

<b>Название журнала</b>	<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА</b>					
<b>Издательство</b>	Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр Российской академии наук "Издательство "Наука"					
<b>Сведения о переименовании и переводе</b>	Переводная версия: <i>Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics</i> <i>Earth Observation and Remote Sensing</i>					
<b>Год выпуска</b>	<b>2013</b>	<b>Том</b>		<b>Номер выпуска</b>	<b>3</b>	
<b>Название статьи</b>					<b>Страницы</b>	<b>Цит.</b>
<b>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ</b>						
	<b>ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ГЕОСТРОФИЧЕСКОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ НА ОСНОВЕ СОПОСТАВЛЕНИЯ С ДРИФТЕРНЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ</b> <i>Кубряков А.А., Станичный С.В.</i>				<b>3</b>	<b>0</b>
	<b>ПАРАМЕТРЫ ПРИДОННОЙ ДИНАМИКИ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК ОПТИЧЕСКИМИ СКАНЕРАМИ</b> <i>Кушнир В.М.</i>				<b>13</b>	<b>1</b>
	<b>КЛАССИФИКАЦИЯ ЛЕСНОГО ПОКРОВА ТВЕРСКОЙ ОБЛАСТИ НА ОСНОВЕ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ АЭРОИЗОБРАЖЕНИЙ</b> <i>Дмитриев Е.В.</i>				<b>22</b>	<b>3</b>
	<b>КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ ЮГА РОССИИ</b> <i>Зинченко В.Е., Лохманова О.И., Калиниченко В.П., Глухов А.И., Повх В.И., Шляхова Л.А.</i>				<b>33</b>	<b>3</b>
<b>МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ</b>						
	<b>РАЗРАБОТКА ЭМПИРИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА-А И ОКРАШЕННЫХ РАСТВОРЕННЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ ДЛЯ ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫХ МОРЕЙ ИЗ ДИСТАНЦИОННЫХ ДАННЫХ ПО ЦВЕТУ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ</b> <i>Салюк П.А., Стёпочкин И.Е., Голик И.А., Букин О.А., Павлов А.Н., Алексанин А.И.</i>				<b>45</b>	<b>4</b>
	<b>АЛГОРИТМИЧЕСКИЙ ПОДХОД ПРИ СОСТАВЛЕНИИ ЦИФРОВЫХ ПОЧВЕННЫХ КАРТ НА ОСНОВЕ ЛАБОРАТОРНО-ПОЛЕВЫХ И СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ</b> <i>Гопп Н.В.</i>				<b>58</b>	<b>1</b>
	<b>ПРОЦЕДУРЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ПРИ СИГНАЛЬНО-ЗАВИСИМЫХ ПОМЕХАХ В ОКРЕСТНОСТИ ОПТИМАЛЬНОЙ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ И ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ</b> <i>Земляченко А.Н., Кожемякин Р.А., Абрамов С.К., Лукин В.В., Чобану М.К.</i>				<b>73</b>	<b>0</b>
<b>КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ</b>						
	<b>МЕТОД ОЦЕНКИ НЕОДНОРОДНОСТИ РЕЛЬЕФА ВЫДЕЛЕННОЙ ОБЛАСТИ</b> <i>Иоффе А.И.</i>				<b>91</b>	<b>1</b>
	<b>ПАМЯТИ ГУРИЯ ИВАНОВИЧА МАРЧУКА (08.06.1925-24.03.2013)</b>				<b>95</b>	<b>0</b>

---

---

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ  
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

---

---

**ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ  
ГЕОСТРОФИЧЕСКОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ЧЕРНОГО МОРЯ  
ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ НА ОСНОВЕ  
СОПОСТАВЛЕНИЯ С ДРИФТЕРНЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ**

© 2013 г. А. А. Кубряков\*, С. В. Станичный

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь*

*\*E-mail: arskubr@gmail.com*

Поступила в редакцию 19.07.2012 г.

Комбинированные измерения спутниковых альтиметров позволяют определять аномалии уровневой поверхности Черного моря на регулярной сетке с высоким пространственным разрешением, составляющим  $1/8^\circ$ . В работе по этим данным были восстановлены массивы полных геострофических скоростей течений в бассейне Черного моря, которые были сопоставлены с дрейферными измерениями скоростей течений за 1999–2007 гг. Сопоставление было проведено как для всего массива дрейферных измерений (~110000 измерений), так и для каждого дрейфера отдельно. Для восстановления скоростей были использованы два различных массива средней динамической топографии (СДТ): синтетическая и климатическая средняя динамическая топография. Результаты сопоставления показали, что использование синтетической СДТ предпочтительнее для расчета геострофических скоростей. Скорости, рассчитанные по данным спутниковой альтиметрии, с достаточно высокой степенью точности согласуются со скоростями, полученным по данным контактных измерений.

**Ключевые слова:** спутниковая альтиметрия, дрейферы, валидация, циркуляция, высокое разрешение, Черное море

DOI: 10.7868/S0205961413020061

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время спутниковая альтиметрия является единственным средством исследования, позволяющим регулярно получать информацию о динамике Мирового океана и, в частности, бассейна Черного моря.

Современные спутниковые альтиметры определяют высоту морской поверхности с высокой точностью ~2 см (Cheney et al., 1994). Эти данные могут быть использованы для определения динамической топографии морской поверхности и расчета поверхностных геострофических скоростей течений в бассейне. Комбинированные измерения, полученные вдоль треков нескольких альтиметрических спутников, позволяют с помощью разработанных в (Le Traon et al., 2001; Pascual et al., 2006) алгоритмов восстанавливать аномалии уровня моря на регулярной сетке. Карты аномалии уровня доступны каждые семь дней (delayed time products) и имеют пространственное разрешение  $1/3^\circ$  для Мирового океана (<http://www.avisio.oceanobs.com/>). Сравнительно недавно, благодаря работе французской компании CLS (Collecte Localisation Satellites), стали доступны

региональные массивы альтиметрических данных для районов Черного и Средиземного морей с более высоким пространственным разрешением  $1/8^\circ$ .

Однако для расчета полей геострофической циркуляции по этим данным необходимо перейти от альтиметрических аномалий уровня моря к полной динамической топографии морской поверхности. Для этого к аномалиям уровня необходимо прибавить поле средней динамической топографии (СДТ), представляющее собой осредненное поле реального уровня за 1993–1999 гг. (Fu, Cazenave, 2001). Скорости течений, определяемые по данным альтиметрии, существенно зависят от используемой СДТ. Зачастую СДТ оказывается определяющим параметром при восстановлении реальных полей скорости (Hernandez et al., 2001).

Цель данной работы – оценка качества полей поверхностных геострофических скоростей Черного моря, восстановленных по данным альтиметрии с высоким пространственным разрешением, на основе сопоставления с результатами дрейферных экспериментов и анализ вклада вли-

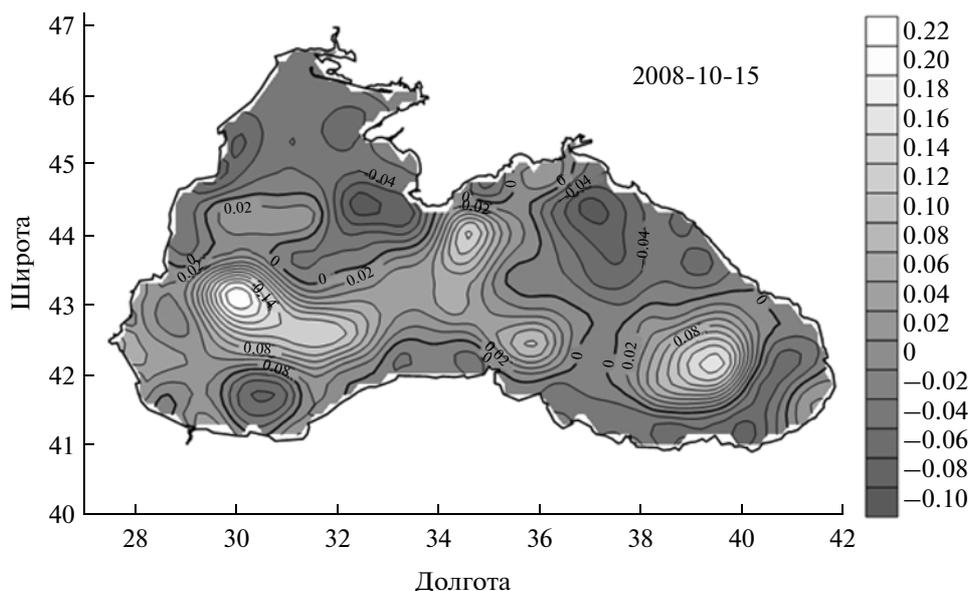


Рис. 1. Пример карты аномалий уровня, полученной по данным альтиметрии за 15.10.2008 г.

яния средней динамической топографии на качество воспроизведения этих полей.

Для решения поставленной задачи по альтиметрическим измерениям были рассчитаны поля поверхностной геострофической скорости течений в Черноморском бассейне за 1992–2010 гг. с пространственным разрешением  $1/8^\circ$  и временным – семь дней. При этом полная динамическая топография, необходимая для расчета, определялась с использованием двух различных полей СДТ – синтетической средней динамической топографии (ССДТ), полученной на основе комбинирования альтиметрических и контактных измерений (Кубряков, Станичный, 2011), и климатической средней динамической топографии (КСДТ), восстановленной на основе модельного расчета с ассимиляцией данных гидрологических зондирований (Кныш и др., 2005).

В настоящее время существует несколько работ, в которых проводилась валидация альтиметрических скоростей в различных районах Мирового океана: в работах (Rio, Hernandez, 2004; Rio et al., 2007) проводится сопоставление всего массива данных, полученных по измерениям дрейфтеров для акватории Мирового океана; в работах (Ichikawa et al., 1995; Uchida et al., 1998) оценки качества сопоставления даются на основании измерений одного буя в районе Тихого океана. Однако для бассейна Черного моря, для которого пространственное разрешение картированных альтиметрических данных выше, чем в океанических бассейнах, таких работ выполнено не было. Валидация, выполненная в этой работе, позволит оценить качество восстанавливаемых по данным

альтиметрии скоростей в Черноморском бассейне и, кроме того, определить возможности использования альтиметрических данных с более высоким пространственным разрешением.

#### ВОССТАНОВЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ

Для расчета скоростей по данным спутниковой альтиметрии использовался массив аномалий уровня моря за 1992–2010 гг. на регулярной сетке, полученный по комбинированным вдольтрековым измерениям современных альтиметров со спутников Jason-1, Jason-2, Envisat, Topex/Poseidon, GFO (Le Traon et al., 2001; Pascual et al., 2006) (рис. 1). При создании массивов в исходные альтиметрические данные были введены традиционные для таких измерений коррекции (Fu, Cazenave, 2001).

В данной работе использовался региональный массив данных, разработанный в CLS специально для Черного моря. Его основным отличием от глобального массива является более высокое пространственное разрешение данных: региональные карты аномалий уровня для Черного моря имеют пространственное разрешение  $1/8^\circ$  по сравнению с  $1/3^\circ$  для глобальных карт (<http://www.aviso.oceanobs.com/>). Временное разрешение картированных данных составляет семь дней (delayed time).

Абсолютная динамическая топография определялась как сумма аномалии уровня и средней динамической топографии. Как было указано вы-

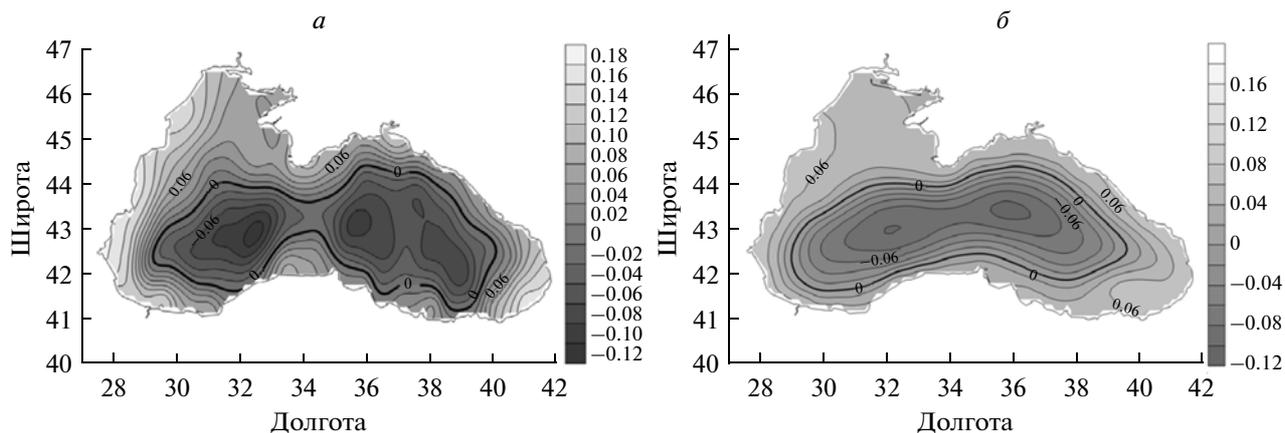


Рис. 2. Средние динамические топографии Черного моря: *a* – синтетическая (ССДТ); *б* – климатическая (КСДТ).

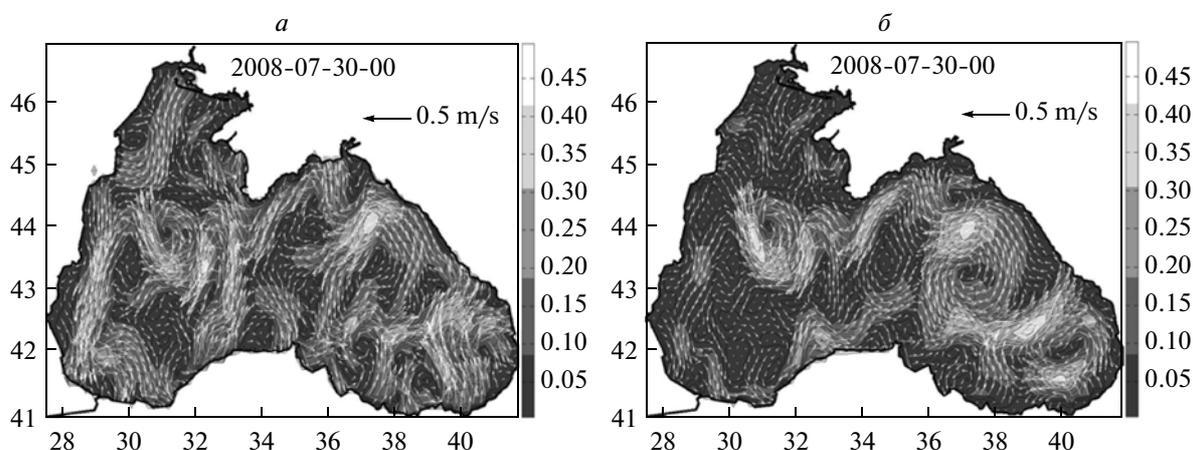


Рис. 3. Поля скоростей, полученных по данным альтиметрии за 30.07.2008 г.: *a* – с использованием ССДТ; *б* – с использованием КСДТ.

ше, для анализа были использованы две различных СДТ:

1) средняя динамическая топография, восстановленная “синтетическим” методом на основе сопоставления данных SVP-дрифтеров, судовых гидрологических съемок и альтиметрических измерений (Кубряков, Станичный, 2011) (рис. 2*а*);

2) средняя динамическая топография, полученная при помощи модельного расчета климатической циркуляции с ассимиляцией гидрологических данных. Для расчета использовались трехмерная нелинейная модель циркуляции Черного моря, разработанная в Морском гидрофизическом институте, и климатический массив гидрологических съемок за период 1950–2004 гг. (Кныш и др., 2005) (рис. 2*б*).

Используя полученные массивы абсолютной динамической топографии, из уравнений геострофического баланса были рассчитаны поверхност-

ные скорости геострофических течений с временным разрешением семь дней на сетке  $1/8^\circ \times 1/8^\circ$ :

$$u_g = -\frac{g}{f} \frac{\partial h}{\partial y}; \quad v_g = \frac{g}{f} \frac{\partial h}{\partial x},$$

где  $u_g, v_g$  – геострофические скорости;  $g = 9.8$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения;  $f = 10^{-4}$  с – параметр Кориолиса.

На рис. 3 изображен пример полей рассчитанных скоростей за 30 июля 2008 г. с использованием различных СДТ. Как видно из примера, полученные карты существенно отличаются друг от друга, особенно в терминах амплитуд течений. Более подробно эти различия будут рассмотрены несколько позже.

### ДРИФТЕРНЫЕ ДАННЫЕ

Для валидации полученных полей течений использовались данные дрифтеров с 1999 по 2007 гг. Основным инструментом являлся SVP-В-дрифт-

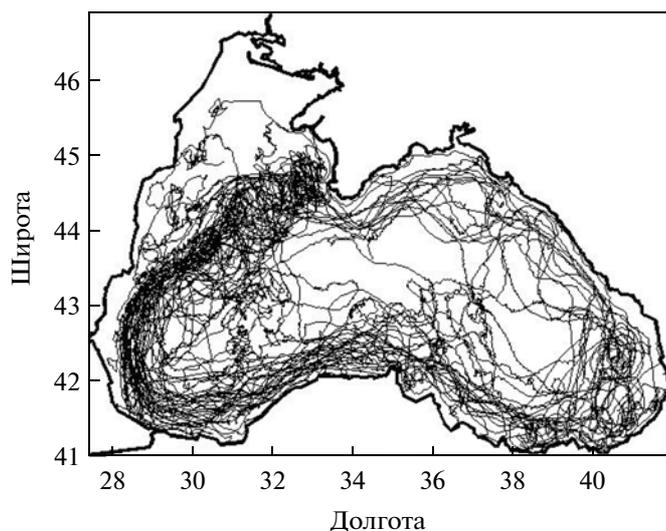


Рис. 4. Траектории дрейфа 51 буя разных типов, раз-  
вернутых в Черном море в период октябрь 1999–де-  
кабрь 2007 гг.

тер и его модификации (Motyzhev et al., 2000). Дрифтер имеет подводный парус 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.

Спутники системы “Аргос” определяют местоположение дрифтера с разрешением не хуже нескольких десятков метров. На рис. 4 изображены траектории дрейфа этих буюв.

Измерения покрывают практически всю акваторию Черного моря, наибольшая часть их находится на периферии в районе ОЧТ. Исходное временное разрешение данных составляет 1–6 часов. Всего использовались данные 51 дрифтера, что соответствует более чем 110000 измерений скорости.

По данным о местоположении дрифтеров  $r(t)$  были вычислены полные скорости течений  $V$ :

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

Инерционная компонента скорости дрифтера были отфильтрована скользящим средним. Окно фильтра выбиралось так, чтобы оно совпадало с периодом инерционных колебаний в Черном море ~17 ч, определяющимся по формуле

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

где  $\varphi$  – широта (для Черного моря она находится в диапазоне 41°–48° с.ш.).

### СОПОСТАВЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ

Для сопоставления скорости, рассчитанные по данным альтиметрии, были проинтерполирова-

ны на момент времени и местоположения контактных измерений скорости. Далее было проведено статистическое сопоставление рядов дрифтерных и альтиметрических скоростей как для всего массива данных, так и для каждого буя индивидуально.

Взаимные коэффициенты корреляции между контактными и спутниковыми измерениями скорости оказались практически одинаковы для обеих средних динамических топографий и составили:  $K_x = 0.76$  – для зональной компоненты скорости и  $K_y = 0.63$  – для меридиональной. Величина среднеквадратичного отклонения (СКО) составляет 0.086 м/с в случае применения ССДТ для восстановления геострофических скоростей, и 0.089 м/с – для КСДТ.

Сопоставление показало, что альтиметрические данные лучше воспроизводят зональную компоненту скорости движения дрифтера (ось  $x$  направлена на восток, ось  $y$  – на север). Коэффициенты корреляции для  $x$ -компоненты в среднем на 0.1 выше, чем для  $y$ -компоненты скорости дрифтера. Несмотря на это, СКО для меридиональной составляющей (0.083 м/с) меньше, чем для зональной компоненты скорости (0.09 м/с). Такое распределение статистических характеристик может быть обусловлено особенностями структуры циркуляции Черного моря. Дрифтеры, в большей своей массе, захваченные основным черноморским течением (ОЧТ), движутся по периферии Черноморского бассейна, вытянутого в зональном направлении. Вследствие этого на наиболее значительных промежутках пути дрифтера меридиональная скорость буя близка к нулю. Поэтому коэффициенты взаимной корреляции  $y$ -компоненты скорости оказываются чувствительными к незначительным ошибкам в определении скорости по данным альтиметра. В свою очередь высокие амплитуды зональной компоненты скорости приводят к увеличению стандартного отклонения. Кроме того, в интенсивном струйном течении при определении компоненты скорости, поперечной к потоку, увеличивается вклад нелинейных адвекционных членов в скорость буя, который в данной работе не учитывается.

Для более детальной оценки качества восстановления скоростей и определения источников несоответствий дальнейший анализ был проведен для каждого буя индивидуально. Для всех дрифтеров были рассчитаны коэффициенты покомпонентной корреляции, стандартное отклонение и разница средних амплитуд скоростей. Результаты (для некоторых буюв) представлены в таблице, из которой видно, что для большинства дрейфующих буюв получены значимые коэффициенты корреляции. Наиболее высокие значения корреляции получены для дрифтеров № 49169 и № 16336, для них они по обоим компонентам близки к 0.9 (табли-

Статистические характеристики сопоставления скоростей, полученных по данным альтиметрии с различными СДТ, и по данным дрейферных измерений

№	$K_x$		$K_y$		Стандартное отклонение, м/с		Разница средних скоростей, м/с	
	ССДТ	КСДТ	ССДТ	КСДТ	ССДТ	КСДТ	ССДТ	КСДТ
16333	0.842	0.828	0.784	0.723	0.119	0.139	-0.085	-0.110
16336	0.899	0.911	0.805	0.763	0.116	0.139	-0.075	-0.098
16337	0.845	0.810	0.660	0.640	0.109	0.110	-0.042	-0.082
34253	0.801	0.775	0.724	0.655	0.061	0.066	0.021	0.025
34832	0.863	0.795	0.632	0.701	0.086	0.115	-0.049	-0.056
40419	0.802	0.810	0.901	0.846	0.071	0.093	-0.010	-0.083
35502	0.802	0.803	0.630	0.641	0.133	0.151	-0.066	-0.096
40422	0.802	0.841	0.765	0.742	0.120	0.109	-0.105	-0.090
49169	0.895	0.878	0.918	0.918	0.052	0.052	-0.013	-0.020

ца). На рис. 5 построены траектории и скорости этих дрейферов. Показаны зональные и меридиональные компоненты скорости: полученные по данным дрейферов – серой линией, по данным альтиметрии с использованием ССДТ – черной пунктирной линией, а с использованием КСДТ – черной сплошной линией.

Эти два буя описывают различные типы движений: первый из них движется в потоке ОЧТ, а второй захвачен мощным антициклоническим вихрем, движущимся с севера на юг вдоль струи ОЧТ. Альтиметрические данные с высокой степенью точности воспроизводят амплитуды и направления для обоих типов движения (рис. 5).

На рис. 6 построены диаграммы взаимных коэффициентов корреляции между альтиметрическими и дрейферными скоростями для различных буев. Как видно из рис. 6, для наибольшего количества дрейферов коэффициент корреляции для зональной компоненты скорости составляет 0.7–0.9, для меридиональной – 0.6–0.7, т.е. для статистически значимого количества дрейферов спутниковая альтиметрия воспроизводит скорости с хорошей точностью.

Однако следует отметить, что для некоторых дрейферов коэффициенты корреляций малы. По нашему мнению, одной из возможных причин такого несоответствия может являться разное временное разрешение данных – несколько часов для дрейферных измерений и одна неделя для альтиметрических.

#### ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНОГО ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДАННЫХ НА РЕЗУЛЬТАТЫ СОПОСТАВЛЕНИЯ

Картированные альтиметрические аномалии уровня моря рассчитываются с дискретностью семь дней. Для их построения используется про-

странственно-временная интерполяция измерений нескольких альтиметрических спутников за временной интервал  $\pm 10$  дней (подробнее см. (Le Traon et al., 2001)). Поэтому скорости, рассчитанные по этим данным, являются в некоторой степени сглаженными по времени. Колебания геострофической скорости, на интервале менее семи дней, оказывающие влияние на перемещение буя, не могут быть учтены по этим данным. Изменчивость геострофической циркуляции на этих периодах приводит к занижению коэффициентов взаимной корреляции и увеличению СКО.

Для получения оценок амплитуд изменчивости геострофической скорости на таких временных масштабах по альтиметрическим данным были рассчитаны структурные функции скорости  $S(i)$  (корень из дисперсии приращений), т.е. СТО, как функция временного интервала от разницы между измерениями

$$S(i) = \sqrt{\frac{\sum (v_t - v_{t+i})^2}{n}}; \quad i = 7, 14, 21, \dots,$$

где:  $t, i$  – время измерения в днях;  $v$  – скорость в точке;  $n$  – количество измерений (рис. 7). Структурная функция, полученная таким образом, характеризует масштабы изменчивости скорости на соответствующих временных интервалах.

Значения структурной функции на недельном интервале варьируют в зависимости от координаты измерений: максимальные значения  $S(7)$  0.07–0.08 м/с приходятся на известные районы с повышенной синоптической активностью – так называемые зоны “квазистационарных” Севастопольского, Батумского и других антициклонов; в районе ОЧТ  $S(7)$  равна 0.05–0.06 м/с, а в центральной части минимальна и составляет 0.03–0.04 м/с. Поскольку большинство дрейфер-

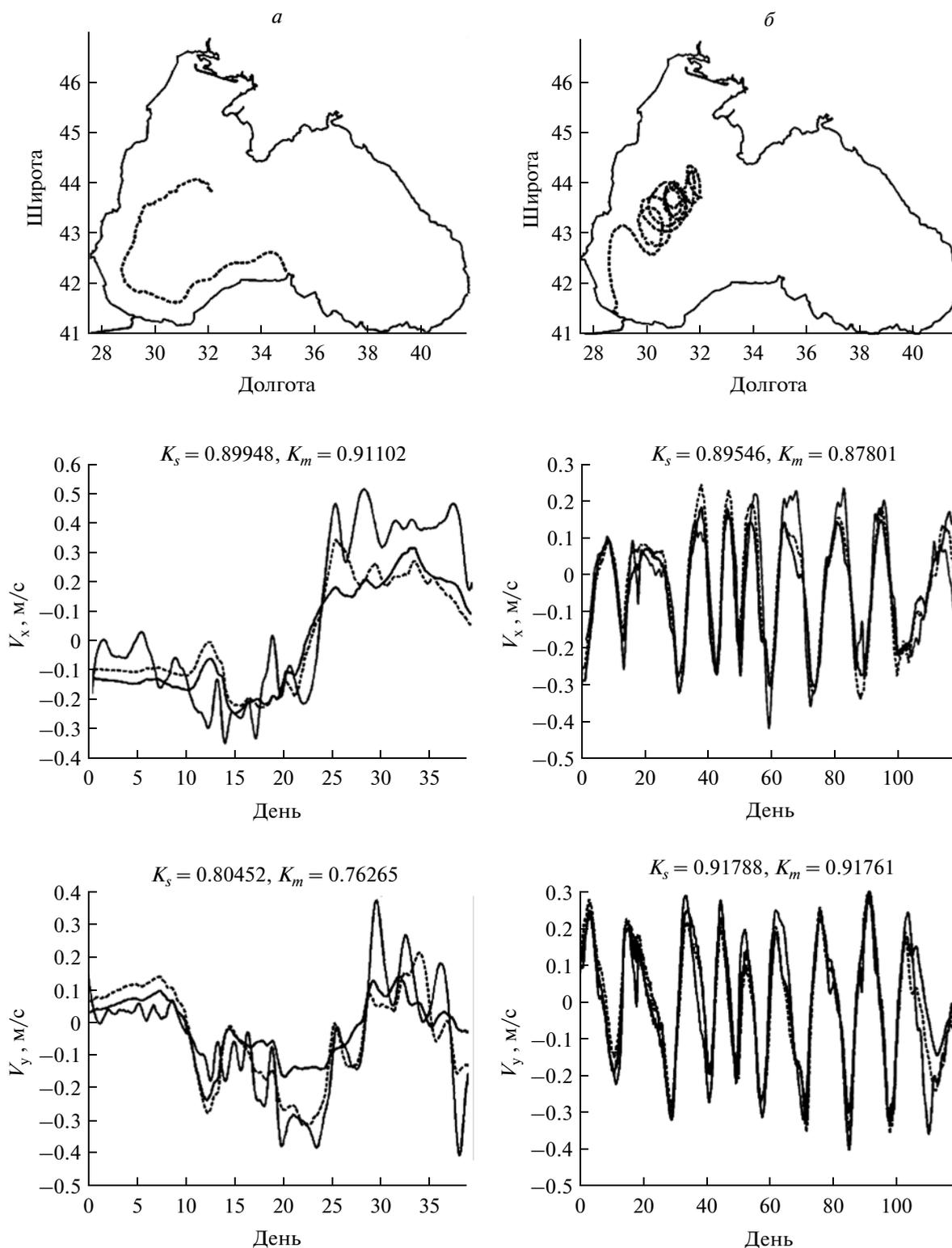


Рис. 5. Траектории (верхний ряд), зональные (средний ряд) и меридиональные (нижний ряд) компоненты скорости для дрейфтеров: а – № 49169; б – № 16336.

ных измерений находится в районе ОЧТ, можно считать, что погрешность измерений, связанная с различным временным разрешением данных,

равна 0.055 м/с, что составляет более чем половину величины среднего СКО, равного 0.09 м/с, т.е. основная часть величины СКО между дрейфтер-

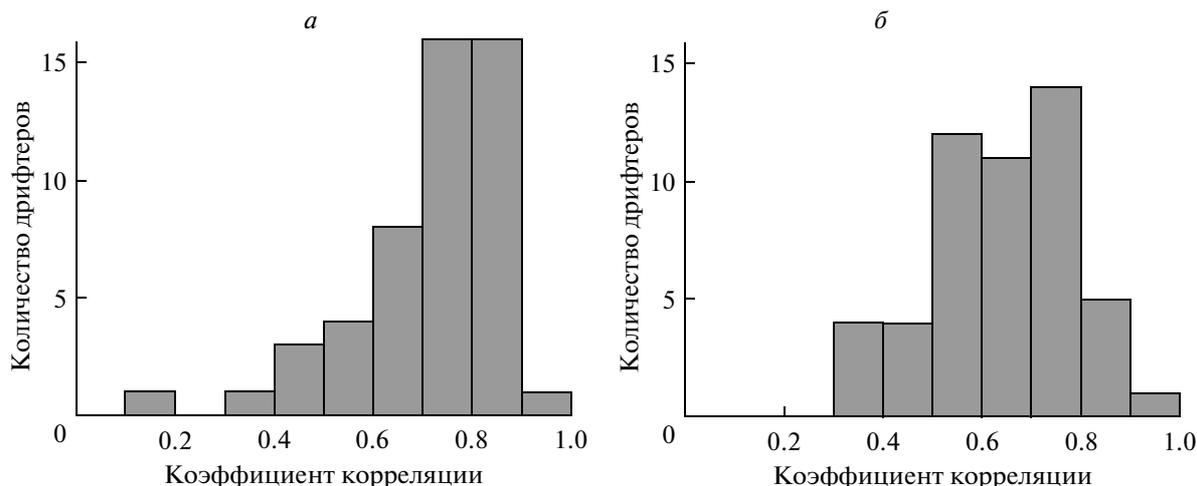


Рис. 6. Диаграммы взаимных коэффициентов корреляции между альтиметрическими и дрейферными скоростями для зональной (а) и меридиональной (б) компонент для различных дрейфтеров.

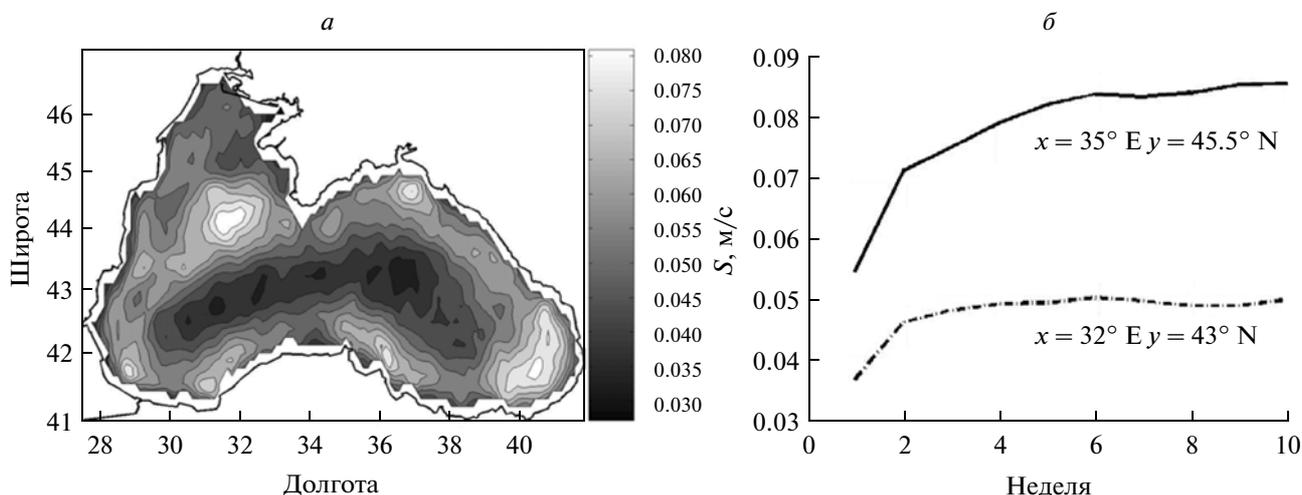


Рис. 7. Структурная функция скорости  $S$  (м/с), восстановленной по данным альтиметрии: а – для недельного интервала; б – для точек с координатами  $32^\circ$  в.д.,  $43^\circ$  с.ш. (пунктир) и  $35^\circ$  в.д.,  $45.5^\circ$  с.ш. (сплошная).

ными и альтиметрическими измерениями может быть объяснена изменчивостью геострофической скорости на периодах менее семи дней.

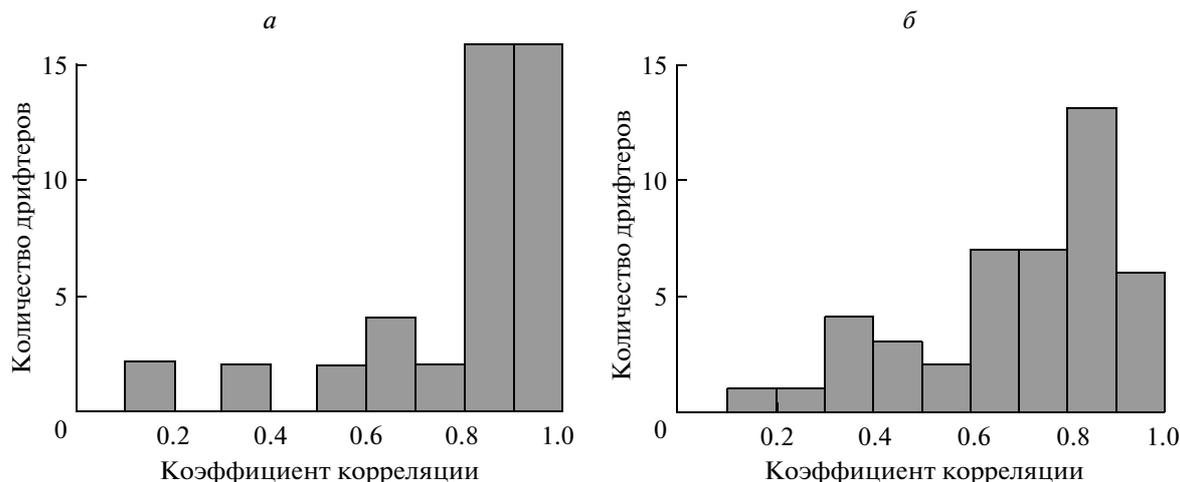
Для анализа влияния этого фактора на результаты сопоставления ряды скорости были сглажены семидневным низкочастотным фильтром, и далее было проведено сопоставление сглаженных рядов. В сопоставлении не участвовали дрейферы, время жизни которых составляло менее трех недель, т.е. меньше длины тройного окна фильтра. Всего были проанализированы данные 44 дрейфтеров.

Средние коэффициенты корреляции для обеих компонент выросли на 0.07, для зональной компоненты  $K_x = 0.8$ ; меридиональной  $K_y = 0.71$ ; СТО упало до 0.063 м/с. По диаграммам взаимных корреляций (рис. 8) видно, что более чем для 32 из 44  $K_x$  превосходит значение 0.8, для 16 дрейфтеров

$K_y$  имело очень высокие значения корреляций: 0.9–1.0. Для  $y$ -компоненты основное число коэффициентов корреляции сосредоточено в интервале 0.8–0.9. Таким образом, для скоростей, сглаженных семидневным фильтром, большинство коэффициентов корреляции очень высоко, что говорит о высоком качестве воспроизведения циркуляции альтиметрическими данными на синоптических и более долгопериодных временных масштабах.

#### ВЛИЯНИЕ СРЕДНЕЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОПОГРАФИИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ СОПОСТАВЛЕНИЯ

Оценим влияние средней динамической топографии на восстановление скоростей течений по



**Рис. 8.** Диаграммы взаимных коэффициентов корреляции между сглаженными семидневным низкочастотным фильтром альтиметрическими и дрейферными скоростями для: *a* – зональной, *b* – меридиональной компонент.

данным спутниковой альтиметрии. Взаимные коэффициенты корреляции между контактными и спутниковыми измерениями скорости оказались практически одинаковы для обеих средних динамических топографий и равны  $K_x = 0.76$  для зональной компоненты скорости и  $K_y = 0.63$  для меридиональной.

