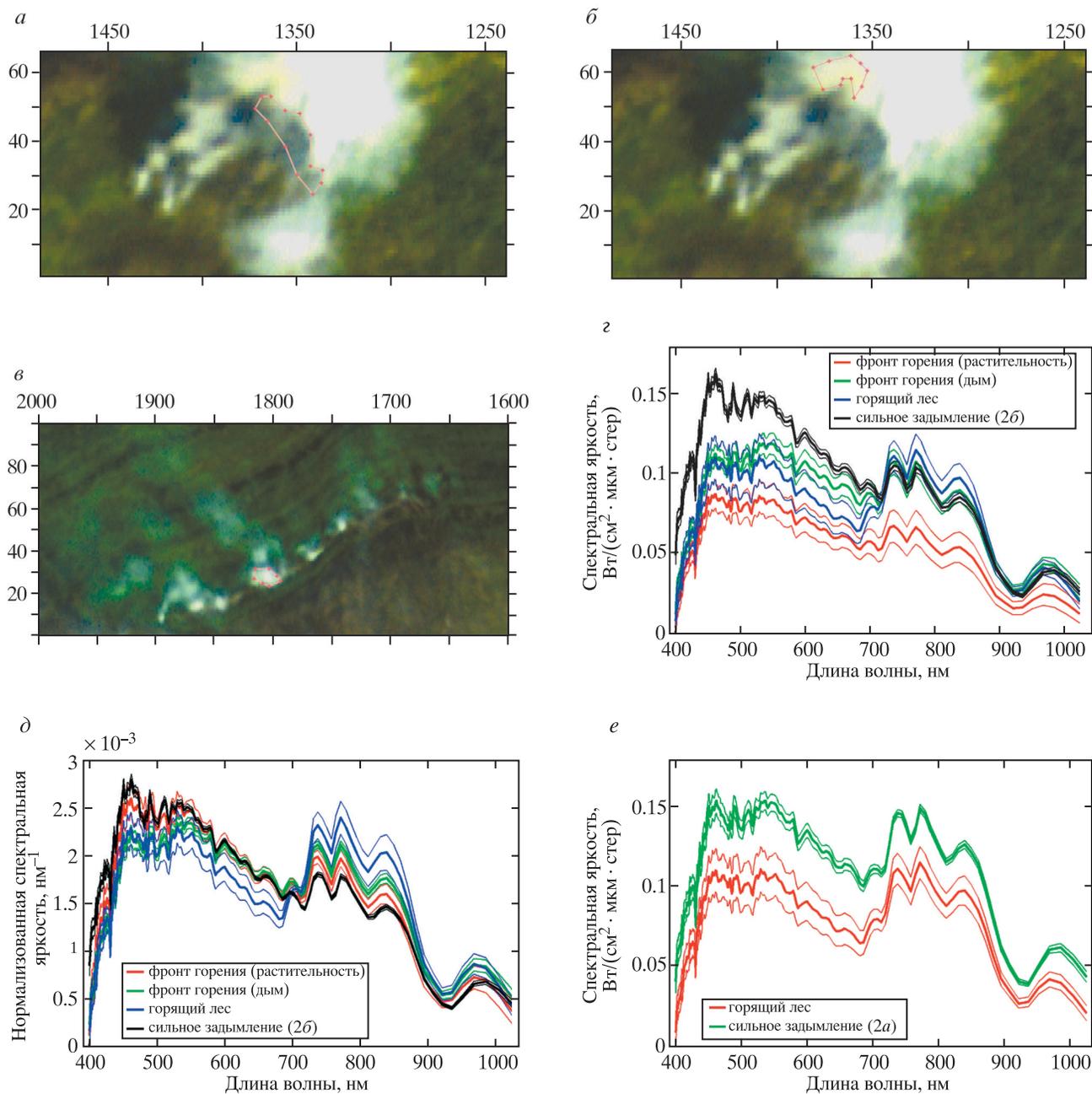


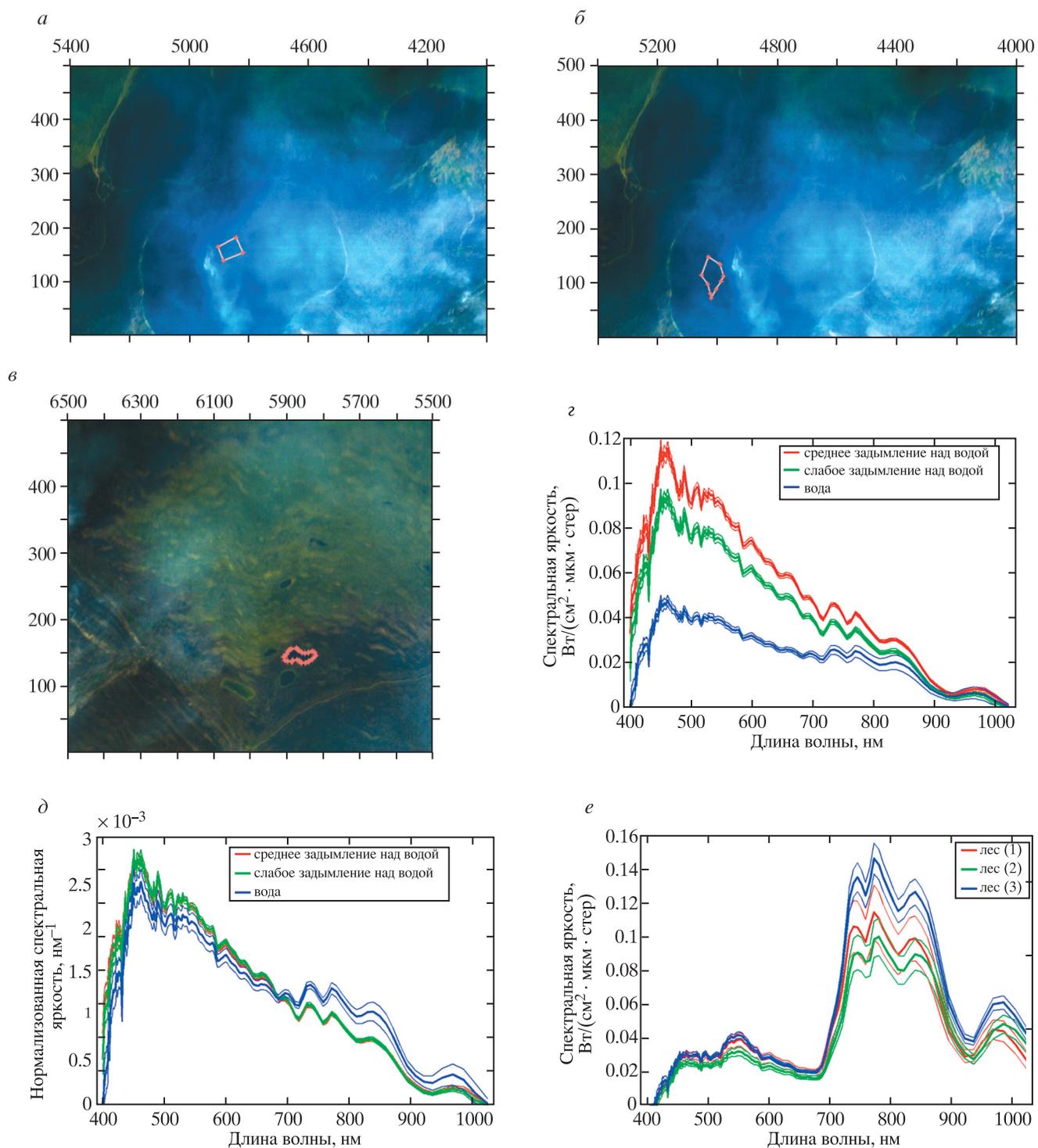
Рис. 2



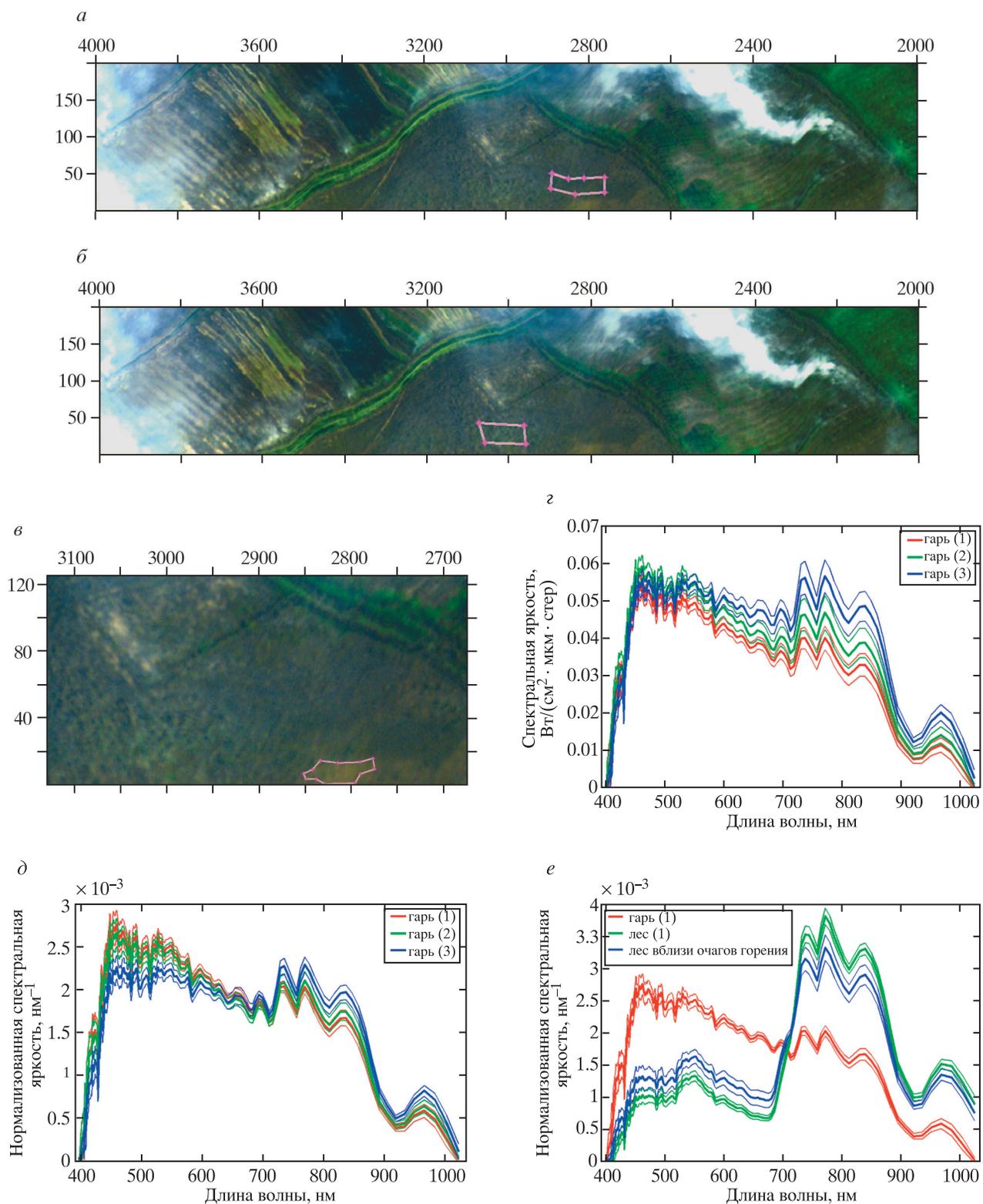


**Рис. 3.** RGB-синтезированные изображения гиперспектрметра с выделенными контурами для фронта интенсивного горения над лесной растительностью (а), над областью сильного задымления (б), над областью верхового лесного пожара (в), а также соответствующие этим контурам исходные и нормированные спектры вместе с их стандартными отклонениями в пределах оконтуренных областей (г, д). Кривые красного цвета соответствуют спектрам в пределах контура (а), зеленого цвета – в пределах контура (б), синего цвета – в пределах контура (в), черного цвета – в пределах контура рис. 2б. Для сравнения приведены спектры горящего леса и области сильного задымления (е). Число спектров для выделенных контуров: а – 390; б – 194; в – 131.

**Рис. 2.** RGB-синтезированные изображения гиперспектрметра с выделенными контурами сильного задымления, но разной интенсивности над двумя разными типами лесной растительности (а, б), среднего задымления (в), слабого задымления (г) и соответствующие этим контурам исходные спектры и их стандартные отклонения в пределах оконтуренных областей (д), а также нормированные спектры и их стандартные отклонения в пределах оконтуренных областей (е). Кривые красного и зеленого цвета соответствуют спектрам и их изменчивости в пределах контуров (а, б), синего цвета – в пределах контура (в), черного цвета – в пределах контура (г). Число спектров для выделенных контуров: а – 1813; б – 600; в – 3958; г – 4426.



**Рис. 4.** RGB-синтезированные изображения гиперспектрометра с выделенными контурами для дыма средней интенсивности (а), слабой интенсивности (б) над водной поверхностью и при фактическом отсутствии дыма над водой (в), а также соответствующие этим контурам исходные и нормированные спектры вместе с их стандартными отклонениями в пределах оконечных областей (г, д). Кривые красного цвета соответствуют спектрам в пределах контура (а), зеленого цвета – в пределах контура (б), синего цвета – в пределах контура (в). Для сравнения приведены исходные спектры различных типов леса, не подверженных пожарам (е), в правой части рис. 1. Число спектров для выделенных контуров: а – 2021; б – 2987; в – 1224.



**Рис. 5.** RGB-синтезированные изображения гиперспектрометра с выделенными контурами трех участков гарей (*a*, *б*, *в*) от предшествующих пожаров с незначительным влиянием дыма в текущий момент съемки, исходные (*г*) и нормированные (*д*) спектры этих участков и стандартные отклонения этих спектров, а также нормированные спектры одного из участков гари (красный цвет) при их сравнении с аналогичными спектрами нормально вегетирующей лесной растительности вдали от очага пожара (зеленый цвет) и вблизи от очага пожара (синий цвет) (*e*). Число спектров для выделенных контуров: *a* – 2740; *б* – 2707; *в* – 771.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

### ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ЗАБРОШЕННЫХ ТОРФОРАЗРАБОТОК ПО МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫМ СПУТНИКОВЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

© 2011 г. М. А. Медведева<sup>1\*</sup>, А. Е. Возбранная<sup>2, 3</sup>, С. А. Баргалева<sup>1</sup>, А. А. Сирин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Учреждение Российской академии наук Институт космических исследований РАН, Москва

<sup>2</sup> Учреждение Российской академии наук Институт лесоведения РАН, МО, с. Успенское

<sup>3</sup> ФГУ национальный парк “Мещера”, Владимирская область, Гусь-Хрустальный

\* E-mail: eveeza@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.07.2010 г.

Представлена методика использования многоспектральных спутниковых данных для оценки состояния и динамики нарушенных добычей и не используемых в настоящее время торфяных месторождений. На примере болотных массивов Национального парка “Мещера” (Владимирская область) с использованием спутниковых изображений Landsat-TM и ETM+ за период 1992–2007 г. показана возможность мониторинга растительного покрова на участках заброшенных торфоразработок и относительных изменений влажности открытых поверхностей торфа. Предложенный и апробированный подход может быть использован для анализа состояния заброшенных торфяников с целью их инвентаризации, мониторинга изменений и выявления участков, требующих первоочередных мер по обводнению и восстановлению.

**Ключевые слова:** многоспектральные изображения, торфяные болота, заброшенные торфоразработки, растительный покров

#### ВВЕДЕНИЕ

По данным земельного учета площадь нарушенных торфоразработками и некультивированных земель в России составляет 1/4 млн. га. Однако эта величина, видимо, существенно занижена, прежде всего, за счет недоучета брошенных в начале 1990-х годов недовыработанных месторождений, частично переведенных позднее без рекультивации в другие категории земель, в частности, такие, как земли запаса или земли особо охраняемых природных территорий (ООПТ). Ранее большая часть использованных месторождений торфа (всего, по разным оценкам, при добыче торфа было нарушено от 850 тыс. до 1.5 млн. га болот) после нормативной выработки залежи рекультивировалась для целей с.-х. использования, реже – для создания лесных культур и других задач (Торфяные болота ..., 2001).

Заброшенные торфоразработки представлены главным образом интенсивно дренированными полями фрезерной добычи, плохо заселяемыми растительностью. Даже через 15–20 лет они могут иметь участки открытого торфа и сильно высыхать в период отсутствия дождей. На таких участках происходят интенсивная деструкция и разложение торфа, водная и ветровая эрозия, эмиссия диоксида углерода в атмосферу. При этом брошенные поля торфодобычи являются, как и разрабатываемые месторождения, объектами добро-

вольного, а в перспективе и обязательного, учета как источники и поглотители парниковых газов (Руководящие принципы ..., 2006). Здесь наиболее велика вероятность торфяных пожаров (Минаева, Сирин 2002). Неиспользуемые торфоразработки образуют значительные территории, сконцентрированные в районе бывших торфодобывающих предприятий с относительно плотным населением. В связи с этим происходящие на заброшенных торфоразработках пожары могут представлять собой значительную угрозу для здоровья людей, включая население крупных городов и мегаполисов. Это одна из наиболее острых экологических проблем, связанных с торфяными болотами в Российской Федерации (Основные направления ..., 2003), которая имеет место и в ряде соседних европейских стран (A Quick Scan ..., 2009).

Для предотвращения указанных неблагоприятных процессов и снижения пожарной опасности необходимо подтопление таких территорий и изменение водного режима торфяных почв для обеспечения последующего восстановления болотных экосистем. Учитывая масштаб проблемы, требуется организация мониторинга неиспользуемых торфоразработок, в том числе для выявления первоочередных объектов для обводнения. Однако в настоящее время отсутствует единая система учета таких площадей, которые входят в разные категории земель с различной системой контроля и управления. Неиспользуемые торфо-

разработки имеют значительные размеры, труднопроходимы и сложны для наземного картографирования. Их растительный покров отличается высокой мозаичностью и быстрыми демутационными сменами, в том числе — из-за чувствительности к погодным условиям отдельных лет и частого воздействия торфяных пожаров. Поэтому данные спутниковых наблюдений представляются наиболее перспективной и единственно практически возможной технической основой создания системы мониторинга неиспользуемых торфопредприятий, обеспечивающей регулярную инвентаризацию их состояния, в том числе для планирования и последующего контроля мероприятий по их обводнению.

В настоящей работе представлены результаты исследования возможностей использования временных серий многоспектральных спутниковых изображений Landsat-TM/ETM+ для мониторинга пространственно-временных изменений заброшенных торфопредприятий.

### ТЕСТОВЫЙ УЧАСТОК

Исследования проводились на примере объектов ФГУ Национальный парк «Мещера» (НП), на территории которого сосредоточены одни из наиболее крупных в России комплексов нарушенных разработками торфяных болот с широким спектром различных воздействий, включающих добычу торфа, пожары и активные работы по искусственному обводнению. НП был создан в 1992 году в Гусь-Хрустальном р-не Владимирской обл. и примыкает к восточной границе Московской обл. На его территории площадью 118,7 тыс. га представлено большое разнообразие болотных экосистем Мещерской низменности, в том числе 62 крупных болотных массива.

Значительная часть болот парка общей площадью более 24 тыс. га была изменена под воздействием торфодобычи, мелиоративных работ и пожаров. За XX столетие было осушено и освоено 60% площади болот. При образовании парка в его границы были частично включены земли четырех бывших торфопредприятий, содержащих около 15 тыс. га выработанных торфяников. С начала промышленной разработки торфа в 1918 г. здесь применялись различные способы и методы добычи. На большинстве участков карьерной добычи первой половины прошлого столетия болотная растительность восстановилась, однако многие поля фрезерной добычи, заброшенные в начале 1990-х годов, представляют собой участки сухого, часто открытого торфа, периодически проходящие пожарами.