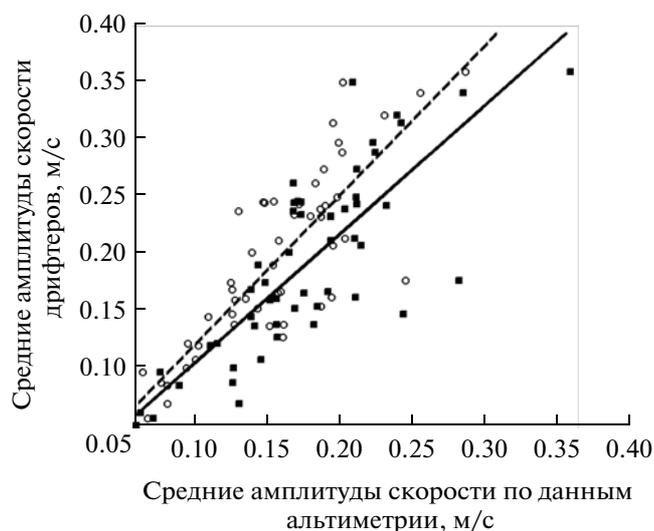
Наибольшее различие в результатах сопоставления заметно при анализе средних амплитуд скоростей движения дрейфера. Среднее по всем буям значение амплитуды скорости по данным контактных измерений равно  $0.199$  м/с, что при-

мерно соответствует оценкам скорости ОЧТ, полученным в (Poulain et al., 2005). Средняя амплитуда скорости, рассчитанной по данным альтиметрии, с использованием ССДТ составляет  $0.168$  м/с, КСДТ –  $0.146$  м/с.

Аналогичные оценки были выполнены также и для каждого буя индивидуально. На рис. 9 изображена диаграмма рассеяния для средних амплитуд, полученных по альтиметрическим и контактным данным с применением двух различных полей СДТ, и соответствующие линии регрессии, рассчитанные методом наименьших квадратов. Коэффициент регрессии, в случае использования ССДТ, равен  $1.08$  и значительно ближе к единице по сравнению с коэффициентом  $1.27$ , полученным при использовании КСДТ. Ошибки определения коэффициентов регрессии составляют  $\sim 0.04$ .

Рассчитанные коэффициенты регрессии больше единицы для обеих СДТ, т.е. средние амплитуды, рассчитанные по данным альтиметра, меньше, чем амплитуды дрейферных скоростей. Это является в первую очередь следствием того, что на парус буя оказывает влияние не только геострофическая компонента течений, но и дрейфовая компонента, которую необходимо каким-либо образом учитывать. Тем не менее величины амплитуд, полученных с применением ССДТ, ближе к реальным значениям. В то же время применение более сглаженной КСДТ приводит к получению более заниженных амплитуд скоростей течений.

И средняя, и индивидуальная, практически для каждого дрейфера, амплитуды скорости, полученные с использованием ССДТ, ближе к значениям, рассчитанным по контактным измерениям. Таким образом, ССДТ лучше воспроизводит реальные амплитуды скоростей течений и ее использование более предпочтительно при вос-



**Рис. 9.** Диаграмма рассеяния средних амплитуд скорости, восстановленной по дрейферным и альтиметрическим измерениям, и соответствующие линии регрессии: с использованием ССДТ (квадратные маркеры, сплошная линия) и КСДТ (круглые маркеры, пунктирная линия).

становлении циркуляции Черного моря с помощью спутниковой альтиметрии.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе на основе массива дрейферных данных за 1999–2007 гг. была проведена валидация скоростей течений, полученных по спутниковым альтиметрическим данным. Для расчета скоростей течений по альтиметрическим измерениям использовались две различных средних динамических топографии: ССДТ, полученная на основе сопоставления контактных и альтиметрических измерений (Кубряков, Станичный, 2011), и КСДТ, восстановленная при помощи модельного расчета климатической циркуляции с ассимиляцией гидрологических данных (Кныш и др., 2005). Статистическое сопоставление рядов дрейферных и альтиметрических скоростей было проведено как для всего массива данных, так и для каждого буя индивидуально.

Сопоставление показало, что альтиметрические измерения позволяют восстанавливать амплитуды скоростей и структуру циркуляции Черного моря с хорошей точностью как для струйных течений, так и для вихревых образований.

Альтиметрические данные лучше воспроизводят зональную компоненту движения дрейфера, коэффициенты корреляции для  $x$ -компоненты в среднем на 0.1 выше, чем для  $y$ -компоненты скорости дрейфера. Для большей части (33 из 52 дрейферов) всех измерений коэффициент взаимной корреляции для зональной компоненты превышает 0.7, а для меридиональной 0.6. Для сглаженных семидневным фильтром временных рядов более чем для 32 из 44 дрейферов  $K_x$  превосходит значение 0.8, для 16 дрейферов  $K_x$  составляет более 0.9 — очень высокие значения корреляций. Для  $y$ -компоненты основное число коэффициентов корреляции сосредоточено в интервале 0.7–0.8.

Некоторые различия в скоростях, восстановленных по контактным и спутниковым данным, могут быть связаны с влиянием пространственно-временной интерполяции при построении карт альтиметрических аномалий уровня.

Для анализа вклада этого фактора были построены структурные функции геострофических скоростей и оценены характерные масштабы изменчивости геострофической скорости на недельных временных интервалах. Они составили 0.07–0.08 м/с в районах с повышенной мезомасштабной активностью — в зонах Севастопольского, Батумского и других антициклонов; 0.03–0.04 м/с — в центральной части Черного моря; 0.05–0.06 м/с — в районе ОЧТ, что примерно соответствует половине величины стандартного отклонения (0.086 м/с) между рядами скорости.

Сопоставление амплитуд средних скоростей показало преимущество использования ССДТ над КСДТ при восстановлении циркуляции Черного моря с помощью альтиметрических данных. Использование ССДТ приводит к получению амплитуд скоростей, близких к реальным, в отличие от более сглаженной КСДТ, использование которой может приводить к занижению скоростей течений в Черном море. Это в первую очередь связано с тем, что для создания КСДТ использовался климатический массив гидрологических съемок за более долгий период 1950–2004 гг.

Современные спутниковые альтиметры позволяют получать регулярные измерения уровневой поверхности на всей акватории Черного моря с высоким пространственным разрешением. Валидация, проведенная в этой работе, показывает, что скорости, рассчитанные по этим измерениям, соответствуют реальным скоростям течений и могут быть использованы для оценки поверхностной циркуляции Черного моря при решении широкого круга океанографических и прикладных задач.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кныш В.В., Коротаев Г.К., Демышев С.Г., Белокопытов В.Н.* Долговременные изменения термохалинных и динамических характеристик Черного моря по климатическим данным температуры и солёности и их ассимиляции в модели // Морской гидрофиз. журн. 2005. № 3. С. 11–30.
- Кубряков А.А., Станичный С.В.* Восстановление средней динамической топографии Черного моря для альтиметрических измерений // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 4. С. 1–7.
- Cheney R., Miller L., Agreen R., Doyle N., Lillibridge J.* TOPEX/POSEIDON: The 2-cm solution // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. № C12. P. 24555–24563.
- Fu L.L., Cazenave A.* Satellite Altimetry and Earth Sciences // A handbook of Techniques and Applications. International Geophysics series, Academic Press, 2001. V. 69.
- Hernandez F., Schaeffer P., Rio M.H., Tamagnan D., Le Traon P.Y.* Mean dynamic topography for satellite altimetry: Two approaches, from oceanographic data or satellite gravimetry // Journees Luxembourgeoises de Geodynamique. 2001. V. 89. P. 19–25.
- Ichikawa K., Imawaki S., Ishii H.* Comparison of surface velocities determined from altimeter and drifting buoy data // J. Oceanogr. 1995. V. 51. P. 729–740.
- Le Traon P.Y., Dibarboure G., Ducet N.* Use of a High-Resolution Model to Analyze the Mapping Capabilities of Multiple-Altitude Missions // J. Atmos. Oceanic Technol. 2001. V. 18. P. 1277–1288.
- Motyzhov S.V., Poulain P.M., Zatsepin A.G., Fayos C., Kostianoy A.G., Maximenko N.A., Poyarkov S.G., Soloviev D.M., Stanichny S.V.* New phase of drifter experiment in the Black Sea. // DBCP Technical Document Series WMO. Geneva, 2000. V. 17. P. 116–128.

*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. V. 109.

*Rio M.H., Poulain P.M., Pascal A., Mauri E., Larnicol G., Santoleri R.* A mean dynamic topography of the Mediterranean Sea computed from altimeter data, in situ measurements and a general circulation model // *J. Marine Systems.* 2007. V. 65. P. 484–508.

*Pascual A., Faugere Y., Larnicol G., Le Traon P.Y.* Improved description of the ocean mesoscale variability by combining

four satellite altimeters // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. № L02611. doi:10.1029/2005GL024633.

*Poulain P.M., Barbanti R., Motychev S., Zatsepin A.* Statistical description of the Black Sea near-surface circulation using drifters in 1999–2003 // *Deep Sea Research Pt I: Oceanogr. Res. Pap.* 2005. V. 52. № 12. P. 2250–2274.

*Uchida H., Imawaki S., Hu J.H.* Comparison of Kuroshio surface velocities derived from satellite altimeter and drifting buoy data // *J. Oceanogr.* 1998. V. 54. P. 115–122.

## Quality Estimation of the Altimetry-Derived Surface Geostrophic Currents in the Black Sea from the Comparison with Drifting Buoy Measurements

A. A. Kubryakov, S. V. Stanichny

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

The combined measurements of the satellite altimeters allow to determine the sea level anomalies of the Black Sea on the regular grid with high spatial resolution  $1/8^\circ$ . In this article the surface geostrophic current reconstructed from these data is comprised with the velocities, computed from drifting buoy measurements during 1999–2007. The comparison was made as for total array of in-situ data (consist of ~110000 measurements), as for each buoy individually. For the reconstruction of the altimetry-derived velocity we use two different fields of the Mean Dynamic Topography (MDT): the synthetic and climatic mean dynamic topography. The comparison show that the usage of the synthetic MDT leads to a better results when comprising to the in-situ data. In general, the altimetry-derived velocities have a rather good accuracy, and are in good agreement with the drifting buoy measurements.

**Keywords:** satellite altimetry, circulation, drifting buoys, high-resolution altimetry data, Black Sea

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

# ПАРАМЕТРЫ ПРИДОННОЙ ДИНАМИКИ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК ОПТИЧЕСКИМИ СКАНЕРАМИ

© 2013 г. В. М. Кушнир

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь*

*E-mail: kushnirv@yahoo.com*

Поступила в редакцию 06.06.2012 г.

Рассмотрена возможность определения параметров придонной динамики прибрежных зон западного побережья Крыма. Используются показания оптических сканеров системы MODIS на длинах волн 645 и 858.5 нм с пространственным разрешением 250 м. Учет атмосферы выполнен на основе анализа оптических контрастов прибрежной зоны и зоны прозрачных морских вод за ее пределами. В качестве безразмерных динамических параметров прибрежной зоны использованы числа Шильдса. Показано, что основные особенности пространственной структуры чисел Шильдса, по данным космических съемок и модельных расчетов в целом соответствуют друг другу.

**Ключевые слова:** прибрежная зона, концентрация взвеси, оптические сканеры, числа Шильдса

DOI: 10.7868/S0205961413030020

### ВВЕДЕНИЕ

Динамические процессы в прибрежной зоне моря характеризуются сложным взаимодействием прибрежных течений и поверхностных волн с морским дном. Это взаимодействие проявляется в деформации профилей пришедших на мелководье поверхностных волн, усилении нелинейных волновых эффектов и формировании турбулентного пограничного слоя под действием вертикальных перепадов волновых и квази-постоянных скоростей относительно дна. Турбулентные напряжения на поверхности дна приводят к перемещению донного грунта и формированию профилей взвешенных частиц. В результате при усилении транспорта донного материала образуются зоны размыва, при ослаблении – области осажде-ния частиц грунта и образование отмелей. Указанные сложные литодинамические процессы имеют большое практическое значение. Это касается навигации в мелководных районах (образование отмелей), укрепления прибрежной зоны (динамика пляжей), решения практически всех проблем морского строительства, а также освоения энергетических ресурсов мелководных районов (размыва опорных оснований буровых платформ, терминалов, подводных трубопроводов и других океанотехнических установок).

Литодинамические эффекты активно проявляются в прибрежных морских зонах на глубинах порядка десятка метров и на космических съемках морской поверхности в виде объектов с увеличением уровня восходящего излучения в види-

мом и ИК-диапазонах спектра (Карабашев и др. 2009; Карабашев, Евдошенко, 2011). Активные проявления литодинамических процессов наблюдаются в Керченском проливе (размыв о. Коса Тузла и образование новых отмелей), на западном побережье Крымского п-ова (изменчивость конфигураций евпаторийских пляжей, промоина в Бакальской косе шириной свыше 600 м и глубиной 3–4 м), а также в других прибрежных районах, где на дне преобладает песок (Кушнир, Бердников, 2010; Ломакин и др., 2008; Спиридонова, 2007).

Интенсивность литодинамических процессов, влияющих на изменчивость рельефа дна, резко усиливается при штормах. С другой стороны, особенностью таких процессов является интегральный эффект их постепенного развития при умеренных гидрометеорологических условиях.

Традиционные методы изучения литодинамических процессов основаны на повторяющихся батиметрических съемках конкретного района и проведении комплексных геологических изысканий. Выполнение таких работ связано со значительными финансовыми затратами, а возможность их выполнения сильно зависит от погодных условий. Поэтому разработка новых технологий литодинамических исследований прибрежных зон является актуальной научно-технической проблемой.

В настоящее время имеются следующие предпосылки для ее решения:

– спутниковые методы измерения яркости восходящего излучения в оптическом (0.4–0.7 мкм) и

ИК-диапазонах, скорости приводного ветра, высот волн 3%-ной обеспеченности;

– численные методы расчета полей поверхностных волн, течений и параметров удельного транспорта донного материала (Иванов, Михинов, 1991; Иванов и др., 2010);

– разработки специализированной измерительной аппаратуры “Донная станция” для исследований динамики придонных процессов (Дыкман и др., 2012; Маньковская, Маньковский, 2008; Иванов и др. 2006).

Эти возможности использованы в настоящей работе для создания технологии дистанционного определения параметров придонной динамики, которые влияют на интенсивность литодинамических процессов в прибрежных зонах.

В качестве конкретного примера рассмотрен участок западного побережья Крыма вблизи Бакальской косы (Каркинитский залив). В этом районе с 21 по 25 июня 2011 г. проводились измерения характеристик придонной динамики комплексом “Донная станция” (Иванов и др., 2006; Дыкман и др., 2012). Результаты этих измерений были обработаны в комплексе с данными космических съемок MODIS с пространственным разрешением 250 м. При этих съемках в пределах одного изображения получены характеристики взмученных прибрежных вод и прилегающих глубоководных вод с относительно высокой прозрачностью. С учетом сложной конфигурации береговой линии и рельефа дна выполнено численное моделирование параметров поверхностных волн и течений. Эти комплексные данные стали основой для обоснования методов дистанционных оценок параметров динамики придонного слоя.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящей работе использованы данные космических съемок MODIS от 21–25 июня 2011 г. территорий западного побережья Крыма, Каркинитский залив (северо-западная часть Черного моря). В этот период на Бакальской косе работала экспедиция Морского гидрофизического института Национальной академии наук Украины (МГИ НАНУ), выполняющая измерения характеристик придонной динамики комплексом “Донная станция”, созданным в МГИ (Иванов и др., 2006). В его состав входят трехкомпонентный измеритель пульсаций вектора скорости течения и среднего значения его горизонтальных составляющих, ловушки взвешенного донного материала с дистанционным считыванием данных, лазерный прозрачномер для определений концентрации взвеси и среднего размера частиц донного материала. Измерения пульсаций вектора скорости течения выполнены малогабаритным трехкомпонентным электромагнитным дат-

чиком, установленным неподвижно в специальной раме на расстоянии 0.25 м от поверхности морского дна. Частота измерений равна 100 Гц, данные в виде физических величин пульсаций скорости течения вводятся непосредственно в память персонального компьютера по кабельной линии связи. Серии измерений выполнялись на расстоянии 10–15 м от берега на глубине около 1.5 м. Так как характерный период поверхностных волн был равен 2.2–2.7 с, а длины анализируемых рядов составляли 20000 отсчетов (200 с), обеспечивалась высокая статистическая достоверность спектральных характеристик волновых возмущений и индуцированной турбулентности в диапазоне частот от 0.1 до 50 Гц (число степеней свободы при оценке спектров было равно 60).

Спектральная обработка данных измерений пульсаций скорости течения показала, что на периодах 2.2–2.7 с находится основной пик спектра волновых возмущений. В диапазоне частот от 0.37–0.45 до 1 Гц наклон спектра  $S(f) \propto f^{-5}$ , при увеличении частоты до 10–15 Гц  $S(f) \propto f^{-3}$ , что соответствует диапазону мелкомасштабной турбулентности (об этом свидетельствуют структура спектров когерентности и фазы горизонтальных и вертикальной составляющих пульсаций скорости, а также модельные оценки (Дыкман и др., 2012)). Анализ спектральных характеристик пульсаций скорости течений показал, что при наблюдавшейся средней скорости ветра 7–8 м/с в прибрежной зоне формируется сложная динамика поля скорости течения. Ее основными составляющими являются нелинейные поверхностные волны Стокса и мелкомасштабная турбулентность, индуцированная этими волнами. Расчеты параметров нелинейных волн, выполненные по модели пятого порядка (Skjelbreia, Hendrickson, 1961), показали, что амплитуда первой гармоники волновой скорости по данным измерений соответствует модельным расчетам с относительным расхождением не более 10%. Амплитуда второй и третьей гармоник волновой скорости на расстоянии от дна 0.25 м значительно меньше амплитуды турбулентных пульсаций на этих же частотах.

В диапазоне частот от 1 до 12–15 Гц спектры пульсаций скорости относятся к диапазону мелкомасштабной турбулентности. Оценки скорости диссипации и микромасштаба турбулентности выполнены по известным соотношениям (Монин, Озмидов, 1981). По данным экспериментальных спектров пульсаций скорости течения выполнена оценка динамической скорости (скорости трения) на дне и турбулентных напряжений, под действием которых происходит перемещение и взмучивание донного материала – формирование профилей взвеси. Обычно аналогичные оценки находят на основе полуэмпирических моделей. Выполненные расчеты для шести моделей (Кушнир, 2005,

Дыкман и др., 2012) показали, что наиболее близкими к экспериментальным данным являются оценки по модели, использованной в работе (Иванова, Михинова, 1991). Эта модель используется ниже для независимых оценок параметров придонной динамики.

Измерения, выполненные лазерным прозрачномером на расстоянии 0.25 м от поверхности песчаного дна, показали, что концентрация взвешенных частиц грунта сильно зависела от погодных условий. При этом оценки среднего размера частиц песка при наблюдаемой скорости ветра 7–8 м/с изменялись в пределах от 0.16 до 0.18 мм.

Таким образом, данные измерений комплексом “Донная станция” были использованы:

– для контроля соответствия измеренных и вычисленных характеристик периодов и амплитуд поверхностных волн;

– для выбора необходимой эмпирической модели расчета придонного трения;

– для определения среднего размера частиц донного грунта.

При несоответствии измеренных и вычисленных периодов поверхностных волн в МГИ отработана методика необходимой корректировки параметров модели SWAN (Иванов и др., 2010).

Для расчета параметров динамики придонного слоя в общем случае необходимы результаты гранулометрического анализа. Специальные исследования такого типа в районе исследований не проводились. В связи с этим использованы таблицы по инженерной геологии морских грунтов, в которых для песчаного дна имеются данные процентного распределения фракций донного материала по размерам в зависимости от глубины отбора проб. В диапазоне глубин от 0.2–0.5 м до 7.4–7.6 м наиболее высокий процент соответствует  $d = 0.175$  мм (Кушнир и др., 2009, Приложение). Эта оценка близка к результатам измерений прозрачномером комплекса “Донная станция”.

В районе проведения исследований также не проводились прямые измерения концентрации взвеси на морской поверхности, необходимые для обработки данных космических съемок оптическими сканерами. Такие данные, совместно с результатами космических съемок, были получены экспедициями Южного научного центра РАН (ЮНЦ РАН) в Керченском проливе в 2008–2009 гг. (Кушнир, Бердников, 2010), а также в совместной экспедиции ЮНЦ РАН и МГИ НАНУ в 2011 г. Учитывая близость характерных глубин в Керченском проливе и вблизи Бакальской косы, а также указанную выше зависимость гранулометрического состава от глубин, в настоящей работе для обработки космических съемок использованы данные, полученные в Керченском проливе. Естественно, такое допущение нуждается в проведении дальнейших исследований, а получен-

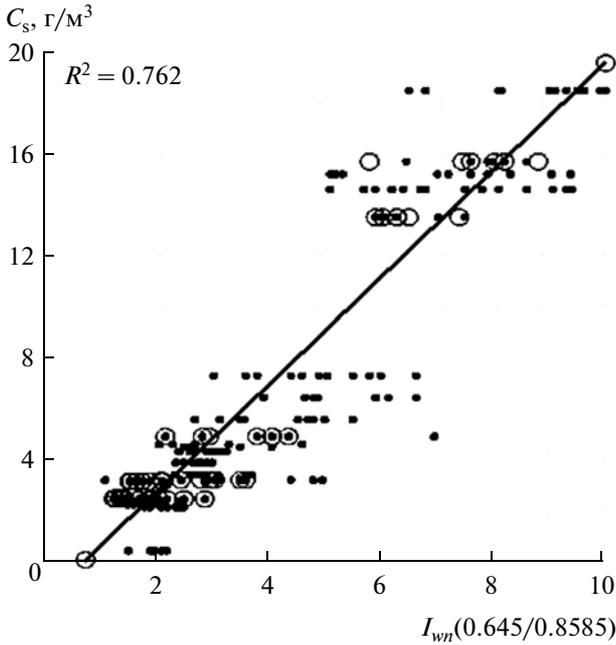
ные количественные результаты о взаимосвязи концентрации взвеси на морской поверхности и данных оптических сканеров можно рассматривать как предварительные.

Для указанных дат проведения экспедиционных исследований были определены поля скорости ветра на основе атмосферной модели MM-5. Эти поля были использованы для расчетов полей поверхностных волн по модели SWAN (с контролем на основе данных измерений комплексом “Донная станция”) и полей скорости ветровых прибрежных течений.

Использованные данные системы MODIS (первый уровень обработки) были получены из свободно распространяемых NASA по сети INTERNET (<http://ladsweb.nasa.gov/data/search.htm>). Первичная обработка выполнена на основе программы Beam VISAT и включала отбор двух каналов, соответствующих длинам волн 0.645 и 0.8585 мкм, выделение области, содержащей мелководный и глубоководный районы вблизи Бакальской косы, оцифровку данных в единицах яркости ( $\text{Вт м}^{-2} \text{стр}^{-1} \text{мкм}^{-1}$ ), привязку каждого пиксела к географическим координатам.

Известно, что атмосферная коррекция оптических съемок мутных прибрежных вод из космоса представляет собой сложную и пока не полностью решенную проблему. Об этом свидетельствует то, что разработанные к настоящему времени универсальные алгоритмы оценки концентрации хлорофилла-*a* по данным ДЗ Земли из космоса нуждаются в существенной корректировке для высокопродуктивных и мутных прибрежных, внутренних вод и эстуариев, где фитопланктон является единственным фактором, определяющим их оптические свойства (так называемых “вод II типа”). Воды прибрежной зоны вблизи Бакальской косы, Керченского пролива, Азовского моря относятся к этому типу, и применяемые в настоящее время алгоритмы атмосферной коррекции и последующих оценок концентрации хлорофилла-*a* по данным спутниковых сканеров цвета для таких акваторий приводят к ошибочным, иногда более чем на порядок, результатам (Сапрыкин, 2011; Матишов и др., 2010; Moses et al., 2009).

В настоящей работе использован другой метод атмосферной коррекции и последующего расчета концентрации взвеси. В его основу положены данные международного проекта AERONET, обработанные в МГИ НАНУ. Анализ показал, что пространственная изменчивость аэрозоля над Азово-Черноморским бассейном определяется, главным образом, крупномасштабной адвекцией воздушных масс, в силу чего радиус корреляции  $R_{Aer}(r)$  пространственной изменчивости аэрозольных образований равен 160 км (Толкаченко, 2010). Обычно на одном и том же космическом снимке прибрежных районов имеются участки мутных



**Рис. 1.** Эмпирическая зависимость  $C_s = f(I_{wn}(0.645/0.8585))$  по данным экспедиций ЮНЦ РАН: 26.09.2011–28.09.2011 (точки); апрель 2008 г. и октябрь 2009 г. (кружки), а также линия регрессии  $C_s = 2.1178 I_{wn}(0.645/0.8585) - 1.5935$ , достоверность аппроксимации  $R^2 = 0.762$ .

прибрежных вод и вод с относительно высокой прозрачностью на расстояниях порядка 10 км. Сигналы яркости восходящего излучения от прозрачной воды на длинах волн 0.645 и 0.8585 мкм пренебрежимо малы, а расстояние от прозрачной воды до мутных прибрежных вод существенно меньше величины  $R_{Aer}(r)$ . Поэтому измеренные фотометром спутника величины яркости для прозрачных вод по существу являются сигналами яркости аэрозольного и молекулярного рассеяния в атмосфере, а сигналы яркости восходящего излучения для зоны мутных прибрежных вод – суммой сигналов этого же атмосферного рассеяния и обратного рассеяния прибрежных вод. Вычисление нормализованной яркости восходящего излучения морской поверхности на указанных длинах волн основано на упрощенном соотношении атмосферной коррекции следующего вида:

$$L_T(\lambda) = L_A(\lambda) + L_R(\lambda) + L_W(\lambda)t(\lambda), \quad (1)$$

где  $L_T(\lambda)$  – яркость излучения, измеряемая бортовым фотометром на длине волны  $\lambda$ ;  $L_W(\lambda)$  – яркость восходящего излучения морской поверхности;  $L_A(\lambda)$ ,  $L_R(\lambda)$  – величины яркости, обусловленные аэрозольным и молекулярным рассеянием в атмосфере;  $t(\lambda)$  – коэффициент пропускания атмосферы, равный  $\exp\{-[0,5\tau_R(\lambda) + \tau_{Oz}(\lambda)](\cos\theta_V)^{-1}\}$ ;  $\tau_R(\lambda)$  – оптическая толщина слоя молекулярного

рассеяния;  $\tau_{Oz}$  – оптическая толщина озонового слоя;  $\theta_V$  – зенитный угол бортового фотометра. Величины  $\tau_R$ ,  $\tau_{Oz}$  для длин волн 0.645 и 0.8585 мкм равны соответственно 0.0504, 0.0162 и 0.0219, 0.00154 (Gordon, 1997).

Оценки других составляющих атмосферной коррекции (обрушение волн, блики морской поверхности) для условий мелководного Азовского моря получены в статье (Кушнир, 2009), и их вклад для мелководья в первом приближении является несущественным.

В качестве информативного параметра для расчетов концентрации взвеси и хлорофилла-*a* использован индекс цвета  $I_{wn}(0.645/0.8585)$ , который в данном случае определяются как отношение нормализованной яркости в двух спектральных участках:

$$I_{wn}(0.645/0.8585) = L_{wn}(0.645)/L_{wn}(0.8585). \quad (2)$$

Для системы MODIS пространственное разрешение для указанных каналов равно 250 м. Полагая, что масштаб изменчивости атмосферных характеристик значительно превышает расстояние от мутных прибрежных вод до вод с относительно высокой прозрачностью, соотношение (2) можно записать таким образом:

$$I_{wn}(0.645/0.8585) = \frac{L_t(0.645) - \min[L_t(0.645)]}{L_t(0.8585) - \min[L_t(0.8585)]} P(0.645/0.8585), \quad (3)$$

где  $\min[L_t(0.645)]$ ,  $\min[L_t(0.8585)]$  – минимальные величины измеренных сигналов на указанных длинах волн, относящиеся к прозрачным водам;

$$P(0.645/0.8585) = \exp\left\{\left[\frac{\tau_R(0.645) - \tau_R(0.8585)}{2} + \tau_{Oz}(0.645) - \tau_{Oz}(0.8585)\right]\left(\frac{1}{\cos\theta_V} + \frac{1}{\cos\theta_S}\right)\right\}$$

– поправочный множитель, учитывающий пропускание атмосферы и пересчет яркости восходящего излучения в яркость нормализованного восходящего излучения. В диапазоне изменения зенитных углов спутника  $\theta_V$  и солнца  $\theta_S$  от  $0^\circ$  до  $60^\circ$ , относительные изменения поправочного множителя не превышают  $\pm 6\%$ .

Как это уже было отмечено, для получения данных о взаимосвязи индекса цвета (3) и концентраций взвеси на морской поверхности были использованы данные аналогичных измерений, выполненных в Керченском проливе. Полученная зависимость  $C_s = f(I_{wn}(0.645/0.8585))$  представлена на рис. 1.

Значительный разброс точек относительно линии регрессии объясняется большим числом фак-

торов, основными из которых являются различные масштабы пространственного осреднения данных, несинхронность измерений, инструментальные погрешности, неполная компенсация влияния атмосферы. Тем не менее уровень достоверности оказался достаточно высоким, что позволяет использовать приведенную зависимость для оценок концентрации взвеси по данным определения индекса цвета в указанной длинноволновой части спектра. Следует отметить также относительно высокую стабильность приведенной зависимости, поскольку данные 2011 г. согласуются с данными, полученными в 2008 и 2009 гг.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Концентрация взвеси на морской поверхности в прибрежной мелководной зоне связана с параметрами динамики придонной области. В этой области поверхностные волны, сформировавшиеся в глубоководной зоне моря, и прибрежные течения взаимодействуют с поверхностью морского дна, что приводит к формированию турбулентного пограничного слоя. Под действием турбулентных напряжений формируются профили различных фракций донного материала.

Интенсивность придонной турбулентности определяется величиной напряжений вблизи поверхности дна, т.е. величиной  $\rho_w u_*^2$ , где  $\rho_w$  – плотности воды и взвеси;  $u_*$  – динамическая скорость или скорость трения. Напряжения вблизи поверхности дна определяются большим числом параметров, основными из которых являются глубина  $H$ , средний размер фракций донного материала  $d$ , ускорение свободного падения  $g$ , скорость свободного опускания частицы  $W(d)$ , плотность воды и песка –  $\rho_w$  и  $\rho_s$ , скорость ветра  $W_w$ , средняя по глубине скорость течения  $W_c$ . Последние два параметра определяют концентрацию взвеси на морской поверхности  $C_s$ , и поэтому в общем виде можно записать следующее соотношение:

$$\rho_s u_*^2 = f(C_s, H, d, g, W, \rho_w, \rho_s). \quad (4)$$

Из восьми размерных параметров три имеют независимую размерность, и поэтому в соответствии с  $P$ -теоремой можно привести соотношение (4) к следующему безразмерному виду:

$$Y = \frac{u_*^2}{\gamma dg} = f\left[\left(\frac{W^2}{gH}\right), \frac{d}{H}, \frac{C_s}{\rho_s - \rho_w}\right]. \quad (5)$$

В этом соотношении  $Y$  – число Шильдса, которое имеет смысл отношения силы дестабилизации частицы на дне к силе ее удержания. В соотношении (5) часть параметров являются постоянными

величинами для условий конкретной съемки ( $W, g, d, \rho_w, \rho_s$ ), другая часть ( $H, C_s$ ) изменяется в каждой точке исследуемой акватории. Поэтому совокупность постоянных параметров можно рассматривать как неопределенный размерный множитель  $A_Y$ , а соотношение (5), исходя из условий подобия, записать в следующем виде (Седов, 1972):

$$Y = A_Y H^n C_s^m. \quad (6)$$

Неизвестные параметры  $A_Y, m, n$  можно найти для условий конкретной съемки с определенными пространственными распределениями глубин  $H$ , концентрацией взвеси на морской поверхности  $C_s$ , параметрами поверхностных волн (высота  $h$ , длина  $\lambda$ , период  $T_w$ ). Пример такого распределения приведен на рис. 2 для условий проведения измерений 21 июня 2011 г. на Бакальской косе. Для этих же условий на рис. 3 показаны пространственное распределение векторов скорости прибрежных течений и соответствующее распределение модуля скорости течений  $V_m = \sqrt{u^2 + v^2}$ . Выше было отмечено, что оценки волновой скорости трения (динамическая скорость)  $u_{*w}$  и скорости трения, индуцированной квази-постоянным течением  $u_{*c}$ , согласуются наилучшим образом с данными прямых измерений комплексом “Донная станция” при использовании эмпирических соотношений из работы (Иванов, Михинова, 1991)

$$\begin{aligned} U_{wo} &= \frac{\pi h}{T_w \operatorname{sh}(kH)}; & a_w &= \frac{U_{wo} T_w}{2\pi}; \\ u_{*w} &= \frac{0.42 U_{wo}}{\ln(0.64 a_w d^{-1} + 1)}; \\ u_{*c} &= 0.2595 V_m \left[ \lg\left(\frac{H}{d}\right) \right]^{-0.4515}; & Y &= \frac{u_{*w}^2 + u_{*c}^2}{gd\gamma}; \\ \gamma &= \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;  $U_{wo}$  – волновая скорость вблизи поверхности дна;  $a_w$  – амплитуда колебаний волновой скорости.

По соотношениям (7) вычисляется пространственное распределение  $Y(x, y)$ , которое используется для определения неизвестных параметров  $A_Y, m, n$  методом наименьших квадратов.

Опуская промежуточные преобразования, ниже приводим систему линейных уравнений, из которой определяются указанные параметры:

$$\begin{aligned} \langle \ln Y \ln H \rangle - \langle \ln Y \rangle \langle \ln H \rangle &= n \langle (\ln H)^2 \rangle - \\ - \langle \ln H \rangle \langle \ln H \rangle + m \langle \ln H \ln C_s \rangle - \langle \ln C_s \rangle \langle \ln H \rangle; \\ \langle \ln Y \ln C_s \rangle - \langle \ln Y \rangle \langle \ln C_s \rangle &= n \langle \ln H \ln C_s \rangle - \\ - \langle \ln H \rangle \langle \ln C_s \rangle + m \langle (\ln C_s)^2 \rangle - \langle \ln C_s \rangle \langle \ln C_s \rangle; \\ \ln A_Y &= \langle \ln Y \rangle - n \langle \ln H \rangle - m \langle \ln C_s \rangle, \end{aligned} \quad (8)$$

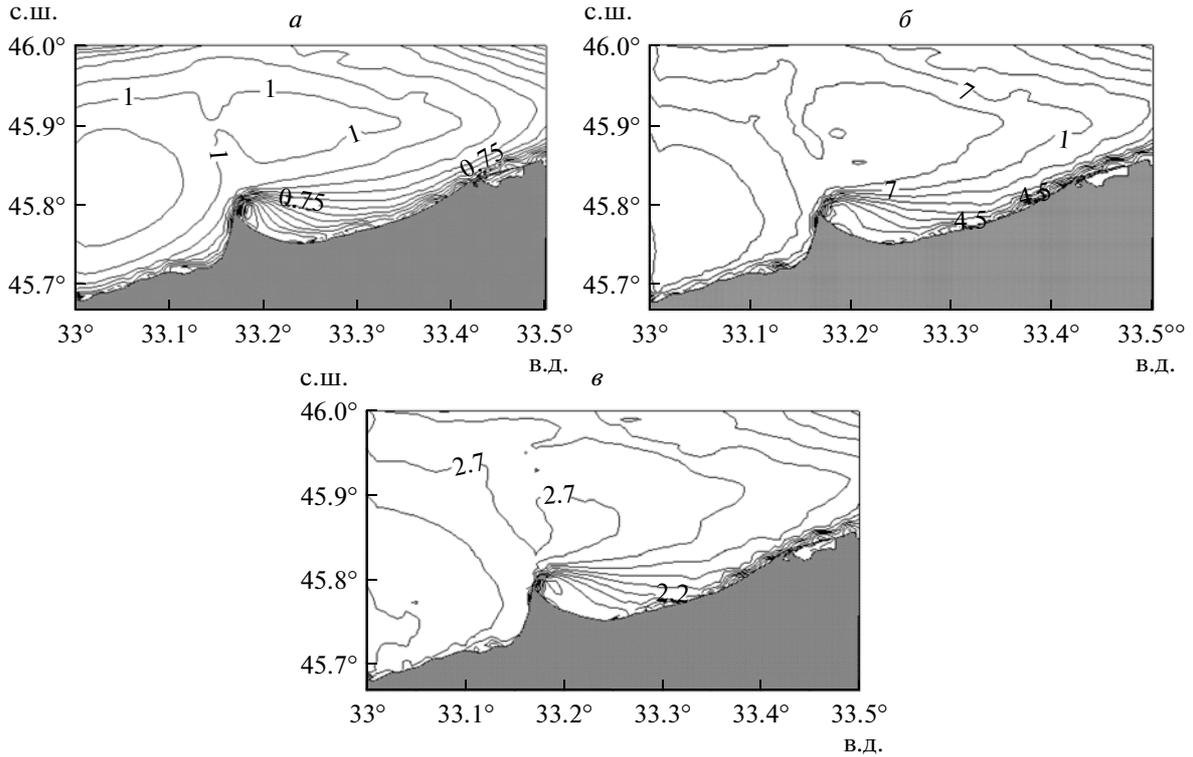


Рис. 2. Волновые параметры: *a* – высота волн, м; *б* – длина волн, м; *в* – периоды волн, с.

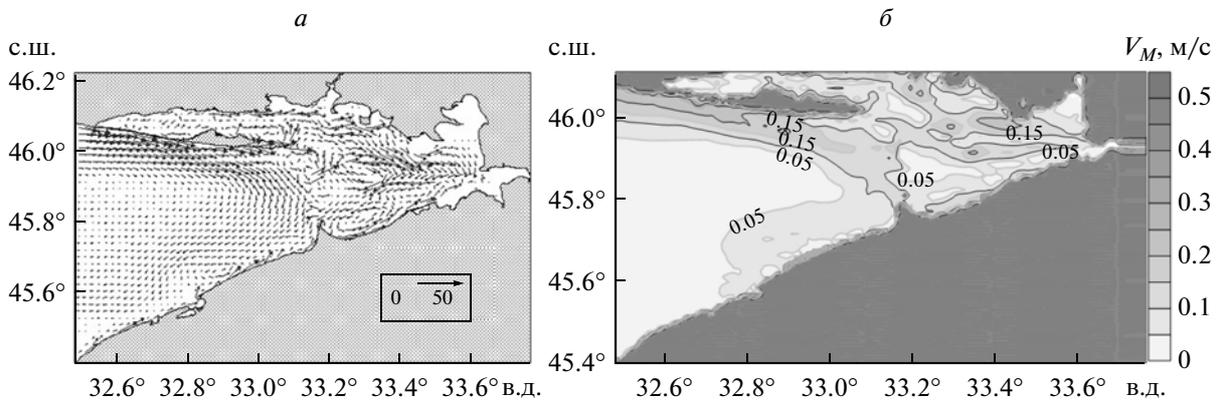


Рис. 3. Параметры течений: *a* – структура поверхностных течений (на врезке показан масштаб векторов скорости величиной 50 см/с); *б* – пространственное распределение модулей скорости среднего по глубине прибрежного течения.

где  $\langle z \rangle$  – среднее значение величины  $z$ .

Для рассматриваемых условий получено следующее соотношение:

$$Y = 1.15H^{-1.6}C_s^{0.115}. \tag{9}$$

На рис. 4 приведены пространственные распределения  $Y(x, y)$ , одно из которых получено по соотношению (7), второе – по (9), т.е. на основе данных о рельефе дна и концентрации взвеси на морской поверхности. Можно отметить тождественность основных особенностей этих распре-

делений как по конфигурации неоднородностей, так и по величинам чисел Шильдса.

На рис. 5 показано пространственное распределение концентрации взвеси по данным съемки 21.06.2011 г. Видно, что, как и распределения чисел Шильдса, аномальные величины  $C_s$  концентрируются вблизи Бакальской косы и по дуге между ней и Тендровской косой, находящейся севернее. Другая область аномальных величин концентрации взвеси и чисел Шильдса примыкает к береговой зоне Тендровской косы с экстремальными величинами вблизи ее северного берега.

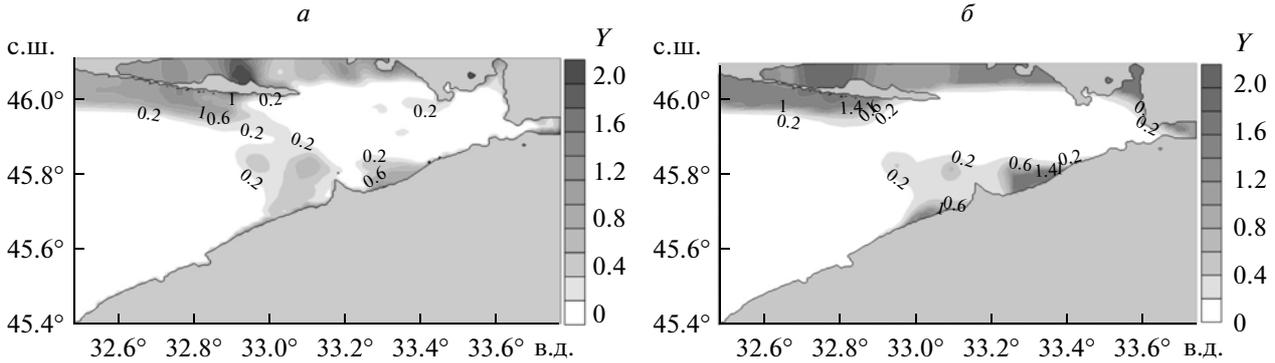


Рис. 4. Пространственное распределение чисел Шильдса: а – вычисленное по соотношениям (7); б – вычисленное по соотношениям (9).

Располагая данными о пространственном распределении чисел Шильдса и полагая, что средний размер  $d$  частиц песчаного дна равен 0.175 мм, можно в первом приближении определить концентрацию взвешенных песчаных наносов вблизи дна и профили взвешенных наносов.

Для этого необходимо определить следующие параметры (Иванов, Михинов, 1991):

$$D_* = d \left( \frac{gY}{\nu^2} \right)^{0.333}, \quad \nu = 1 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} - \text{молекулярная вязкость;}$$

$W_S$ , м/с – скорость свободного падения частиц песка диаметром  $d$ . При  $d = 0.175$  мм,  $D_* = 3.4$ ,  $W_S = 0.015$  м/с;

$u_* = (\gamma g d Y)^{0.5}$  – скорость трения (динамическая скорость), м/с;

$z_0 \cong d/4$  – минимальный размер неоднородностей дна (Иванов и др., 2010);

$C_b = 0.035 \left( \lg \frac{u_* D_*^{0.7}}{W_S} \right)^{3.75}$  – безразмерная концентрация наносов вблизи поверхности дна,  $C_b = \frac{\rho_n - \rho_w}{\rho_s - \rho_w} = \frac{C_s}{\rho_s - \rho_w}$ ,  $\rho_s \cong 2600$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_w \cong 1020$  кг/м<sup>3</sup> – плотность морской воды.

Используется также зависимость концентрации взвеси от расстояния до дна, полученная на основе модели логарифмического пограничного слоя, которая в целом соответствует экспериментальным данным (Иванов и др., 2010; Кушнир, 2007)

$$C_s(z) = (\rho_s - \rho_w) C_b \left( \frac{z}{z_0} \right)^{-(W_S/ku_*)}, \quad (10)$$

где  $k = 0.42$  – постоянная Кармана;  $z$  – расстояние от поверхности дна.

Пространственное распределение концентрации взвеси на поверхности дна, вычисленное по приведенным выше соотношениям для  $C_b$  приве-

дено на рис. 6. Основные особенности этого пространственного распределения совпадают с особенностями распределения концентрации взвеси на поверхности моря.

Возможность использования упрощенной модели профилей взвешенного донного материала над поверхностью дна (10) определяется сопоставлением двух независимых методов оценки показателя степени.

С одной стороны,

$$m_1 = \frac{\ln(C_b/C_s)}{\ln(H/0.25d)},$$

с другой,

$$m_2 = \frac{W_S}{ku_*}.$$

На рис. 7 показано пространственное распределение отношения  $m_1/m_2$ . Видно, что в зоне активизации литодинамических процессов придонной динамики между Бакальской и Тендровой косами это отношение близко к единице. В зонах ослабления интенсивности придонной динамики – глубо-

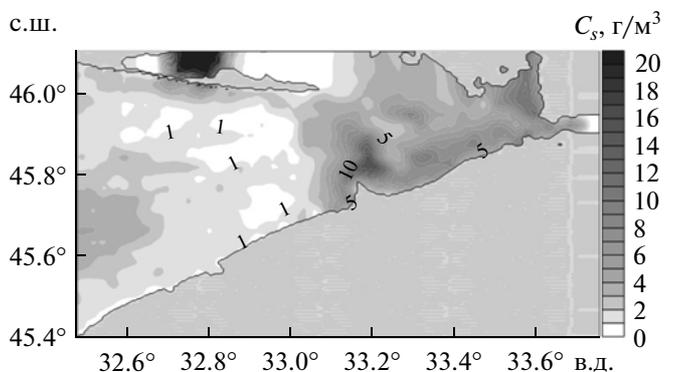


Рис. 5. Пространственное распределение концентрации взвеси по данным съемки 21.06.2011 г.

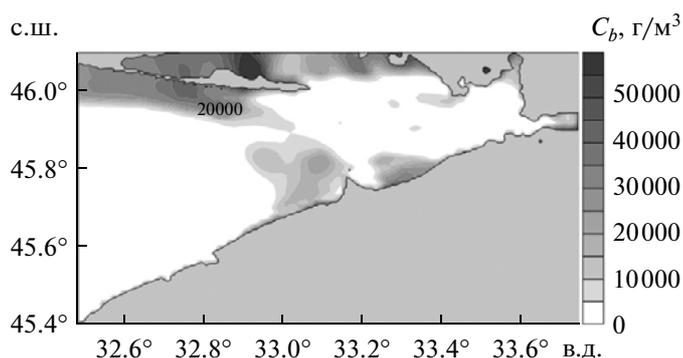


Рис. 6. Пространственное распределение концентрации наносов в придонной области,  $г/м^3$ .

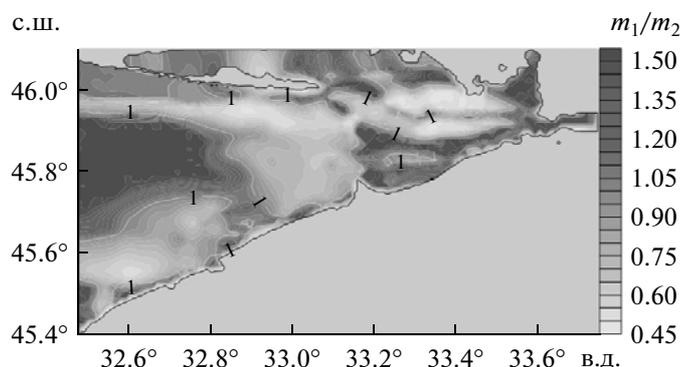


Рис. 7. Пространственное распределение отношения  $m_1/m_2$ .

ководная часть Каркинитского залива — это отношение увеличивается до 1.4–1.5. В этой же зоне числа Шильдса и концентрация взвеси на морской поверхности имеют незначительные величины, что косвенно свидетельствует о сильном ослаблении динамики придонных процессов.

## ВЫВОДЫ

Для получения в первом приближении параметров придонной динамики прибрежной зоны на основе использования результатов космических съемок необходимо располагать данными о рельефе дна, характеристиках поверхностных волн и прибрежных течений, результатами гранулометрического анализа несвязного (песчаного) грунта, данными прямых определений концентрации взвеси на поверхности моря. Необходимо также использовать гипотезу о том, что пространственные масштабы яркости рассеяния света аэрозолем значительно превышают расстояние порядка 10 км от мутных прибрежных вод до глубинных вод с высокой прозрачностью. В значительной степени эта гипотеза подтверждается данными МГИ НАНУ по международному проекту AERONET.

Оценка концентрации взвеси  $C_s$  (минеральной и органической) в мутных прибрежных водах может быть выполнена по результатам взаимных сличений индекса цвета для длинноволновых каналов оптического сканера (0.645 и 0.8585 мкм) и результатов прямых измерений концентрации взвеси стандартным методом взвешивания. Несмотря на значительный разброс данных относительно линии регрессии, между концентрацией взвеси и индексом цвета, коэффициент достоверности достаточно высок (коэффициент корреляции равен 0.873). Полученная таким образом зависимость  $C_s = f(I_{wn}(0.645/0.8585))$  для Керченского пролива характеризуется относительно высокой временной стабильностью, о чем свидетельствуют данные, полученные в 2008, 2009 и 2011 гг. Эта же зависимость использована в настоящей работе для западного побережья Крыма. Основанием для этого является то, что гранулометрический состав песчаного морского грунта определяется в значительной степени диапазоном глубин отбора проб, которые для Керченского пролива и района исследований близки. Тем не менее, такое допущение нуждается в проведении дальнейших исследований, а использованную зависимость  $C_s = f(I_{wn}(0.645/0.8585))$  можно рассматривать как предварительный результат.

Результаты модельных расчетов чисел Шильдса по пространственным распределениям характеристик поверхностных волн и течений достаточно хорошо согласованы с пространственными распределениями чисел Шильдса по данным космических съемок и рельефу дна.

Оценки профиля взвешенных наносов могут быть выполнены по упрощенной модели на основе баланса взмучивания и оседания частиц донного грунта (степенная модель). Вычисленные двумя независимыми методами показатели степени этой модели достаточно хорошо согласованы по величине в зоне проявления активных литодинамических процессов, в данном случае это участок Каркинитского залива между Бакальской и Тендровской косами и вблизи берегов. По мере удаления от этой зоны указанные показатели степени начинают друг от друга существенно различаться.

В статье использованы результаты определений концентрации взвеси в Керченском проливе, полученные экспедициями ЮНЦ РАН, расчетов параметров поверхностных волн, выполненных С.В. Федоровым, прибрежных течений по данным Ю.Н. Рябцева. Данные о поле ветра были представлены М.В. Шокуровым. Автор благодарен названным коллегам за их вклад в подготовку этой работы.

Представленная работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 11-05-90439-Укр\_ф\_а (Россия) и ДФФД Ф40 68 (Украина).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дыкман В.З., Иванов В.А., Кушнир В.М. Нелинейные волны и турбулентность в прибрежной зоне о. Коса Тузла // Морской гидрофиз. журн. 2012. № 4. С. 3–21.
- Иванов В.А., Михинов А.Е. Прогноз динамики наносов в прибрежной зоне моря (Практические рекомендации и примеры расчетов). Севастополь: МГИ АН УССР, 1991. 50 с.
- Иванов В.А., Дыкман В.З., Ефремов О.И. и др. Современные методы и средства контроля морской среды / Под ред. В.А. Иванова. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. 112 с.
- Иванов В.А., Кушнир В.М., Федоров С.В. Динамика изменений рельефа дна в Керченском проливе по данным космических съемок оптическими сканерами // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. Вып. 22. С. 127–155.
- Карабашев Г.С., Евдошенко М.А., Шеберстов С.В. Об индикации придонного переноса на морском мелководье по данным спутникового сканера цвета океана // Океанология. 2009. Т. 49. № 1. С. 28–36.
- Карабашев Г.С., Евдошенко М.А. О ветровом режиме мелководья как факторе формирования спутниковых изображений моря (на примере Южного Каспия) // Океанология. 2011. Т. 51. № 5. С. 807–817.
- Кушнир В.М. Структура волнового пограничного слоя над ровным и неровным дном // Морской гидрофиз. журн. 2005. № 6. С. 188–202.
- Кушнир В.М. Придонный пограничный слой в Черном море: экспериментальные данные, турбулентная диффузия, потоки // Океанология. 2007. Т. 47. № 1. С. 39–48.
- Кушнир В.М. Характеристики приповерхностного слоя Азовского моря по данным оптических сканеров системы MODIS // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 3. С. 35–46.
- Кушнир В.М., Душко В.Р., Федоров С.В. Воздействие морской среды на системы освоения шельфа. Севастополь: СевНТУ, 2009. 303 с.
- Кушнир В.М., Бердников С.В. Характеристики взвеси в Керченском проливе по данным контактных и дистанционных измерений // Геоинформатика. 2010. № 2. С. 61–67.
- Ломакин П.Д., Спиридонова Е.О., Чепыженко А.И. и др. Антропогенные и природные источники взвешенного вещества в водах Керченского пролива // Морской экологич. журн. 2008. Т. 7. № 4. С. 51–59.
- Маньковская Е.В. Информационная технология обработки гидрооптической информации для экологического контроля морских вод: Дис. ... канд. технич. наук. МГИ НАН Украины, 2011. 153 с.
- Маньковская Е.В., Маньковский В.И. Информационная технология обработки измерений флуктуаций прозрачности морской среды для определения параметров крупной взвеси // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: МГИ НАНУ, 2008. С. 137–139.
- Матишов Г.Г., Поважный В.В., Бердников С.В., Мозес В.Д., Гительсон А.А. Оценки концентрации хлорофилла а и первичной продукции в Азовском море с использованием спутниковых данных // Докл РАН. 2010. Т. 432. № 4. С. 563–566.
- Монин А.С., Озмидов Р.В. Океанская турбулентность. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 320 с.
- Сапрыгин В.В. Изучение распределения хлорофилла-а в Азовском море по данным дистанционного зондирования Земли из космоса и результатам судовых измерений: Дис. канд. географ. наук. Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН, 2011. 125 с.
- Седов А.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1972. 440 с.
- Спиридонова Е.О. Оценка влияния гидрометеорологических факторов на распределение донных осадков в Керченской бухте // Сб. тр. Межд. науч.-технич. сем. "Системы контроля окружающей среды". 14 сентября 2007 г. Севастополь, 2007. С. 235–239.
- Толкаченко Г.А. Исследования пространственных масштабов оптических неоднородностей аэрозоля над Черным морем // Системы контроля окружающей среды. Севастополь, 2010. Вып. 14. С. 83–88.
- Gordon H.R. Atmospheric correction of ocean color imagery in the Earth Observing System // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. № D14. P. 17.081–17.106.
- Moses W.J., Gitelson A.A., Berdnikov S., Povazhnyy V. Satellite estimation of chlorophylla concentration using the red and NIR bands of MERIS - The Azov Sea case study // IEEE Geosci. Rem. Sens. Lett. V. 6. № 4. P. 845–849.
- Skjelbreia L., Hendrickson A. Fifth order gravity wave theory // Proc. 7th Conf. Coastal Engineering. 1961. P. 184–196.

## Characteristics of Coastal Dynamics Benthic According Satellite Imagery Optical Scanner

V. M. Kushnir

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

Possibility of definition of parameters of benthic dynamics of coastal zones (depth first tens in m, distance from coast first tens in km) which bottom consists mainly of an inconsistent ground material – sand is considered. Indications of optical scanners of system MODIS on lengths of waves of 645 and 858.5 nm, with the spatial resolution of 250 m for the western coast of Crimea are used. The atmosphere account is carried out on the basis of the analysis of optical contrasts of a coastal zone and a zone of transparent sea waters behind its limits. As dimensionless dynamic parameters of a coastal zone numbers of Shields are used. It is shown, that the basic features of spatial structure of Shields numbers, according to space surveys and modeling calculations as a whole correspond each other.

**Keywords:** coastal zone, suspension concentration, optical scanners, Shields numbers

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

# КЛАССИФИКАЦИЯ ЛЕСНОГО ПОКРОВА ТВЕРСКОЙ ОБЛАСТИ НА ОСНОВЕ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ АЭРОИЗОБРАЖЕНИЙ

© 2013 г. Е. В. Дмитриев

*Институт вычислительной математики РАН, Москва*

*E-mail: yegor@inm.ras.ru; yegor@mail.ru*

Поступила в редакцию 29.08.2012 г.

В течение последних лет проводятся исследования, направленные на создание системы гиперспектрального аэрозондирования лесной растительности на региональных масштабах. Для отработки элементов системы используются данные, получаемые в ходе измерительных кампаний для тестовых участков Тверского лесхоза. Для проведения гиперспектральной аэросъемки используется российский видеоспектрометр производства НПО “Лептон”. Применяемая методика распознавания наземных объектов основана на принципах байесовской классификации с учетом оптимизации признакового пространства. Выбор наиболее информативных спектральных каналов основывается на методе последовательного включения. Предлагается подход, позволяющий сделать выбор каналов более устойчивым. Приводятся результаты сравнения классификации древостоев на основе гиперспектральных изображений и наземной информации, показывающие состоятельность разрабатываемой системы.

**Ключевые слова:** гиперспектральные изображения, распознавание образов, классификация растительного покрова, оптимизация спектральных каналов

DOI: 10.7868/S0205961413030019

### ВВЕДЕНИЕ

Лесной покров является комплексной трехмерной структурой с большими вариациями породного состава, ориентации фитоэлементов, их вертикального распределения. На сегодняшний день активно развиваются эмпирические и физические приближения, используемые для оценки параметров, характеризующих элементы этой структуры, по данным дистанционного зондирования (ДЗ).

В эмпирических моделях производится поиск меры связи спектральной отражательной способности или вегетационных индексов с теми или иными переменными данной структуры на основе уравнений регрессии. Ограничения этого подхода связаны с соответствующими модельными представлениями, применимыми только для конкретных условий получения дорогостоящих наземных измерений параметров, характеризующих указанную структуру (Asner et al., 2003).

Физическое приближение описания взаимодействия излучения с параметрами растительного покрова способствует пониманию особенностей рассматриваемой проблемы, но требуется учет таких факторов, как затенения и анализ смеси спектральных образов разных компонентов этой структуры. Основное преимущество этого приближения перед эмпирическим приближением – в примени-

мости модельных описаний для разных объектов и выборочных условий (Jaquinta et al., 1997).

С начала 1970-х гг. ведется разработка различных моделей переноса излучения в растительном покрове (Goel, 1988; Roberts, 2001). Геометрические модели описывают растительный покров как мутную среду с геометрическими формами (конусы или цилиндры), которые отбрасывают тени на окружающие их фоны. Соответственно прозрачность крон представляется равной нулю. Эти модели чаще всего используются для разреженной растительности, когда основную роль играет затенение.

В аналитических моделях (Suits, 1972; Verhoef, 1984) растительный покров описывается как горизонтально однородный полубесконечный слой, в котором фитоэлементы рассматриваются как рассеивающие и поглощающие частицы при заданных геометрии и плотности. Соответствующие модели применимы для описания однородного, плотно покрытого листьями растительного покрова. При этом взаимное затенение фитоэлементов не принимается во внимание.

Рассматривают также гибридные модели мутной среды с соответствующими возмущениями за счет рассеивающих и поглощающих частиц. Одним из примеров служит модель взаимодействия света с лесной растительностью (Forest Light Interaction Model/FLIM) (Rosema et al., 1992). В работе (Atzberger, 2000) предлагается более сложная мо-

дель, допускающая обращение расчета отражательной способности лесной растительности (Invertible Forest Reflectance Model/INFORM). Компьютерная модель трассирования лучей падающего излучения (Gastellu-Etchegorry et al., 1996) рассчитывает пути отдельных фотонов в растительном покрове в лучевом приближении. Однако, как оказалось, данную модель достаточно сложно обратить.

При проведении тематической обработки данных ДЗ с целью классификации и восстановления характеристик лесного покрова часто возникает необходимость решения прямых и обратных задач переноса излучения в системе “растительный покров–атмосфера”. При решении прямых задач проводятся модельные расчеты спектральной отражательной способности фитоэлементов и растительного покрова в целом. Если указанные модельные параметры измеряются в полевых условиях, то это дает возможность проведения количественной валидации результатов модельных расчетов. Анализ численных решений прямых задач способствует также пониманию причин различия данных модельных расчетов и измерений. Открываются возможности изучения влияния растительности на ее спектральные сигнатуры, проявляющиеся в отражательной способности, с точки зрения влияния биохимической структуры растительности на поле излучения (Vasour et al., 2002; Rautiainen et al., 2004).

Традиционные процедуры обращения моделей переноса излучения в растительном покрове используют процедуры оптимизации для оценки параметров моделей при минимизации некоторой функции, характеризующей информационную меру связи сравниваемых данных. Основные трудности получения оптимальных оценок параметров в соответствующем итерационном процессе связаны с необходимостью достижения глобального минимума функционала ошибки, зависящего от многих переменных (Gong et al., 1999), с вычислительной неэффективностью используемых попиксельных процедур в региональных и глобальных исследованиях (Kimes et al., 2002). Соответствующим образом возрастает компьютерное время реализации вычислительных процедур обращения при большой размерности (спектральной и/или угловой) обрабатываемых данных. Альтернативой этим численным методам оптимизации расчетов служат так называемые “таблицы быстрого просмотра” (lookup-tables/LUT) результатов модельных расчетов (Combal et al., 2002; Weiss et al., 2000). Для оценки характеристик растительного покрова с помощью этих таблиц каждый измеренный спектр отражательной способности сравнивается со всеми спектрами, сохраненных в базе данных LUT. Окончательное решение принимается в виде комбинации наилучшего соответствия между измеренными и расчетными данными по спектральной отражательной способности растительности, т.е. соответствует наименьшему значению выбранной ин-

формационной меры близости. Преимущества такого подхода – в нахождении наиболее вероятных решений с использованием выбранной меры. Недостаток – в довольно большом пространстве параметров используемых выборок, что приводит к необходимости поиска решений для отдельных элементов разрешения при существенных затратах компьютерного времени.

При обращении модели спектральной отражательной способности применяются эффективные подходы, использующие аппарат искусственных нейронных сетей (ИНС) (Gong et al., 1999; Kimes et al., 2002; Udelhoven et al., 2000). В этом случае модельные спектры отражения растительного покрова и соответствующие параметры его состояния используются для обучения с точки зрения нахождения нелинейной связи между измерительными данными (входные данные) и биофизическими переменными покрова, которые восстанавливаются по данным модельных расчетов (выходные данные). Преимущества указанных подходов – в вычислительной эффективности процедур нахождения связей между входными и выходными переменными (Demuth, Beale, 2003). Основные недостатки связаны с трудно предсказуемым поведением ИНС, если реальные спектральные характеристики исследуемых объектов не являются репрезентативными для модельных спектров.

По мере развития современных технологий восстановления количественных параметров состояния объектов аэрокосмического мониторинга на основе методов вычислительной математики стала очевидной необходимость создания подхода промежуточной степени сложности, который, с одной стороны, обладал бы значительными возможностями по сравнению с крайне упрощенными подходами, основанными на вегетационных индексах, а с другой, был бы реально реализуем на практике, в отличие от подходов, основанных на полных моделях радиационного режима лесной растительности. За последние годы был предложен новый подход к решению задачи восстановления биологических и продукционных характеристик на основе многоспектральных и гиперспектральных аэрокосмических изображений. Подход основан на решении прямых и обратных задач переноса излучения в системе “растительный покров–атмосфера” и полностью удовлетворяет изложенным выше требованиям. Результаты исследований с использованием данных методов опубликованы в работах (Kozoderov, Dmitriev, 2008, 2011; Козодеров и др., 2007–2010). В настоящей статье обсуждаются результаты работы по усовершенствованию подходов, применяемых для классификации лесной растительности на основе изображений с высоким пространственным и спектральным разрешением. Рассматривается проблема выбора оптимального набора спектральных каналов с целью повышения вычислительной эффективности

обработки данных ДЗ и обеспечения устойчивости решения задачи распознавания.

### ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

Для получения детальных региональных изображений поверхности Земли применяют мультиспектральные (до 10 каналов) и гиперспектральные (сотни каналов) видеокамеры, установленные на воздушные летательные аппараты. Относительно низкая высота полета обеспечивает возможность совмещения высокого пространственного и спектрального разрешения и позволяет существенно уменьшить искажающее влияние атмосферы. В качестве примера наиболее известных зарубежных гиперспектральных камер (ГСК) можно привести AisaEAGLET (Spectral Imaging Ltd, Финляндия) и CASI-1500, (ITRES Research Ltd, Канада), которые имеют соответственно 150 и 210 каналов в видимом- и ближнем ИК-диапазонах (ВБИК), при пространственном разрешении примерно 0.4 м при вировании в надира с 1 км.

Развитие отечественных систем аэрокосмического мониторинга является одной из стратегических задач Российской Федерации. На сегодняшний день этот процесс идет с некоторым отставанием. Один из лучших образцов действующих отечественных сканеров, установленный на спутнике “Ресурс-ДК1”, имеет пространственное разрешение от 2 до 3 м (эллиптическая орбита) и имеет лишь два канала в видимом и один в ближнем ИК-диапазоне.

Конкуренция с западными разработчиками в нынешних условиях сложна, но все же принципиально возможна. Гиперспектрометры разработки НПО “Лептон” (г. Зеленоград, г. Москва), данные которых рассматриваются в настоящей работе, не уступают по основным параметрам ведущим западным образцам (CASI-1500) и превосходят аналогичные известные отечественные приборы, такие как “Фрегат” (НИУ ИТМО, г. Санкт-Петербург), имеющий 70 каналов при пространственном разрешении 1 м с высоты 1 км, “Реагент” (ЗАО “Реагент”, г. Москва) – 106 каналов при пространственном разрешении 1.4 м с высоты 1 км и “Сокол-ГЦП” (ФНПЦ ОАО Красногорский завод им. С.А. Зверева, г. Красногорск, Московской обл.) – 105 каналов при пространственном разрешении 0.75 м с высоты 1 км.

В последние годы нами используется призматическая авиационная ГСК высокого разрешения РНКП.64.00.00.00, разработанная и откалиброванная в НПО “Лептон” (Козодеров и др., 2012). Диспергирующим элементом является сложная призма (призма прямого зрения, Амичи), состоящая из семи оптически склеенных простых призм

(производится в НПО “Лептон”). Данную призму отличают повышенная линейность дисперсионной кривой и значительное приближение направления распространения светового пучка со средней длиной волны к оси прибора. Выполнение последнего условия исключительно актуально. Именно оно позволяет при диапазоне угловой дисперсии 2°–3° (диапазон углового разложения спектральных компонент входного светового потока) сформировать на фотоприемнике прямые изображения спектральных щелей на всех длинах волн спектральной полосы. За счет этого растр синтезированных моноспектральных изображений становится прямоугольным.

В качестве фотоприемника применяется ПЗС-матрица SONY ICX255AL, 1/3", имеющая 500 × 582 (291) активных элементов, размером 9.8 × 6.3 (12.6) мкм. Полученный спектр может отличаться от исходного спектра вследствие конечной ширины спектральной щели, абберационных и дифракционных искажений, вносимых входной, выходной и коллимационной оптическими системами, элементами фотоприемника.

Летом 2011 г. была проведена измерительная кампания, в ходе которой выполнялась авиационная съемка тестовых территорий Тверского лесхоза. При разработке полетного задания были выбраны участки с различным типом рельефа, водных объектов, растительных ассоциаций и антропогенных зон. Основным тестовым участком Тверского полигона по растительным ассоциациям был выбран район нового карьера около г. Тверь (рис. 1а на цветн. вклейках). Размер участка составил примерно 4 × 3 км (12 км<sup>2</sup>).

Такой выбор обусловлен, с одной стороны широким разнообразием ассоциаций, с другой – доступностью данного участка для наземных обследований. На этом же участке расположены водные объекты (рис. 1б – там же): 1 – искусственный песчаный карьер; 2 – участок р. Волга (до Ивановского водохранилища); 3 – противопожарный водоем; 4 – участок болота. Антропогенные зоны представлены городской ТЭЦ-3 и свалкой.

Съемки производились с борта самолета АН-2 Тверского областного авиационно-спортивного клуба РОСТО-ДОСААФ. Кроме ГСК в состав оборудования входят: блок питания; ноутбук с необходимым программным обеспечением; гиросtabilизированная платформа и прочие элементы подвески; фотокамера для получения цифровых снимков территории съемки. Техническое оборудование проходит обязательную проверку перед полетом и регламентные работы между полетами (зарядка аккумуляторов, юстировка ГСК на подвеске, проверка затяжки креплений, выставление уровня, пробная съемка перед вылетом и т.п.).

Перед полетом ГСК проходит серию специальных тестов, заключающихся в определении

интервала линейности текущей калибровки и зависимости уровня шума от уровня сигнала. Первый тест позволяет установить оптимальное для текущих условий время накопления, обеспечивающее наилучшую точность измерения спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ). При слишком малом времени накопления измеряемые СПЭЯ существенно возмущаются собственным шумом ПЗС-матрицы, а при слишком большом, данные калибровки ГСК становятся недействительными из-за нелинейных эффектов. Второй тест позволяет определить эффективное радиометрическое и радиационное разрешение ГСК. Так для описанной выше кампании измерений было установлено, что спектральное разрешение должно быть редуцировано к значению из диапазона от 5 до 30 нм посредством объединения каналов.

Подготовка оператора воздушных съемок проводилась разработчиками ГСК и программного обеспечения (НПО "Лептон"). При возникновении проблем во время съемки и первоначальной обработки спектров проводились консультации с разработчиками и устранение проблем (как в г. Зеленограде, так и с выездом разработчиков в г. Тверь).

Маршрут каждого полета указывался в полетном задании. Определялись координаты начала и конца каждого трека (участка съемки), которые корректировались в зависимости от погоды (облачности, ветра), разрешения на полеты над определенными участками в день полетов, результатов предыдущих съемок (неудачные съемки отдельных треков). Разработанный маршрут заносился штурманом самолета в навигатор АН-2 и совместно с пилотом устанавливалась очередность прохода треков и необходимое расстояние до точки начала трека (чтобы обеспечить точность прохождения трека). Для каждого полета предусматривались запасные варианты на случай изменения ситуации в полете.

#### МЕТОДИКА КЛАССИФИКАЦИИ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ АЭРОИЗОБРАЖЕНИЙ

При решении задачи классификации наземных объектов на основе гиперспектральных данных, классифицируемыми объектами являются пиксели изображения. Множество классов содержит названия распознаваемых объектов (например, растительность, почва, водная поверхность, асфальт, бетон и т.п.). На практике вместо непосредственно классифицируемых объектов рассматривают их характеристики (признаки), при этом соответствующее множество называют признаковым пространством.

В рассматриваемом случае в качестве признаков будем рассматривать значения СПЭЯ отраженного излучения видимого и ближнего ИК-диапазонов, измеряемые с помощью ГСК. По данным измерений, для каждого пиксела изображения можно построить соответствующий спектр. Один из способов формирования признакового пространства заключается в том, что каждый спектральный канал рассматривается в качестве отдельного измерения пространства признаков. Таким образом, каждый спектр пиксела гиперспектрального изображения представляется точкой в  $N$ -мерном пространстве, где  $N$  – число спектральных каналов.

Следует отметить, что при решении данной задачи не всегда возможно использовать непосредственно яркости отраженного излучения. Часто становится необходимым осуществить переход в подпространство, элементы которого получены из исходного пространства с помощью некоторого заданного нетривиального и ненулевого преобразования: отбор наиболее информативных спектральных каналов, переход в пространство спектральных плотностей яркости нормированных на интегральную яркость, проецирование в пространство коэффициентов разложения по эмпирическим ортогональным функциям и т.д.

Формирование спектров излучения отраженного от распознаваемых объектов определяется множеством факторов – оптическими свойствами элементарных однородных компонент объектов. Так, например, если элементу разрешения гиперспектрального прибора соответствует участок лесного полога, то даже при однородном породном и возрастном составе, измеряемый спектр будет зависеть от объемного распределения листвы и ветвей, вариаций отражающей способности листвы, ветвей и подстилающей поверхности, и соотношения указанных элементов. Поскольку на практике нет точной информации о процентном соотношении элементарных компонент и их взаимном пространственном расположении, то можно считать, что формирование спектра пиксела ГСК имеет случайный характер. Таким образом, для построения алгоритмов классификации вполне естественно использовать вероятностный подход.

Общая постановка задачи в этом случае может быть сделана следующим образом. В качестве вероятностного пространства рассматривается множество  $X \times Y$ , которое содержит все возможные пары элементов множеств  $X$  (признаки) и  $Y$  (классы). Включение в вероятностное пространство всех возможных пар классов и признаков обосновано тем, что при определенных условиях, касающихся распределения элементарных компонент распознаваемых объектов, спектры различных классов могут совпадать. Учитывая конечность множества  $Y$ , совместную плотность распределения можно представить в виде  $p(x, y) = P(y)p(x|y)$ , где

$P(y) \equiv P_y$  – вероятность класса  $y$  на рассматриваемой сцене (априорная вероятность класса),  $p(x|y) \equiv p_{y,}(x)$  – плотность вероятности распределения признаков внутри класса  $y$  (функция правдоподобия класса). В рамках вероятностного подхода, требуется построить алгоритм, который приводит к минимальной вероятности ошибки классификации.

Если известны точные  $P_y$  и  $p_{y,}(x)$ , то оптимальный, в вероятностном смысле (байесовский), алгоритм строится на основе принципа наибольшего правдоподобия

$$s = a(x) = \arg \max_{y \in Y} P(y)p(x|y).$$

В графической интерпретации построение алгоритма четкой классификации сводится к разбиению признакового пространства на непересекающиеся области, каждая из которых ставится в соответствие одному из ответов. Разбиение производится с помощью некоторых поверхностей, называемых дискриминантными. В случае непрерывного распределения признаков, попадание точно на дискриминантную поверхность является событием с нулевой вероятностью. На практике, ввиду наличия некоторой фиксированной точности измерений, вероятность попадания на дискриминантную поверхность отличается от нуля. В этом случае классификация производится случайным образом между классами, для которых данный участок дискриминантной поверхности является граничным.

Для практического построения алгоритма классификации нам необходимо получить оценки априорных вероятностей классов и распределений признаков внутри классов. Задание априорных вероятностей является своеобразным процессом настройки “жесткости” отбора признаков, производимой классификатором для того или иного класса. Для ограниченных дискриминантных поверхностей происходит преобразование с сохранением формы – гомотетия. Так, например, если некоторый класс дискриминируется эллиптической поверхностью, то увеличение априорной вероятности данного класса эквивалентно приводит к пропорциональному увеличению всех его осей.

Априорные вероятности могут быть заданы на основе предположений, например, объект “песчаная почва” появляется на данной сцене с вероятностью в 3 раза больше, чем объект “торфяная почва”, либо вычислены на основе априорной информации, например, по частотам вхождения классов в обучающую выборку. Последнее в нашем случае неприменимо, поскольку обучающие спектры получаются на основе оконтуривания соответствующих объектов, что является независи-

мой выборкой лишь относительно данного класса, но никак не относительно всей сцены.

Оценивание плотностей вероятностей распределения признаков внутри классов производится с помощью двух принципиально различных подходов. В случае если нет никакой информации о форме совместного распределения (семейство распределений не определено), то в качестве оценки используется нормализованная гистограмма или оценка Парзена–Розенблатта (непараметрический подход). В случае применения данного метода к обработке гиперспектральных изображений практически неизбежно возникает проблема, известная как “проклятие размерности”. Проблема возникает в связи с тем, что для гистограммной аппроксимации многомерной функции плотности совместного распределения требуется большое количество независимых реализаций признаков для каждого рассматриваемого класса, получить которое в нашем случае не представляется возможным. При этом редукция размерности признакового пространства должна быть настолько существенной, что теряется смысл привлечения гиперспектральных данных. Таким образом, непараметрический подход в нашем случае не оправдан.

Параметрический подход предполагает, что функция плотности вероятности известна с точностью до параметров –  $p(x) = \varphi(x, \theta)$ , т.е. задано параметрическое семейство распределений  $\Phi^\theta$ . Если  $p(x) \in N(\mu, \Sigma)$ , т.е. принадлежит семейству нормальных распределений, то совокупность получаемых алгоритмов составляет нормальный дискриминантный анализ. Известно, что плотность многомерного нормального распределения определяется выражением

$$p_{N(\mu, \Sigma)}(x) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n \det(\Sigma)}} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^T \Sigma^{-1} (x - \mu)}{2}\right),$$

где  $\mu = [Ex^1, Ex^2, \dots, Ex^n]^T$  – вектор математических ожиданий;  $\Sigma = E(x - \mu)(x - \mu)^T$  – ковариационная матрица.

Если имеется  $m$  выборочных реализаций случайного вектора  $x \sim N(\mu, \sigma)$  размерности  $n$ , то несмещенные оценки неизвестных статистических моментов имеют вид

$$\hat{\mu} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i, \quad \hat{\Sigma} = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (x_i - \hat{\mu})(x_i - \hat{\mu})^T.$$

Получение оценок статистических моментов собственным и есть процесс обучения.