Болотная растительность парка относительно подробно детально изучена (Антипин и др., 2004), в том числе имеются цифровые карты части за-

брошенных торфопредприятий, наличие которых позволило сформировать набор опорных данных для идентификации типов земного покрова при анализе спутниковых изображений. Начиная с 2005 г., на тестовом участке ведется наблюдение за изменением растительного покрова и показателей среды на системе постоянных пробных площадей, расположенных на трех наиболее репрезентативных болотных массивах. Выявлены основные тенденции и причины динамики растительного покрова нарушенных торфяников (Возбранная и др., 2008). Для проведения описанных в настоящей статье исследований на территории НП «Мещера» были выбраны девять болотных массивов общей площадью около 8 тыс. га.

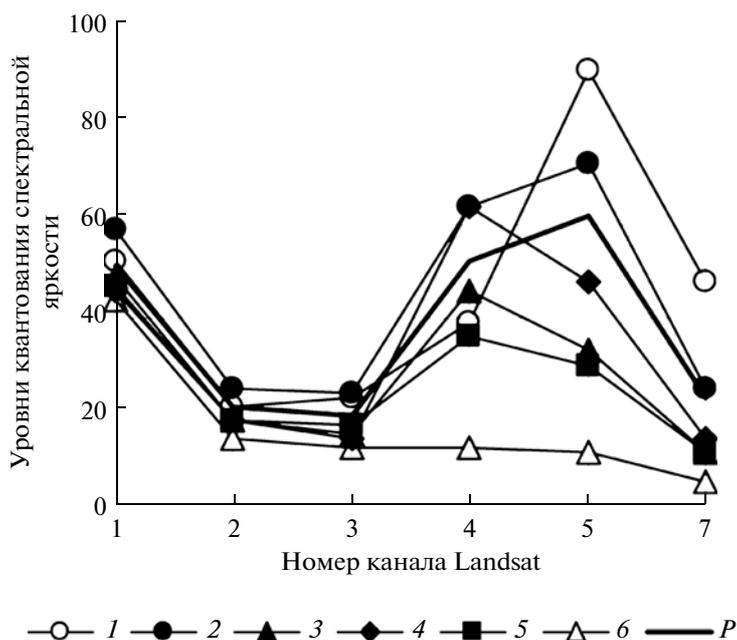
### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения исследований использовалась временная последовательность трех спутниковых изображений территории тестового участка, имеющих пространственное разрешение 28,5 м. и полученных системами Landsat-TM и ETM+ в различные даты, а именно 29.05.92 (TM), 30.06.01 (ETM) и 10.08.07 (TM). Начало охваченного данными дистанционного зондирования (ДЗ) временного диапазона примерно соответствует времени полной остановки работ по добыче торфа на территории парка, за исключением одного болота (Тасин Борское), где ограниченные работы велись до 1998 г. Для анализа использовались изображения, полученные в шести спектральных диапазонах, а именно: TM1 (0,45–0,52 мкм), TM2 (0,53–0,61 мкм), TM3 (0,63–0,69 мкм), TM4 (0,75–0,90 мкм), TM5 (1,55–1,75 мкм) и TM7 (2,09–2,35 мкм).

Анализ и обработка спутниковых изображений включали в себя следующие основные этапы:

- оценка уровня разделимости по спутниковым изображениям различных типов земного покрова;
- подготовка на основе имеющихся опорных наземных данных и результатов визуального экспертного анализа обучающей выборки для контролируемой классификации спутниковых изображений;
- классификация типов земного покрова независимо по каждому разновременному спутниковому изображению;
- экспертная оценка достоверности полученных результатов;
- сравнение результатов классификации разновременных спутниковых изображений и оценка динамики земного покрова участков торфопредприятий.

Предварительный анализ имеющихся многоспектральных спутниковых изображений позволил установить множество достаточно уверенно распознаваемых типов земного покрова тестово-



**Рис. 1.** Средние значения спектральной яркости в каналах Landsat-TM/ETM для набора распознаваемых классов и участка ошибочной классификации (*P*): 1 – открытый торф; 2 – кипрейные, вейниковые и березово-вейниковые сообщества; 3 – сообщества с преобладанием сосны; 4 – сообщества с преобладанием ивы и березы; 5 – гидрофильные сообщества с рогозом и камышом; 6 – вода.

го участка. Выбранные на спутниковом изображении 2007 г. и находящиеся на семи из девяти массивах 11 эталонных участков шести названных ниже различных типов земного покрова, представляющих собой по наземной информации примерно однородные площади, позволили сформировать репрезентативный набор опорных данных для проведения классификации с обучением. Для других спутниковых изображений опорные данные были получены на основе экспертного установления соответствия между типичными сигнатурами идентичных классов в пространстве значений спектральных яркостей в каналах ТМ3, ТМ4 и ТМ5.

Так, проведенный анализ информативности используемых спутниковых данных позволил установить возможность выделения с достаточным уровнем достоверности на исследуемой территории следующих шести типов земного покрова, преимущественно отражающих факт наличия, а также характер и состояние растительности:

1. *Открытый торф* – участки открытого (в том числе пройденного огнем) торфа с разреженным растительным покровом (встречаются отдельные экземпляры березы, пушицевые кочки, мелкие фрагменты покрова второго типа).

2. *Кипрейные, вейниковые и березово-вейниковые сообщества*, формирующиеся при зарастании открытого торфа: березово-вейниково-кипрейные, кипрейные, пушицево-вейниково-моховые зла-

ково-травяные, тростниково-травяные растительные ассоциации.

3. *Сообщества с преобладанием сосны* различной степени угнетенности, характерные для естественной восстановительной динамики участков неиспользуемых торфоразработок с карьерной и ручной добычей торфа.

4. *Сообщества с преобладанием ивы и березы* на зарастающих фрезерных полях: преимущественно березняки, реже ольшаники или осинники с примесью березы, распространены березово-вейниковые и кустарниково-вейниковые ассоциации.

5. *Гидрофильные сообщества с рогозом и камышом* на обводненных участках (встречается также частуха, пушица стройная или многоколосковая).

6. *Вода* – водоемы, образовавшиеся в результате естественного или искусственного подтопления участков торфяников.

Первые два типа характеризуются наиболее низкими уровнями болотных вод (УБВ), периодически сильно высыхающей поверхностью почвы и наиболее высокой степенью пожароопасности. Третий и четвертый типы земного покрова занимают промежуточное положение, а пятый характеризуется значениями УБВ, близкими к водной поверхности.

На рис. 1 представлены средние значения спектральной яркости распознаваемых типов земной поверхности, полученные на основе используемых многоспектральных спутниковых

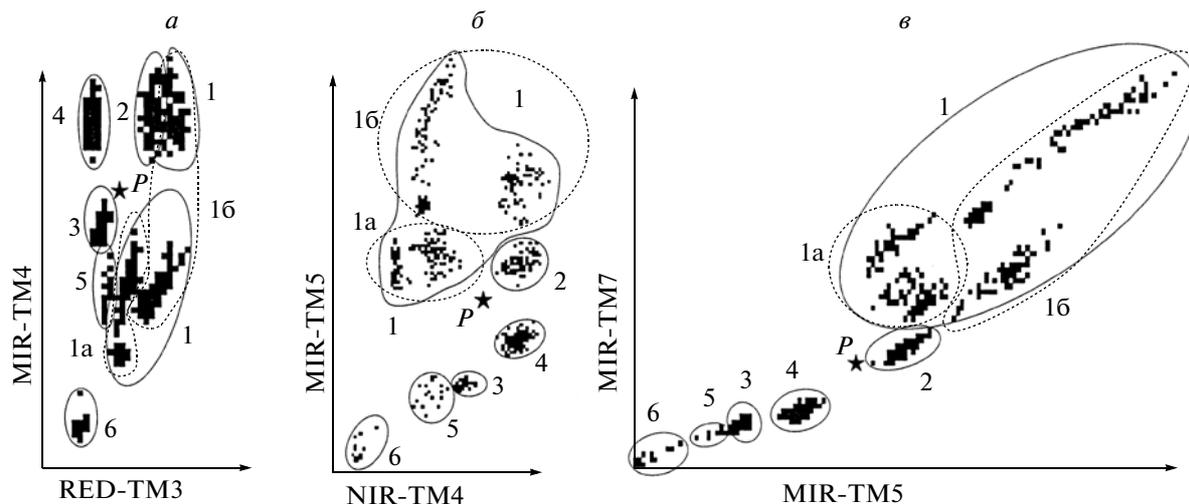


Рис. 2. Области различных классов в двумерном пространстве значений спектральной яркости для различных сочетаний каналов Landsat-TM/ETM (см. также пояснения к рис. 1): 1a – влажный торф; 16 – сухой торф. P – ошибочно классифицированный участок.

изображений и данных обучающей выборки. Рисунок 2 характеризует области, занимаемые различными распознаваемыми классами обучающей выборки в двумерных пространствах значений спектральной яркости, образуемых различными сочетаниями наиболее информативных для решения данной задачи каналов прибора Landsat-TM/ETM, а именно TM3, TM4, TM5 и TM7.

Исследования возможностей классификации с обучением проводились с использованием трех различных методов: минимального расстояния, максимального правдоподобия и расстояния Махаланобиса. В качестве наиболее приемлемого был выбран метод минимального расстояния исходя из полных матриц ошибок и вычисленных точностей классификаций, представленных в таблице (Лабутина, 2004). Определение данных характеристик проводилось по одному для всех методов набору случайно выбранных точек, распределенных по всем исследуемым участкам изображения 2007 г. Примеры результатов классификации по разновременным спутниковым изображениям различных типов земного покрова на некоторых участках торфяных разработок представлены на рис. 3.

Кроме того, была проведена экспертная оценка достоверности полученных результатов применительно к данным, полученным с использованием спутникового изображения 2007 г. для 60 различных участков массива Тасин-Борского, в наибольшей степени обеспеченного материалами наземного обследования, исключая ранее выбранные площади для обучения классификатора. При этом был выявлен лишь один ошибочно классифицированный участок (P), а суммарная ошибка классификации не превысила 2%.

Указанный участок был отнесен при распознавании ко второму классу, тогда как по данным наземного обследования на данном участке произрастали преимущественно низкорослые деревья (класс 4), перемежающиеся с участками травянистой растительности (класс 2).

Результаты исследования возможностей классификации участков открытого торфа по относительному уровню его влажности (влажный и сухой) представлены на рис. 2. При этом очевидно, что классы сухого и влажного торфа группируются в обособленные кластеры с относительно небольшой переходной областью. Для проведения исследований обучающая выборка для класса открытого торфа была разделена на два подкласса на основе их спектральных различий в каналах TM5 и TM7. Рисунок 4 иллюстрирует значения спектрального отражения средних значений и дисперсии обучающей выборки изображения 2007 г. для двух классов торфа различной влажности. Распознавание двух указанных типов открытого торфа выполнялось также на основе классификации с обучением, фрагмент результатов которой представлен на рис. 5. В таблице представлены матрицы ошибок и точность классификации в том числе и для этих двух классов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные по результатам проведенной классификации данные характеризуют изменение земного покрова девяти неиспользуемых торфяников на территории тестового участка, общая динамика которых представлена на рис. 6a. Результаты, полученные для трех из девяти указан-

Полные матрицы ошибок и точность результатов классификации по разным методам оценки. Класс 1 – торф (1а – влажный, 1б – сухой), классы 2–6 – см. пояснения к рис. 1

<i>Метод “максимальное правдоподобие”</i>									
Классы	Реальные								
Расчетные	1а	1б	2	3	4	5	6	Σ	Точность, %
1а	14	0	1	0	0	0	0	15	93.3
1б	0	6	22	То же	2	То же	То же	30	20.0
2	То же	0	9	«	1	«	«	10	90.0
3	«	То же	0	5	0	1	«	6	83.3
4	«	«	То же	0	5	0	«	5	100.0
5	«	«	«	1	0	1	«	2	50.0
6	«	«	«	0	То же	0	1	1	100.0
Σ	14	6	32	6	8	2	То же	69	
Точность, %	100.0	100.0	28.1	83.3	62.5	50.0	100.0		<b>59.42*</b>
<i>Метод “расстояние Махаланобиса”</i>									
1а	13	0	1	0	0	0	0	14	92.9
1б	1	6	23	То же	1	То же	То же	31	19.4
2	0	0	9	«	То же	«	«	10	90.0
3	То же	То же	0	5	0	1	«	6	83.3
4	«	«	То же	0	5	0	«	5	100.0
5	«	«	«	1	0	1	«	2	50.0
6	«	«	«	0	То же	0	1	1	100.0
Σ	14	6	33	6	7	2	То же	69	
Точность, %	92.9	100.0	27.3	83.3	71.4	50.0	100.0		<b>57.97*</b>
<i>Метод “минимальное расстояние”</i>									
1а	14	0	0	0	0	0	0	14	100.0
1б	0	4	То же	4	То же				
2	То же	0	34	«	«	«	«	34	«
3	«	То же	0	5	«	«	«	5	«
4	«	«	То же	1	9	«	«	10	90.0
5	«	«	«	0	0	1	«	1	100.0
6	«	«	«	То же	То же	0	1	То же	То же
Σ	14	4	34	6	9	1	То же	69	
Точность, %	100.0	100.0	100.0	83.3	100.0	100.0	100.0		<b>98.55*</b>

\* – общая точность классификации.

ных выше участков, представлены в качестве примера на рис 6.

Анализ полученных результатов, в частности, свидетельствует о наличии процессов зарастания

открытых участков торфа древесно-кустарничковой и травяной растительностью в период 1992–2001 гг. Однако период 2001–2007 гг. характеризуется увеличением площади травяных сообществ и участков открытого торфа на фоне сокращения

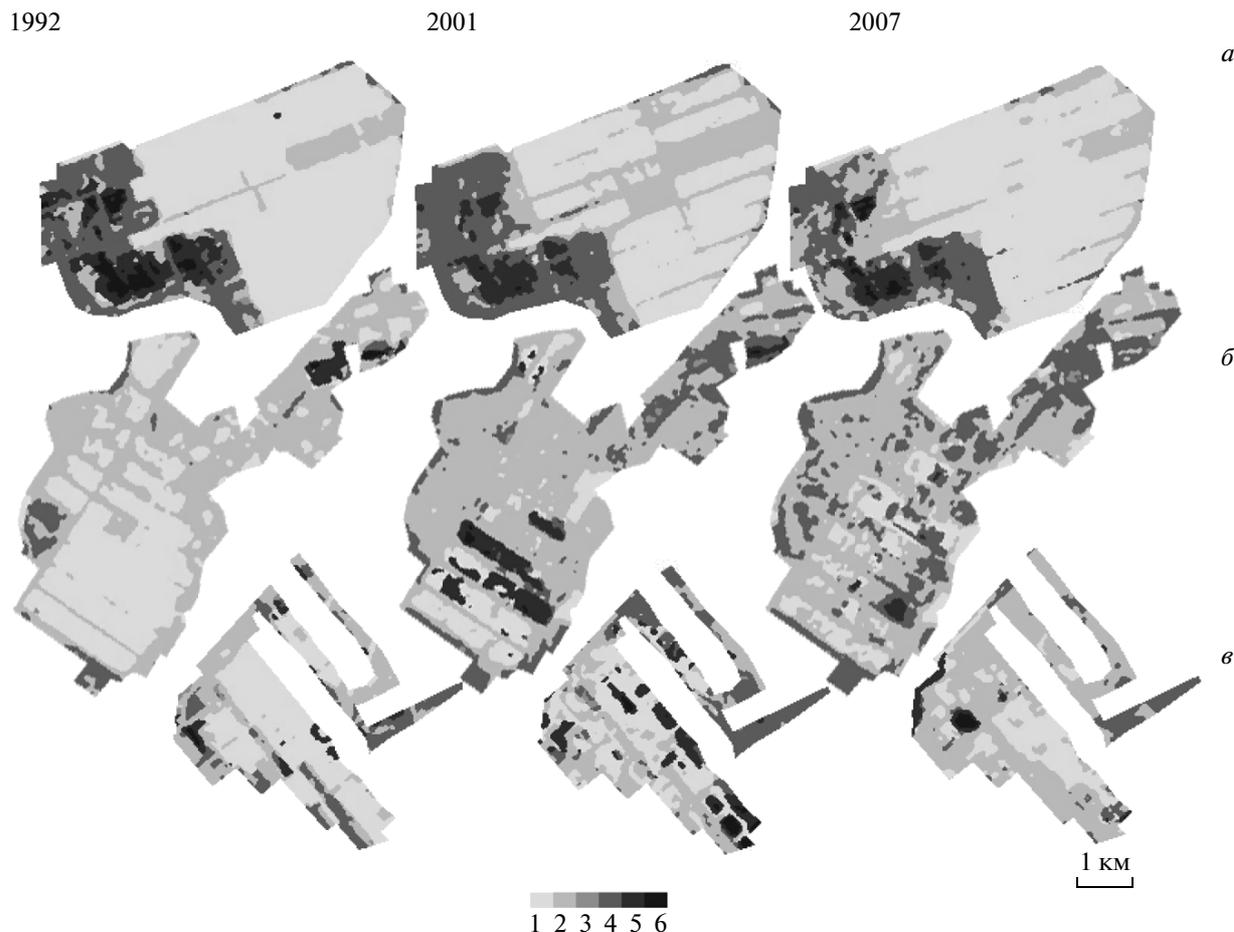


Рис. 3. Пример классификации по разновременным спутниковым изображениям участков торфозабо­ровок на болотных массивах: *а* – Островское, *б* – Мезиновское, *в* – Тасин-Борское.

площадей насаждений лиственных пород, что может быть результатом сухого и жаркого лета 2007 г., приведшего к масштабным торфяным пожарам. В то же время указанная динамика имеет свои особенности при рассмотрении отдельных торфяных массивов. Так, для Тасин-Борского болота наблюдаются поступательное уменьшение площади открытого торфа и увеличение доли площадей с травяной растительностью и насаждениями лиственных пород. Здесь влияние пожаров оказалось слабее. Для двух других представленных на рис. 6 массивов заметно увеличение площади открытого торфа при одновременном уменьшении покрытой растительностью территории. Особо отчетливо воздействие пожаров проявляется на примере Островского болота (рис. 3, 5 и 6). Одновременно результаты анализа данных для Мезиновского массива показали наличие сукцессионной смены травяных сообществ, имевших место в 2001 г., насаждениями с преобладанием ивы и березы в 2007 г.

К сожалению, полученные результаты выявили отрицательную динамику площадей гидрофильных

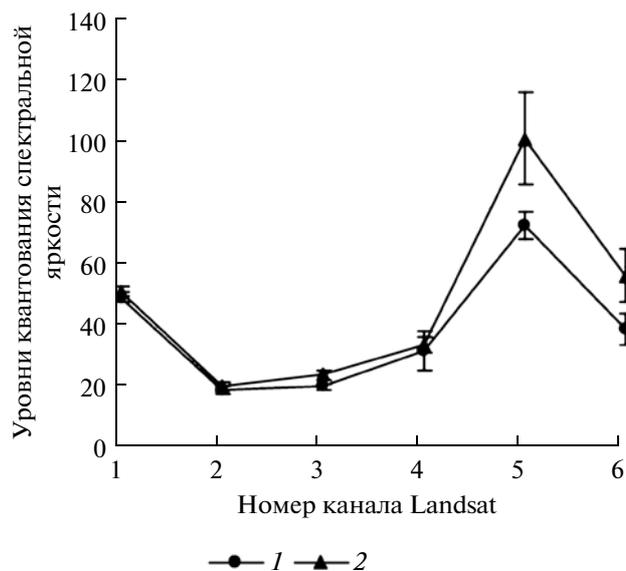


Рис. 4. Средние значения и дисперсия спектральной яркости в каналах Landsat-TM/ETM для различных по уровню влажности классов открытого торфа: 1 – влажный, 2 – сухой.