При поиске максимума апостериорной вероятности можно использовать монотонные преобразования. В рассматриваемом случае удобно использовать логарифмирование. Таким образом, об-

ший байесовский алгоритм преобразуется к виду  $a(x) = \arg \max_{y \in Y} (\ln P_y + \ln p_y(x))$ . Подставляя функцию плотности многомерного нормального распределения, имеем алгоритм классификации

$$a(x) = \arg \max_{y \in Y} \left( \ln(P_y) - \frac{1}{2}(x - \hat{\mu}_y)^T \hat{\Sigma}_y^{-1}(x - \hat{\mu}_y) - \frac{1}{2} \ln(\det(\hat{\Sigma}_y)) \right),$$

известный как квадратичный дискриминантный анализ или квадратичный дискриминант (Местецкий, 2002). Название связано с тем, что дискриминантные поверхности, разделяющие каждую пару классов, задаются полиномами второй степени

$$F = x^T Qx + Lx + K,$$

$$\text{где } Q = \hat{\Sigma}_2^{-1} - \hat{\Sigma}_1^{-1}, \quad L = 2(\hat{\mu}_1^T \hat{\Sigma}_1^{-1} - \hat{\mu}_2^T \hat{\Sigma}_2^{-1}) \quad \text{и} \quad K = 2 \ln \left( \frac{P_1}{P_2} \right) + \ln \left( \frac{\det \hat{\Sigma}_2}{\det \hat{\Sigma}_1} \right) + \hat{\mu}_2^T \hat{\Sigma}_2^{-1} \hat{\mu}_2 - \hat{\mu}_1^T \hat{\Sigma}_1^{-1} \hat{\mu}_1.$$

Если ковариационные матрицы классов равны ( $\Sigma_y = \Sigma, \forall y \in Y$ ), то  $Q = 0$  и квадратичные дискриминантные гиперповерхности становятся гиперплоскостями. В этом случае говорят о линейном дискриминанте. Если предположить, что ковариационные матрицы  $\Sigma_y$  имеют диагональный вид, то говорят о квадратичном или линейном наивном байесовском классификаторе.

Из всех рассмотренных вариаций нормального дискриминантного анализа наиболее пригодным методом для обработки гиперспектральных данных является квадратичный дискриминант. С одной стороны, данный метод наиболее подвержен проблеме переобучения и обладает наиболее низкой устойчивостью. Однако ранее проведенные тесты показывают, что точность линейного дискриминанта и наивного байесовского классификатора в нашем случае часто является неприемлемо низкой. Линейное приближение является достаточно грубым для разделения сложных подклассов лесной растительности. Применение наивного метода оправдано, когда можно заранее обосновать независимость используемых признаков. Для нашей задачи этого, очевидно, сделать нельзя.

Проблема “проклятия размерности” имеет место и для нормального байесовского классификатора. При наличии высокой коррелированности спектральных каналов ковариационная матрица  $\hat{\Sigma}_y$  становится плохо обусловленной, и возникают трудности при ее обращении. Одним из способов решения данной проблемы является эффективное сокращение размерности признакового пространства на основе отбора наиболее информативных признаков. Для этого можно использовать пошаговый метод “последовательного включения”.

Суть метода заключается в следующем. Выбираются метод распознавания и априорная вероятность для распознаваемых классов. На каждом шаге пространство всех признаков делится на две группы – уже включенных в алгоритм распознавания и остальных, для которых производится оценка возможности включения в алгоритм. Для каждого признака из множества “остальных признаков” делается оценка ошибки распознавания при условии его добавления в алгоритм. Из полученного набора ошибок выбирается минимальная, и производится ее сравнение с ошибкой алгоритма на предыдущем шаге. Если произошло значимое уменьшение ошибки, то соответствующий признак принимается в алгоритм, если нет, то процесс останавливается.

Отметим, что общим недостатком метода последовательного включения является то, что при малом изменении обучающей выборки найденная оптимальная последовательность может достаточно сильно меняться. В связи с этим ниже в части результатов тематической обработки будет описан подход, позволяющий существенным образом решить проблему устойчивости.

### СОЗДАНИЕ АНСАМБЛЯ ОБУЧАЮЩИХ ВЫБОРОК

Измерительная кампания 2011 г. позволила получить гиперспектральные данные по достаточно большой связанной области (рис. 1) на территории Савватьевского лесничества (Тверской лесхоз). Выделы на тестовой территории состоят в основном из сосны и березы. Также присутствуют осинники и ельники. Площади, покрытые вязовыми древостоями, не относятся к лесному фонду и данных лесотаксации по ним нет.

Для составления базы данных обучающих спектров нас интересовали только выделы с однородным породным составом. Таким образом, были получены достаточно большие выборки для сосны, березы, осины и вяза. Результаты представлены в табл. 1. Полученные данные позволили рассмотреть одно из наиболее интересных приложений гиперспектрального аэрозондирования – возможность классификации возраста древостоев единого породного состава. Наибольшее разрешение по возрасту получилось для сосновых древостоев (14 возрастных градаций). В данном случае можно полноценно определить зависимость СПЭЯ от возраста. Для березы это также можно сделать, но скорее на качественном уровне.

Изображения лесного полога имеют характерную текстуру, которую составляют перемежающиеся освещенные и затененные участки крон, а также межкрупные просветы. СПЭЯ отраженного излучения освещенных участков определя-

**Таблица 1.** Параметры ансамблей СПЭЯ однородных древостоев

Порода	Возраст, лет	Количество спектров	Наименование трекаисточника
Сосна	13	1046	2011-08-12=11-10-57
	16	2428	2011-08-12=11-31-32
	26	2061	2011-08-12=12-05-23
	36	447	2011-08-12=11-10-57
	47	5025	2011-08-12=11-17-58
	56	1807	2011-08-12=11-46-25
	66	7551	2011-08-12=11-52-48
	76	1557	2011-08-12=11-52-48
	76	4019	2011-08-12=11-59-25
	86	2055	2011-08-12=11-46-25
	96	3156	2011-08-12=11-38-02
	106	2191	2011-08-12=11-59-25
	116	644	2011-08-12=11-24-25
	126	1932	2011-08-12=11-04-17
136	695	2011-08-12=11-46-25	
Береза	16	1729	2011-08-12=11-31-32
	51	1634	2011-08-12=11-38-02
	71	5656	2011-08-12=11-46-25
Осина	11	2545	2011-08-12=11-38-02
Вяз	—	534	2011-08-12=10-47-53

ется в основном оптическими свойствами кроны, текущими атмосферными условиями и высотой солнца. При этом ГСК обеспечивает достаточно хорошее соотношение сигнал/шум.

Отражение затененными участками кроны происходит гораздо более сложным образом. Здесь начинает играть роль многократное рассеяние света внутри кроны и спектральные свойства подстилающей поверхности. Кроме того, уровень сигнала ГСК значительно ниже и влияние собственной шумовой составляющей на формирование СПЭЯ отраженного излучения гораздо более существенно, чем для освещенной части кроны.

Освещенные и затененные участки кроны могут быть разделены на основе значений интегральной яркости (СПЭЯ интегрируется методом трапеций по всем центральным длинам волн измерительных каналов ГСК). Для полученных обучающих выборок были рассчитаны интегральные яркости и разделены на семь градаций с помощью процентных интервалов. Указанный метод работает следующим образом. Отрезок от 0 до 1 делится на заданное число равных частей. Затем рассчитывается эмпирическая функция распределения вероятностей и реализация, попавшая в один из интервалов, относится к соответствующей градации.

На рис. 2а (на цветн. вклейках) представлены СПЭЯ молодого (13 лет) соснового древостоя с однородным породным составом. Наиболее темная градация выделена красным цветом. При увеличении яркости цвета переходят к фиолетовому и завершаются черным цветом. Можно видеть, что наибольшее различие между СПЭЯ освещенных и затененных участков происходит в ближнем ИК-диапазоне. В видимой части спектра они практически сливаются.

При решении задачи распознавания породного состава лесных выделов кажется затруднительным опираться непосредственно на значения соответствующих СПЭЯ, поскольку различие между спектрами отражения различных пород (а тем более возрастов) может быть гораздо более выраженным, чем различие между затененными и освещенными участками. Кроме того, значения СПЭЯ существенным образом зависят от высоты Солнца и текущих атмосферных условий. Для того чтобы сделать алгоритм распознавания более универсальным, необходимо в качестве признаков использовать СПЭЯ, нормализованные на интегральную яркость (рис. 2б).

Нормализованные спектры, соответствующие различным градациям интегральной яркости, практически сливаются. Это обусловлено тем, что для молодых древостоев характерна незначительная изрезанность верхней границы полога. Кроме того, сами размеры кроны таковы, что не разрешаются ГСК, — характерный размер пиксела порядка 1 м. Таким образом, практически каждый пиксел содержит и освещенные и затененные участки. Текстура молодняков, как правило, выглядит значительно более однородной, чем текстура припевающих и средневозрастных древостоев.

Последнее утверждение становится очевидным, если обратиться к рис. 2в, на котором изображены градации СПЭЯ припевающего соснового древостоя. В возрасте 66 лет крона и соответствующее межкрупное пространство разрешается несколькими пикселями ГСК. Градации на рис. 2в ярко выражены как в ИК-, так и в видимой части спектра. Градации освещенной части кроны имеют существенные вариации.

При переходе к нормализованным СПЭЯ (рис. 2г) разброс резко уменьшается, однако для припевающего древостоя можно видеть, что форма спектров освещенных и затененных участков существенным образом различна — затененные участки кроны имеют в видимом диапазоне смещение цвета в синюю область. Также следует отметить, что при построении алгоритма классификации можно сократить число используемых градаций до трех, поскольку различие между градациями, обозначаемыми фиолетовым и синим цветами, а также красным и желтым не столь очевидно.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Для решения задачи распознавания проведено редуцирование полученных данных аэрозондирования к спектральному разрешению не лучше 5 нм (получено 87 каналов) и построено подмножество наиболее информативных объединенных каналов. Прежде чем рассматривать различимости объектов на той или иной длине волны, необходимо определить и исключить из рассмотрения каналы со значимыми радиометрическими помехами, влияние которых на результат распознавания может оказаться крайне негативным. Так, например, добавление в пространство признаков всего лишь одного дополнительного канала, в котором имеется значимый эффект виньетирования, может привести к тому, что по краям или в центре изображения возникнут полосы, в которых интересующий нас объект будет ошибочно классифицирован. Использование таких каналов может существенно испортить результат даже при распознавании хорошо различаемых объектов. В связи с этим была проведена работа по выявлению каналов со значимыми радиометрическими помехами для дальнейшего их исключения из рассмотрения. Результаты представлены в табл. 2.

Если в алгоритме последовательного включения ориентироваться исключительно на полную вероятность ошибки, то результат оптимизации каналов будет неустойчивым. В частности, очевидно, что если в обучающей выборке присутствует большое число хорошо разделяемых объектов и малое число плохо разделяемых, то последние будут вносить относительно небольшой вклад и не дадут значимого отклика в методе последовательного дополнения. Чтобы избежать этой проблемы, необходимо проводить оптимизацию каналов поэтапно.

На первом этапе необходимо рассмотреть хорошо распознаваемые классы наземных объектов. Для таких объектов характерно наличие одного или нескольких каналов, на основе кросс-валидации которых можно заключить, что объекты различаются с точностью 100%. В нашем случае применялся метод кросс-валидации на отложенных данных (holdout) с параметром 0.5, который заключается в случайном разбиении исходного ансамбля на обучающий и тестовый, имеющие одинаковый объем. Разбиение производится таким образом, чтобы каждый ансамбль содержал примерно равное количество элементов от каждой из групп. После независимого расчета полной вероятности ошибки классификации процесс повторяется заданное число раз. В нашем случае было задано 30 повторений.

Наиболее сильно отличаются спектры открытой водной поверхности и растительного покро-

ва. Для этих объектов была построена гистограмма частот появления каналов разделяемости 100%. В соответствии с заданным числом повторений, максимально возможная частота равна 30. В результате было сделано заключение, что практически каждый канал, за исключением 51, 52, 81, 85, 86, 87, гарантирует абсолютно точное разделение данных объектов в пространстве спектров, нормализованных на соответствующее интегральное значение.

Далее рассмотрим группу объектов, хорошо различаемую даже по мультиспектральным данным, — водная поверхность, почва, растительность, облачность. В этом случае число каналов стопроцентной точности значительно уменьшилось, и гарантированное разделение мы можем иметь лишь в каналах 15, 16 и 55. Любой из данных каналов может быть использован в качестве начального при реализации алгоритма последовательного дополнения к группам классов, однако нами был выбран канал 55 (736.58 нм), поскольку он наименее подвержен атмосферным искажениям. Выбранный канал будет использован в качестве стартового в алгоритме последовательного дополнения, поскольку алгоритм распознавания должен как минимум обеспечить отличное разделение основных классов: вода, растительность, почва.

Следующим этапом является определение оптимальных последовательностей спектральных каналов для проведения более тонкой классификации. Для этого использовался следующий алгоритм. Устанавливается характерное число реализаций в обучающем множестве для выбранного класса и на этой основе производится оценка порогового значения полной вероятности ошибки при равномерном распределении априорных вероятностей и отсутствии класса “прочие объекты”. В нашем случае было выбрано пороговое значение 0.001. Алгоритм последовательного включения останавливается, когда при очередном увеличении числа каналов на один, полная вероятность ошибки изменяется на величину, не превышающую указанного порогового значения.

Для определения полной вероятности ошибки также используется метод кросс-валидации с параметром 0.5. Поскольку выделяемая таким образом последовательность каналов будет изменяться при каждом очередном запуске кросс-валидации, необходимо попытаться как-то регуляризовать этот процесс. Для этого производится 30 случайных экспериментов, в которых получается 30 отличающихся случайных последовательностей. Из них выбирается наиболее вероятная.

Алгоритм поиска наиболее вероятной последовательности спектральных каналов состоит в следующем. Сначала рассматривается множество каналов с максимальной информативностью. Для этого множества рассчитывается мода, и из исход-

**Таблица 2.** Объединенные каналы с выраженными радиометрическими искажениями

Номер канала	54	58	59	60	67	76	77	80	82	83	84
Центр. длина волны, нм	728.9	753.0	758.8	764.8	811.7	888.3	898.3	930	952.9	964.9	977.3

**Таблица 3.** Оптимальные наборы каналов для тонкой классификации различных типов объектов

Вода	55	42	10	32	6	50	34	48	39	61							
Почва	55	4	53	1	23	5	32	42	81	33	3	52	11	8	34	24	44
Асфальт	55	22	3	52	51	75	20	81	24	7	1	74	25				
Трава	55	36	15	20	81												
Породный состав, град. 3	55	7	36	52	51	38	81	47	41	53	86	37					
Породный состав, град. 2	55	2	36	3	53	29	28	35									
Породный состав, град. 1	55	66	37	53	52	57	31	79	29	21							
По возрасту, сосна, град. 3	55	51	81	17	44	27	53	52	57	68	46	18	79	1	74	24	2
По возрасту, береза, град. 3	55	27	18	46	52	49	33	6	69	68	35	66	44				

ного множества последовательностей выбираются только те, которые соответствуют наиболее вероятному каналу. Далее процесс повторяется, но уже на новом множестве меньшей размерности. Повторения происходят до тех пор, пока не останется только одна последовательность каналов, которая и будет считаться оптимальной для данной группы классов.

К группам объектов тонкой классификации были отнесены различные типы водной поверхности, почв, асфальто-бетонного покрытия, луговой растительности, породный состав древостоев по трем градациям яркости лесного полога (1 – полностью затененная часть крон и межкрупное пространство, 3 – полностью освещенная часть крон), возрастные классы выделов однородного породного состава. Для каждой такой группы был применен описанный выше алгоритм поиска наиболее вероятной последовательности спектральных каналов. Результаты представлены в табл. 3.

Если при обработке сцены мы имеем необходимость сосредоточиться на распознавании различных типов воды или почвы, можно использовать соответствующую оптимальную последовательность из табл. 3. Для получения более универсального набора каналов были объединены первые три столбца табл. 3 для всех объектов. Далее из полученного множества были выделены уникальные номера каналов и представлены в виде табл. 4.

На основе полученных данных были произведены тестовые эксперименты по воспроизведению породного состава древостоев Савватьевского лесничества. Для указанной территории имеются лесотаксационные карты и описания. На рис. 3 (на цветн. вклейках) представлена часть трека 2011-08-12=11-38-02. Сцена содержит смешанные леса с преобладанием сосны, березы или

осина, дорожную сеть и территорию садового товарищества. Результаты распознавания породного состава по спектральному признаку на основе нормального байесовского классификатора представлены на рис. 3в–3г.

В целом видно, что результаты распознавания соответствуют карте лесотаксации (рис. 3б). Выделенный участок содержит фрагменты трех кварталов: 66 (выделы 12, 13 14); 67 (выделы 8, 9, 10, 11); 68 (выделы 11, 12, 13). Выделы 12 и 13 квартала 66 содержат 70% березы, 20% сосны и 10% осины, а выдел 14 – 90% березы и 10% сосны. По данным рис. 3в, процент вхождения сосны для квартала 66 несколько превышает значение данных лесотаксации. Объяснение этих расхождений дается на рис. 3г, где отображены также градации освещенности лесного полога. Видно, что если рассматривать освещенные и полусвещенные части крон, то соответствие с лесотаксационными данными становится гораздо большим. Также для квартала 66 можно видеть четкую полосу сосновых насаждений, которая не обозначена на лесотаксационной карте и не может быть распознана глазом на основе RGB-изображения.

Выделы 9 квартала 67 и 12 квартала 68 являются сосновыми на 100%, однако результаты распознавания показывают небольшие вкрапления березы (менее 10%), в том числе и участки освещенной части крон. Осинный выдел 11 (квартал 67) также классифицировался достаточно точно. Можно видеть небольшие вкрапления березы и сосны (видимо молодняка, судя по характеру крон), которые отсутствуют в лесотаксационных данных.

Для квартала 68 в целом имеем хорошее соответствие данным лесотаксации. Выдел 13 состоит в равной пропорции из березы и сосны (хотя на карте обозначен как сосновый). Выдел 11 на 80% березовый и на 20% сосновый. По результатам распознавания можно видеть, что смешанный

**Таблица 4.** Универсальный оптимальный набор спектральных каналов

№ канала	2	3	4	7	10	15	18	22	27	36	37	42	55	66	81
Длина волны, нм	409.45	414.73	420.01	436.09	451.81	478.95	495.93	518.35	547.41	602.89	609.12	636.71	736.58	804.37	941.27

породный состав выдела 13 распределен не равномерно. В южной части, очевидно, преобладают березы. Таким образом, если полученные данные подтвердятся, лесничеству можно было бы рекомендовать произвести его разбиение как минимум на две части.

Породный состав на территории садового товарищества, скорее всего, ошибочен, поскольку в обучающей базе данных отсутствовала соответствующая информация о СПЭЯ плодовых деревьев и кустарников. Здания выделяются классификатором как нераспознанные объекты. Заметим, что таким же образом садовые деревья выделить нельзя, поскольку спектральные отличия от других пород деревьев достаточно тонкие.

Другой пример классификации породного состава приведен на рис. 4 (на цветн. вклейках). Сцена содержит смешанные березовые и сосновые древостои, произрастающие вокруг песчаного карьера. Некоторая часть водной поверхности карьера была отнесена к нераспознанным объектам. Это, скорее всего, связано либо с просвечивающим песчаным дном, либо с наличием загрязнений на поверхности.

В этом случае мы также можем наблюдать хорошее соответствие между результатами распознавания и лесотаксационными данными. Хорошо заметны выделы с преобладанием березы: выдел 18 квартала 52 и выдел 3 квартала 65 содержат 80% березы, выделы 1 и 3 квартала 66 содержат соответственно 80 и 70% березы. Наличие осины в последних указанных выделах, скорее всего, связаны с ошибкой классификатора. Сосновые древостои, травянистые, дорожная сеть и открытые площади песчаного грунта на качественном уровне распознаются хорошо.

В заключение необходимо отметить, что разделение при обучении кроновой части по градациям интегральной яркости позволяет предоставлять более точную информацию. Основные ошибки классификации породного состава соответствуют затененной части кроны. Эту проблему, по-видимому, не удастся решить при совершенствовании лишь методов тематической обработки, поскольку для затененных участков применяемая ГСК не может обеспечить необходимого для такой тонкой классификации соотношения сигнал—шум.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена задача классификации лесной растительности на основе гиперспектральных изображений высокого пространственного разрешения. Приведено обоснование выбора приборной базы и методики проведения летных испытаний. Исследована возможность использования эффективной с вычислительной точки зрения нормальной байесовской классификации для распознавания породного состава лесной растительности. Показано, что для обеспечения устойчивости указанных алгоритмов необходимо оптимизировать признаковое пространство путем объединения и отбора наиболее информативных спектральных каналов. Предложена методика позволяющая повысить устойчивость стандартного метода “последовательного включения”. Создана база данных обучающих СПЭЯ, позволяющая рассматривать задачу классификации древостоев как по породному составу, так и по возрасту. Предложенное разделение обучающих ансамблей СПЭЯ кроновой части древостоев по градациям интегральной яркости отраженного излучения позволяет получить более детальную классификацию. Показано, что наиболее точно классифицируются полностью освещенные участки кроны. Получены оптимальные последовательности каналов используемой ГСК, ориентированные на воспроизведение породного и возрастного состава древостоев, луговой растительности, типов почв, водной поверхности, асфальто-бетонного покрытия, а также универсальная последовательность.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 гг. и грантов РФФИ 11-07-00382, 11-07-12006-офи\_м.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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., Дмитриев Е.В., Егоров В.Д., Борзяк В.В.* Инновационная технология обработки многоспектральных космических изображений земной поверхности // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 1. С. 56–72.
- Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Дмитриев Е.В., Казанцев О.Ю., Персев И.В., Щербаков М.В.* Обработка дан-

- ных гиперспектрального аэрокосмического зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 5.
- Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Казанцев О.Ю., Бобылев В.И., Щербаков М.В., Борзяк В.В., Дмитриев Е.В., Егоров В.Д., Каменцев В.П., Беляков А.Ю., Логинов С.Б.* Обработка и интерпретация данных гиперспектральных аэрокосмических измерений для дистанционной диагностики природно-техногенных объектов // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 2. С. 36–54.
- Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Косолапов В.С., Головкин В.А., Дмитриев Е.В.* Восстановление объема фитомассы и других параметров состояния почвенно-растительного покрова по результатам обработки многоспектральных спутниковых изображений // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 1. С. 57–65.
- Местецкий Л.М.* Математические методы распознавания образов. Курс лекций. М.: Ф-т ВМиК МГУ, кафедра ММП, 2002. 85 с.
- Asner G.P., Hicke J.A., Lobell D.B.* Per-pixel analysis of forest structure: Vegetation indices, spectral mixture analysis and canopy reflectance modeling, Remote Sensing of Forest Environments: Concepts and Case Studies / Eds. M.A. Wulder, S.E. Franklin. Norwell, Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 2003. P. 209–254.
- Atzberger C.* Development of an invertible forest reflectance model: The INFOR-Model / Ed. In Buchroithner. A decade of trans-European remote sensing cooperation // Proc. 20th EARSeL Symp. 14–16. June 2000. Dresden, Germany, 2000. P. 39–44.
- Bacour C., Jacquemoud S., Tourbier Y., Dechambre M., Frangi J.-P.* Design and analysis of numerical experiments to compare four canopy reflectance models // Rem. Sens. Environ. 2002. V. 79. P. 72–83.
- Combal B., Baret F., Weiss M., Trubuil A., Macé D., Pragnère A., Myneni R., Knyazikhin Y., Wang L.* Retrieval of canopy biophysical variables from bidirectional reflectance. Using prior information to solve the ill-posed inverse problem // Rem. Sens. Environ. 2002. V. 84. P. 1–15.
- Demuth H., Beale M.* Neural network toolbox for Matlab-users guide version (4.1). The Mathworks Inc., Natick, USA, 2003.
- Gastellu-Etchegorry J.P., Demarez V., Pinel V., Zagolski F.* Modelling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies // Rem. Sens. Environ. 1996. V. 58. P. 131–156.
- Goel N.S.* Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data // Rem. Sens. Rev. 1988. V. 4. P. 1–212.
- Gong P., Biging G.S., Lee S.M., Mei X., Sheng Y., Pu R., Xu B., Schwarz K., Mostafa M.* Photo ecometrics for forest inventory // Geogr. Inform. Sci. 1999. V. 5. P. 9–14.
- Iaquina J., Pinty B., Privette J.L.* Inversion of a physically based bidirectional reflectance model of vegetation // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 1997. V. 15. № 3. P. 687–698.
- Kimes D., Gastellu-Etchegorry J., Estève P.* Recovery of forest canopy characteristics through inversion of a complex 3D model // Rem. Sens. Environ. 2002. V. 79. P. 320–328.
- Kozoderov V.V., Dmitriev E.V.* Remote sensing of soils and vegetation: regional aspects // Int. J. Rem. Sens. 2008. V. 29. P. 2733–2748.
- Kozoderov V.V., Dmitriev E.V.* Remote sensing of soils and vegetation: pattern recognition and forest stand structure assessment // Int. J. Rem. Sens. 2011. V. 32. № 20. P. 5699–5717.
- Rautiainen M., Stenberg P., Nilson T., Kuusk A.* The effect of crown shape on the reflectance of coniferous stands // Rem. Sens. Environ. 2004. V. 89. P. 41–52.
- Roberts G.* A review of the application of BRDF models to infer land cover parameters at regional and global scales // Progr. Phys. Geogr. 2001. V. 25. № 4. P. 483–511.
- Rosema A., Verhoef W., Noorbergen H., Borgesius J.J.* A new forest light interaction model in support of forest monitoring // Rem. Sens. Environ. 1992. V. 42. P. 23–41.
- Suits G.H.* The calculation of directional reflectance of a vegetation canopy // Rem. Sens. Environ. 1972. V. 2. P. 117–125.
- Udelhoven T., Naumann D., Schmitt J.* Development of a hierarchical classification system with artificial neural networks and FT-IR spectra for the identification of bacteria // Appl. Spectrosc. 2000. V. 54. № 10. P. 1471–1479.
- Verhoef W.* Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model // Rem. Sens. Environ. 1984. V. 16. P. 125–141.
- Weiss C.R., Moideen S.V., Croft S.L., Houghton P.J.* Activity of extracts and isolated Naphthoquinones from *Kigelia pinnata* against *Plasmodium falciparum* // J. Nat. Prod. 2000. V. 63. № 9. P. 1306–1309.

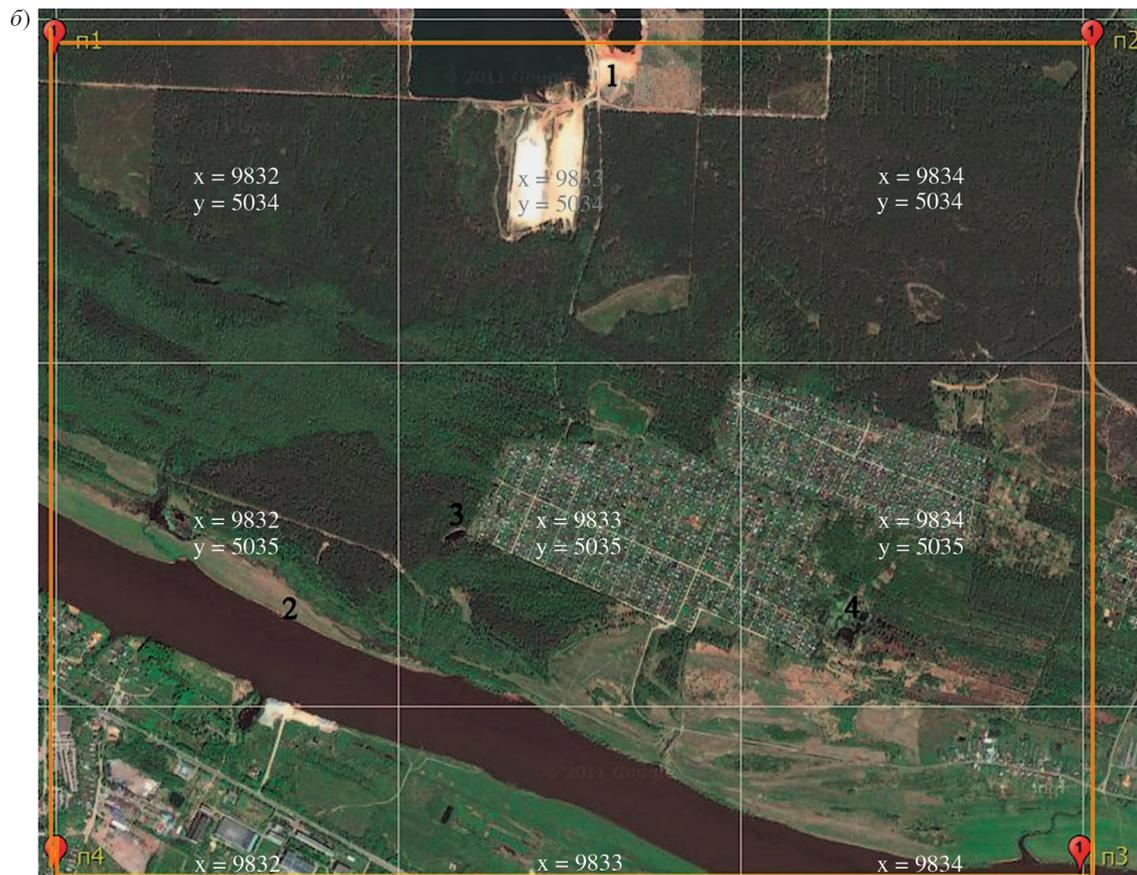
## Classification of the Forest Cover of Tver Region Using Hyperspectral Airborne Imagery

E. V. Dmitriev

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

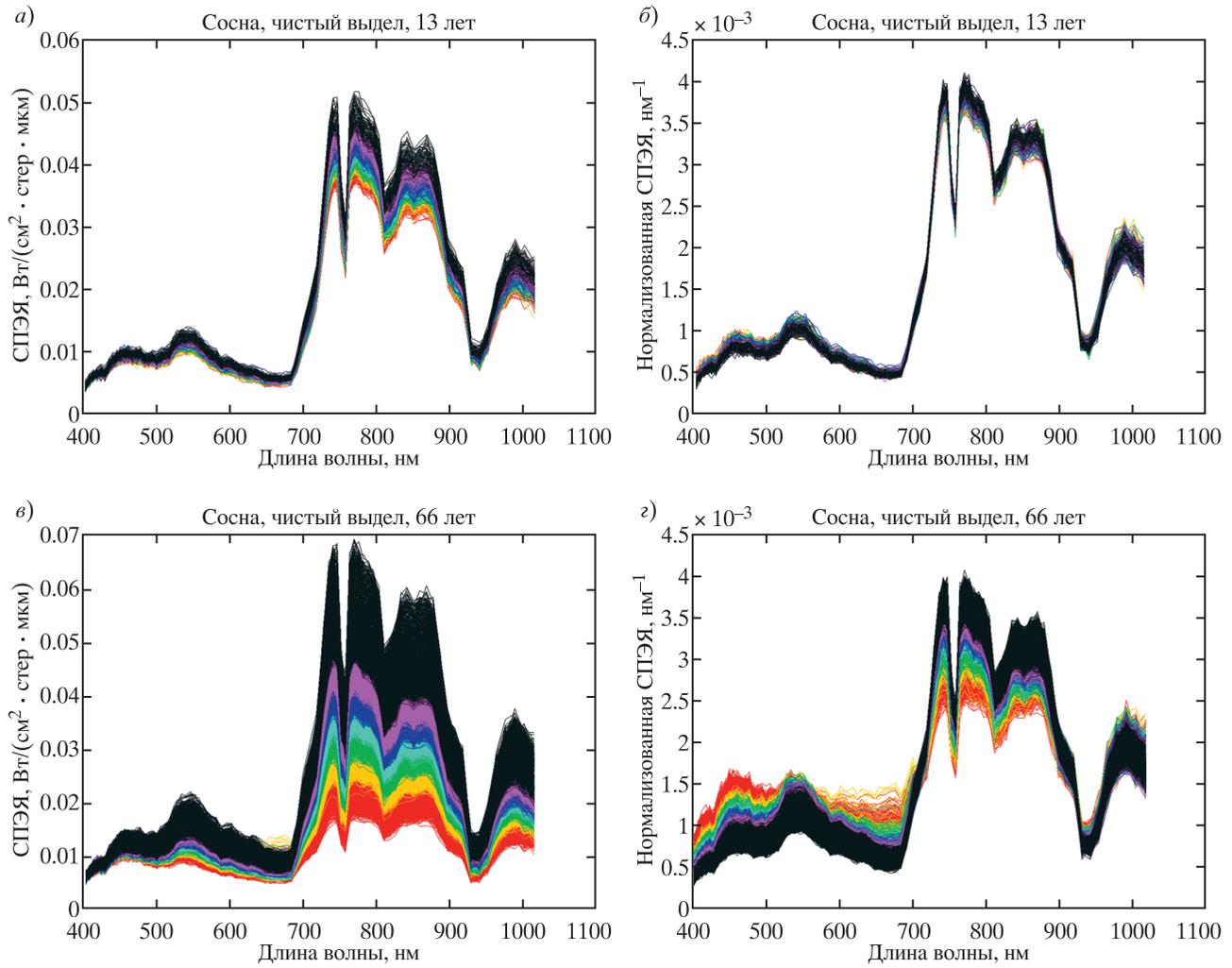
In several last years we perform the studies aimed at the development of the system of hyperspectral airborne remote sensing of vegetation in regional scales. Testing of the elements of the system is based on the data obtained during the campaigns of measurements for the selected areas of the Tver forestry. Russian video spectrometer developed by NPO “Lepton” is employed for obtaining hyperspectral airborne imagery. The method used for the recognition of land surface objects is based on the Bayesian classification principle taking into account optimization of the feature space. The selection of the most informative spectral channels is based on the step-up method. The method allowing to improve the stability of the channel selection is proposed. The comparison of the forest classification based on hyperspectral imagery and the ground-based information shows the validity of the system developed.

**Keywords:** hyperspectral imagery, pattern recognition, classification of the vegetation cover, channel optimization



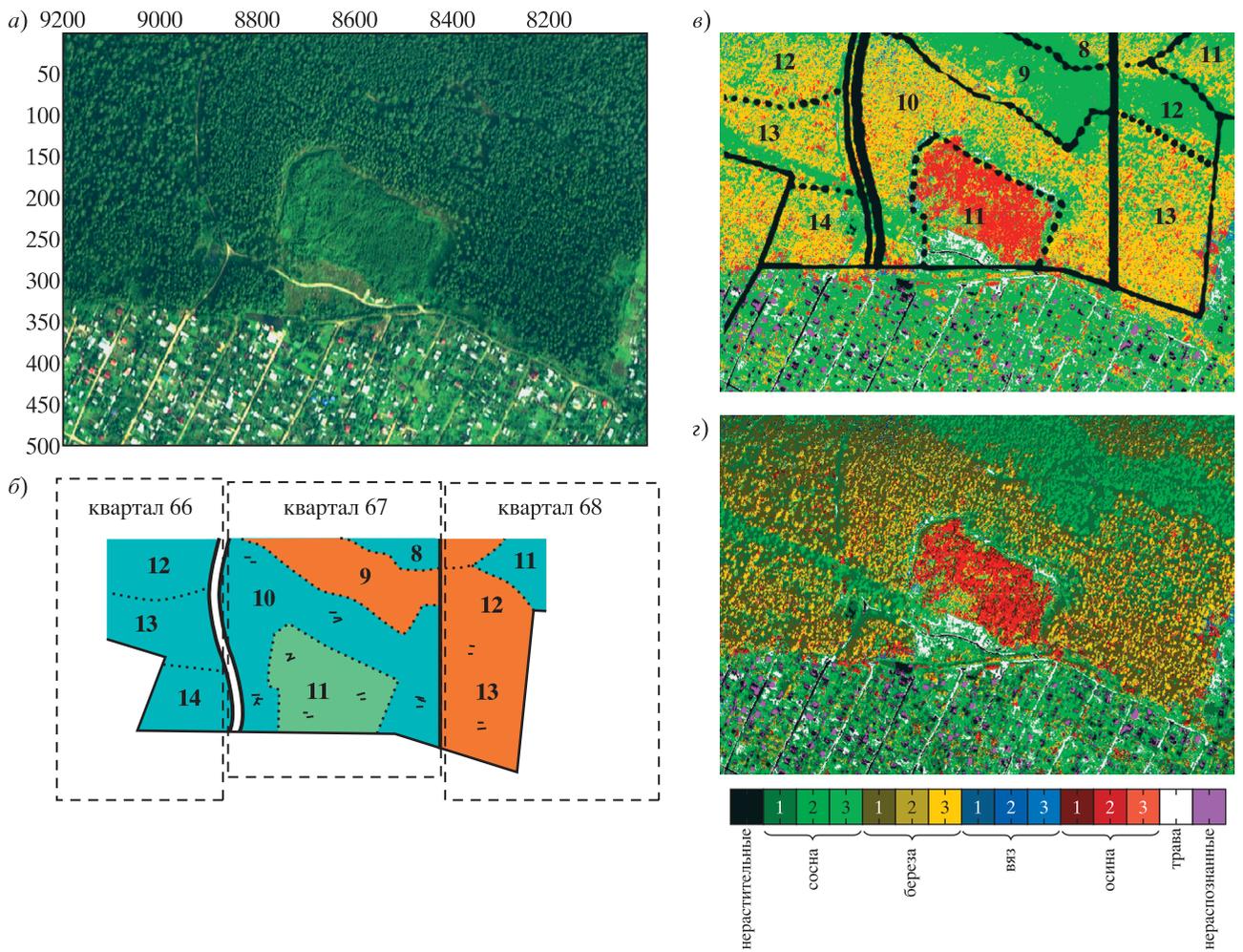
**Рис. 1.** Район выполнения полетного задания: *а* – топографическая карта, тестовый участок выделен оранжевой рамкой; *б* – изображение GoogleEarth, цифрами обозначено расположение объектов, обсуждаемых в тексте статьи.