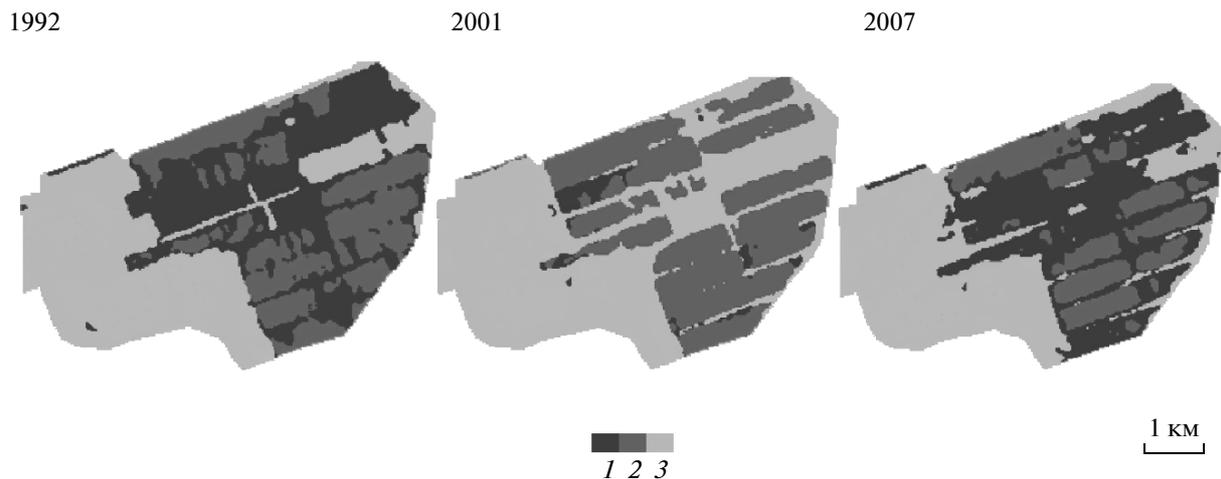


Рис. 5. Пример классификации участков с разделением состояний открытого торфа: 1 – влажный торф; 2 – сухой торф; 3 – другие классы земного покрова.

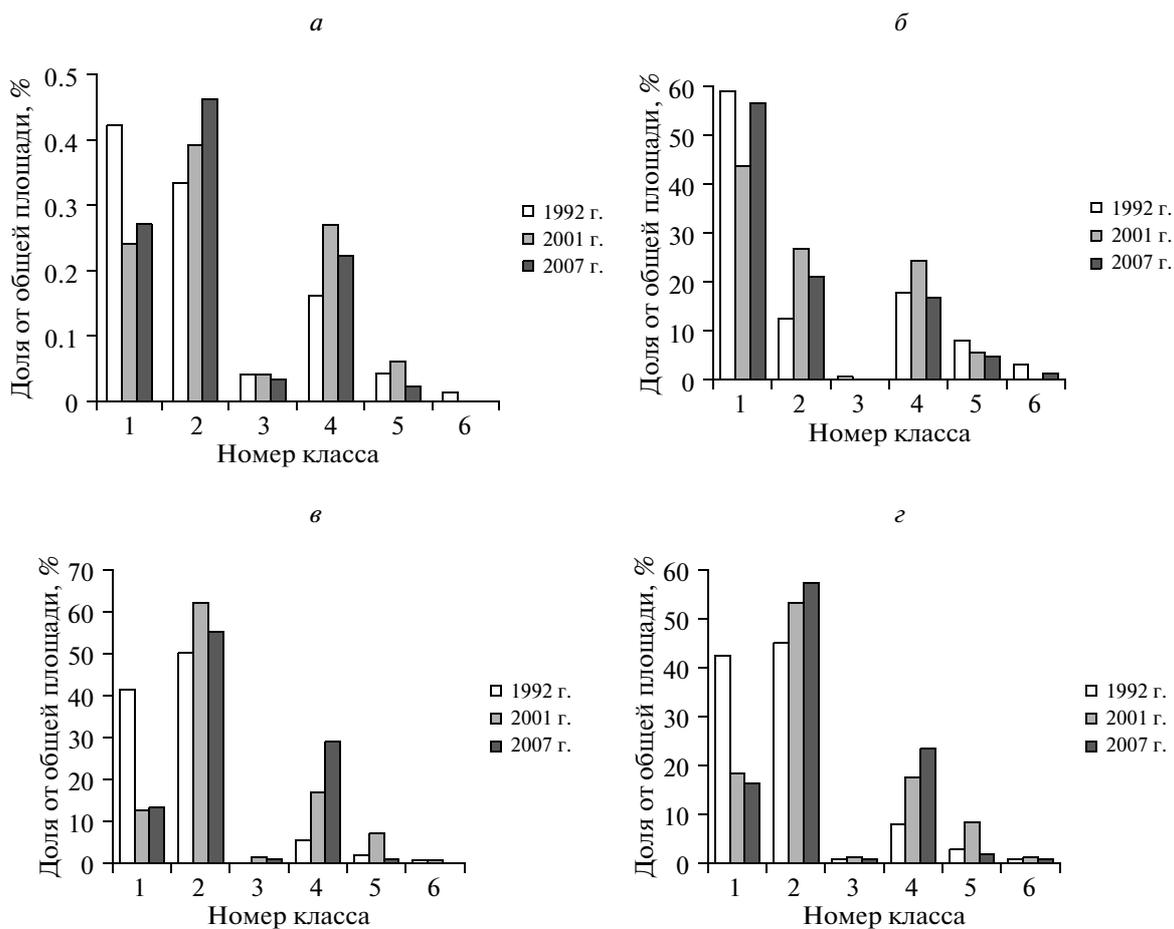


Рис. 6. Изменение структуры земного покрова по данным ДЗЗ за 1992, 2001 и 2007 гг. на территории массивов торфо-разработок: а – весь тестовый участок, б – Островский массив, в – Мезиновский массив, г – Тасин-Борский массив.

сообществ и водных поверхностей (рис. 3 и 6). В 2000–2001 гг. в южных частях Тасин–Борского и Межиновского болот был возведен ряд перемычек и дамб для искусственного подтопления нарушенных торфяников. Это способствовало увеличению площади гидрофильных сообществ и открытой воды, что было зафиксировано наземными обследованиями. Однако пожары 2002 и 2006 гг. уничтожили значительную часть дамб и к 2007 г. доля гидрофильных сообществ и водных участков уменьшилась, что было отчетливо выявлено по спутниковым данным.

Результаты обработки спутниковых изображений позволили оценить динамику зарастания растительностью участков открытого торфа. Для каждой разновременной пары спутниковых изображений была проведена оценка доли открытых участков торфа, трансформировавшихся в покрытые растительностью площади для всех исследуемых массивов. Так, за период 1992–2001 гг. на 46% ранее открытых участков появилась растительность, а за промежуток 2001–2007 гг. – на 26%. В то же время площади с открытым торфом могли образоваться в результате пожаров растительности или других неблагоприятных факторов. Так было установлено, что 8% участков открытого торфа 2001 г. были покрыты растительностью в 1992 г. и их образование могло быть связано с пожарами 1998 и 2000 гг. Еще более серьезные последствия имели пожары 2007 г. Полученные данные показали, что 33% участков открытого торфа 2007 г. в 2001 г. были покрыты различной растительностью.

Было проведено сравнение состояния увлажнения открытого торфа за имеющиеся периоды наблюдений. Полученные оценки соотношения сухой/влажный торф имели по годам следующие значения, %: 1992 г. – 43/56; 2001 г. – 54/45; 2007 г. – 26/74. Полученные результаты могут иметь ряд объяснений, в том числе и связанных с проведением работ по затоплению и подтоплению нарушенных торфяников для восстановления болот. Эти мероприятия проводятся в НП с 2000 г., продолжались в 2003, 2006 и 2007 гг., в результате чего площадь подтопленных территорий составила около 1 тыс. га, т.е. 12% от площади исследуемой территории.

## ВЫВОДЫ

Результаты исследования возможностей использования многоспектральных спутниковых изображений (на примере Landsat-TM/ETM+) показали, что современные системы ДЗ, обеспечивающие наблюдения земной поверхности с пространственным разрешением 20–30 м, открывают потенциальную возможность регулярного мониторинга выработанных торфяников на уровне как отдельных болотных массивов, так и более

крупных территорий. При этом имеющиеся возможности распознавания по спутниковым изображениям типов земного покрова и оценки уровня влажности открытого торфа обеспечивают получение информации, достаточной для определения уровня потенциальной пожароопасности участков неиспользуемых торфоразработок, выявления требующих первоочередного обводнения территорий и контроля результатов выполнения необходимых мероприятий.

В основу спутникового мониторинга неиспользуемых торфоразработок могут быть положены возможности распознавания участков открытого торфа и разных типов растительности по их спектральным характеристикам, измеряемым с помощью приборов ДЗ. Было определено, что наибольшие отличия разных типов покрова достигаются в каналах TM4, TM5 и TM7 спутниковых приборов Landsat-TM/ETM, а по степени влажности участки открытого торфа наиболее эффективно разделяются в каналах TM5 и TM7.

Были продемонстрированы возможности классификации типов земного покрова по спутниковым изображениям с привлечением данных выборочного наземного обследования, а также оценки многолетней динамики восстановления растительности на выработанных торфяниках. Анализируемые спутниковые изображения позволяют осуществить классификацию типов покрова, тематической детальности которой вполне достаточно для решения задачи мониторинга участков неиспользуемых торфоразработок. Высокая пространственно-временная вариабельность земного покрова заброшенных торфяников, выявленная в рамках данной работы, может служить наглядным обоснованием необходимости разработки и использования дистанционных методов их мониторинга.

Работа была выполнена при финансовой поддержке проекта INTAS Thematic Call with ESA Project 06-100025-9182 “Remote Sensing Methods for Environmental Assessment of Eurasian Peatlands and Associated Ecosystems under Climate Change (PACINE)”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Антипин В.К., Бойчук М.А., Грабовик С.И., Стойкина Н.В., Возбранная А.Е.* Растительный покров естественных и освоенных болот национального парка “Мещера”, Владимирской обл. // Антропогенная трансформация таежных экосистем Европы: экологические, ресурсные и хозяйственные аспекты. Петрозаводск, 2004. С. 166–169.

*Возбранная А.Е., Антипин В.К., Сирин А.А.* Мониторинг растительного покрова и экологических условий нарушенных торфяников ГНП “Мещера” Владимирской области / Мониторинг и оценка состояния раститель-

ного мира // Междунар. Науч. конф. Минск. Нарач. 22–26 сентября 2008. С. 244–246.

Лабутина И.А. Дешифрирование аэрокосмических снимков: Учебное пособие для студентов вузов. Аспект Пресс, 2004. 184 с.

Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006 г., Подготовлено Программой МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов / Под ред. Игглестон Х.С., Буэндиа Л., Мива К., Нгара Т. и Танабе К. Хаяма. Япония: ИГЕС, 2006.

Основные направления действий по сохранению и рациональному использованию торфяных болот России.

Министерство природных ресурсов Российской Федерации. М.: Российская программа Международного бюро по сохранению водно-болотных угодий. 2003. 24 с.

Минаева Т.Ю., Сирин А.А. Торфяные пожары – причины и пути предотвращения // Наука и промышленность России. 2002. № 9. 2002. С. 3–8.

Торфяные болота России: к анализу отраслевой информации / Под ред. А.А. Сирина, Т.Ю. Минаевой. М.: Геос, 2001. 190 с.

A Quick Scan of Peatlands in Central and Eastern Europe / Eds. T. Minayeva, A. Sirin, O. Bragg Wageningen. The Netherlands: Wetlands International, 2009. 132 p.

## Multispectral Remote Sensing for Assessing Changes on Abandoned Peat Extraction Lands

M. A. Medvedeva<sup>1</sup>, A. E. Vozbranaya<sup>2,3</sup>, S. A. Bartalev<sup>1</sup>, A. A. Sirin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

<sup>2</sup> Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences, Uspenskoye, Moscow District

<sup>3</sup> Meschera State National Park, Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, Gus-Khrustalny, Vladimir District

The approach based on multispectral satellite data to assess the condition and dynamics of abandoned peat extraction lands is presented. On example of peatlands of the National park “Meshera” (Vladimir region) and using Landsat-TM and ETM+ satellite images for the period of 1992–2007 the possibility to monitor vegetative cover of the abandoned peat extraction lands and relative changes of humidity of bare peat surfaces is shown. Proposed and verified approach can be applied for analysis of abandoned peat extraction lands condition for their inventory, monitoring of land cover changes and identifying priority sites for re-wetting and mire restoration.

**Keywords:** multi-spectral images, peatlands, abandoned peat extraction lands, vegetation cover

КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ, СИСТЕМЫ И ПРОГРАММЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАЛОГО КА ДЗЗ “МОНИТОР-Э”  
И ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ЕГО УЛУЧШЕННОГО  
АНАЛОГА КА “МОНИТОР-2”

© 2011 г. Е. В. Михайлов\*, О. В. Михеев, А. Е. Положенцев, В. М. Судаков

Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева, Москва

\*E-mail: eo@khrunichev.com

Поступила в редакцию 10.08.2010 г.

В 2010 г. завершился ресурс функционирования малого космического аппарата (КА) “Монитор-Э”. Разработчиком данного КА, Государственным космическим научно-производственным центром им. М.В. Хруничева, предлагается создать КА “Монитор-2” — улучшенный аналог КА “Монитор-Э” для решения задачи оперативного мониторинга территории России. КА “Монитор-2” оснащается многоспектральной съемочной аппаратурой видимого- и ИК-диапазонов среднего разрешения с полосой захвата до 120 км. Для выбранных характеристик целевой аппаратуры, орбитальных параметров КА и условий наблюдения проведено моделирование и получены оценки показателей периодичности и производительности съемки для различного числа КА в орбитальной группировке.

**Ключевые слова:** трассовая съемка, кадровая съемка, периодичность съемки, производительность съемки, целевая аппаратура, полоса захвата, разрешение на местности

## ВВЕДЕНИЕ

Создание в Государственном космическом научно-производственном центре им. М.В. Хруничева (ГКНПЦ) космического аппарата (КА) “Монитор-Э” явилось первой реализацией проекта по созданию российского малого КА нового поколения, в котором были заложены технические и эксплуатационные характеристики, соответствующие лучшим зарубежным аналогам (Монитор для Земли, 2005). При разработке КА “Монитор-Э” использовались новейшие технологии и принципы, опробованные в отрасли космического приборостроения на рубеже 2000–2005 гг. КА “Монитор-Э” (“Э” — экспериментальный) был запущен 26 августа 2005 г. и после плановых летных испытаний был введен в опытную эксплуатацию 26 февраля 2006 г. Несмотря на отдельные отказы в бортовых системах, КА “Монитор-Э” обеспечивал, хотя и в ограниченном режиме, проведение съемок в течение более 5 лет при заданном пятилетний ресурсе.

За весь период работы им было проведено более 1000 маршрутов съемки поверхности Земли, общей площадью более 150 млн. км<sup>2</sup>. Изображения, получаемые с КА “Монитор-Э”, благодаря применению в съемочной аппаратуре простых пиксельных линеек обладают высокими геометрическим качеством и измерительными характеристиками. Данные с КА “Монитор-Э” широко используются различными ведомствами и администрациями ре-

гионов России в интересах лесного хозяйства, сельского хозяйства, рыболовства, экологического мониторинга, задач по обнаружению последствий чрезвычайных ситуаций.

Важно отметить, что в процессе разработки КА “Монитор-Э” ГКНПЦ им. М.В. Хруничева была создана вся необходимая наземная инфраструктура для подготовки КА к запуску, запуска КА с космодрома “Плесецк”, управления, приема и обработки информации на этапе летных испытаний и эксплуатации.

Учитывая высокий научно-технический и производственный потенциал ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, созданный в процессе разработки КА различного назначения, а также сегодняшние потребности российских ведомств в спутниковых данных, получаемых с использованием средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), ГКНПЦ им. М.В. Хруничева предлагается создать улучшенный аналог КА “Монитор-Э” — КА “Монитор-2”.

## СОСТАВ ЦЕЛЕВОЙ АППАРАТУРЫ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КА

Анализ требований к спектральным характеристикам аппаратуры КА, приведенным, например в (Жиленев, 2009), а также характеристик уже существующих в мире КА ДЗЗ, в том числе опыт эксплуатации КА “Монитор-Э”, показывает, что большинство задач, возлагаемых на КА “Монитор-2”,

**Таблица 1.** Основные характеристики комплекса целевой аппаратуры КА “Монитор-2”

Тип аппаратуры	Базовый комплект		Один из возможных типов аппаратуры дооснащения	
	Аппаратура видимого и ближнего ИК-диапазонов	ИК-аппаратура коротковолнового диапазона	Гиперспектральная аппаратура	ИК-аппаратура среднего и дальнего диапазонов
Спектральный диапазон, мкм	0.51–0.85 (ПХ) 0.45–0.52 0.52–0.60 0.63–0.69 0.74–0.90 (МС)	1.55–1.75 2.08–2.55	0.5–1.0 (60 каналов) 1.5–2.5 (30 каналов)	3.5–4.1 10.25–11.4 11.4–12.5
Пространственное разрешение (при съемке в надир), м	3–5 (ПХ) 8–12 (МС)	20	30 (ВД) 60 (ИК)	60
Полоса захвата, км	120	120	40	110
Разрядность квантования, бит/пикс	12	12	12	12
Характеристики системы сбора, накопления и передачи информации				
– основные режимы	ЗАП; ЗАП+ВОСПР; ВОСПР (со сжатием или без сжатия информации)			
– объем ЗУ, Тбит	2			
– скорость передачи информации, Мбит/с	300 (возможно введение дополнительного канала на скорость 64 Мбит/с для работы с персональными станциями приема)			

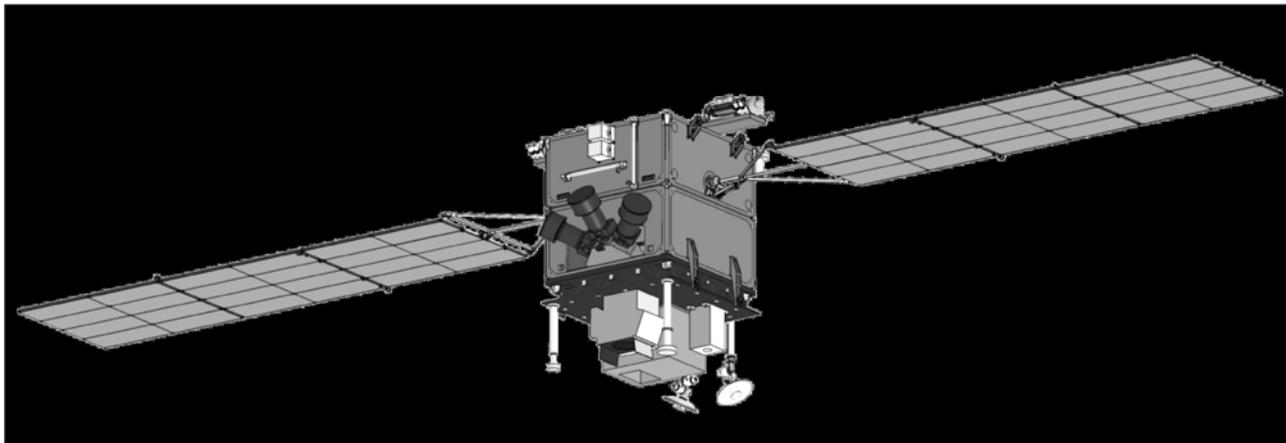
Примечание. Принятые сокращения: ВД – видимый (диапазон); ИК – инфракрасный (диапазон); ПХ – панхроматический (канал); МС – многоспектральный (канал); ЗАП – запись; ВОСПР – воспроизведение (информации), ЗУ – запоминающее устройство.

решается комплексом оптико-электронной аппаратуры, в состав которого входят панхроматическая и многозональная аппаратура видимого и ближнего ИК-диапазонов. В многозональной аппаратуре желательно иметь не менее четырех спектральных каналов. Кроме того, в состав аппаратурного комплекса целесообразно включить ИК-аппаратуру коротковолнового диапазона.