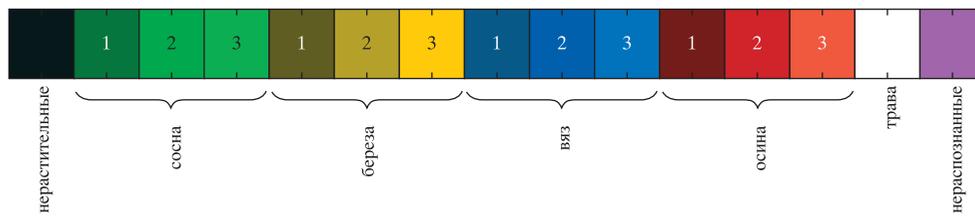
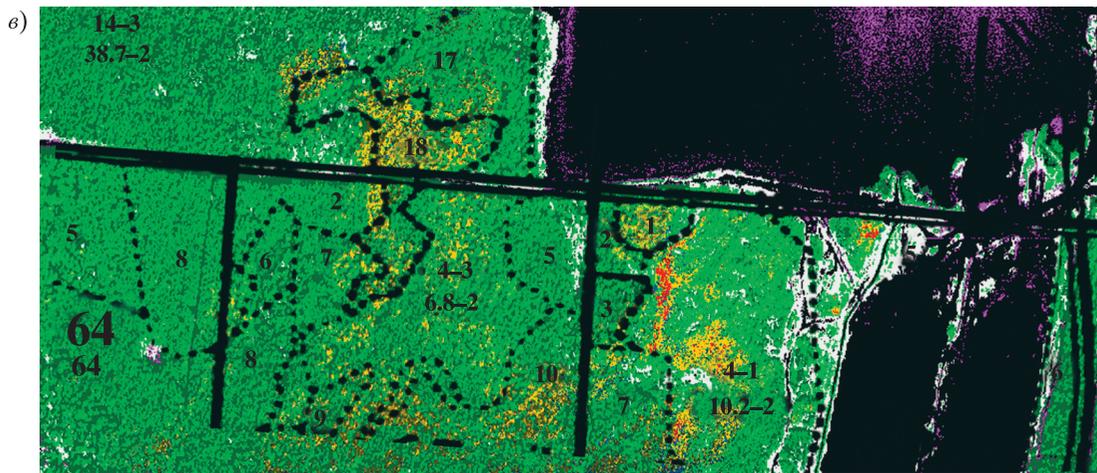
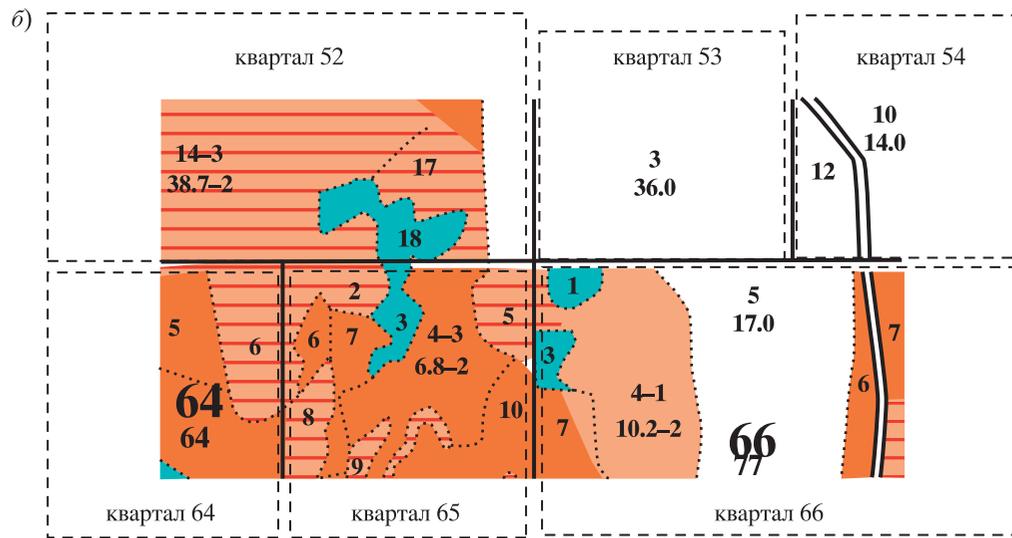
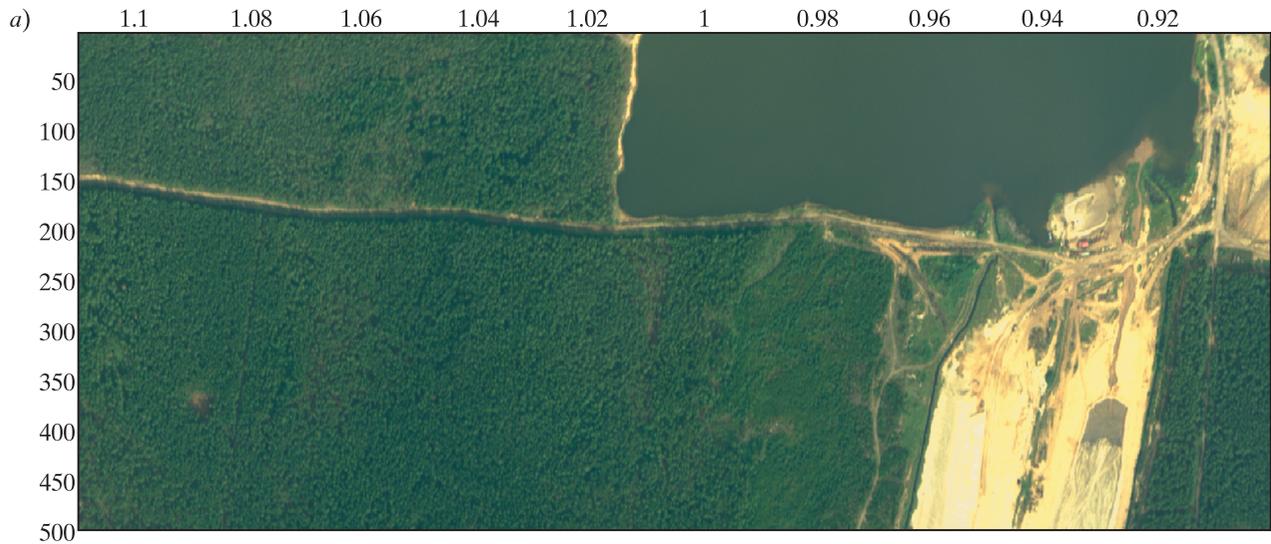
**Рис. 2.** Распределение СПЭЯ сосняков с однородным породным составом по градициям интегральной яркости (7 градаций, равномерные процентные интервалы красный-желтый- ... -фиолетовый-черный): *a* и *б* – СПЭЯ и нормализованные СПЭЯ древостоя в возрасте 13 лет; *в* и *г* – СПЭЯ и нормализованные СПЭЯ древостоя в возрасте 66 лет.





**Рис. 3.** Классификация породного состава смешанных древостоев на территории Савватьевского лесничества, трек 2011-08-12=11-38-02: *а* – RGB-изображение; *б* – соответствующая карта лесотаксации (синий – преобладание березы, оранжевый – сосны, зеленый – осины); *в* – результаты распознавания без классификации по градиентам интегральной яркости излучения, отраженного от лесного полога; *г* – распознавание с учетом градиентов освещения кроны (1 – полностью затененная, 2 – полуосвещенная, 3 – освещенная). Цветовая шкала соответствует части *г* рисунка. Цветовые обозначения породного состава для части *в* соответствуют градации 3.

**Рис. 4.** Результат классификации древостоев по породному составу (трек 2011-08-12=12-05-23): *а* – RGB-изображение; *б* – карта лесотаксации (синий – преобладание березы, оранжевый – сосны); *в* – результаты распознавания породного состава древостоев с учетом градиентов освещения кроны (1 – полностью затененная, 2 – полуосвещенная, 3 – освещенная).



ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА № 3 2013 (Вклейка к ст. Дмитриева Е.В.)



## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

### КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ ЮГА РОССИИ

© 2013 г. В. Е. Зинченко<sup>1</sup>, О. И. Лохманова<sup>1\*</sup>, В. П. Калиниченко<sup>2</sup>,  
А. И. Глухов<sup>2</sup>, В. И. Повх<sup>3</sup>, Л. А. Шляхова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Донской научно-исследовательский институт сельского хозяйства, п. Рассвет, Ростовская обл.

<sup>2</sup>Институт плодородия почв юга России, п. Персиановский, Ростовская обл.

<sup>3</sup>Южный региональный информационно-аналитический центр, Ростов-на-Дону

\*E-mail: [agropolygon@yandex.ru](mailto:agropolygon@yandex.ru)

Поступила в редакцию 02.10.2012 г.

Показаны особенности пакетной технологии обработки данных аэрокосмических съемок разного пространственного разрешения для оценки состояния сельскохозяйственных культур от отдельного поля до нескольких полей выбранного административного района. Используются процедуры географической привязки исходных изображений к слоям землеустройства, а также классификации данных дистанционного зондирования с учетом севооборота соответствующих культур для исследуемого региона.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, мониторинг сельскохозяйственного производства, классификация объектов

DOI: 10.7868/S0205961413030068

#### ВВЕДЕНИЕ

Применение данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в целях мониторинга наземных объектов способствует получению информации о состоянии сельскохозяйственных (с.-х.) культур и земель с.-х. назначения (Козодеров и др., 1998; Shljakhova et al., 2001; Кравцов, Уварова, 2001; Justice et al., 2002; Vina et al., 2004; Баргалева и др. 2005). Методы ДЗЗ также актуальны при принятии решений по управлению продуктивностью земельного фонда юга России. Эти методы позволяют судить об интенсивности антропогенного воздействия на земельные ресурсы, контролировать их использование, определять пути сохранения и перераспределения в свете земельной реформы РФ. Открываются перспективы для разработки новых технологий, технических средств земледелия и мелиорации, принятия мер по уменьшению деградации земельного фонда РФ (Калиниченко, 2003, 2004; Калиниченко и др., 2011).

#### ДАнные ДЗЗ И ПРОГРАММНЫЕ ПРОДУКТЫ

Для распознавания визуальных образов растительности применяется программа ENVI (Гарбук, Гершензон, 1997; Козодеров и др., 1998). При этом широко распространена концепция вегета-

ционных индексов (Wenwen et al., 2011). Одним из его вариантов является NDVI (Fontana et al., 2012; Maxwel, Sylvester, 2012).

Программное средство ENVI адаптировано для создания на основе NDVI векторных массивов, описывающих границы элементов биogeосистем (Borgogno et al., 2009; Gitelson et al., 2012; Viña et al., 2012.). Это объекты с особой растительностью, например, лес и рядом расположенная степная растительность, водные и водохозяйственные объекты, или объекты антропогенного характера – дороги, каналы, населенные пункты. Для создания таких массивов используются усовершенствованные алгоритмы обработки данных ДЗЗ (Козодеров и др., 2008; Прохоров, Лисецкий, 2011a; Zhang et al., 2011).

Данные ДЗЗ применялись нами для объективного мониторинга земельных массивов в условиях с.-х. производства на базе радиометрических свойств агрофитоценозов. В процессе выполнения работ на основе ENVI были созданы программные продукты обработки данных. Была апробирована пакетная технология, реализованная в Южном региональном информационно-аналитическом центре (ЮРИА-Центр) (Зинченко и др., 2005, 2011, 2012; Повх и др., 2006, 2007, 2009; Povkh et al., 2004, 2005).

Были выполнены следующие исследования: инвентаризация структуры землепользования и посевных площадей; оценка состояния фитоценозов и прогноз их биологической продуктивности; оценка возможностей использования методов ДЗЗ при принятии решений по продуктивности земельного фонда юга России.

### ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ ДЗЗ И НАЗЕМНЫХ ОБСЛЕДОВАНИЙ

В процессе исследований использованы данные спектрорадиометра MODIS – Terra, Aqua (канал 1 – 620–670 нм и канал 2 – 841–876 нм, пространственное разрешение – 250 м, полоса обзора – 2300 км) (Кравцова, Уварова, 2001; Вина, 2008; Justice et al., 2002; Cescatti, 2012). Применяли также данные высокого пространственного разрешения многозонального сканера МСУ-Э с космического аппарата (КА) “Метеор-3М”. Спектральные диапазоны 500–600, 600–700, 800–900 нм, номинальное пространственное разрешение – 38 м, полоса обзора – 78 км (Гарбук, Гершензон, 1997).

Прием спутниковых данных осуществлялся наземной станцией “СканЭр”. При предварительной обработке информации задействованы программные средства IVAPP, ScasViewer. Обработка цифровых многоспектральных данных проводилась в программной среде ENVI 3.5 (Повх и др., 2006).

Организационно мониторинг земель с.-х. назначения по данным ДЗЗ выполнен в виде системы измерительного и информационного обеспечения. В состав системы входят: программно-аппаратный комплекс приема, первичной обработки и тематического анализа данных ДЗЗ; электронный архив; распределенная сеть сбора и передачи информации. Исходя из аппаратных возможностей, выбраны три уровня целевых территорий: производственное территориальное подразделение с.-х. предприятия (поле), с.-х. предприятие, административный район, область.

Для создания цифровых векторных планов землепользования использованы данные ДЗЗ сверхвысокого (на момент выполнения съемки) пространственного разрешения 4 м: камера КФА-1000, КА “Ресурс-Ф1М” (Киенко, 2000).

Наземная опорная информация включала: состав, органогенез и продуктивность агрофитоценозов на тестовых полигонах; отображение информации в стандартной картографической проекции.

### МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОНИТОРИНГА ЗЕМЕЛЬ С.-Х. НАЗНАЧЕНИЯ ПО ДАННЫМ ДЗЗ

Сроки проведения ДЗЗ были привязаны к радиометрическим свойствам агрофитоценозов согласно стадиям органогенеза культур (Шульгин, 1978; Повх и др., 2006; Козодеров и др., 2007, 2008; Козодеров, Дмитриев, 2010). Метод составления базы исходных данных – пакетная технология, т.е. наложение результатов очередной съемки на данные предыдущей съемки. Структура землепользования устанавливалась по результатам векторизации растрового изображения пространственного разрешения 4 м, а структура посевных площадей – на базе полученной векторной основы структуры землепользования с учетом данных тестовых полигонов в пакетах по индексам NDVI в программной среде ENVI.

Оценка состояния фитоценозов проводилась по подразделениям структуры посевных площадей (поля, производственные участки из нескольких полей) на полученной векторной основе структуры землепользования. Прогноз биологической продуктивности агрофитоценозов осуществлялся по корреляции реальной урожайности культуры и NDVI соответствующего тестового полигона за прошлый с.-х. год.

Метод обработки данных ДЗЗ заключался в геокодировании цифрового плана землеустройства и космического снимка путем стандартной геодезической процедуры привязки по ориентирам и реперам исходного изображения к векторному слою землеустройства в пакете. Формирование пакета: геокодирование первого по сроку снимка (базовый снимок); пиксельная привязка очередного снимка к базовому.

Классификация пакета: формирование пространственной обучающей выборки объектов с близкими, в пределах выборки, и отличными от других областей пакета фотометрическими свойствами согласно данным тестового полигона. Размер элемента выборки – отдельное поле или его фотометрически-однородный фрагмент.

Создание рабочей маски связано с требованием ограничения области классификации только объектами, относящимся к регулярной агрокультуре для данной территории. Классификация данных ДЗЗ о выделенных пространственных объектах в маске проводилась экспертно методом подобия. Конечный результат классификации данных ДЗЗ – цифровая карта посевных площадей в градациях признака состояния культуры. Формат представления данных растровой, векторной, табличной форм на всех этапах обработки ДЗЗ совместим с основными программными ГИС-средствами.



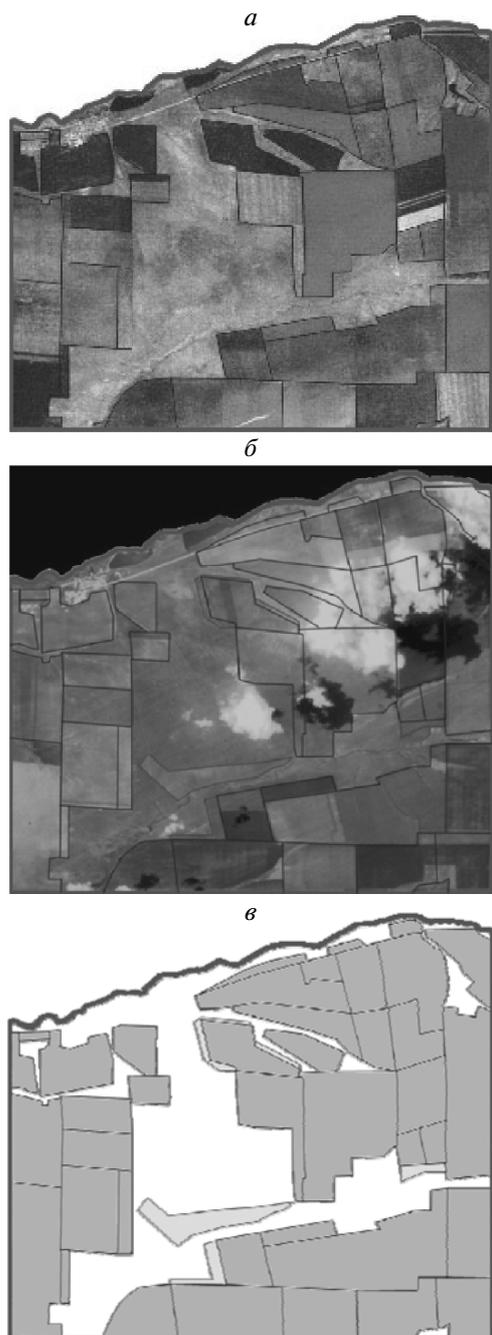
**Рис. 1.** Стадии обработки материалов ДЗЗ для с.-х. предприятия “Совхоз Александровский” Мясниковского р-на Ростовской обл.: *а* – векторный слой “система землепользования”; *б* – целевое маскирование изображения; *в* – результаты классификации данных ДЗЗ.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследований решена задача векторизации растровых изображений землепользования Ростовской обл., их привязки к существующей официальной картографической проекции.

На рис. 1*а–в* в качестве примера представлены соответствующие стадии обработки материалов ДЗЗ для с.-х. предприятия “Совхоз Алексан-

дровский” Мясниковского р-на Ростовской обл. На рис. 1*а* показаны результаты векторизации растрового изображения и полученная в результате структура землепользования изученного объекта по космофотоснимку аппаратуры КФА-1000 от 01.10.1999 г.; на рис. 1*б* – результат создания рабочей маски: ограничение области классификации только объектами, находящимися в регулярной агрокультуре. В дальнейшем векторный слой



**Рис. 2.** Пример возможности контроля динамики землепользований для с.-х. предприятия «Совхоз Александровский» Мясниковского р-на Ростовской обл.: *а* – структура землепользования по космическому снимку (1995 г.); *б* – структура землепользования по космическому снимку в следующий период наблюдений (1999 г.); *в* – цифровая картосхема динамики землепользования.

использовался как при обновлении существующих карт землепользования, так и при обработке данных ДЗЗ для целевого маскирования изображений. На рис. 1*в* приведены результаты классификации данных ДЗЗ после наложения маски,

что позволяет соотнести качественные и количественные характеристики выделяемых классов агроценозов с объектами векторного слоя.

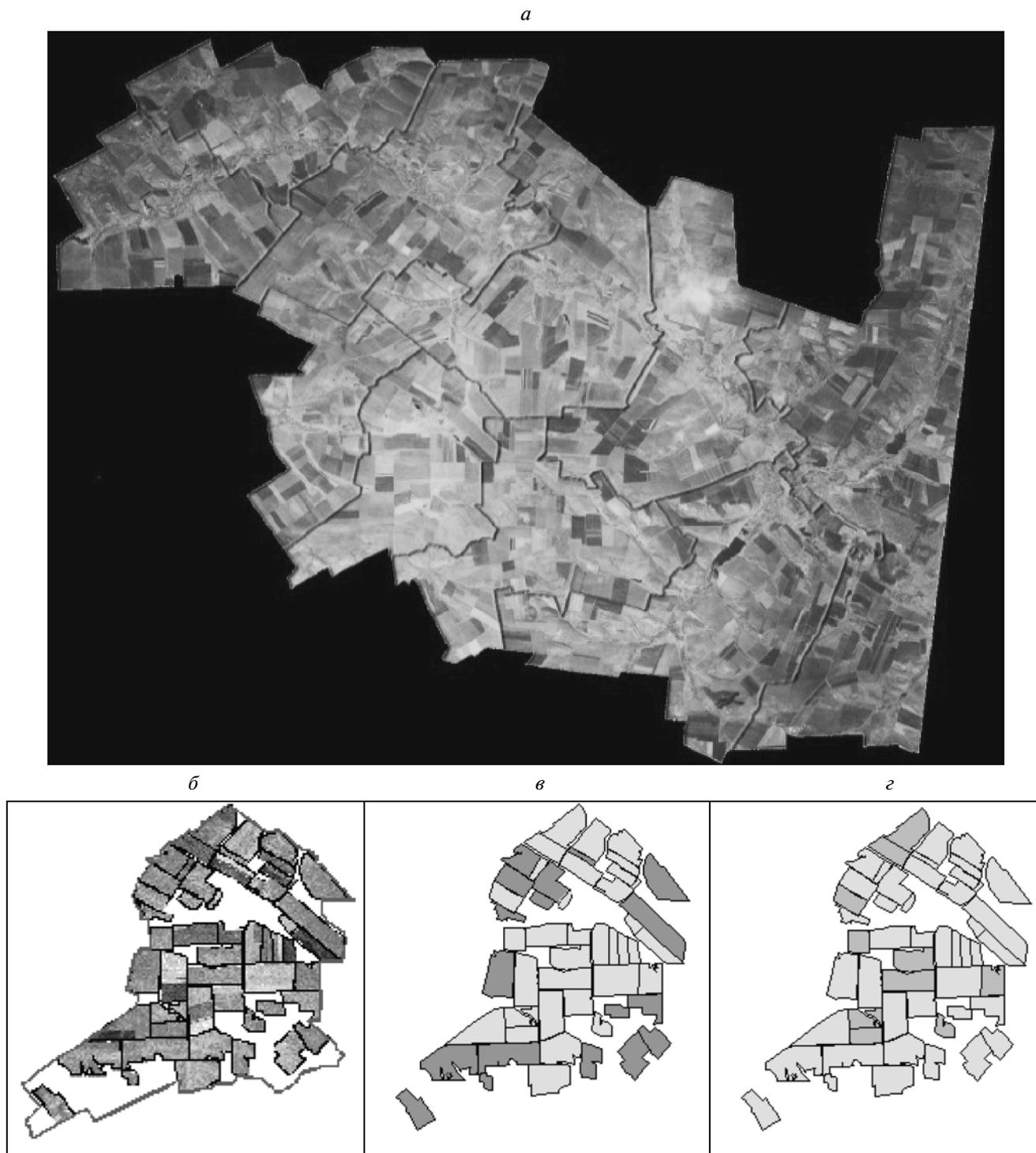
Задачей землеустройства в свете земельной реформы является контроль динамики земельных выделов. Как правило, в наземном исполнении землеустройства в прошлом контроль динамики землепользования выполняли один раз в пять лет. Такая длительность постоянной времени обратной связи в системе регулирования государственного земельного фонда характеризует эту систему как абсолютно нерегулируемую. Ситуация абсолютно нетерпима вследствие отсутствия контроля получаемой с.-х. продукции. Один из основных аспектов решения этой задачи состоит в оперативном контроле динамики землепользований. Примеры представлены на рис. 2*а–2в*.

Из данных рис. 2 следует принципиально новая возможность контроля динамики землепользований по данным ДЗЗ. На рис. 2*а* представлена структура землепользования с.-х. предприятия СКВО Мясниковского р-на Ростовской обл. по исходному космическому снимку, выполненному в начальный период наблюдений. На рис. 2*б* отдельным векторным слоем выделены границы обрабатываемых полей, отсутствовавших в землепользовании в структуре регулярной агрокультуры в предшествующий период дистанционного наблюдения. На рис. 2*в* дана динамика землепользования данного с.-х. предприятия в виде цифровой картосхемы. Площадь новых не учтенных в Земельном кадастре полей составляет 155 га.

Задачами мониторинга с.-х. земель являются контроль их использования по целевому назначению и перераспределение земель между категориями землепользования. Текущими актуальными и более простыми задачами являются контроль использования земель по целевому назначению и перераспределение земель новым пользователям. В качестве критерия для принятия указанных решений можно предложить возможности ДЗЗ на примере анализа снимка КФА-1000 от 01.10.1999 г. на территорию Боковского р-на Ростовской обл. (рис. 3*а–3г*).

Согласно рис. 3*в*, имеет место факт неиспользования земель с.-х. назначения в СПК «Колхоз Красная Заря» Боковского р-на Ростовской обл. Факт легко установить, например, по отсутствию резкой смены NDVI в течение всего лишь одного вегетационного сезона. Когда не ведется обработка земельного участка, фотометрические параметры фитоценоза изменяются медленно.

Несоблюдение агротехники также устойчиво контролируется методами ДЗЗ. На рис. 3*г* представлены площади подсолнечника, который был идентифицирован в качестве культуры в поздние осенние сроки съемки. Оказалось, что подсолнечник не был убран в надлежащие агротехниче-



**Рис. 3.** Пример контроля использования земель по целевому назначению по данным ДЗЗ: *a* – снимок КФА-1000 от 01.10.1999 г. территории Боковского р-на Ростовской обл.; *б* – землепользование СПК “Колхоз Красная Заря”; *в* – неиспользуемые земли СПК (общая площадь 3042 га); *г* – поля с необраным подсолнечником СПК (общая площадь 1488 га).

ские сроки. Факт такого рода также является мотивом к принятию решения о смене пользователя земельного участка.

Важным элементом агротехники служит севооборот, т.е. чередование культур и пара в пространстве земельного участка. Подсолнечник яв-



**Рис. 4.** Анализ места подсолнечника в севообороте на примере землепользования с.-х. предприятия СПК “Каргинский” Боковского р-на Ростовской обл.: *a* – снимок МСУ-Э от 10.08.2000 г. после предварительной обработки; *б* – место подсолнечника в севообороте по двум последовательным годам наблюдений.

ляется классической пропашной культурой, требующей севооборота. При возврате культуры на то же поле севооборота раньше, чем через 5–7 лет,

есть опасность развития заразики подсолнечника – паразитного растения, споры которого долгое время сохраняются в почве. После появления заразики на поле возделывание подсолнечника на нем становится невозможным на долгие годы ввиду практически полного уничтожения растений подсолнечника растением-паразитом. По указанной причине важно выявлять землепользователей, которые нарушают севооборот.

На рис. 4*a*, 4*б* представлен анализ места подсолнечника в севообороте на примере землепользования с.-х. предприятия СПК “Каргинский” Боковского р-на Ростовской обл. по двум последовательным годам наблюдений.

Для Ставропольского края по данным MODIS и Landsat 2006 г. выполнена оценка посевных площадей подсолнечника. Для Советского и Изобильненского районов данные приведены на рис. 5*a*, 5*б*.

Установлена высокая степень корреляции данных государственной статистики и результатов, полученных с использованием методов ДЗЗ. Поскольку последние имеют неизмеримо более высокую оперативность, очевидна их перспектива как официального и юридически значимого инструмента управления использованием земельного фонда.

Результаты тематического анализа данных ДЗЗ дают несколько градаций состояния культуры в пределах поля, поэтому полученная структура данных о пространственных объектах более детальна, чем базовая схема землепользования. Исследование временных и пространственных аспектов сукцессии агроландшафтной системы при мониторинге севооборотов позволяет оценить вид агроценоза независимо от градаций состояния культуры внутри поля.

Важной стадией органогенеза озимых культур является их развитие в позднеосенний, зимний и ранневесенний периоды. В это время на юге РФ, ввиду отсутствия сплошного устойчивого снежного покрова, имеется возможность получать космические снимки о текущем состоянии растений. На рис. 6*a*, 6*б* приведены текущие оценки условий перезимовки озимых культур для Республики Адыгея в декабре 2007–январе 2008 гг., выполненные по снимкам среднего разрешения MODIS на основе NDVI, метеорологических данных и метеорологических функциональных соотношений (Шульгин, 1978). Последующими съемками установлено, что оценки меняются и в дальнейшем, до весны, причем наиболее высокая корреляция состояния посевов и будущей урожайности имеет место для поздневесеннего периода оценок.

Экологическая реакция видов на изменяющиеся условия внешней среды изучена на примере мониторинга озимой пшеницы по данным космического ДЗЗ. Использована методика иденти-

фикации посевов по дешифровочному признаку NDVI. Индекс имеет прямую связь с уровнем фотосинтетической активности растений и служит индикатором состояния культурного агроценоза. Дешифрование посевов озимых зерновых выполнено с пространственным разрешением 250 м.

На рис. 7 представлена карта-схема Кагальницкого р-на с учетом данных спектрорадиомера MODIS. Двумя градациями показаны посевные площади озимых зерновых в хорошем и удовлетворительном состоянии. Указана доля общих посевных площадей, занятых посевами озимых, и доли посевов озимых в хорошем и удовлетворительном состоянии.

Полученные оценки посевных площадей и состояния озимых зерновых в ранневесенний период служат базой для моделирования возможной урожайности. Моделирование выполнено на базе данных об урожайности и фотометрических свойствах агрофитоценоза соответствующей культуры в аналогичных условиях развития по прошедшему с.-х. году (рис. 8).

Результаты прогноза урожайности озимых зерновых по данным космической съемки в 2002 г. для Кагальницкого р-на Ростовской обл. показаны на диаграммах (рис. 9) в трех градациях урожайности (менее 3.0 т/га, от 3.0 до 4.0 т/га, более 4.0 т/га). Коэффициент корреляции прогноза и реально зафиксированной урожайности составил 0.81 при статистической стандартной ошибке оценки урожайности 0.45 т/га.

В результате предлагаемой нами пакетной технологии достигнуты следующие цели: контроль посевов озимых культур и подсолнечника, соблюдение агротехники, в том числе развития растений на ранних стадиях органогенеза, соблюдение севооборота землепользователями, качество использования земель с.-х. назначения в регулярной агрокультуре, прогноз урожайности основных с.-х. культур.

Для практических приложений в с.-х. производстве требуются иные параметры, чем NDVI. В прикладном земледелии требуется информация о глубине обработки почвы, качестве семян, пространственной неоднородности выпадения осадков, стоке, впитывании, потоках воды, уплотнении почвы ходовыми системами с.-х. техники и других параметров (Chen et al., 2012; Comar et al., 2012; Dematté et al., 2009; Qu et al., 2012; Long, Singh, 2012). В этом смысле существуют естественные ограничения данных аэрокосмического мониторинга (Brown et al., 2012; Ciganda et al., 2012). В отличие от NDVI должна решаться более углубленная задача распознавания наблюдаемых объектов и поэлементного восстановления объема фитомассы для разных типов растительного покрова, как это показано в работе (Козодеров и др., 2008) для случая лесного биогеоценоза.

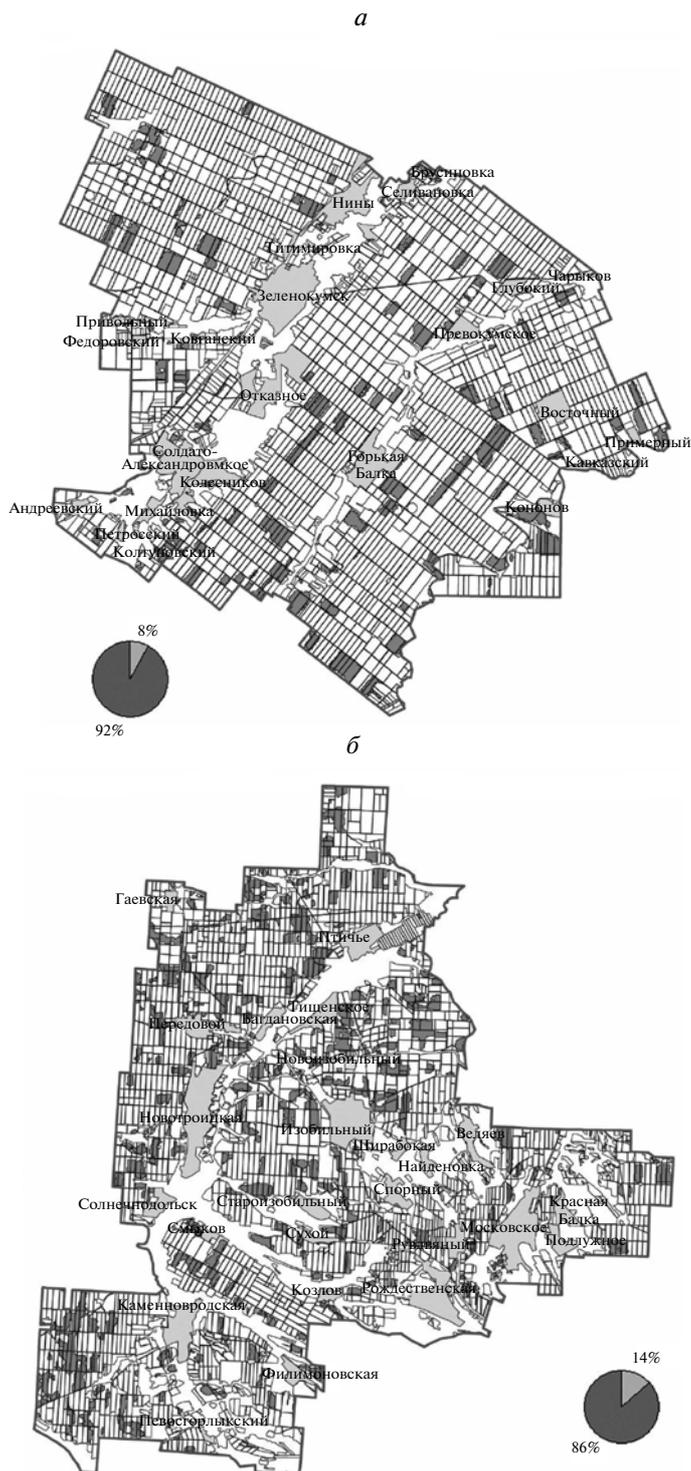


Рис. 5. Оценка посевных площадей подсолнечника в Ставропольском крае по данным MODIS и Landsat 2006 г.: а – в Советском р-не; б – в Изобильненском р-не.

Возникает необходимость более глубокого понимания энергетики геосистем (Лисецкий, 2011а, 2011б; Лисецкий, Нарожняя, 2011). Возрастает роль изучения режима почвообразования (Дем-



Рис. 6. Тематическая карта интегральных условий перезимовки озимых с.-х. культур в Республике Адыгея: а – декабрь 2007 г.; б – январь 2008 г.

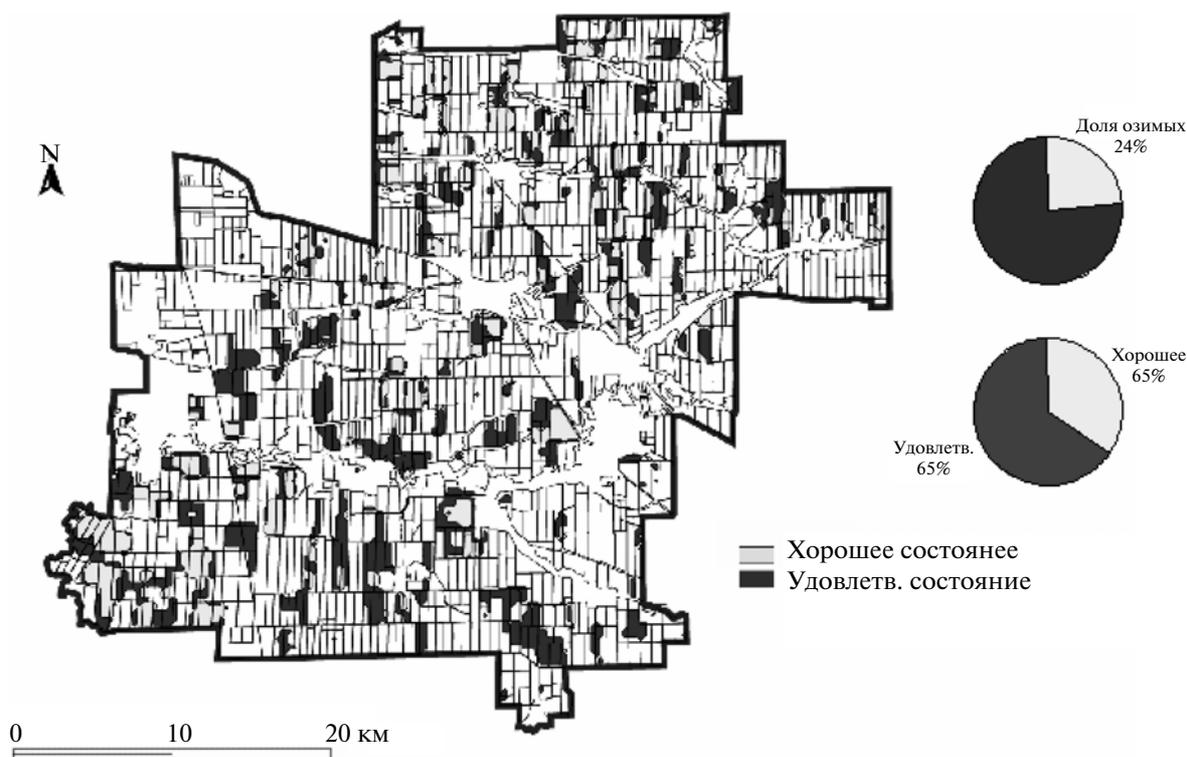
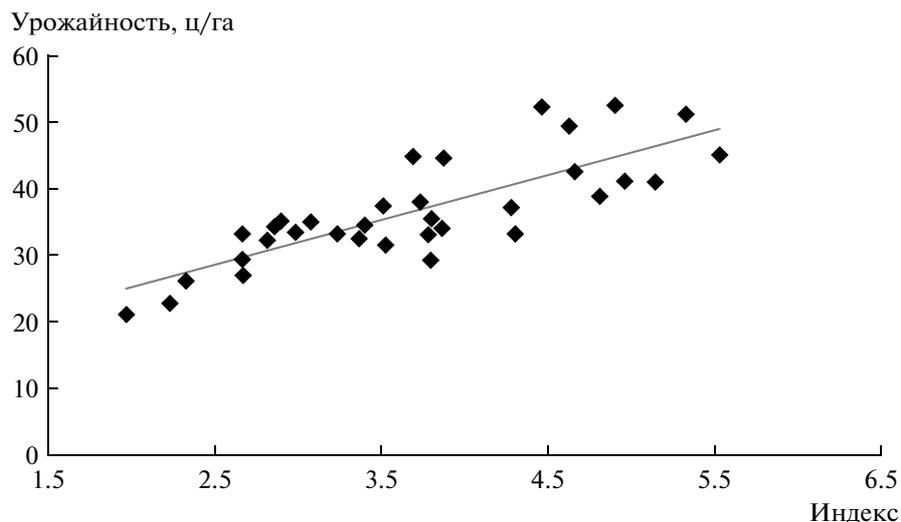


Рис. 7. Кагальницкий р-н Ростовской обл. Состояние озимых зерновых по данным космического ДЗЗ (февраль 2002 г.).

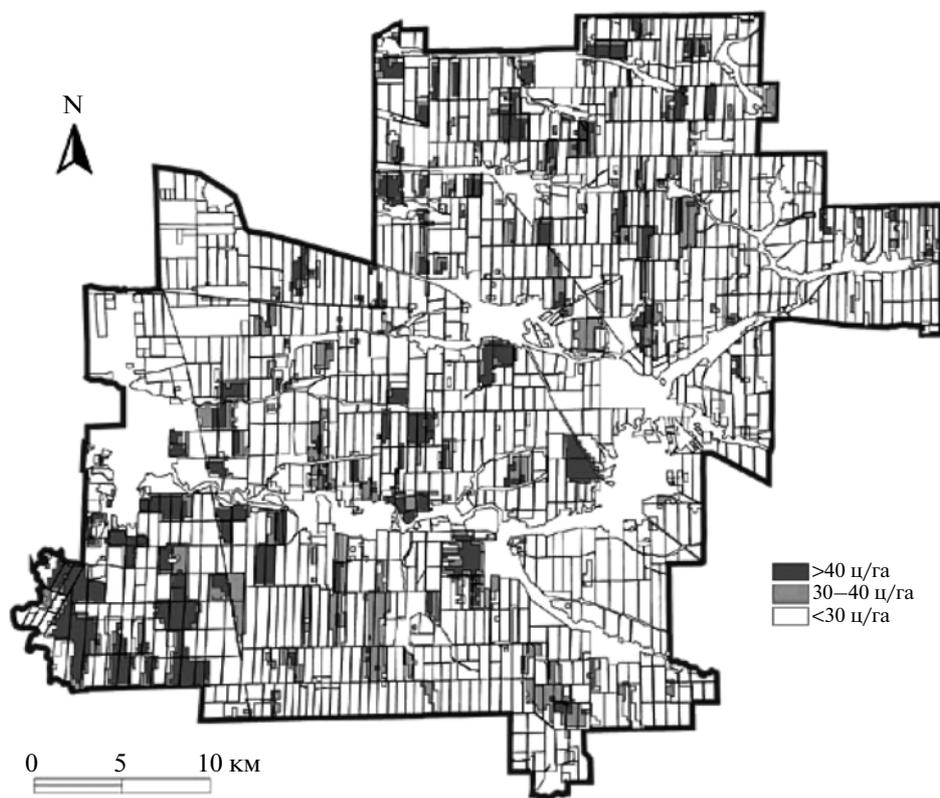
кин и др., 2012а, 2012б; Калиниченко и др., 2011). Требуется создание баз данных агропочвоведения и экологии (Куст и др., 2011; Макеев, 1996; Шеин, 2010; Шоба, 2009). Расширяется информационная база описания структуры почвенного покрова (Артоболевский и др., 2009; Котляков, Тишков, 2009).

На рис. 10 представлен аэроснимок, выполненный подразделением землепользования Донского научно-исследовательского института сельского хозяйства.

Снимок отражает сильную дифференциацию структуры растительного покрова, следующую из дифференциации структуры почвенного покрова



**Рис. 8.** Эмпирическая зависимость между оптическим индексом вегетации посевов озимых зерновых и урожайностью, рассчитанная по тестовой выборке полей по данным 2001 г.



**Рис. 9.** Прогноз урожайности озимых зерновых по данным космической съемки в феврале 2002 г., Кагальницкий р-н Ростовской обл.

(Калиниченко и др., 2011). Природная структура почвенного покрова согласно снимку обусловлена несколькими геоморфологическими элементами рельефа. В северной части снимка расположен небольшой тальвег, который занят талой водой.

Имеется локальное слабовыраженное понижение рельефа, оно направлено от центра снимка на юго-восток. Вдоль понижения расположены несколько западин, в которых наблюдается локальное угнетение растений от переувлажнения — относитель-

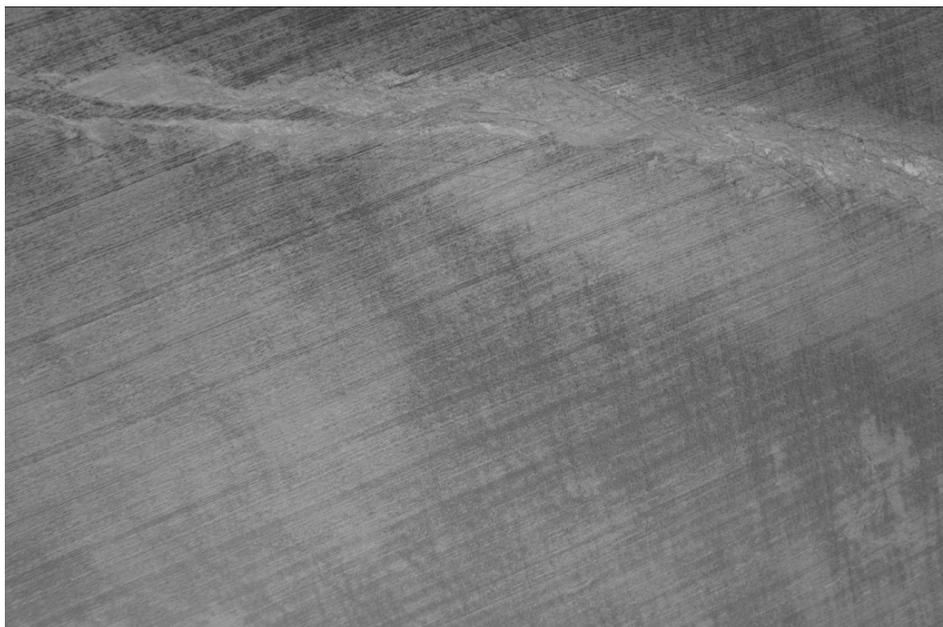


Рис. 10. Аэроснимок посевов озимой пшеницы с беспилотного летательного аппарата “Рассвет”, 11.02.2011, 12:44.

но светлые контуры изображения. Понижение окаймлено двумя мезоповышениями рельефа, расположенными относительно него на северо-восток и юго-запад. В пределах этих контуров культурные растения развиты слабо еще с осени, ввиду малого стартового запаса воды в почве.

Исходя из результатов дополнительной съемки с помощью беспилотного летательного аппарата “Рассвет” Таганрогского института ЮФУ, только 5–10% территории землепользования, охваченной снимком, характеризуется приемлемой, с точки зрения нормального органогенеза озимой пшеницы, структурой растительного покрова. Актуальной является задача оценки качества земельных угодий с использованием материалов аэрокосмических съемок.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные космического ДЗЗ и результаты их тематического дешифрирования дают объективную информацию о текущем состоянии с.-х. производства, определяют эффективность управления производством.

Агропочвы юга России являются объектом с ярко выраженным преобладанием вклада локальной микронеоднородности. Были показаны некоторые примеры использования ДЗЗ как главного инструмента для объективной характеристики биогеоэкологической системы и развития современных представлений о целостности ее отдельных уровней отображения в материалах аэрокосмической съемки (Xian et al., 2012).

Полученные результаты могут использоваться в управлении земельными ресурсами территории.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Артоболевский С.С., Бабурин В.Л., Бакланов П.Я и др. Стратегии пространственного развития в Российской Федерации: географические ресурсы и ограничения // Изв. РАН. Сер. географическая. 2009. № 3. С. 8–17.
- Барталев С.А., Лупян Е.А., Нейштадт И.А., Савин. И.Ю. Дистанционная оценка параметров с.-х. земель по спутниковым данным спектрорадиомера MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов / Под. ред. Е.А. Лупяна, О.Ю. Лавровой. Вып. 2. Т. 2. М.: GRANP polygraph, 2005. С. 228–236.
- Гарбук С.В., Гершензон В.Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. М.: А и Б, 1997. 297 с.
- Демкин В.А., Борисов А.В., Демкина Т.С., Удальцов С.Н. Эволюция почв и динамика климата степей юго-востока русской равнины в эпохи энеолита и бронзы (IV–II тыс. до н.э.) // Изв. РАН. Сер. географическая. 2012а. № 1. С. 46–57.
- Демкин В.А., Золотарева Б.Н., Демкина Т.С., Хомутова Т.Э., Каширская Н.Н., Ельцов М.В., Удальцов С.Н. Динамика свойств степных палеопочв сарматского времени (II в. до н.э. – IV в. н.э.) в связи с вековой изменчивостью увлажненности климата // Почвоведение. 2012б. № 2. С. 142.
- Зинченко В.Е., Повх В.И., Калинин В.П. Управление плодородием почв на основе дистанционного зондирования агроландшафтов Ростовской области // Мат. Междун. научно-практ. конф. “Актуальные проблемы и перспективы развития агропромышленного

- комплекса". 1–4 февраля 2005 г. П. Персиановский, 2005. С. 21–24.
- Зинченко В.Е., Повх В.И., Лохманова О.И., Глухов А.И., Калиниченко В.П.* Возможности и перспективы дистанционного зондирования Земли при мониторинге земель сельскохозяйственного назначения // Мат. Междун. научно-практ. конф. "Инновации в науке, образовании и бизнесе – основа эффективного развития АПК". 1–4 февраля 2011 г. П. Персиановский. 2011. Т. 2. С. 108–111.
- Зинченко В.Е., Повх В.И., Лохманова О.И., Калиниченко В.П., Зинченко А.Е.* Использование космических съемок и наземных обследований для оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур // Вестн. Российской академии с.-х. наук. 2012. № 1. С. 45–47.
- Калиниченко В.П.* Природные и антропогенные факторы происхождения и эволюции структуры почвенного покрова. М.: МСХА, 2003. 376 с.
- Калиниченко В.П.* Устойчивость агроэкосистем как условие реализации федеральной программы повышения плодородия почв на 2002–2005 гг. (на примере Ростовской обл.) // Докл. Российской академии с.-х. наук. 2004. № 6. С. 27–30.
- Калиниченко В.П., Шаршак В.К., Безуглова О.С., Ладан Е.П., Генева Е.Д., Илларионов В.В., Зинченко В.Е., Морковской Н.А., Черненко В.В., Ильина Л.П.* Изменение почв солонцового комплекса за 30-летний период после отвальной, трехъярусной и нового приема роторно-фрезерной обработки // Почвоведение. 2011. № 8. С. 1010–1022.
- Киенко Ю.П.* Рекомендации по использованию космических съемок со спутника "Ресурс-Ф1М" № 2. Госцентр "Природа". М., 2000.
- 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., Дмитриев Е.В., Егоров В.Д., Борзяк В.В.* Инновационная технология обработки многоспектральных космических изображений земной поверхности // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 1. С. 56–72.
- Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Косолапов В.С., Головкин В.А., Дмитриев Е.В.* Восстановление объема фитомассы и других параметров состояния почвенно-растительного покрова по результатам обработки многоспектральных спутниковых изображений // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 1. С. 57–65.
- Козодеров В.В., Косолапов В.С., Ушаков С.А. и др.* Космическое земледование: информационно-математические основы / Под ред. В.А. Садовниченко. М.: МГУ, 1998. Т. 1. 756 с.
- Котляков, В.М., Тишков А.А.* Стратегия устойчивого развития России в начале XXI века: инновационные векторы и место географического прогноза // Инновации. 2009. № 9. С. 74–81.
- Кравцова В.И., Уварова И.А.* Гиперспектральная система MODIS для глобального мониторинга Земли // Информ. бюл. ГИС Ассоциации. 2001. № 2. С. 39–41.
- Куст Г.С., Розов С.Ю., Стома Г.В., Андреев П.В.* Педогеохимическая индикация особенностей устойчивого функционирования Приволжской оросительной системы (Саратовская обл.) // Аридные экосистемы. 2011. Т. 17. № 47. С. 5–17.
- Лисецкий Ф.Н.* Историко-экологические этапы трансформации восточно-европейских степей // Усп. совр. естествознания. 2011а. № 5. С. 33–36.
- Лисецкий Ф.Н.* Ритмика почвообразования и солнечная активность // Совр. пробл. науки и образования. 2011б. № 1. С. 6–9.
- Лисецкий Ф.Н., Нарожняя А.Г.* Энергетические и экологические оценки геосистем // Пробл. регион. экол. 2011. № 2. С. 100–105.
- Макеев А.О.* Обеспечение сетевого доступа и информационного обмена с применением www-технологий к информационным системам и базам данных в области агропочвоведения и экологии // Информ. бюл. РФФИ. 1996. Т. 4. № 7. С. 46.
- Повх В.И., Гарбузов Г.П., Шляхова Л.А.* Космический мониторинг с.-х. угодий Ростовской обл. // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 3. С. 1–8.
- Повх В.И., Гарбузов Г.П., Шляхова Л.А.* Оценка структуры посевов подсолнечника в Ставропольском крае по данным дистанционного зондирования спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов / Под. ред. Е.А. Лупяна, О.Ю. Лавровой. Вып. 4. Т. 2. М.: Азбука-2000, 2007. С. 284–289.
- Повх В.И., Шляхова Л.А., Воробейчик Е.А.* Использование технологии дистанционного зондирования Земли для решения задач прогноза урожайности зерновых культур в Республике Адыгея // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов / Под. ред. Е.А. Лупяна, О.Ю. Лавровой. Вып. 6. Т. 2. М.: Азбука-2000, 2009. С. 419–424.
- Прохорова О.В., Лисецкий Ф.Н.* Применение геоинформационных технологий и данных дистанционного зондирования Земли для расширения сети ООПТ (на примере степных ландшафтов Воронежской области) // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Сер. География. Геоэкология. 2011. № 1. С. 184–187.
- Шейн Е.В.* Гидрология почв: этапы развития, современные тенденции, ближайшие перспективы // Почвоведение. 2010. № 2. С. 175–185.
- Шоба С.А.* Горизонты почвоведения: итоги и перспективы // Почвоведение. 2009. № 5. С. 515–520.
- Шульгин А.М.* Агрометеорологическая климатология. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 200 с.
- Borgogno F., D'Odorico P., Laio F., Ridolfi L.* Mathematical models of vegetation pattern formation in ecohydrology // Rev. Geophys. 2009. V. 47. № RG1005. doi:10.1029/2007RG000256.
- Brown M.E., Beurs de K.M., Marshall M.* Global phenological response to climate change in crop areas using satellite remote sensing of vegetation, humidity and temperature over 26 years // Rem. Sens. Environ. 2012. V. 126. P. 174–183.
- Cescatti A., Marcolla B., Vannan S.K.S., Pan J.Y., Roman M.O., Yang X., Ciais P., Cook R.B., Law B.E., Matteucci G., Migliavacca M., Moors E., Richardson A.D., Seufert G., Schaaf C.B.* Intercomparison of MODIS albedo retrievals and

- in situ measurements across the global FLUXNET network // *Rem. Sens. Environ.* 2012. V. 121. P. 323–334.
- Ciganda V.S., Gitelson A.A., Schepers J.* How deep does a remote sensor sense? Expression of chlorophyll content in a maize canopy // *Rem. Sens. Environ.* 2012. V. 126. P. 240–247.
- Chen Q., Laurin G.V., Battles J.J., Saah D.* Integration of airborne lidar and vegetation types derived from aerial photography for mapping aboveground live biomass // *Rem. Sens. Environ.* 2012. V. 121. P. 108–117.
- Comar A., Baret F., Viénot F., Yan L., Solan de B.* Wheat leaf bidirectional reflectance measurements: Description and quantification of the volume, specular and hot-spot scattering features // *Rem. Sens. Environ.* 2012. V. 121. P. 26–35.
- Dematté J.A.M., Fioriob P.R. Ben-Dorc E.* Estimation of soil properties by orbital and laboratory reflectance means and its relation with soil classification // *Open Rem. Sens. J.* 2009. V. 2. P. 12–23.
- Fontana F.M.A., Coops N.C., Khlopenkov K.V., Trishchenko A.P., Riffler M., Wulder M.A.* Generation of a novel 1 km NDVI data set over Canada, the northern United States, and Greenland based on historical AVHRR data // *Rem. Sens. Environ.* 2012. V. 121. P. 171–185.
- Gitelson A.A., Peng Y., Masek J.G., Rundquist D.C., Shashi Verma, Andrew Suyker, John M. Baker, Jerry L. Hatfield, Meyers T.* Remote estimation of crop gross primary production with Landsat data // *Rem. Sens. Environ.* 2012. V. 121. P. 404–414.
- Justice C.O., Townshend J.R.G., Vermote E.F. et al.* An overview of MODIS Land data processing and product status // *Rem. Sens. Environ.* 2002. V. 83. P. 3–15.
- Long D., Singh V.P.* A Two-source Trapezoid Model for Evapotranspiration (TTME) from satellite imagery // *Rem. Sens. Environ.* 2012. V. 121. P. 370–388.
- Maxwell S.K., Sylvester K.M.* Identification of “ever-cropped” land (1984–2010) using Landsat annual maximum NDVI image composites: Southwestern Kansas case study // *Rem. Sens. Environ.* 2012. V. 121. P. 186–195.
- Povkh V., Shljakhova L., Garbuzov G.* Operational Monitoring of the Agricultural Production Based on the Observation MODIS Data as a Support for Improving Regional Planning // *Proc. 31th ISRSE.* June 20–25, 2005. St. Petersburg. P. 421–424.
- Povkh V.I., Vorobeychik E.A., Shljakhova L.A. et al.* Detailed monitoring of agricultural production based on the MODIS radiometer data // *Proc. SPIE: Rem. Sens. Agricult., Ecosyst., and Hydrology.* 2004. V. 5232. P. 548–552.
- Qu M., Li W., Zhang C., Wang S.* Effect of Land Use Types on the Spatial Prediction of Soil Nitrogen // *GIScience and Rem. Sens.* 2012. V. 49. № 3. P. 397–411.
- Shljakhova L.A., Povkh V.I., Garbuzov G.P.* MSS/Resource-01 imagery for crop growth and yield studies // *IRS 2000: Current Problems in Atmospheric Radiation.* Virginia, 2001. P. 133–135.
- Vina A., Bearer S., Zhang H., Ouyang Z., Liu J.* Evaluating MODIS data for mapping wildlife habitat distribution // *Rem. Sens. Environ.* 2008. V. 112. P. 2160–2169.
- Vina A., Hebery G.M., Gitelson A.* Satellite monitoring of vegetation dynamic: Sensivity enhancement by the wide dynamic range vegetation index // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. P. L04503.
- Vina A., Tuanmu M.-N., Xu W., Li Y., Jiaguo Q., Ouyang Z., Liu J.* Relationship between floristic similarity and vegetated land surface phenology: Implications for the synoptic monitoring of species diversity at broad geographic regions // *Rem. Sens. Environ.* 2012. V. 121. P. 488–496.
- Wenwen C., Jinling S., Jindi W., Zhiqiang X.* High spatial- and temporal-resolution NDVI produced by the assimilation of MODIS and HJ-1 data // *Canad. J. Rem. Sens.* 2011. V. 37. № 6. P. 612–327, 10.5589/m12-004.
- Xian G., Homer C.G., Aldridge C.L.* Effects of Land Cover and Regional Climate Variations on Long-Term Spatiotemporal Changes in Sagebrush Ecosystems // *GIScience and Rem. Sens.* V. 49. № 3. 2012. P. 378–396.
- Zhang K., Hu B., Wang J., Pattey E., Smith A.M.* Improving the retrieval of the biophysical parameters of vegetation canopies using the contribution index // *Canad. J. Rem. Sens.* 2011. V. 37. № 6. P. 643–652, 10.5589/m12-006.

## Land Monitoring from Space of Agricultural Fields in the Southern Part of Russia

V. E. Zinchenko, O. I. Likhmanova, V. P. Kalinitchenko, A. I. Glukhov,  
V. I. Povkh, G. P. Garbuzov, L. A. Shljakhova

*Don Science and Technology Institute of Agriculture, Rassvet, Rostov Region*

*Institute of Soil Fertility Southern Russia, Persianovsky, Rostov Region*

*Southern Regional Information and Analytical Center, Rostov-on-Don*

Characteristic features are shown of a packet technology of airspace data processing with different spatial resolution to assess the state of agricultural crops from a separate field to several fields for the selected administrative region. Procedures are employed of initial imagery geographical referencing to land use layers as well as of remote sensing data classification taking into account the crop rotation of the related canopies for the region under study.

**Keywords:** remote sensing of the Earth, agricultural production monitoring, classification of objects

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ  
КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

РАЗРАБОТКА ЭМПИРИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ  
КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА-А И ОКРАШЕННЫХ РАСТВОРЕННЫХ  
ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ ДЛЯ ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫХ МОРЕЙ  
ИЗ ДИСТАНЦИОННЫХ ДАННЫХ ПО ЦВЕТУ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

© 2013 г. П. А. Салюк<sup>1</sup>, И. Е. Стёпочкин<sup>2</sup>, И. А. Голик<sup>1</sup>, О. А. Букин<sup>3</sup>,  
А. Н. Павлов<sup>3</sup>, А. И. Алексанин<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток

<sup>2</sup>Морской государственный университет им. адмирала Г.И. Невельского, Владивосток

<sup>3</sup>Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток

<sup>4</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

\*E-mail: psalyuk@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 19.04.2012 г.

Рассмотрены методы эмпирического определения концентрации хлорофилла-а и окрашенных растворенных органических веществ (ОРОВ) из гиперспектральных данных по цвету морской поверхности в случае различных соотношений между концентрацией хлорофилла-а и ОРОВ. Исследования проведены на акваториях Японского и Охотского морей в водах различного оптического типа. Для собранного массива натурных наблюдений показано, что для наилучшего разделения вкладов фитопланктона и ОРОВ в цвет океана необходимо использовать линию солнечно-инуцированной флуоресценции хлорофилла-а в районе 680 нм для оценки концентрации хлорофилла-а, и коэффициенты яркости морской поверхности в спектральном диапазоне 550–580 нм для оценки концентрации ОРОВ. Определены спектральные каналы современных спутниковых сканеров цвета морской поверхности для наилучшего разделения вкладов фитопланктона и ОРОВ в регистрируемый сигнал.

**Ключевые слова:** фитопланктон, хлорофилл-а, растворенное органическое вещество, цвет морской поверхности, флуоресценция, биооптический алгоритм, пассивное оптическое зондирование

DOI: 10.7868/S0205961413030044

## ВВЕДЕНИЕ

Измерение цвета морской поверхности со спутников активно развивается в последние десятилетия. В настоящее время спутниковые данные широко используются в задачах мониторинга окружающей среды. Содержание фитопланктона и окрашенных растворенных органических веществ (ОРОВ) в морской воде является одним из основных факторов, определяющих изменчивость регистрируемого сигнала. Большинство современных стандартных биооптических алгоритмов оценивает только концентрацию хлорофилла-а – основного пигмента фитопланктона, который является показателем биопродуктивности морских вод. Однако концентрация ОРОВ не менее важный параметр, необходимый для более точных оценок состояния фитопланктонных сообществ и производимой ими первичной продукции, а также для проведения экологического мониторинга. В дан-

ный момент в основном используются региональные алгоритмы, оценивающие ОРОВ, которые зависят не только от района, но и от сезона измерений. Разработка более универсальных подходов позволит точнее определять содержание хлорофилла-а и ОРОВ вне зависимости от наличия подспутниковых наблюдений.

Существуют два основных подхода для оценки концентрации хлорофилла-а и ОРОВ в морской воде: эмпирический, в котором используются экспериментально установленные соотношения между коэффициентами яркости моря на определенных длинах волн и концентрациями оптически-активных компонентов (ОАК) морской воды, и полуаналитический, где спектральное распределение коэффициента яркости представлено в виде функции от показателей рассеяния и поглощения ОАК в исследуемой акватории.

Общей проблемой для обоих подходов является сложность спектральных распределений показателей поглощения и рассеяния света морской воды. Особенно это актуально для вод второго оптического типа, где показатели различных ОАК соизмеримы по величине, и соотношения концентраций ОАК непостоянны (Morel, Prieur, 1977; Sathyendranath, 2000). Так, например, отношение концентрации хлорофилла-*a* к ОРОВ может зависеть от наличия аллохтонного ОРОВ, степени деградации ОРОВ и состояния клеток фитопланктона, при этом перечисленные факторы меняются в различные сезоны наблюдений (Букин и др., 2004; Morel, Gentili, 2009).

У эмпирического и полуаналитического подхода есть свои преимущества и недостатки. В первом случае возникают существенные ошибки при смене соотношений между хлорофиллом-*a* и ОРОВ. Поэтому необходимо проведение большого количества измерений эталонными контактными методами для накопления достаточной статистики и построения алгоритмов для различных районов и сезонов (Букин и др., 2003; Bukin et al., 2010; Burenkov et al., 2000). Во втором случае минусы состоят в большей чувствительности к ошибкам атмосферной коррекции (Kopelevich et al., 2004), необходимости больших вычислительных ресурсов и неустойчивости задачи, что может привести к кардинально ошибочному решению из неправильной области локального минимума. Кроме этого, излишняя сложность полуаналитического подхода в водах первого оптического типа может привести к дополнительным ошибкам.

Полуаналитический подход является более перспективным, поскольку позволяет уменьшить ошибки, связанные со сменой соотношений между ОАК, и его недостатки будут уменьшаться по мере развития вычислительных мощностей и улучшения спектрального разрешения дистанционных измерений. Однако эмпирические алгоритмы не теряют своей актуальности, так как они более устойчивы к ошибкам атмосферной коррекции, необходимы для определения начальных и граничных условий полуаналитических моделей и могут быть использованы в качестве оценок в том случае, если полуаналитические алгоритмы не приводят к корректным решениям. Улучшить эмпирические алгоритмы возможно за счет тщательного подбора рабочих спектральных диапазонов, которые будут максимально разделять вклады ОАК.

Задача данной работы — поиск таких эмпирических определений концентрации хлорофилла-*a* и ОРОВ из спектров коэффициента яркости моря, которые максимально разделяют вклад хлорофилла-*a* и ОРОВ в формирование восходящего излучения моря, или, другими словами, максимально приближают рассматриваемую воду к первому

оптическому типу. Для решения поставленной задачи рассмотрены спектральные диапазоны реально существующих спутниковых сканеров цвета морской поверхности и подобраны оптимальные диапазоны вне привязки к спутниковым сканерам.

В качестве экспериментальных данных в работе использованы судовые измерения. При этом полученные результаты могут быть использованы для спутников, поскольку метод пассивного оптического зондирования цвета морской поверхности универсален как для работы из космоса, так и для работы с борта судна. Отличия состоят в необходимости проведения атмосферной коррекции, спектральном разрешении и ошибках измерений.

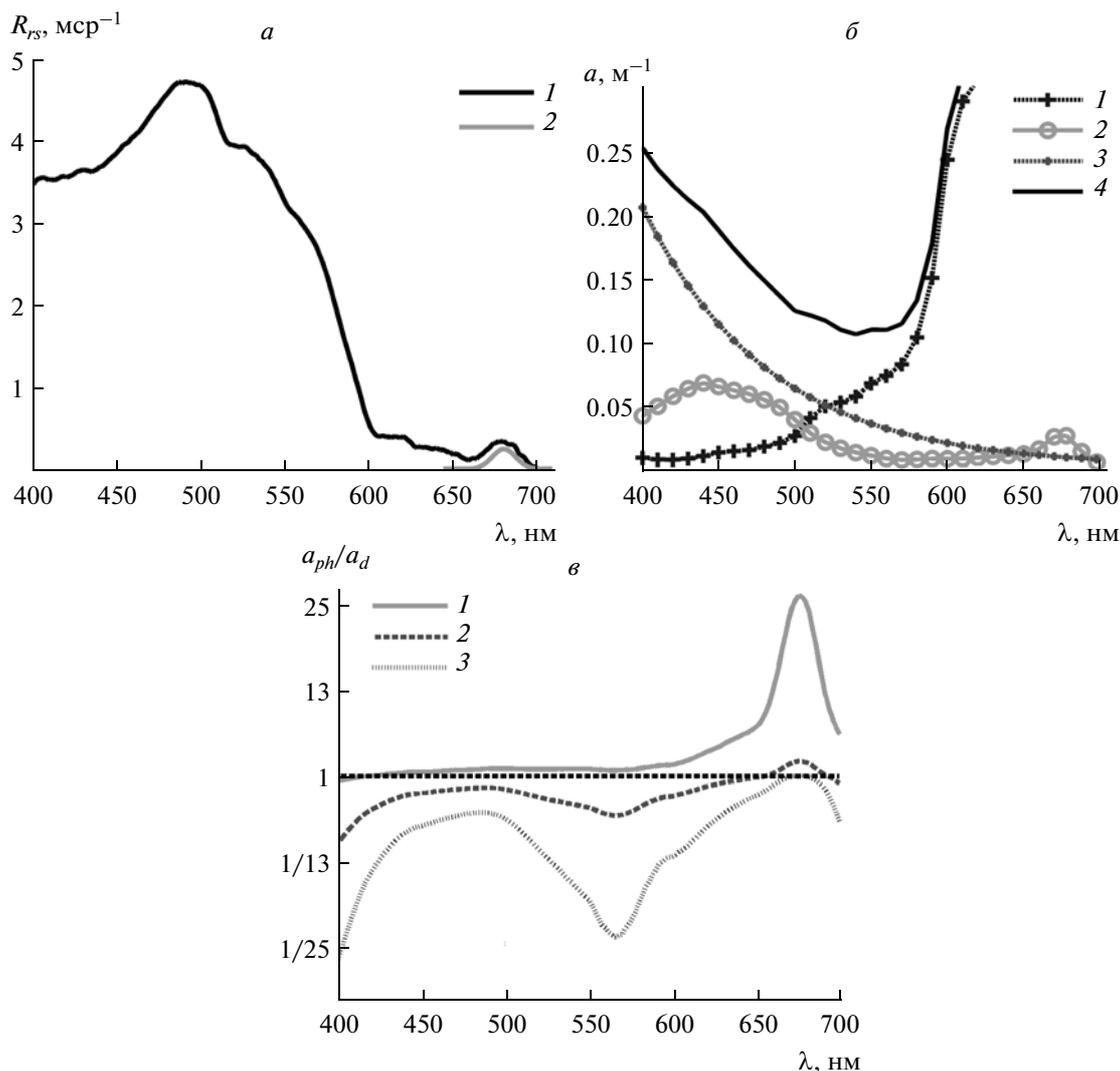
Использование судовых экспериментальных данных для решения поставленной задачи имеет ряд преимуществ. Во-первых, используемый ручной радиометр позволяет измерять спектр восходящего излучения моря в широком спектральном диапазоне с высоким разрешением, что дает возможность определять оптимальный рабочий спектральный диапазон разрабатываемых биооптических алгоритмов. Во-вторых, при радиометрических измерениях с борта судна отсутствует необходимость проведения атмосферной коррекции данных, что исключает неточности связанные с прохождением регистрируемого сигнала через атмосферу. В результате схема эксперимента выбрана так, чтобы оставшаяся неопределенность была связана только с изменениями соотношений между различными ОАК морской воды, или, другими словами, с выбором правильного биооптического алгоритма.

## ИЗВЕСТНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Значения показателей поглощения, рассеяния и интенсивности солнечно-индуцированной флуоресценции ОАК определяют спектр восходящего излучения моря, или цвет моря, который регистрируется дистанционно радиометрами. Универсальной характеристикой цвета морской поверхности является спектр коэффициента яркости моря, определяемый следующим образом:

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{L_w^{ex}(\lambda)}{E_d(\lambda)}, \quad (1)$$

где  $L_w^{ex}(\lambda)$  — яркость восходящего излучения моря в надир;  $E_d(\lambda)$  — солнечная освещенность, падающая на морскую поверхность. На рис. 1а представлен типичный измеренный спектр  $R_{rs}(\lambda)$ . Кривая 1 соответствует сигналу, рассеянному обратно из морской толщи, который выражается че-



**Рис. 1.** Спектральные параметры: *a* – спектр коэффициента яркости моря  $R_{rs}(\lambda)$  (кривая 1) и выделенный пик солнечно-индуцированной флуоресценции хлорофилла-*a* *FLH* (кривая 2); *б* – спектральное распределение показателей поглощения основных оптически-активных компонентов морской воды для концентрации хлорофилла-*a* 4 мкг/л и концентрации ОРОВ 2.9 мкг/л (1 – показатель поглощения чистой водой  $a_w(\lambda)$ ; 2 – показатель поглощения фитопланктоном  $a_{ph}(\lambda)$ ; 3 – показатель поглощения ОРОВ и детритами  $a_d(\lambda)$ ; 4 – суммарный показатель поглощения  $a(\lambda)$ ); *в* – спектральное распределение отношения показателей поглощения  $a_{ph}(\lambda)$  и  $a_d(\lambda)$  для различных концентраций хлорофилла-*a* (1 – 0.3 мкг/л; 2 – 3 мкг/л; 3 – 10 мкг/л).

рез первичные гидрооптические характеристики следующим образом:

$$R_{rs}(\lambda) = Qf \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)}, \quad (2)$$

где  $Q$  – фактор, зависящий от зенитного и азимутального углов, под которыми радиометр направлен на морскую поверхность;  $f$  – переменный параметр, зависящий от индикатрисы рассеяния морской воды и от пространственного распределения падающего света;  $a(\lambda)$  – суммарный показатель поглощения морской воды;  $b_b(\lambda)$  – суммарный показатель обратного рассеяния морской водой.

Кривая 2 (рис. 1а) определяется интенсивностью солнечно-индуцированной флуоресценции хлорофилла-*a*, которая зависит от концентрации фитопланктона в морской воде, его стратификации по глубине, видового состава и функционального состояния клеток фитопланктона, солнечной освещенности (Gower, King, 2007). Солнечно-индуцированная флуоресценция измеряется на спутниковых сканерах MERIS (в настоящее время не работает), MODIS, GOCI путем использования трех каналов: центрального – около 680 нм для оценки интенсивности сигнала, и двух каналов для учета фона в районе 660 и 750 нм (Behrenfeld et al., 2009).

На рис. 1б приведены спектры показателей поглощения света чистой водой ( $a_w$ , кривая 1) (Smith, Baker, 1981), фитопланктоном ( $a_{ph}$ , кривая 2) (Bricaud, 1995), и суммой ОРОВ и детритов ( $a_d$ , кривая 3) (Tassan et al., 1994; Lee et al., 1996), смоделированных для значения концентрации хлорофилла-*a* 4 мкг/л. Соответствующая концентрация ОРОВ составляет примерно 2.9 мкг/л (Kowalczuk et al., 2010). Спектральные распределения показателей поглощения ОРОВ и детритов в видимом диапазоне описываются ниспадающей экспоненциальной функцией, поэтому их сложно различить, и они обычно объединяются в один компонент. Детриты могут иметь местное биологическое происхождение, являясь продуктами разложения различных микроорганизмов, а в водах второго типа — поступать с органическими материалами с суши, из стоков рек и/или из апвеллингов.

Значения концентраций хлорофилла-*a* и ОРОВ во многом определяют, к какому оптическому типу относится морская вода, и в дальнейшем только их соотношения будут рассматриваться. На рис. 1в представлено отношение коэффициентов  $a_{ph}$  и  $a_d$  для разных концентраций хлорофилла-*a* (0.3, 3 и 10 мкг/л), откуда видно, какой из спектральных диапазонов более предпочтителен для оценки рассматриваемых ОАК.

В случае, если вклад фитопланктона в  $R_{rs}(\lambda)$  значимо превышает вклад ОРОВ, либо если отношение этих вкладов равно некоторому наиболее вероятному стабильному значению, то хорошо себя зарекомендовали эмпирические алгоритмы, основанные на экспериментально установленной функциональной зависимости между концентрацией ОАК  $C_{OAC}$  и коэффициентами яркости моря. Одним из наиболее распространенных видов эмпирических алгоритмов является следующее выражение:

$$C_{OAC} = 10^{\left( \sum_{i=0}^{i=n} k_i \left( \lg \left( R_{\lambda_2}^{\lambda_1} \right) \right)^i \right)} + k_{n+1}, \quad (3)$$

где  $C_{OAC}$  — концентрация рассматриваемой ОАК;  $n$  — степень полинома;  $k_i$  — коэффициенты полинома;  $R_{\lambda_2}^{\lambda_1}$  — индекс цвета моря, определяемый следующим образом:

$$R_{\lambda_2}^{\lambda_1} = \frac{R_{rs}(\lambda_1)}{R_{rs}(\lambda_2)}. \quad (4)$$

В зависимости от доступного для анализа массива данных степень полинома  $n$  подбирается таким образом, чтобы обеспечить достаточное качество аппроксимации.

Для выбора длины волны числителя  $R_{rs}(\lambda_1)$  необходимо использовать диапазон, наиболее сильно определяемый искомой оптически-активной

компонентой. Из рис. 1б, 1в видно, что в диапазоне 400–600 нм для хлорофилла-*a* это примерно 490 нм, а для ОРОВ — 400 или 570 нм. Кроме того, видно, что в районе 670 нм показатель поглощения хлорофилла-*a* превосходит показатель поглощения ОРОВ наиболее сильно, однако много большее поглощение водой на этой же длине волны не дает возможность корректно рассматривать восходящее излучение моря, формируемое первичными гидрооптическими свойствами.

Нормировочное значение  $R_{rs}(\lambda_2)$  принято выбирать так, чтобы влияние всех ОАК, помимо воды, было минимальным. Обычно используется значение из диапазона 550–560 нм, поскольку, во-первых, в данном диапазоне влияние хлорофилла-*a* и ОРОВ на формирование восходящего излучения моря ниже, чем в диапазоне 400–550 нм, а во-вторых, поглощение воды не так сильно скачивается, как в видимом диапазоне более 570 нм (рис. 1б). Исключением являются случаи, когда в водах присутствует пикопланктон, приводящий к дополнительному поглощению в диапазоне 550–560 нм (Суслин и др., 2008).

Если отношение между вкладами различных ОАК на длине волны  $\lambda_1$  соизмеримо и изменчиво, то эмпирический подход (3) не применим, так как  $R_{rs}(\lambda_1)$  в разной пропорции определяется обоими сигналами, что ведет к постоянной смене калибровочных коэффициентов.

Поскольку концентрация хлорофилла-*a* — основной параметр, определяющий изменчивость линии солнечно-индуцированной флуоресценции хлорофилла-*a* ( $FLH$  — Fluorescence Line Height), то еще одним подходом для оценки концентрации хлорофилла-*a* являются эмпирически установленные функциональные зависимости с  $FLH$  (Gower, King, 2007; Fiorani et al., 2006). Несомненный плюс такого подхода заключается в том, что влиянием ОРОВ на формирование восходящего излучения в области 680 нм можно пренебречь.