При выборе разрешения и полосы захвата аппаратуры КА “Монитор-2” учитывались два главных фактора:

– подавляющее число народно-хозяйственных задач с использованием данных ДЗЗ решается при пространственном разрешении материалов ДЗЗ от 2–5 м в панхроматическом канале до 6–10 м в многоспектральных каналах;

– возможности унифицированной космической платформы “Яхта”, эксплуатируемой в составе КА “Монитор-Э” и на основе которой строится КА “Монитор-2”, обеспечивают размещение многоспектральной съемочной аппаратуры с указанным выше разрешением с предельно возможной полосой захвата до 120 км.



Орбита:	Солнечно-синхронная
– высота, км	670 км
– наклонение, град	98.1
Точность поддержания ориентации ( $3\sigma$ ), град	0.05
Точность стабилизации ( $3\sigma$ ), град/с	0.0005
Электрическая мощность СБ, Вт	1800
Масса КА, кг	850
Срок функционирования, лет	не менее 7
Средство выведения, ракета-носитель (РН)	РН “Рокот”, РН “Ангара-1-2”,

Рис. 1. Космический аппарат “Монитор-2” и его технические характеристики.

Предложения по созданию съемочной аппаратуры с указанными характеристиками разработаны, например, специалистами Красногорского завода им. С.А. Зверева.

Основные характеристики комплекса целевой аппаратуры, предлагаемого к установке на КА “Монитор-2”, приведены в табл. 1. Общий вид КА и его технические характеристики приведены на рис. 1.

#### АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ КА “МОНИТОР-2” ПО ПЕРИОДИЧНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СЪЕМКИ

Оценка периодичности и производительности съемки КА “Монитор-2” получена путем статистического моделирования процессов съемки с учетом баллистических параметров КА, характеристик целевой аппаратуры, а также месторасположения и размеров зон радиовидимости пунктов приема информации. Оценка получена для следующих исходных данных:

- производится съемка территории России для летнего сезона наблюдения;
- КА функционируют на солнечно-синхронных орбитах с высотой 670 км;
- допустимые углы разворота КА составляют  $\pm 30^\circ$ ;
- полоса захвата аппаратуры – 120 км;
- предельный угол Солнца при съемке равен  $10^\circ$ ;
- задействованы три ППИ (в Москве, Красноярске, Хабаровске) с предельными углами радиовидимости  $5^\circ$ ;
- информационный поток со всей съемочной аппаратуры  $\sim 1500$  Мбит/с;
- объем бортового запоминающего устройства (ЗУ) равен 2 Тбит;
- скорость сброса видеoinформации на ППИ составляет 300 Мбит/с;
- коэффициент сжатия видеoinформации (без существенной потери качества)  $\sim 3$ ;
- расчеты получены без учета облачности.



**Рис. 2.** Зависимость периодичности съемки в кадровом режиме любого заданного объекта на территории России от числа КА в группировке.

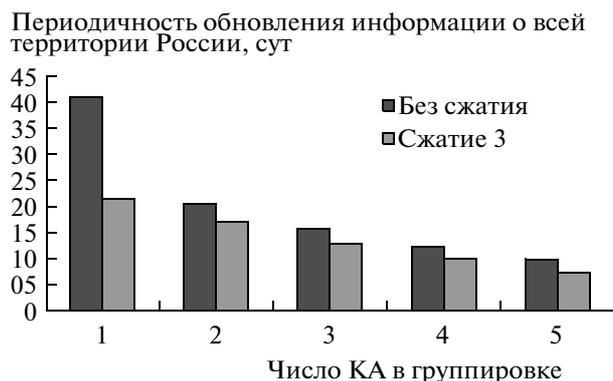
Результаты моделирования приведены на рис. 2–6.

На рис. 2 показана зависимость максимальной и средней периодичности наблюдения заданного объекта на территории России от числа КА в группировке при съемке в кадровом режиме. Нахождение совокупности значений периодичности осуществлялось по множеству реализаций случайного местоположения объектов на территории России. Далее определялось максимально возможное время повторной съемки объекта для самого “неблагоприятного” по расположению объекта на территории России и, по совокупности реализаций, – среднее время повторной съемки. Как видно из рис. 2, максимальная периодичность составляет для одного КА 3 сут, а для группировки из двух КА – 1 сут. На рисунке также видно, что увеличение числа КА в группировке до трех и более не приводит к уменьшению максимальной (в отличие от средней) периодичности съемки объекта.

Для режима трассовой съемки, когда необходимо обеспечить наблюдение больших площадей, на рис. 3 приведена зависимость периодичности обновления информации на всю территорию России от числа КА в группировке. Как следует из рис. 3, для одного КА периодичность обновления данных на всю территорию России составит 22 сут, а для группировки из трех КА 13 сут (около 7 раз за сезон). Периодичность улучшается почти в 2 раза при применении на борту процедуры сжатия видеoinформации.

На рис. 4 и 5 наглядно показано, как увеличивается площадь отснятой территории России в зависимости от времени полета для случаев одного и пяти КА в группировке.

На рис. 6 показана зависимость производительности КА по проведению съемки при изменении числа КА “Монитор-2” в группировке от одного до



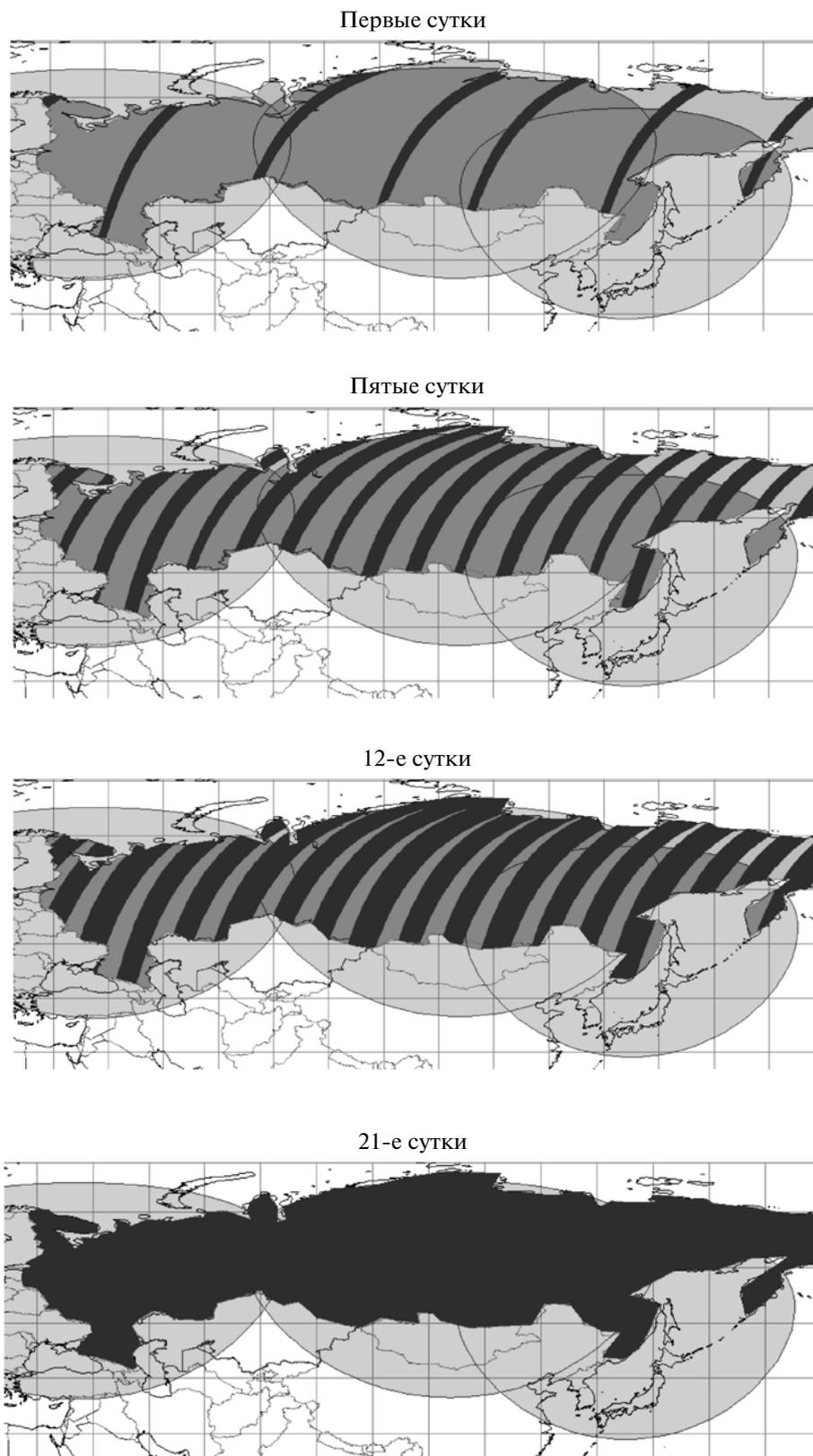
**Рис. 3.** Зависимость периодичности обновления информации для всей территории России от числа КА в группировке (летний сезон).

пяти. В соответствии с диаграммой на рис. 6 для двух КА в группировке производительность составляет 3.5 млн. км<sup>2</sup>/сут.