## ИССЛЕДУЕМЫЙ РЕГИОН

Исходя из поставленной задачи, районы исследований были подобраны таким образом, чтобы охватить максимально возможное число различных типов вод. Географическое положение измерений представлено на рис. 2. Это акватории Японского и Охотского морей, включающие в себя следующие типы вод: олиготрофные (банка Кашеварова, обозначена р1, залив Петра Великого), мезотрофные (залив Петра Великого), эвтрофные (открытые воды Японского и Охотского морей), подверженные речному стоку (эстуарии р. Амур и р. Раздольная, р2), антропогенному воздействию (Амурский залив, бухта Золотой Рог, р3).

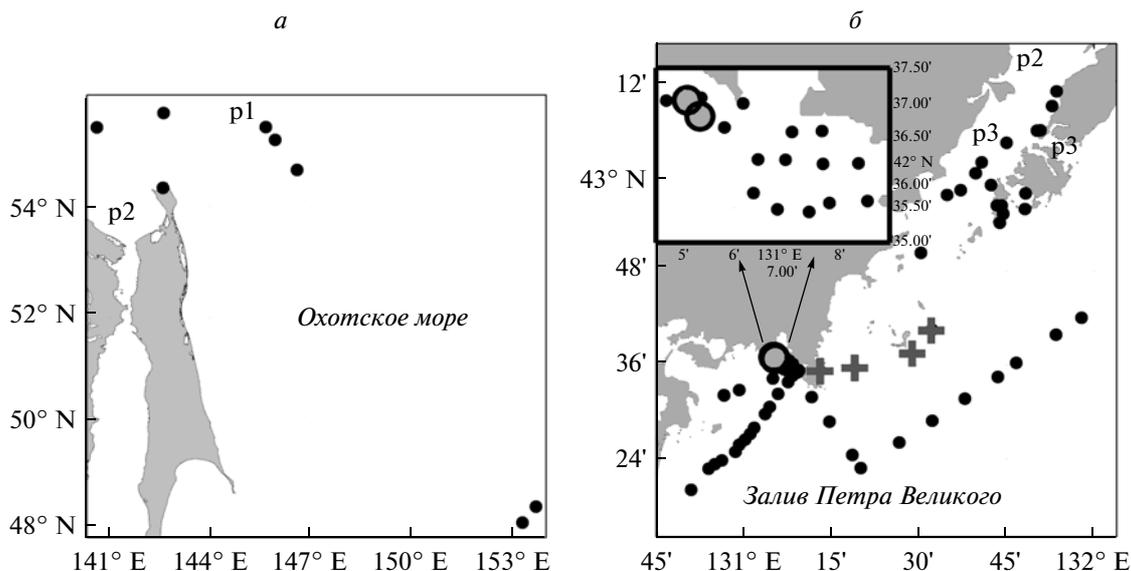


Рис. 2. Географическое положение синхронных дистанционных и контактных измерений в летне-осенний период 2009 и 2010 гг.

Данные районы содержат воды как первого, так и второго оптических типов. В водах залива Петра Великого измерения проводились в период май–сентябрь в 2009–2011 гг. на судах прибрежного хода “Малахит” и “Импульс”. В Охотском море данные получены в ходе морской экспедиции на парусном учебном судне “Надежда” в августе 2010 г. В обоих случаях измерения пришлись на период между весенним и осенним пиками цветения фитопланктона.

В заливе Петра Великого в период наблюдений типичные диапазоны концентраций хлорофилла-*a* составляют 1–2 мкг/л. В прибрежных зонах залива, в эстуариях рек, в вихрях и в зонах апвеллингов, концентрации могут достигать значений 5–10 мкг/л.

В Охотском море концентрации хлорофилла-*a* в открытой части составляют несколько десятков долей мкг/л. В эстуарии р. Амур, в апвеллингах на банках Кашеварова и Крузенштерна наблюдается практически круглогодичное цветение фитопланктона с максимальными концентрациями хлорофилла-*a* до 10–20 мкг/л.

## МЕТОДЫ И АППАРАТУРА

Для разработки биооптических алгоритмов необходим набор данных натуральных наблюдений, полученных эталонным контактным методом, который определяет концентрации оптически активных компонентов, и дистанционным методом, измеряющим вторичные гидрооптические величины.

В качестве эталонного инструмента был использован погружной гидрологический зонд Sea-

Bird SBE-19plus с калиброванными сертифицированными датчиками концентрации хлорофилла-*a* и ОРОВ – WetLabs, и со сферическим датчиком Licor фотосинтетически-активного излучения (*PAR*, Photosynthetically Available Radiation). Для дистанционных измерений с борта судна применялся ручной гиперспектральный радиометр ASD FieldSpec Hand Held. Все измерения были синхронизированы и проводились во время стоянки судна.

### Эталонные (контактные) измерения

Гидрологический зонд SeaBird SBE-19plus позволил измерить глубинные профили температуры, солености, давления, концентрации хлорофилла-*a* и ОРОВ, *PAR*. Разрешение по глубине для полученных профилей составило не более 0.25 м.

В используемом оборудовании концентрация хлорофилла-*a* и ОРОВ определялась на основе измерений интенсивности флуоресценции на длинах волн 695 и 460 нм при возбуждении излучением светодиодов на длинах волн 460 и 370 нм соответственно. Калибровка датчиков проведена фирмой-изготовителем в лабораторных условиях. Интенсивность флуоресценции хлорофилла-*a* сравнивалась с концентрацией экстрагированного хлорофилла-*a* в воде в диапазоне 0.03–75 мкг/л. Оценкой количественного содержания ОРОВ являлась концентрация раствора хинина сульфата дигидрата в диапазоне 0–250 млрд<sup>-1</sup>.

Также проведены натурные калибровочные измерения концентрации хлорофилла-*a* стандартным спектрофотометрическим методом. Соответствующий коэффициент корреляции равен

0.7 для 25 проанализированных проб с концентрацией хлорофилла-*a* в диапазоне 0.1–3 мкг/л. Аналогичные калибровочные измерения датчика WetLabs были выполнены в заливе Петра Великого (Звалинский и др., 2008), где значение коэффициента корреляции составило 0.95 в диапазоне 0.1–10 мкг/л.

Возможность проведения оперативных измерений по глубине являлась основной причиной, по которой используемый зонд был выбран в качестве эталонного инструмента. Это связано с тем, что излучение, регистрируемое пассивными оптическими дистанционными методами, формируется в нескольких первых метрах морской толщи. Таким образом, при разработке биооптических алгоритмов важно знать стратификацию исследуемых вод, чтобы оценить значения концентрации ОАК, которые должны определяться дистанционным зондированием (Gordon, Clark, 1980). С этой целью в качестве весовых коэффициентов использовались измерения *PAR*, которые являются мерой проникновения света в морскую толщу. Чтобы исключить влияние дна на формирование восходящего излучения, глубинные профили, где до дна доходило более 1% падающего на морскую поверхность *PAR*, в дальнейших исследованиях не использовались. В качестве эталонных значений концентрации хлорофилла-*a* и ОРОВ,  $C_{ow}$  и  $D_{ow}$  соответственно использовались следующие величины:

$$C_{ow} = \int_0^{z_{99}} C_{SBE}(z)w(z) dz / \int_0^{z_{99}} w(z) dz, \quad (5)$$

$$D_{ow} = \int_0^{z_{99}} D_{SBE}(z)w(z) dz / \int_0^{z_{99}} w(z) dz, \quad (6)$$

$$w(z) = PAR(z)^2. \quad (7)$$

Эти “оптически взвешенные” значения концентраций хлорофилла-*a* и ОРОВ являются оценками концентраций, определяющих сигнал, регистрируемый радиометром. Здесь  $w$  – оптический весовой коэффициент, учитывающий вклад ОАК в поток восходящего излучения моря;  $z$  – глубина;  $z_{99}$  – глубина, на которой *PAR* ослабевает на 99% (нижняя глубина фотического слоя);  $C$  – концентрация хлорофилла-*a*;  $D$  – концентрация ОРОВ; индекс *SBE* показывает, что измерения получены на гидрологическом зонде; индекс *ow* – усредненные данные с учетом  $w$ . Использование второй степени в формуле (7) связано с тем, что необходимо учесть прохождение света на глубину  $z$  и обратно. Общий вид уравнений (5) и (6) соот-

ветствует формуле расчета средневзвешенной величины. Использование *PAR*( $z$ ) в качестве весовой функции вне зависимости от длины волны, на которой проводятся дистанционные измерения, не внесло существенной ошибки, поскольку в используемом массиве данных наблюдается сильная линейная связь, близкая к единице между значениями концентраций ОАК, взвешенных с помощью профилей освещенности на разных длинах волн, полученных численным моделированием. Но поскольку для дальнейшего анализа намного удобнее использовать эталонные значения, рассчитанные единым способом, то в качестве весовой функции использован сигнал *PAR*( $z$ ).

### Дистанционные измерения

Используемый ручной радиометр позволял работать с борта судна в соответствии с протоколами NASA по методу 2 (Mueller, 2003). Спектральный диапазон измерений составлял 325–1075 нм с разрешением 1.5 нм. Угловая апертура используемого объектива спектрофотометра равнялась 10°. С помощью прибора измерялся спектр коэффициента яркости моря  $R_{rs}(\lambda)$ . Для получения каждого спектра проводилась серия некалиброванных измерений, состоящая из:

– 20–25 спектров яркости восходящего излучения от морской поверхности  $S_{yc}(\lambda, \theta, \phi, \theta_0)$ , время накопления 1–4 с на каждый спектр;

– 30 спектров яркости излучения неба  $S_{sky}(\lambda, \theta_{sky}, \phi_{sky}, \theta_0)$ , время накопления 100–500 мкс;

– 100 спектров яркости горизонтального рассеивателя  $S_g(\lambda, \theta_g, \phi_g, \theta_0, \phi_0)$  с известной двумерной функцией распределения отражательной способности  $R_g(\lambda, \theta_g, \phi_g, \theta_0, \phi_0)$ , время накопления 20–200 мкс.

Здесь  $\lambda$  – длина волны;  $\theta$  – зенитный угол, под которым прибор был направлен на морскую поверхность (–45°);  $\phi$  – азимут относительно солнца (от 90° до 180°);  $\theta_0$  – зенитный угол Солнца в момент измерения;  $\theta_{sky}$  – зенитный угол, под которым прибор направлен на небо (+45°);  $\theta_g$  – угол, под которым прибор направлен на рассеиватель.  $S_g$  использовалось для оценки нисходящей солнечной освещенности.

Чтобы устранить резкие выбросы, связанные с качкой и особенностями использования ручного радиометра, в дальнейших расчетах использовалось медианное значение из зарегистрированных спектров. Корректными измерениями считались те данные, где сигнал *PAR*, характеризующий солнечную освещенность, значимо не менялся во время всего эксперимента.

Исходя из определения (1),  $R_{rs}(\lambda)$  рассчитывался по формуле

$$R_{rs}(\lambda, \theta, \varphi, \theta_0) = \frac{S_{sfc}(\lambda, \theta, \varphi, \theta_0) - \rho S_{sky}(\lambda, \theta_{sky}, \varphi_{sky}, \theta_0)}{\pi S_g(\lambda, \theta_g, \varphi_g, \theta_0, \varphi_0)} \times R_g(\lambda, \theta_g, \varphi_g, \theta_0, \varphi_0), \quad (8)$$

где  $\rho$  – коэффициент отражения Френеля для границы раздела вода–атмосфера, зависящий от волнения морской поверхности и определяемый по методу из работы (Mobley, 1999). Ошибки, связанные с вычитанием отраженного от морской поверхности излучения неба, минимизировались путем вычитания  $R_{rs}(750)$  из всего полученного спектра. Зависимость от углов обзора радиометром и зенитного угла Солнца устранялась по методу, использованному в (Mueller, 2003), – путем приведения восходящей яркости моря к наблюдению в надир через корректирующие факторы, зависящие от скорости ветра, концентрации хлорофилла-*a*, зенитного угла Солнца и геометрии наблюдения радиометром.

Высота пика солнечно-индуцированной флуоресценции *FLH* оценивалась путем аппроксимации спектра  $R_{rs}(\lambda)$  суммой линейной регрессии и функции Гаусса в диапазоне 645–710 нм

$$R_{rs}(\lambda) = p_1\lambda + p_2 + FLH \exp\left(-(\lambda - \lambda_0)^2 / \Delta\lambda^2\right) + \varepsilon(\lambda), \quad (9)$$

$l = 645-710 \text{ нм,}$

где  $p_1, p_2$  – коэффициенты линейной регрессии;  $\lambda_0$  – положение пика, нм;  $\Delta\lambda$  – ширина пика на высоте 77.88% от максимума;  $\varepsilon(\lambda)$  – ошибка аппроксимации.

#### Сравнение данных дистанционных и контактных измерений

Для определения алгоритма, который наиболее эффективно использовать для разделения вкладов хлорофилла-*a* и ОРОВ, рассчитывается среднеквадратичное расстояние  $r$  между точками диаграммы рассеяния контактных измерений “ $C_{ow} - D_{ow}$ ” и диаграммы рассеяния дистанционных измерений “ $C_{rs} - D_{rs}$ ” для значений, нормированных на среднеквадратичное отклонение  $\sigma(C_{ow})$  и  $\sigma(D_{ow})$

$$r(C_{rs}, D_{rs}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \left( \frac{C_{owi} - C_{rsi}}{\sigma(C_{ow})} \right)^2 + \left( \frac{D_{owi} - D_{rsi}}{\sigma(D_{ow})} \right)^2 \right)}. \quad (10)$$

Здесь  $C$  и  $D$  – концентрации хлорофилла-*a* и ОРОВ, рассчитываемые по тестируемому биооп-

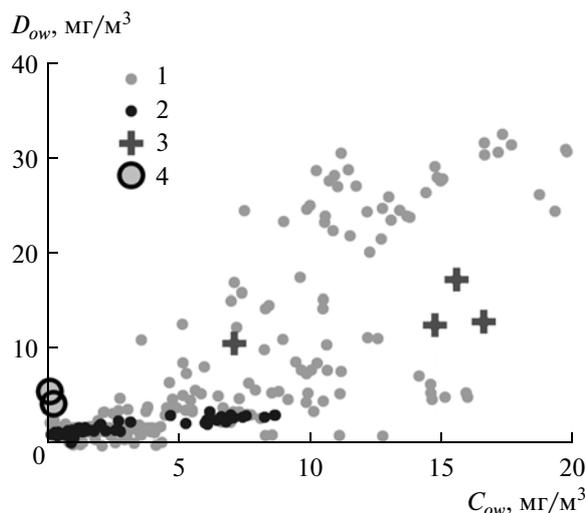


Рис. 3. Диаграмма рассеяния концентраций хлорофилла-*a* и ОРОВ, измеренных погружаемым гидрологическим зондом: 1 – измерения, полученные зондом, вне зависимости от дистанционных измерений; 2 – измерения, описываемые единой линейной зависимостью; 3 – измерения в водах с высокими концентрациями хлорофилла-*a* и относительно высоким содержанием ОРОВ; 4 – измерения в водах с высоким содержанием растворенных органических веществ.

тическим алгоритмам;  $N$  – количество используемых измерений.

В качестве тестируемых биооптических алгоритмов, основанных на поглощающих и рассеивающих свойствах морской воды, использовался набор уравнений следующего вида:

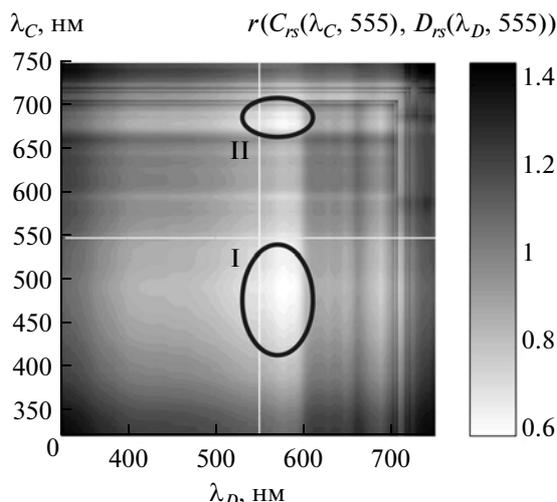
$$D_{rs}(\lambda_D, \lambda_n) = 10^{(d_0 + d_1 \lg(R_{\lambda_n}^{\lambda_D}))}, \quad (11)$$

$$C_{rs}(\lambda_C, \lambda_n) = 10^{(c_0 + c_1 \lg(R_{\lambda_n}^{\lambda_C}))}, \quad (12)$$

где  $\lambda_D$  и  $\lambda_C$  – длины волн для оценки концентрации ОРОВ и хлорофилла-*a* соответственно;  $\lambda_n$  – длина волны, используемая для нормировки при расчете индексов цвета моря. Для данных судового радиометра ASD выбрано значение  $\lambda_n = 555 \text{ нм}$ . Для известных спутниковых сканеров цвета использовался спектральный канал в диапазоне 550–560 нм в зависимости от конфигурации прибора.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Построена диаграмма рассеяния контактно определенных концентраций хлорофилла-*a*  $C_{ow}$  и ОРОВ  $D_{ow}$  (рис. 3). Точкам 1 соответствуют данные, полученные в исследуемых районах независимо от дистанционных измерений, а точкам 2, 3 и 4 – полученные одновременно с корректными дистанционными измерениями и использующиеся для дальнейшего анализа. Из распределения



**Рис. 4.** Распределение параметра  $r(C_{rs}(\lambda_C, 555), D_{rs}(\lambda_D, 555))$ . Спектральные области I и II – области минимальных значений  $r$ .

точек 1 видно, что соотношения между концентрациями хлорофилла-*a* и ОРОВ в исследуемых районах различны, а точки 2 и 3 являются данными из другого типа соотношений, а не инструментальными ошибками.

Основное количество точек, обозначенных маркером 2, описывается единой линейной зависимостью. Точки 3 и 4 лежат вне этой зависимости по причине смены соотношений между содержанием хлорофилла-*a* и ОРОВ, что может быть связано с выносом дополнительных источников ОРОВ, изменением состояния фитопланк-

тонных сообществ, либо с особыми условиями стратификации (Букин и др., 2005; Salyuk et al., 2010). Именно наличие точек 3 и 4 позволяет подобрать спектральные диапазоны, при которых наиболее точно разделяется вклад хлорофилла-*a* и ОРОВ в формирование коэффициентов яркости моря.

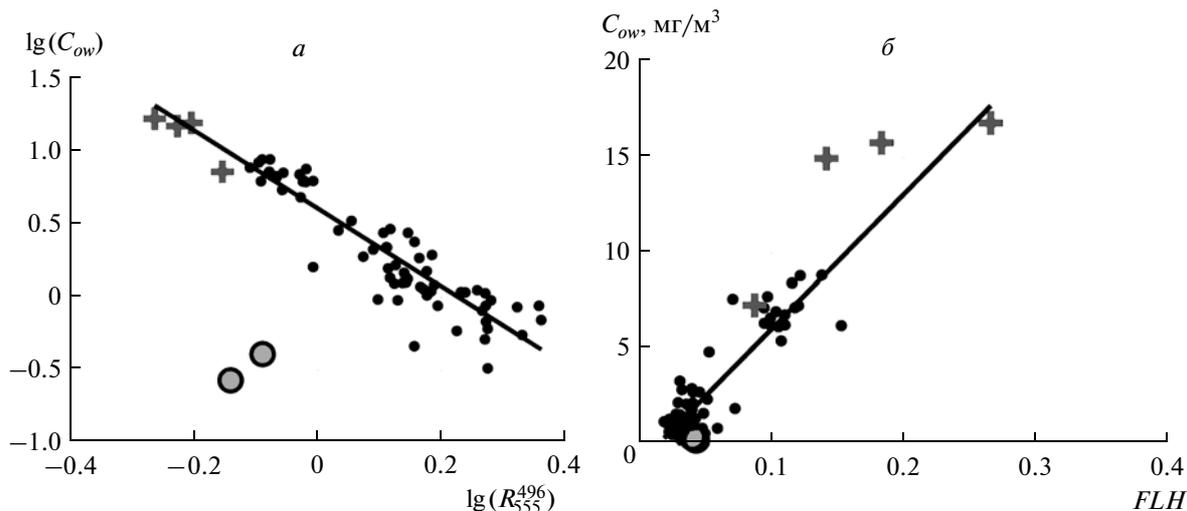
На рис. 4 представлено трехмерное распределение значений  $r(C_{rs}(\lambda_C, 555), D_{rs}(\lambda_D, 555))$ . Видно, что область с наименьшей ошибкой, которая обозначена I, находится в пределах  $\lambda_C = 430\text{--}530$  и  $\lambda_D = 530\text{--}590$  нм. Это хорошо соотносится со спектрами поглощения хлорофилла-*a* и ОРОВ, и их отношениями, представленными на рис. 1б, 1в. Кроме этого, хорошие результаты наблюдаются в области II:  $\lambda_C = 670\text{--}700$  и  $\lambda_D = 530\text{--}590$  нм, что связано с наличием линии флуоресценции хлорофилла-*a*.

По минимальному значению  $r$  выбрана наиболее оптимальная длина волны для оценки концентрации хлорофилла-*a* из сигналов, определяемых поглощающими и рассеивающими свойствами морской воды

$$C_{rs}(496.555) = 10^{(0.69 - 2.71 \lg(R_{555}^{496}))}, \quad (13)$$

$$R^2 = 0.86, \quad \text{RMSE} = 2.08 \text{ мкг/л}, \\ r(C_{rs}(496.555), D_{rs}(579.555)) = 0.59.$$

Соответствующая диаграмма рассеяния между  $\lg(C_{ow})$  и  $\lg(R_{555}^{496})$  представлена на рис. 5а. Видно, что при аппроксимации линейной регрессией точки 4 являются выбросами. Это связано с тем, что относительное содержание ОРОВ велико и



**Рис. 5.** Диаграммы рассеяния: а – между десятичным логарифмом концентрации хлорофилла-*a*  $C_{ow}$  и индекса цвета  $R_{555}^{496}$ ; б – между концентрацией хлорофилла-*a*  $C_{ow}$  и солнечно-индуцированной линией флуоресценции хлорофилла-*a*  $FLH$  (маркеры в соответствии с рис. 3).

происходит дополнительное поглощение на длине волны 490 нм, и, как следствие, смещение точек влево от линейной регрессии. Точки 3 описываются линией в пределах ошибки, что можно объяснить большими концентрациями хлорофилла-а на фоне которых вариации концентрации ОРОВ практически не сказываются на цвет морской поверхности на 496 нм.

Рассмотрим второй подход к эмпирическому определению концентрации хлорофилла-а, основанный на использовании линии флуоресценции FLH. На рис. 5б представлена диаграмма рассеяния  $C_{ow}$  и FLH.

Все точки на рис. 5б описываются линейной регрессией

$$C_{RS}^{FLH} = 70FLH - 1.1, \quad (14)$$

$$R^2 = 0.91, \quad RMSE = 1.12 \text{ мкг/л},$$

где  $C_{RS}^{FLH}$  — дистанционно определяемая концентрация хлорофилла-а из алгоритма, основанного на линии солнечно-индуцированной флуоресценции.

С целью подбора алгоритма для определения ОРОВ дополнительно анализировалось распределение величины  $r(C_{RS}^{FLH}, D_{RS}(\lambda_D, 555))$ , кривая 1 на рис. 6, и протестирован вид алгоритма ОС4 (O'Reilly, 2000), который является одним из стандартных глобальных алгоритмов для спутникового радиометра SeaWiFS и широко используется для других радиометров, кривая 2 на рис. 6. В алгоритме используется максимальное значение индекса цвета из трех спектральных каналов 443, 490 и 510 нм. Коэффициенты алгоритма ОС4 подбирались таким образом, чтобы минимизировать  $r(C_{RS}^{OC4}, D_{RS}(\lambda_D, 555))$  для каждой  $\lambda_D$ .

Видно, что алгоритм (14), основанный на использовании линии солнечно-индуцированной флуоресценции, приводит к наилучшим результатам. Во всех трех случаях применения различных подходов к оценке концентрации хлорофилла-а оптимальной длиной волны для расчета концентрации ОРОВ является 579 нм. Алгоритм для определения ОРОВ, полученный из распределения  $r(C_{RS}^{FLH}, D_{RS}(\lambda_D, 555))$ , имеет наименьшее значение  $r$  и записывается в следующем виде:

$$D_{RS}(579.555) = 10^{(1.13 + 5.46 \lg(R_{555}^{579}))},$$

$$R^2 = 0.9, \quad RMSE = 0.97 \text{ мкг/л},$$

$$r(C_{RS}^{FLH}, D_{RS}(759.555)) = 0.51. \quad (15)$$

Результат работы алгоритма (15) и результирующая диаграмма рассеяния между концентрациями хлорофилла-а и ОРОВ, восстановленная из данных дистанционного зондирования по наиболее

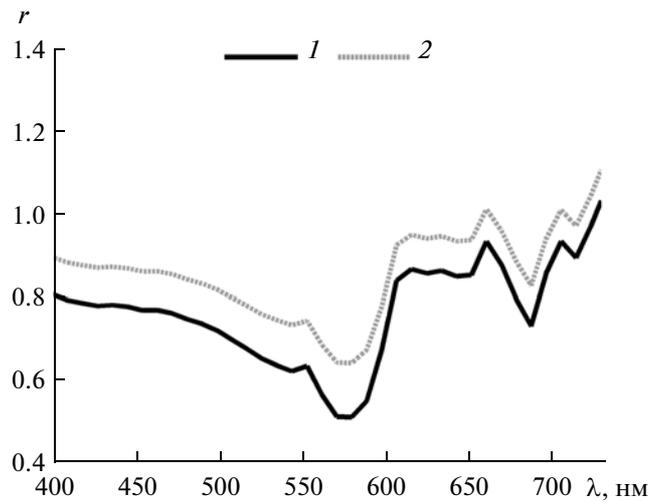


Рис. 6. Спектральное распределение параметров  $r(C_{RS}^{FLH}, D_{RS}(\lambda_D, 555))$  — кривая 1; и  $r(C_{RS}^{OC4}, D_{RS}(\lambda_D, 555))$  — кривая 2.

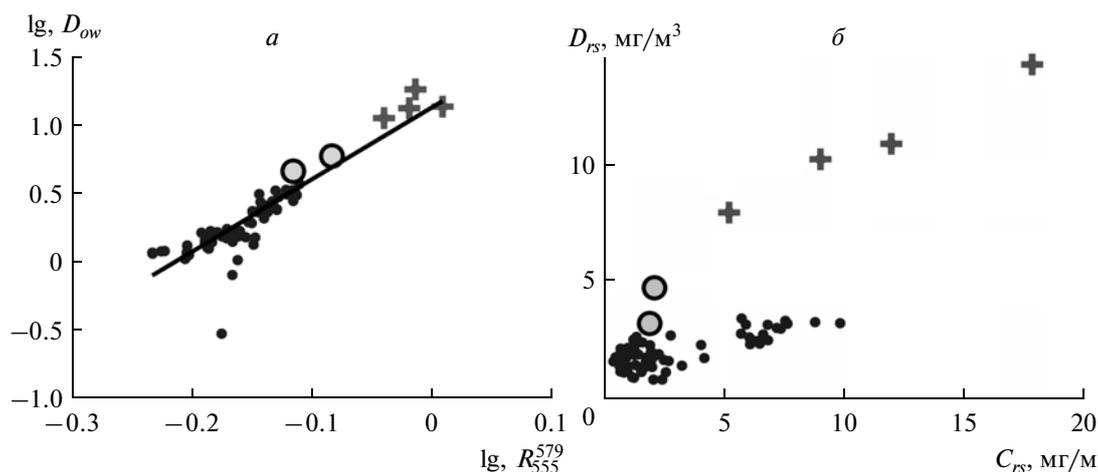
более оптимальным алгоритмам (14) и (15), представлены на рис. 7.

#### Определение оптимальных спектральных каналов для известных спутниковых радиометров

Полученные экспериментальные данные позволили оценить, какие спектральные каналы известных спутниковых сканеров цвета морской поверхности наиболее подходят для разделения вкладов хлорофилла-а и ОРОВ в диапазоне 400–600 нм (таблица). Каналы в районе 680 нм не рассматривались, поскольку не на всех сканерах они используются и/или не решена проблема с вычитанием подложки в этом диапазоне. По параметру  $r$  видно, что наборы спектральных каналов современных спутниковых радиометров обеспечивают примерно одинаковое разделение вкладов хлорофилла-а и ОРОВ в восходящее излучение моря. В худшую сторону выделяется сканер CZCS, при этом у него совпадают длины волн, на которых определяется концентрация хлорофилла-а и ОРОВ. Таким образом, для данного сканера при смене соотношений между ОАК морской воды не будет меняться диаграмма рассеяния концентрация хлорофилла-а – ОРОВ.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрим алгоритм (14) для дистанционного определения концентрации хлорофилла-а. Интенсивность солнечно-индуцированной флуоресценции хлорофилла-а дополнительно зависит от видового состава и состояния фотосинтетического аппарата клеток фитопланктона (Gower, King, 2007). Зависимость от интенсивности



**Рис. 7.** Диаграммы рассеяния: *a* – десятичного логарифма концентрации ОРОВ и индекса цвета  $R_{555}^{579}$ . *б* – дистанционно определенных концентраций хлорофилла-*a* и ОРОВ по формулам (14) и (15) (маркеры в соответствии с рис. 3).

падающей солнечной освещенности в основном учтена при нормировке на  $E_d(\lambda)$  в формуле (1). Однако наличие значимой линейной зависимости при использовании данных из районов с априори разным видовым составом и функциональным состоянием фитопланктона говорит о том, что концентрация хлорофилла-*a* является первоочередным фактором, определяющим интенсивность солнечно-индуцированной флуоресценции. Другие факторы вносят дополнительные вариации, но в используемом массиве данных, где соотношения между концентрацией хлорофилла-*a* и ОРОВ существенно различаются, использование линии *FLH* для определения концентрации хлорофилла-*a* дает меньшую ошибку,

чем стандартные эмпирические подходы, основанные на использовании сигнала  $R_{rs}(\lambda_1)$ , формируемого за счет поглощающих и рассеивающих свойств ОАК морской воды.

Линия *FLH* в настоящее время широко применяется на современных спутниковых сканерах цвета океана для оценки концентрации хлорофилла-*a*, однако существует ряд ограничений для ее использования. Зачастую набор спектральных каналов не позволяет корректно учесть подложку, на которой наблюдается сигнал флуоресценции. Например, на современных сканерах ОСМ-2 и VIIRS и на ряде планируемых к запуску сканерах отсутствуют спектральные каналы для учета подложки. Процедура вычитания фона на сканерах

Оптимальные спектральные каналы различных радиометров для наилучшего разделения вкладов хлорофилла-*a* и ОРОВ в восходящее излучение моря в спектральном диапазоне 400–600 нм

	ASD	CZCS	OCTS	SeaWiFS, GOCI	MODIS	MERIS
$\lambda_C$	496	520	490	490	488	490
$\lambda_D$	579	520	516	510	531	510
$\lambda_n$	555	550	565	555	555	560
$d_0$	1.1	0.35	0.43	0.41	0.51	0.46
$d_1$	6.79	-2.95	-1.87	-1.74	-9.9	-1.61
$c_0$	0.69	0.52	0.76	0.69	0.62	0.76
$c_1$	-2.7	-6.51	-2.29	-2.56	-2.52	-2.41
$R^2(D_{RS})$	0.92	0.93	0.94	0.93	0.95	0.94
$RMSE(D_{RS})$	0.97	2.1	1.99	2.13	1.84	2.09
$R^2(C_{RS})$	0.86	0.84	0.86	0.86	0.87	0.86
$RMSE(C_{RS})$	2.08	2.56	2.19	1.97	1.95	2.10
$r$	0.59	0.78	0.71	0.76	0.71	0.74

MODIS-Aqua и GOCI может привести к отрицательным значениям  $FLH$  (Behrenfeld et al., 2009). Кроме этого, сигнал флуоресценции, регистрируемый со спутника, достаточно слаб и формируется в нескольких первых метрах морской толщи. Это приводит к тому, что в настоящее время корректные измерения флуоресценции хлорофилла- $a$  со спутников возможны в районах с достаточно высокой концентрацией хлорофилла- $a$  в приповерхностном слое. Существование дополнительных факторов, влияющих на интенсивность флуоресценции и не связанных с изменением концентрации хлорофилла- $a$ , также вносит дополнительные ошибки. Таким образом, использование эмпирических алгоритмов для оценки концентрации хлорофилла- $a$ , основанных на линии  $FLH$ , целесообразно в водах с различными соотношениями между концентрациями хлорофилла- $a$  и ОРОВ.

Вид алгоритма (15) для дистанционного определения ОРОВ не совпадает с принципом, описанным для формулы (3), так как  $R_{rs}$  (555), по сравнению с  $R_{rs}$  (579), в большей степени определяется содержанием ОРОВ в морской воде, поэтому на рис. 6 наблюдается прямая линейная зависимость, а не обратная. Но с точки зрения статистики, использование  $R_{579}^{555}$  вместо  $R_{555}^{579}$  приводит к одинаковым значениям  $R^2$  и  $RMSE$  за счет подбора других калибровочных коэффициентов, поэтому вид алгоритма (15) остается без изменений.

Сигнал восходящего излучения моря в спектральном диапазоне 555–579 нм является значимым и по полученным экспериментальным данным составляет 30–50% от максимума, наблюдаемого обычно в диапазоне 450–500 нм. Отношение показателей поглощения ОРОВ и воды на длине волны 555 нм составляет 10–50%. Резкое увеличение поглощения воды по сравнению с поглощением хлорофилла- $a$  и ОРОВ начинается примерно с 580–585 нм (рис. 1б). Таким образом, использование спектрального диапазона 550–580 нм для оценки ОРОВ в используемом массиве данных оправдано, поскольку, во-первых, вариации сигнала восходящего излучения моря, определяемые изменением содержания ОРОВ, значимы, во-вторых, вклад ОРОВ в формирование цвета морской поверхности превышает вклад фитопланктона, а в-третьих, влияние поглощения воды находится на приемлемом уровне.

В работе (Ficek et al., 2011) для определения ОРОВ в озерах применялся индекс  $R_{655}^{570}$ . Однако для используемого массива данных такой подход показал худшие результаты. Возможно, это связано с тем, что на длине волны 655 нм сильно сказывается поглощение воды.

При применении результатов, представленных в таблице, необходимо иметь в виду следующее. Данные получены только в Японском и

Охотском морях в водах с существенно различными соотношениями между концентрациями хлорофилла- $a$  и ОРОВ. В районах исследований могут иметь место характерные особенности спектрального распределения показателей поглощения хлорофилла- $a$  и ОРОВ – т.е. результаты носят региональный характер. Именно этим можно объяснить, что оптимальной длиной волны для оценки ОРОВ, для всех проанализированных спутниковых радиометров, является спектральный канал в диапазоне 510–531 нм, который обычно используется для оценки содержания взвешенных веществ в морской воде. В большинстве случаев для оценки ОРОВ используются алгоритмы, основанные на применении коэффициента яркости на 412 нм. Однако эти алгоритмы разрабатываются без учета разделения вкладов хлорофилла- $a$  и ОРОВ в сигнал восходящего излучения. Кроме этого, использование канала 412 нм имеет существенный недостаток, связанный с максимальной ошибкой атмосферной коррекции данных, регистрируемых со спутника. Таким образом, в исследованных водах второго типа для оценки концентрации ОРОВ оптимально использовать спектральные каналы из диапазона 500–600 нм. Это может быть связано с региональными характеристиками ОАК морской воды в исследуемых водах второго типа и с особенностями атмосферной коррекции данных пассивного оптического зондирования.

Значения  $RMSE$ , представленные в таблице, достаточно высоки, что связано с тем, что используются данные из вод различного типа с различными соотношениями концентраций хлорофилла- $a$  – ОРОВ. При этом значения  $RMSE$  минимальны для приведенных длин волн. Поэтому основными результатами, которыми можно пользоваться из таблицы, являются значения длин волн, используемых для оценки концентрации хлорофилла- $a$  и ОРОВ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для наилучшего разделения вклада фитопланктона и ОРОВ в восходящее излучение моря в исследуемых районах при наблюдаемых диапазонах изменения концентрации хлорофилла- $a$  и ОРОВ необходимо использовать:

1) алгоритм (14) для оценки концентрации хлорофилла- $a$ , основанный на использовании интенсивности линии солнечно-индуцированной флуоресценции  $FLH$ ;

2) алгоритм (15) для определения концентрации ОРОВ;

3) спектральные каналы, представленные в таблице, – в случае применения архивных и современных данных спутниковых сканеров цвета морской поверхности.

Представленные подходы и полученные результаты востребованы, поскольку развиваются автоматические гиперспектральные дистанционные измерения водной поверхности со стационарных наземных и надводных станций, которые используются для атмосферной коррекции спутниковых наблюдений, а также разрабатываются новые поколения спутниковых сканеров цвета океана с большим количеством спектральных каналов.

Полученные результаты улучшают точность определения концентрации хлорофилла-*a* и ОРОВ в водах с непостоянным соотношением между этими двумя ОАК. Это в свою очередь дает возможность максимально точно подобрать начальные и граничные условия для модельного подхода, либо в ряде случаев избежать необходимости его использования. Корректное определение концентраций ОРОВ и хлорофилла-*a* позволит перейти к решению таких задач, как оценка состояния фитопланктонных сообществ и биопродуктивности морских вод.