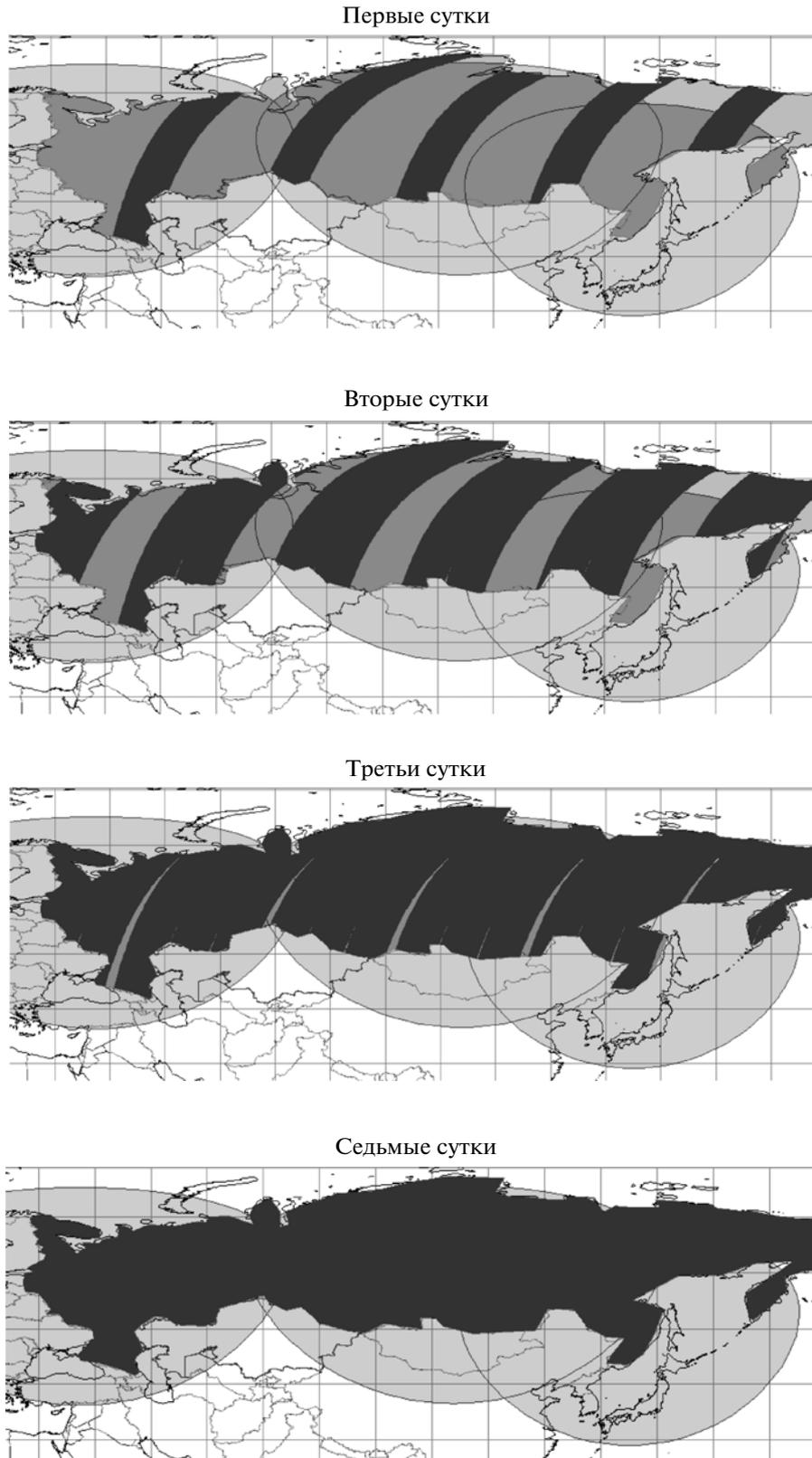
Необходимо заметить следующее. Периодичность обновления данных на всю территорию России оценивалась в режиме трассовой съемки, т.е. съемки в надир. При таких условиях съемки отдельные районы в течение длительного времени не попадают в полосу захвата аппаратуры, в то же время другие районы могут покрываться многократно. Как показывают результаты моделирования, если допустить использование при трассовой съемке даже небольших подворотов КА по крену с целью оптимизации покрытия, то периодичность обновления информации на всю территорию России может быть уменьшена в 2 раза по сравнению с приведенной на рис. 3. Так, для одного КА она составит 10–12 сут, а для группировки из трех КА – 5–6 сут.

По пути создания группировок однотипных КА идут и зарубежные разработчики космических систем ДЗЗ. Ярким примером такой группировки является эксплуатируемая в настоящее время группировка из пяти мини-спутников RapidEye (Германия).

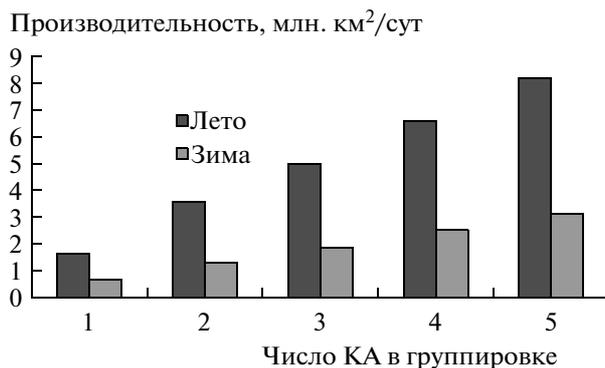
В ходе моделирования был проведен сравнительный анализ возможностей группировки КА ДЗЗ “Монитор-2” и группировки из пяти мини-спутников RapidEye. Сравнение производилось по показателям периодичности обновления информации о всей территории России (в гипотетическом предположении, что вся группировка RapidEye решает задачу съемки территории России) и производительности съемки для летнего периода наблюдений при плановой съемке. При этом были использованы имеющиеся данные о характеристиках спутников системы RapidEye (Дворкин, 2009; Кучейко, 2008) (баллистика построения группировки, полоса захвата, объем бортового запоминающего



**Рис. 4.** Динамика покрытия территории России полосами съемки в зависимости от времени полета для одного КА (овалами показаны зоны радиовидимости ППИ, расположенные в Москве, Красноярске и Хабаровске).



**Рис. 5.** Динамика покрытия территории России полосами съемки в зависимости от времени полета для пяти КА в группировке.



**Рис. 6.** Изменение производительности съемки в зависимости от количества КА “Монитор-2” в группировке для летнего и зимнего сезонов.

устройства, скорость сброса видеоинформации, величина первичного потока информации, предельная длина полосы съемки и др.). Коэффициент сжатия информации был принят равным 3. Было также учтено, что сброс видеоинформации со всех КА RapidEye осуществляется на единственный пункт приема на Шпицбергене (далее информация по оптоволоконному каналу связи поступает в г. Бранденбург для обработки и архивирования).

Результаты сравнения группировок КА приведены в табл. 2, из которой видно, что периодичность обновления информации о всей территории России группировкой КА RapidEye почти в 1.5 раза хуже, чем даже одним КА “Монитор-2”. Это объясняется более низкими характеристиками КА RapidEye по полосе захвата, предельной длине полосы съемки, не обеспечивающей на одном проходе перекрытие всей территории России с севера на юг, емкости запоминающего устройства, скорости сброса информации, а также невозможностью совмещения режима съемки и сброса видеоинформации. Производительность группировки из двух КА “Монитор-2” становится соизмеримой с производительностью пяти КА RapidEye. Все это говорит о высоких потен-

циальных возможностях предлагаемого отечественного КА “Монитор-2”.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая возрастающие потребности российских ведомств в космической информации, а также ограниченность российской орбитальной группировки ДЗЗ, предлагается, с учетом опыта разработки и почти пятилетней работы КА “Монитор-Э”, создать более совершенный КА ДЗЗ “Монитор-2”. КА “Монитор-2” оснащается широкозахватной (до 120 км) многоспектральной съемочной аппаратурой видимого и ближнего ИК-диапазонов с разрешением 3–5 м в панхроматическом канале и 8–12 м в многоспектральном канале, а также коротковолновой ИК-аппаратурой с разрешением 15–25 м. Потенциальные возможности размещения на космической платформе КА “Монитор-2” съемочной аппаратуры общей массой до 300 кг позволяют дополнительно устанавливать гиперспектральную либо ИК-аппаратуру среднего и дальнего диапазонов или другую аппаратуру по выбору Заказчика. Это позволит значительно расширить возможности КА

**Таблица 2.** Сравнительные характеристики группировок КА “Монитор-2” и RapidEye

Показатель	Группировка КА “Монитор-2” в количестве					Действующая группировка из пяти КА RapidEye
	1 КА	2 КА	3 КА	4 КА	5 КА	
Периодичность обновления информации по всей территории России, сут	21.7	17.0	13.0	10.0	7.0	Более 30
Производительность съемки, млн. км <sup>2</sup> /сут	1.6	3.5	5.0	6.6	8.1	3.7

“Монитор-2” по предоставлению полноценной информации потребителю.

Группировка из трех предлагаемых КА, работающих в режиме трассовой съемки, обеспечит обновление информации о всей территории России с периодичностью 13 сут, т. е. почти семь раз за сезон, а в режиме кадровой съемки с перенацеливанием — повторное наблюдение любого заданного на территории России объекта (района) с максимальной периодичностью не более 1 сут. Это позволит достаточно оперативно обеспечивать российские ведомства полноценной космической

информацией, в том числе связанной с национальной безопасностью России.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дворкин Б.А.* Группировка спутников ДЗЗ RapidEye: уникальные возможности для решения задач мониторинга // Геоматика. 2009. № 3 (4). С. 14–21.
- Жиленев М.Ю.* Обзор применения мультиспектральных данных ДЗЗ и их комбинаций при цифровой обработке // Геоматика. 2009. № 3 (4). С. 56–64.
- Кучейко А.* Система аграрного мониторинга одним пуском // Новости космонавтики. 2008. № 10. С. 33–34.
- Монитор для Земли* // Новости космонавтики. 2005. № 10. С. 16.

### Operational Experience of Small Earth Remote Sensing Spacecraft “Monitor-E” and Perspectives of Developing its Enhanced Analog “Monitor-2”

**E. V. Mikhailov, O. V. Mikheyev, A. E. Polozhencev, V. M. Sudakov**

*M.V. Khrunichev State Research and Production Space Center, Moscow*

The service life of the small Earth remote sensing spacecraft “Monitor-E” expires 2010. The spacecraft developer represented by Khrunichev State Research and Production Space Center suggests developing spacecraft “Monitor-2”, an enhanced analog of spacecraft “Monitor-E”, to solve the problem of operational monitoring of Russian territory. Spacecraft “Monitor-2” is equipped with the multispectral surveying instruments of visible and IR-bands of medium resolution with a capture range of up to 120 km. Simulation was carried out for the selected characteristics of the target equipment, spacecraft orbital parameters and observation conditions and assessments of the surveying periodicity and capability indices were obtained for a various number of spacecraft in the orbital constellation.

**Keywords:** small remote sensing spacecraft, path space imagery, frame survey, survey capability, target equipment, capture range, ground resolution