Работа выполнена на оборудовании, уникальных стендах и установках Центра коллективного пользования “Лазерные методы исследований конденсированных сред, биологических объектов и мониторинга окружающей среды”, в рамках ФЦП “Научные и педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.” при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, а также при поддержке фонда Российских фундаментальных исследований (грант № 12-05-31148 и № 12-05-33072).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Букин О.А., Пермяков М.С., Зенкин О.Л., Хованец В.А., Пузанков К.А., Буров Д.В., Салюк П.А. Сравнительный анализ результатов измерения концентраций хлорофилла-*a*, полученных с использованием данных сканера цвета морской поверхности SeaWiFS и методом лазерной индуцированной флуоресценции в Охотском море // Исслед. Земли из космоса. 2003. № 4. С. 84–90.
- Букин О.А., Пермяков М.С., Салюк П.А., Майор А.Ю., Буров Д.В., Хованец В.А., Голик С.С., Подопригора Е.Л. Особенности формирования спектров лазерной индуцированной флуоресценции морской воды в период цветения водорослей в различных районах Мирового океана // Оптика атмосферы и океана. 2004. Т. 17. № 9. С. 742–749.
- Букин О.А., Салюк П.А., Майор А.Ю., Павлов А.Н. Исследование процессов воспроизводства органического вещества клетками фитопланктона методом лазерной индуцированной флуоресценции // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18. № 11. С. 976–983.
- Звалинский В.И., Тищенко П.П., Тищенко П.Я., Лобанов В.Б., Сагалаев С.Г., Шевцова М.Г., Волкова Т.И., Сергеев Т.И., Пронн Л.Н. Результаты съемки гидрохимических и продукционных параметров на акватории Амурского залива в период паводка реки Раздольной в августе 2005 года // Современное состояние и тенденции изменения природной среды залива Петра Великого Японского моря. М.: ГЕОС, 2008. С. 199–229.
- Кондратьев К.Я. Аэрозоль и климат: некоторые результаты и перспективы дистанционного зондирования. 2. Тропосферный аэрозоль // Экол. химия. 1998. Т. 7. № 3. С. 145–163.
- Суслин В.В., Чурилова Т.Я., Сосик Х.М. Региональный алгоритм расчета концентрации хлорофилла-*a* в Черном море по спутниковым данным // Морск. экол. журн. 2008. Т. 7. № 2. С. 24–42.
- Behrenfeld M.J., Westberry T.K., Boss E.S., O'Malley R.T., Siegel D.A., Wiggert J.D., Franz B.A., McClain C.R., Feldman G.C., Doney S.C., Moore J.K., Dall'Olmo G., Milliman A.J., Lima I., Mahowald N. Satellite-detected fluorescence reveals global physiology of ocean phytoplankton // Biogeosciences. 2009. V. 6. № 5. P. 779–794.
- Bricaud A., Babin M., Morel A., Claustre H. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization // J. Geophys. Res. 1995. V. 100. № C7. P. 1321–1332.
- Bukin O., Salyuk P., Pavlov A., Stepanchik I., Golik I. Performance of satellite regional bio-optical algorithms depending on relationships between chlorophyll-*a* and dissolved organic matter concentrations // Proc. SPIE. 2010. V. 7857. P. 78570G-1–78570G-8.
- Burenkov V.I., Kopelevich O.V., Shebertsov S.V., Vedernikov V.I. Sea-truth measurements of ocean colour: Validation of the SeaWiFS satellite scanner data // Oceanology. 2000. V. 40. № 3. P. 329–334.
- Fiorani L., Okladnikov I.G., Palucci A. First algorithm for chlorophyll-*a* retrieval from MODIS-Terra imagery of Sun-induced fluorescence in the Southern Ocean // Int. J. Rem. Sens. 2006. V. 27. P. 3615–3622.
- Gordon H.R., Clark D.K. Remote sensing optical properties of a stratified ocean: an improved interpretation // App. Optics. 1980. V. 19. № 20. P. 3428–3430.
- Gower J., King S. Validation of chlorophyll fluorescence derived from MERIS on the west coast of Canada // Int. J. Rem. Sens. 2007. V. 28. № 3–4. P. 625–635.
- Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Ershova S.V., Shebertsov S.V., Evdoshenko M.A. Application of SeaWiFS data for studying variability of bio-optical characteristics in the Barents, Black and Caspian seas // Deep-Sea Res. II. 2004. V. 51. P. 1063–1091.
- Kowalczyk P., Zablocka M., Sagan S., Kulinski K. Fluorescence measured in situ as a proxy of CDOM absorption and DOC concentration in the Baltic Sea // Oceanol. 2010. V. 52. № 3. P. 431–471.
- Lee Z.P., Carder K.L., Peacock T.G., Davis C.O., Mueller J.I. Method to derive ocean absorption coefficients from remote-sensing reflectance // Appl. Optics. 1996. V. 35. № 3. P. 453–462.
- Morel A., Prieur L. Analysis of variations in ocean color // Limnol. Oceanogr. 1977. V. 22. № 4. P. 709–722.
- Mobley C.D. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements // Appl. Opt. 1999. V. 38. № 36. P. 7442–7455.
- Mueller J.L. et al. Ocean optics protocols for satellite ocean color Sensor validation // Radiometric Measur. and Data Analysis Protocols. 2003. Rev. 4. V. 4. 78 p.

*O'Reilly J.E. et al.* SeaWiFS postlaunch calibration and validation analysis, Part 3 // NASA Technical Memorandum 2000-206892 / Eds. S.B. Hooker, E.R. Firestone. NASA Goddard Space Flight Center, 2000. V. 11. 49 p.

*Smith R.C., Baker K.S.* Optical properties of the clearest natural waters // Appl. Optics. 1981. V. 20. № 2. P. 177–184.

*Salyuk P.A., Bukin O.A., Pavlov A.N., Mayor A.Yu., Shmirko K.A., Akmaykin D.A., Krikun V.A.* Optical properties of Peter the Great Bay waters compared with satellite ocean co-

lour data // Int. J. Rem. Sens. 2010. V. 31. № 17–18. P. 4651–4664.

Remote sensing of ocean colour in coastal, and other optically-complex waters / Ed. S. Sathyendranat // Rep. Int. Ocean-Colour Coordinating Group. 2000. № 3. Dartmouth, Canada, 2000. 140 p.

*Tassan S.* Local algorithm using SeaWiFS data for retrieval phytoplankton, pigments, suspended sediment, and yellow substance in coastal waters // Appl. Optics. 1994. V. 33. № 12. P. 2369–2378.

## Development of Empirical Algorithms for Chlorophyll-a and Colored Dissolved Organic Matter Concentrations Estimation from Water Remote Sensed Data in the Far Eastern Seas

**P. A. Salyuk, I. E. Steepochkin, I. A. Golik, O. A. Bukin, A. N. Pavlov, A. I. Aleksanin**

*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok*

*Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoi, Vladivostok*

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

The methods of empirical estimation of chlorophyll-a and colored dissolved organic matter (CDOM) concentrations are considered in the case of various relationships between content of phytoplankton and CDOM in seawater. The investigations were carried out in the Japan Sea and in the Sea of Okhotsk in the different seawater cases. It was shown for obtained dataset that it is more efficient to separate phytoplankton and CDOM contributions to sea surface color when sun-induced chlorophyll-a fluorescence used for estimation of chlorophyll-a concentration and sea surface reflectance in 550–580 nm spectral region used for estimation of CDOM concentration. Also spectral bands of well-known satellite ocean scanners were selected for the best separation of CDOM and phytoplankton signals.

**Keywords:** phytoplankton, chlorophyll-a, dissolved organic matter, sea surface colour, fluorescence, biooptical algorithms, passive optical remote sensing

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ  
КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

АЛГОРИТМИЧЕСКИЙ ПОДХОД ПРИ СОСТАВЛЕНИИ ЦИФРОВЫХ  
ПОЧВЕННЫХ КАРТ НА ОСНОВЕ ЛАБОРАТОРНО-ПОЛЕВЫХ  
И СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

© 2013 г. Н. В. Гопп

*Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск*

*E-mail: natalia.gopp@gmail.com*

Поступила в редакцию 12.07.2013 г.

В работе рассматривается методика составления цифровых почвенных карт с использованием параметров растительности и рельефа, рассчитываемых по спутниковым снимкам (Landsat ETM+, SPOT 4) и матрицам высот поверхности Земли (SRTM90). На примере ключевого участка показана возможность эффективного использования материалов лабораторно-полевых и спутниковых данных для дешифрирования ареалов почв по косвенным признакам.

**Ключевые слова:** картографирование почв, дистанционное зондирование Земли, цифровая почвенная картография

DOI: 10.7868/S0205961413020036

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время использование алгоритмического подхода при обработке спутниковых и лабораторно-полевых данных является неотъемлемой составляющей при картографировании почв. Сложность объекта исследования и многообразие факторов, участвующих в формировании почв, требуют привлечения обширной информации, а их обработка традиционными методами нередко оказывается недостаточной и увеличивает сроки изготовления карт. Алгоритмы принятия решений для задач классификации разнородных пространственных данных позволяют на новом методологическом уровне создавать производные тематические карты, что является оптимальным решением при изучении географических особенностей распространения почв.

Основные трудности картографирования почвенного покрова по спутниковым снимкам связаны с “закрытостью” почв растительностью, высокой пространственно-временной изменчивостью физико-химических свойств почв и недостаточностью оперативных пространственных данных среднего и высокого разрешения. Рассмотрим возможности различных подходов к дешифрированию почв по космическим снимкам. Классические методики визуально-инструментального дешифрирования почв, не покрытых и полностью покрытых растительностью, принципиально различаются тем, что осуществляются они соответственно по прямым и косвенным признакам, ко-

торые в свою очередь подразделяются на оптические, геометрические, структурные и текстурные. При дешифрировании почв, не покрытых растительностью, в основном используются оптические признаки (тон и цвет изображения). Однако следует подчеркнуть, что тон изображения одного и того же объекта на разновременных спутниковых снимках может быть более или менее различным, так как на него влияет очень много факторов. Тон зависит от освещенности поверхности и ее структуры, влажности, от способности поверхности рассеивать свет, от цвета поверхности и т.д. (Почвенная съемка, 1959). Все перечисленные особенности сильно усложняют сравнение результатов исследований, полученных от разновременных спутниковых съемок, что ставит под сомнение вопрос о строгом соответствии выявляемых идентификационных признаков классификационным единицам почв. Во-первых, очень трудно установить момент, когда почвы находятся в одинаковых условиях съемки и одинаковом состоянии, во-вторых, идентификационные признаки некоторых почв могут быть не отличимы друг от друга. Скорее всего, здесь следует сказать, что снимки эффективны в качестве географической основы для проведения картографических почвенных работ и определения пространственных границ (контурное дешифрирование) по прямым и косвенным признакам, а не для установления классификационной принадлежности почв (идентификационное дешифрирование). Установление классификационной принадлежности почв, а также прямых

или косвенных идентификационных признаков в таком случае осуществляется в полевых подспутниковых исследованиях.

Проблемы дешифрирования почв, полностью покрытых растительностью, связаны с “закрытостью” объекта и, следовательно, с отсутствием прямых дешифровочных признаков. Для таких территорий ведущую роль при дешифрировании почвенного покрова играет ландшафтная индикация. Согласно С.В. Викторову, ландшафтная индикация – это выявление индикаторов, возможно более полный сбор сведений о способах их распознавания на местности и при дешифрировании, раскрытие характера связи между индикатором и индикатом и практическое использование индикаторов (Викторов, Чикишев, 1990). Применение методов ландшафтной индикации обосновано тем, что на специфику фотоизображения (плотность, текстура, цвет) оказывает влияние комплекс факторов, к которым, прежде всего, относятся геологическое строение, рельеф, почвы, растительность и т.д. (Викторов, Чикишев, 1990). Согласно сказанному выше, ландшафтная индикация предполагает использование разнородной пространственной информации о компонентах ландшафта и проведение сопряженной классификации. Поэтому в настоящее время очень важно создавать новые подходы к решению вопросов картографии почв, а разработка алгоритмов для обработки пространственной информации и математико-картографическое моделирование позволяют этот процесс сделать более эффективным.

В представляемой работе рассматривается методика картографирования почв, полностью покрытых растительностью, следовательно, дешифрирование границ почвенных контуров осуществляется по косвенным признакам с использованием методов ландшафтной индикации. Известно, что изменчивость факторов почвообразования (почвообразующие породы, растительность, климат, рельеф) во времени и пространстве обуславливает формирование разнообразных типов почв. Из всех факторов почвообразования, которые можно эффективно исследовать по спутниковым данным и использовать их параметры в качестве индикационных признаков почв, нужно выделить растительность и рельеф, являющиеся наиболее информативными, с одной стороны, а с другой стороны, доступными для дистанционных и подспутниковых исследований. В связи с этим цель настоящего исследования – разработка методики сопряженной обработки спутниковых и лабораторно-полевых данных для картографирования почв.

Сущность методики заключается в расчете и количественной оценке индикационных параметров растительности и рельефа по спутниковым данным и матрицам высот, установлении

статистических связей между химическими свойствами почв и индикационными параметрами, а также в выборе наиболее информативных признаков и составлении классификационных алгоритмов “дерево решений”. Эти алгоритмы позволяют в достаточно короткий срок создавать пространственно-распределенные тематические слои, с последующим объединением полученной пространственной информации в единую цифровую почвенную карту.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования послужили различные типы и подтипы почв из отдела альфегумусовых (дерново-подбур иллювиально железистый, подбур глееватый, подбур грубогумусированный, дерново-подбур глееватый) и железисто-метаморфических (ржавозем грубогумусированный), а также параметры растительности и рельефа Джулукульской котловины (Республика Алтай). Ключевой участок ограничен координатами  $50^{\circ}28'32.32''$ – $50^{\circ}26'23.03''$  с.ш.,  $89^{\circ}40'18.07''$ – $89^{\circ}43'41.50''$  в.д. По физико-географическому районированию, территория исследования относится к Юго-восточной Алтайской провинции, Джулукульский район (Атлас, 1978).

Изучаемыми параметрами рельефа являлись: крутизна склонов, площадь максимального сбора, горизонтальная кривизна, максимальная кривизна, освещенность. Для территории исследования характерен грядово-холмистый и гривисто-западинный рельеф. Расчет тематических карт морфометрических величин рельефа проводился по матрицам высот поверхности Земли SRTM90 (Shuttle Radar Topography Mission). Алгоритмы расчета морфометрических величин рельефа описаны в работе (Shary et al., 2002).

Изучаемыми параметрами растительности являлись спектрально-яркостные характеристики растительности, выявляемые по многозональным снимкам, и запасы надземной фитомассы, вычисляемые с использованием вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Анализ литературы показывает, что значения NDVI, определяемые как отношение яркостей в двух диапазонах снимка (красный и ИК), коррелируют с количеством биомассы растительности (Виноградов, 1984; Кашкин, Сухинин, 2001). Для решения этой задачи находятся взаимосвязи между рассчитанными по спутниковому снимку значениями NDVI и запасами надземной фитомассы растительных сообществ, полученными в полевых условиях.

На ключевом участке были описаны следующие растительные сообщества: осоково-разнотравно-злаковая травянистая тундра; кустарниково-шикшевая ерниковая тундра; кустарниковая ерниковая

тундра; разнотравно-моховая кустарниковая тундра; разнотравно-злаковая кобрезиевая тундра. Определение запасов надземной фитомассы проводилось на площадках  $0.25 \text{ м}^2$  ( $50 \times 50 \text{ см}$ ) методом укосов в четырехкратной повторности (Родин и др., 1968). При этом сроки определения запасов надземной фитомассы в полевых условиях были скоординированы с днем проведения космической съемки, и таким образом было соблюдено условие, заключающееся в одновременном получении информации о состоянии объекта на земле и из космоса. Алгоритм расчета запасов надземной фитомассы описан в работе (Гопп, 2009).

Полевое обследование и описание почв, растительности, рельефа проводилось на ключевых участках и маршрутах, предварительно выделенных на космическом снимке. Выделенные ключевые участки и маршруты наиболее полно охватывают имеющееся разнообразие почв, растительности, рельефа на территории проведения исследований. Основными критериями выбора участков на космическом снимке послужили следующие показатели: различные цветовые (спектральные) и текстурные характеристики объектов исследования и приуроченность к определенным элементам рельефа (возвышенности, депрессии, склоны различной экспозиции и градиента крутизны).

Почвенное картографирование проведено в М 1 : 100000. Территория исследования относится к четвертой категории сложности местности. В общем, заложено и описано пять полнопрофильных почвенных разрезов, 10 полюам и 49 прикопок, что соответствует требованиям почвенной инструкции (Общесоюзная инструкция..., 1973). Описание почв проводилось по новой классификации почв (Шишов и др., 2004).

Исследование физико-химических свойств почв осуществлялось по следующим общепринятым методикам: содержание углерода – методом мокрого сжигания по Тюрину, обменные катионы – по Шолленбергеру (Аринушкина, 1970). Механический состав почв определяли по методу Качинского (Практикум по почвоведению, 1986).

#### *Предварительная обработка данных дистанционного зондирования*

В работе были использованы снимки Landsat 7 ETM+ (разрешение 30 м) – для классификации типов растительных сообществ, SPOT 4 (разрешение 20 м) – для расчета запасов надземной фитомассы, матрица высот SRTM90 (разрешение 90 м) – для расчета морфометрических величин рельефа. Обработка и анализ результатов классификации проводились с помощью пакетов программ: GRASS GIS, ENVI, ГисЭко.

**Атмосферная коррекция.** Спутниковые снимки Landsat 7 ETM+ и SPOT 4 подвергались предва-

рительной атмосферной коррекции в модуле ACM (Atmospheric Correction Module), подмодуль FLAASH (программное обеспечение ENVI). Согласно исследованиям (Verote, Kotchenova, 2008), излучение в красном и ИК-каналах подвержено существенному влиянию атмосферы из-за присутствия различных аэрозолей и водяного пара, которые снижают качество снимков в результате поглощения и рассеивания излучения в атмосфере. Атмосферная коррекция проводится для повышения точности отраженного излучения. Результатом является пересчет измеренных значений к условиям абсолютно прозрачной атмосферы.

**Линейное растяжение по NDVI и расчет оптимальных каналов методом OIF (Optimum Index Factor).** Предложенный метод необходим для снижения признаков пространства с целью улучшения качества классификации спутниковых снимков. Сужение пространства признаков путем отсека непокрываемых растительностью территорий по индексу NDVI и последующее линейное растяжение на весь допустимый диапазон значений яркости позволяют добиться лучших результатов при классификации типов растительности с близкими спектрально-яркостными характеристиками.

Процедура обработки изображения начинается с пороговой сегментации снимка по нормализованному вегетационному индексу

$$\text{NDVI} = \frac{I_{ir} - I_r}{I_{ir} + I_r},$$

где  $I_r$ ,  $I_{ir}$  – значения сигналов, регистрируемые в каналах 3 и 4 соответственно.

Для более наглядного представления гистограммы значения вегетационного индекса преобразовываются к интервалу [0, 255]. Пороговые величины для отсека непокрываемых растительностью территорий (водная поверхность, горные породы, постройки т.п.) определяются пользователем в диалоговом режиме на основе визуального анализа гистограммы значений NDVI. Затем производится линейное растяжение динамических диапазонов значений спектральных признаков на весь допустимый диапазон [0, 255] (Гопп и др., 2007).

После сегментации для всех возможных наборов признаков вычисляется значение OIF (Optimum Index Factor)

$$\text{OIF}(S) = \frac{\sum_{i \in S} \sigma(i)}{\sum_{i \in S} \left( \sum_{j \in S, j > i} |r(i, j)| \right)},$$

где  $S$  – набор каналов;  $\sigma(i)$  – среднеквадратичное отклонение значений спектральных яркостей для  $i$ -го канала;  $r(i, j)$  – коэффициент корреляции значений спектральных яркостей между  $i$ -м и  $j$ -м каналами.

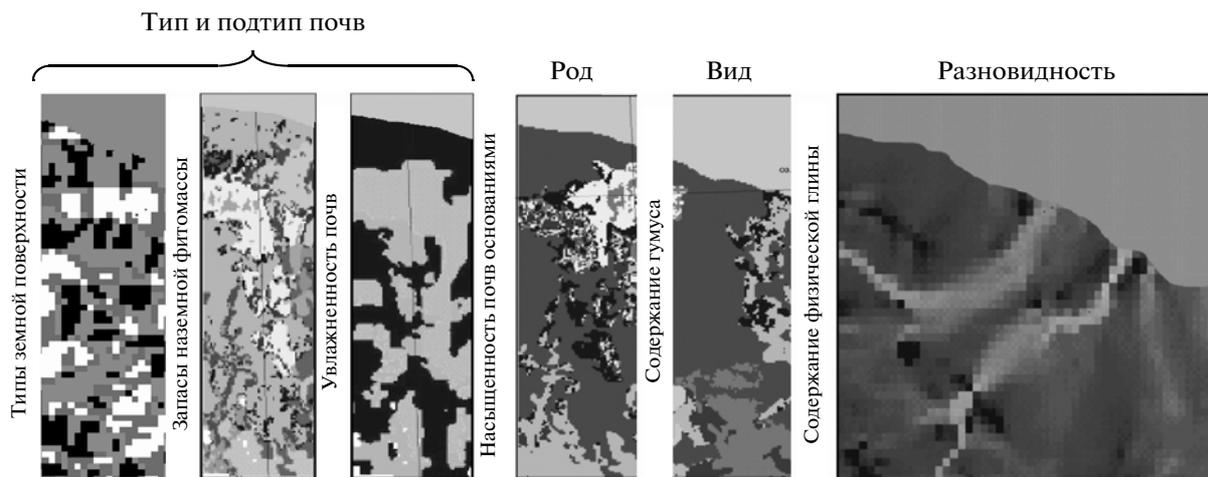


Рис. 1. Тематические слои, используемые в алгоритме (растровое представление данных).

Этот метод был предложен (Chavez et al., 1984) и базируется на алгоритме, который производит поиск комбинации, состоящей из трех каналов, которые между собой имеют наименьшую корреляцию, т.е. максимально не коррелированы, что говорит о высокой информативности этих каналов при последующем проведении классификации снимка. Расчет OIF проводился в программе “GRASS 6.0.0” командной строкой “i.oif” между набором каналов 1, 2, 3, 4, 5 и 7, исключая тепловой ИК-канал 6 и панхроматический канал 8. Затем определяются наборы признаков с наибольшими значениями OIF. Среди них, на основе анализа спектральных откликов растительности, определяется набор признаков, наиболее подходящий для решения конкретной задачи. Таким образом, находятся слабокоррелированные и информативные признаки, которые используются для автоматизированной классификации растительности на снимке с использованием непараметрического алгоритма ССА (Combined Clusterization Algorithm) (Пестунов и др., 2006; Гопп и др., 2007). Обучающая выборка для выделения границ типов растительности на снимке формировалась на основе географически привязанных данных полевых исследований растительности.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выявление максимально возможного количества индикационных признаков почв, отображаемых на обработанных многозональных снимках и матрицах высот, а также разработка алгоритмов для сопряженной классификации тематических слоев позволяют смоделировать пространственную изменчивость почв на различных таксономических уровнях (тип, подтип, род, вид, разновидность). При этом использование растровой моде-

ли данных обеспечивает быструю и эффективную обработку тематических слоев.

Ключевым моментом методики является создание серии тематических карт с использованием различных данных (наземных, аналитических, спутниковых). Среди рассчитанных тематических карт выявлены наиболее значимые косвенные индикаторы границ почвенных контуров на уровне типа и подтипа почв, к которым относятся: запасы наземной фитомассы, основные типы земной поверхности (холмы, выпуклые склоны, вогнутые склоны, депрессии) и увлажненность (рис. 1). Установлено, что эти признаки могут использоваться только для выявления пространственных границ и не позволяют идентифицировать классификационную принадлежность почв, так как они строго не приурочены к тем или иным разновидностям почв и могут, в свою очередь, встречаться на других территориях, но уже с другими почвами. Классификационную принадлежность почв устанавливают в полевых условиях.

### Слой “Типы земной поверхности”

Расчет карты основных типов земной поверхности (рис. 2) проводился в программе ГисЭко (Shary, 2006) по матрице высот SRTM 90.

Известно, что параметры рельефа влияют на свойства почв и растительности опосредованно, через регулирование факторов среды. В верхних ярусах возвышенностей преобладает снос продуктов выветривания. В нижних ярусах наблюдается аккумуляция материала, принесенного сверху. Для Джулукульской котловины максимальная контрастность процессов сноса и аккумуляции, как функции от действия сил гравитации, обусловливается грядово-холмистым и гривисто-западным рельефом. По мере удаления от областей сноса (холмы, средневыпуклые седловины)

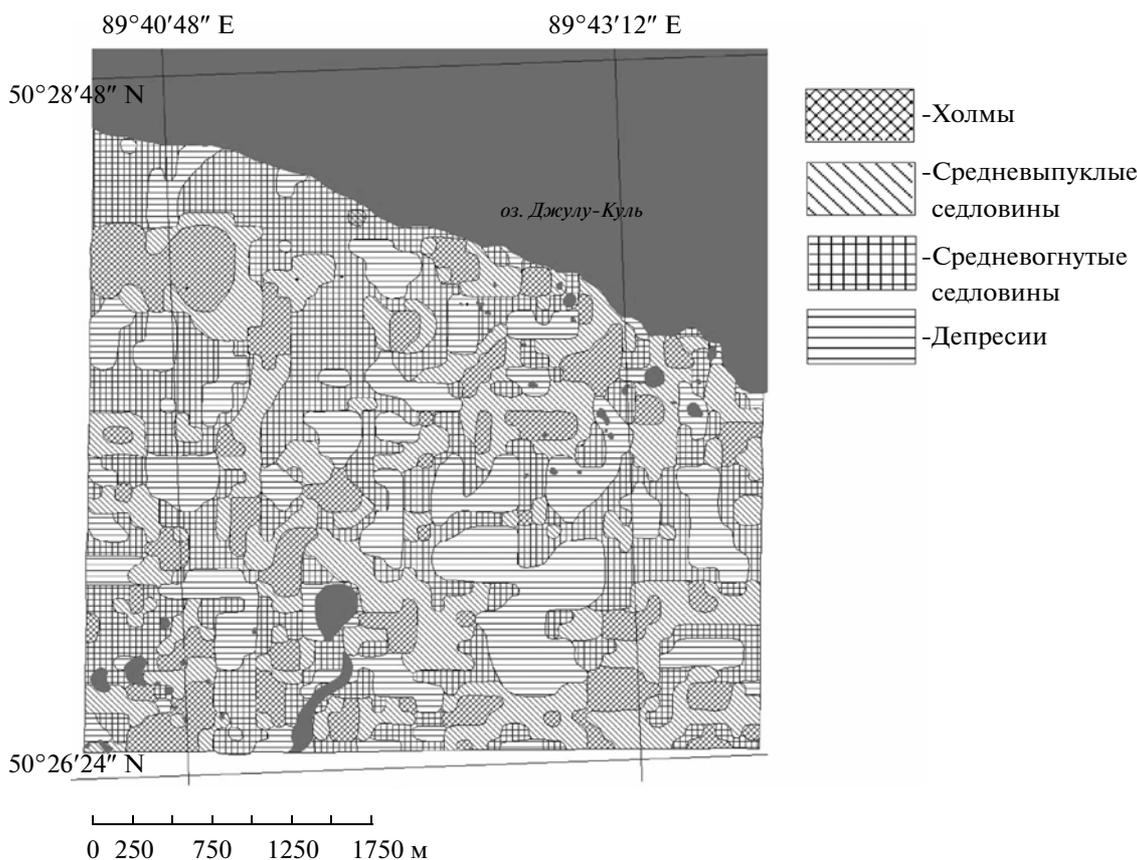


Рис. 2. Карта-схема основных типов земной поверхности.

и приближения к зонам аккумуляции (депрессии, средневогнутые седловины) наблюдается изменение физико-химических параметров почв, при совокупном воздействии грунтовых вод в понижениях изменяется соответственно и видовой состав растений – на мезофильные и гигрофильные виды. В целом для многих параметров почв на изучаемой территории характерна тенденция к изменению показателей в сторону увеличения по мере удаления от областей сноса и приближения к областям аккумуляции (депрессии).

#### Слой “Запасы надземной фитомассы”

Известно, что значительная роль в почвообразовании принадлежит растительности, так как

она является основным поставщиком органических остатков, которые подвергаются последующей минерализации и трансформации в гумусовые вещества почв.

Расчет карты запасов надземной фитомассы проводился по снимку SPOT 4. Для различных растительных сообществ установлены коэффициенты корреляции между значениями запасов надземной фитомассы и вычисленными значениями NDVI по снимку SPOT 4 (табл. 1). Для моделирования пространственной неоднородности запасов надземной фитомассы произведены расчеты уравнений регрессий (табл. 1) и составлен алгоритм (рис. 3), позволяющий автоматизированно построить карту (рис. 4). Также запасы надземной фитомассы используются в качестве крите-

Таблица 1. Зависимость запасов надземной фитомассы от NDVI

Тип растительного сообщества	Коэффициент детерминации	Уравнение регрессии
Осоково-разнотравно-злаковая травянистая тундра	0.95	$y = 13.48x + 9.48$
Кустарниково-шикшевая ерниковая тундра	0.98	$y = 50.85x + 85.01$
Кустарниковая ерниковая тундра	0.86	$y = 106.3x + 161.24$
Разнотравно-моховая кустарниковая тундра	0.94	$y = 42.28x + 99.86$
Разнотравно-злаковая кобрезиевая тундра	0.92	$y = 28.57x + 6.61$

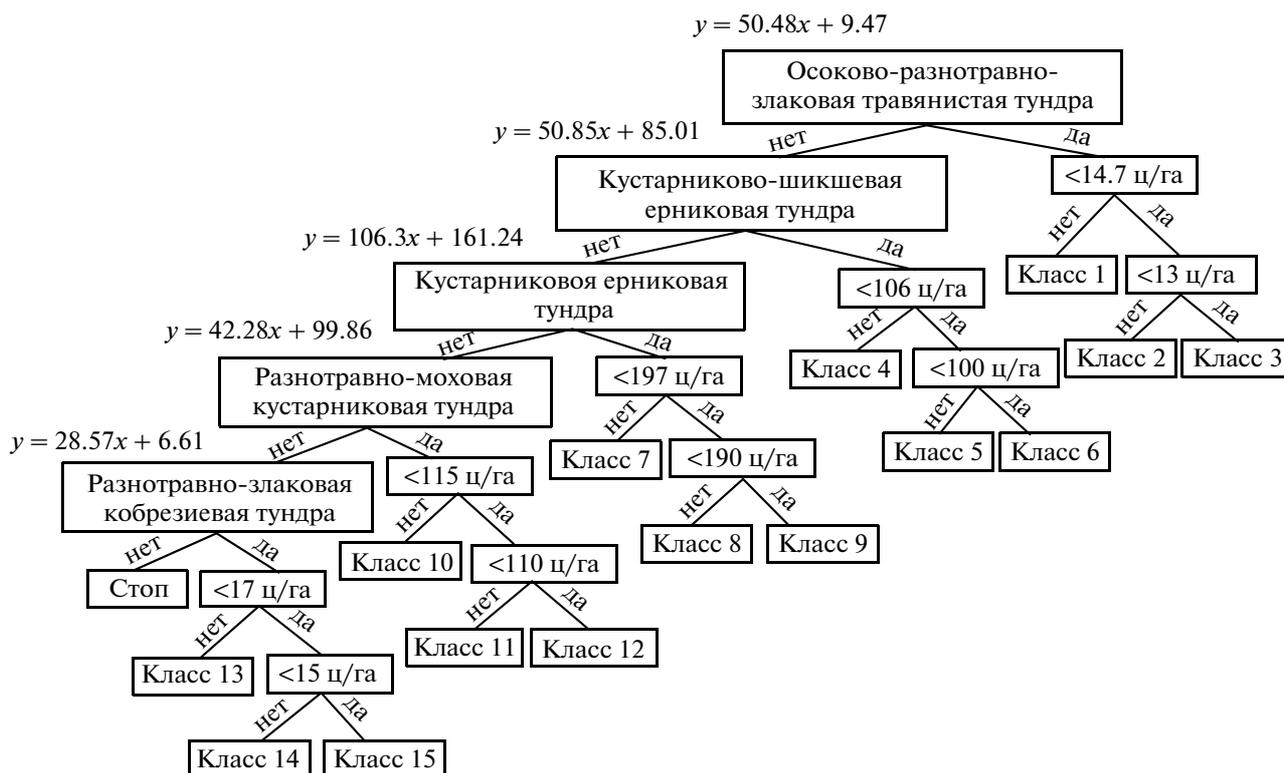


Рис. 3. Схема алгоритма “дерево решений”.

рия оценки некоторых почвенных свойств, где для каждого растительного сообщества установлена прямая корреляция с содержанием органического углерода и степенью насыщенности почвенного поглощающего комплекса основаниями (табл. 2 и 3).

*Слой “Увлажненность почв”*

В связи с тем что растительность не всегда является индикатором тех или иных почв, произведена трансформация ее цифровой карты в карту режима увлажнения согласно шкалам увлажнения Л.Г. Раменского (Раменский, 1938). Ступени увлажнения легко читаются по изменению растительности в порядке любого экологического ряда. К выявленным экологическим группам присваивается количественный показатель (степень эко-

логического ряда), служащий в дальнейшем как косвенный диагностический признак водного режима почв. По приспособленности растительных сообществ к водному режиму почв на изучаемом ключевом участке установлены три градации: 48 – класс влажно-степного и сухо-лугового увлажнения; 57 – класс влажно-лугового увлажнения; 67 – класс сыро-лугового увлажнения (рис. 5, 6). Поскольку, в основном, перераспределение влаги в почвах происходит благодаря рельефу, то в алгоритм были добавлены данные о типах земной поверхности, которые позволяют сделать более точный прогноз.

*Слой “Насыщенность почв основаниями”*

Род почв, определяемый в изучаемых почвах по степени насыщенности почвенного поглощаю-

Таблица 2. Зависимость степени насыщенности почв основаниями от запасов фитомассы

Тип растительного сообщества	Коэффициент детерминации	Уравнение регрессии
Осоково-разнотравно-злаковая травянистая тундра	0.7	$y = 32.38x - 425.64$
Кустарниково-шикшевая ерниковая тундра	0.73	$y = 2.17x - 189.82$
Кустарниковая ерниковая тундра	0.77	$y = 0.13x + 49.34$
Разнотравно-моховая кустарниковая тундра	0.94	$y = 0.36x + 32.47$
Разнотравно-злаковая кобрезиевая тундра	0.77	$y = 0.99x + 18.35$

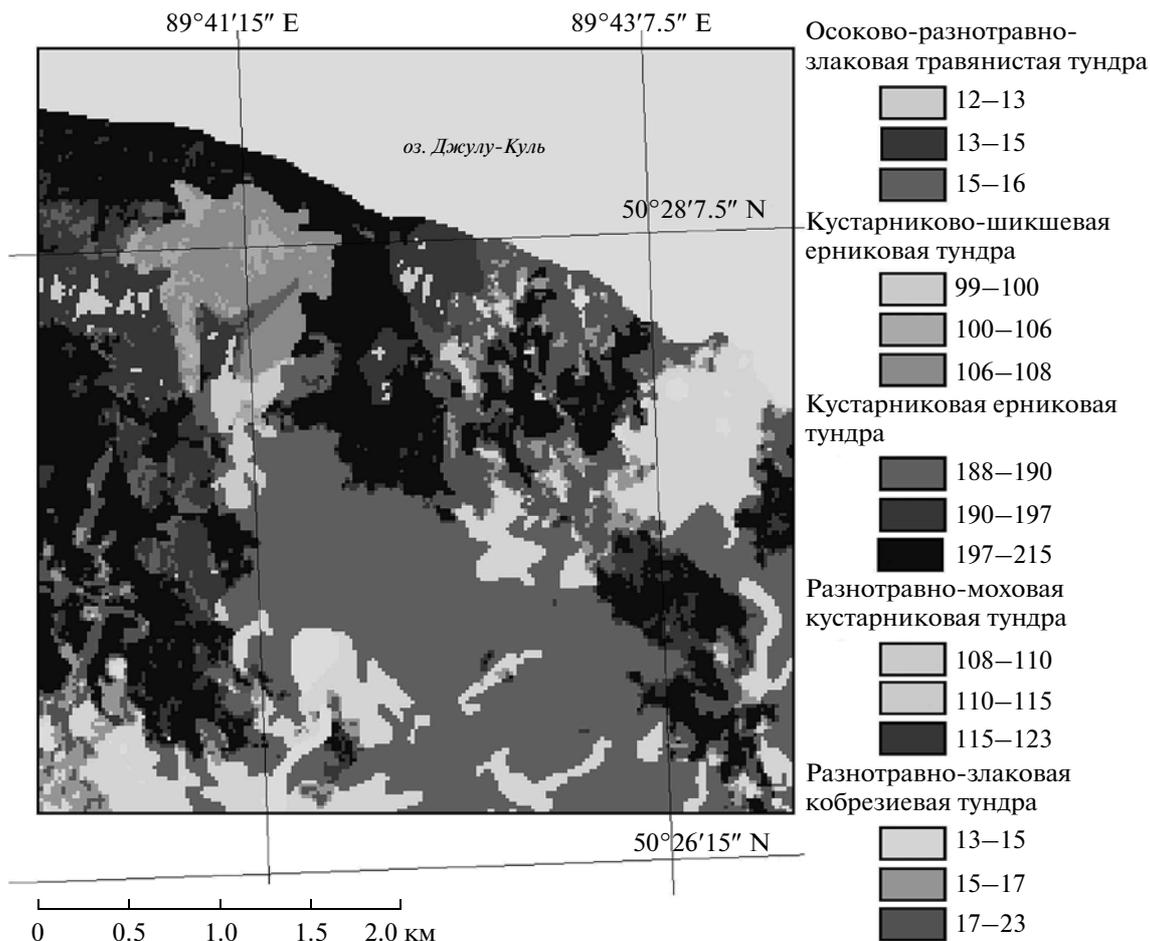


Рис. 4. Запасы надземной фитомассы, ц/га.

щего комплекса основаниями, коррелирует с запасами надземной фитомассы растительных сообществ (табл. 2). Для моделирования пространственной неоднородности свойств почв по степени насыщенности основаниями (определяет род почв) произведены расчеты уравнений регрессий (табл. 2) и составлен алгоритм (рис. 7), позволяющий автоматизированно построить карту степени насыщенности почв основаниями (рис. 8). Таким образом, в результате проведенных расчетов установлено, что предел колебания степени

насыщенности почвенного поглощающего комплекса основаниями на изучаемой территории составляет 30–80%, следовательно, почвенный поглощающий комплекс почв является ненасыщенным.

#### Слой "Содержание гумуса"

Вид почв, определяемый в изучаемых почвах по содержанию гумуса, коррелирует с запасами надземной фитомассы растительных сообществ

Таблица 3. Зависимость содержания гумуса от запасов надземной фитомассы

Тип растительного сообщества	Коэффициент детерминации	Уравнение регрессии
Осоково-разнотравно-злаковая травянистая тундра	0.92	$y = 2.59x - 32.26$
Кустарниково-шикшевая ерниковая тундра	0.95	$y = 0.21x - 13.6$
Кустарниковая ерниковая тундра	0.92	$y = 0.009x + 7.45$
Разнотравно-моховая кустарниковая тундра	0.88	$y = 0.026x + 6.26$
Разнотравно-злаковая кобрезиевая тундра	0.85	$y = 0.11x + 4.06$



Рис. 5. Алгоритм “дерево решений” для составления карты типов растительных сообществ по приспособленности к водному режиму почв.

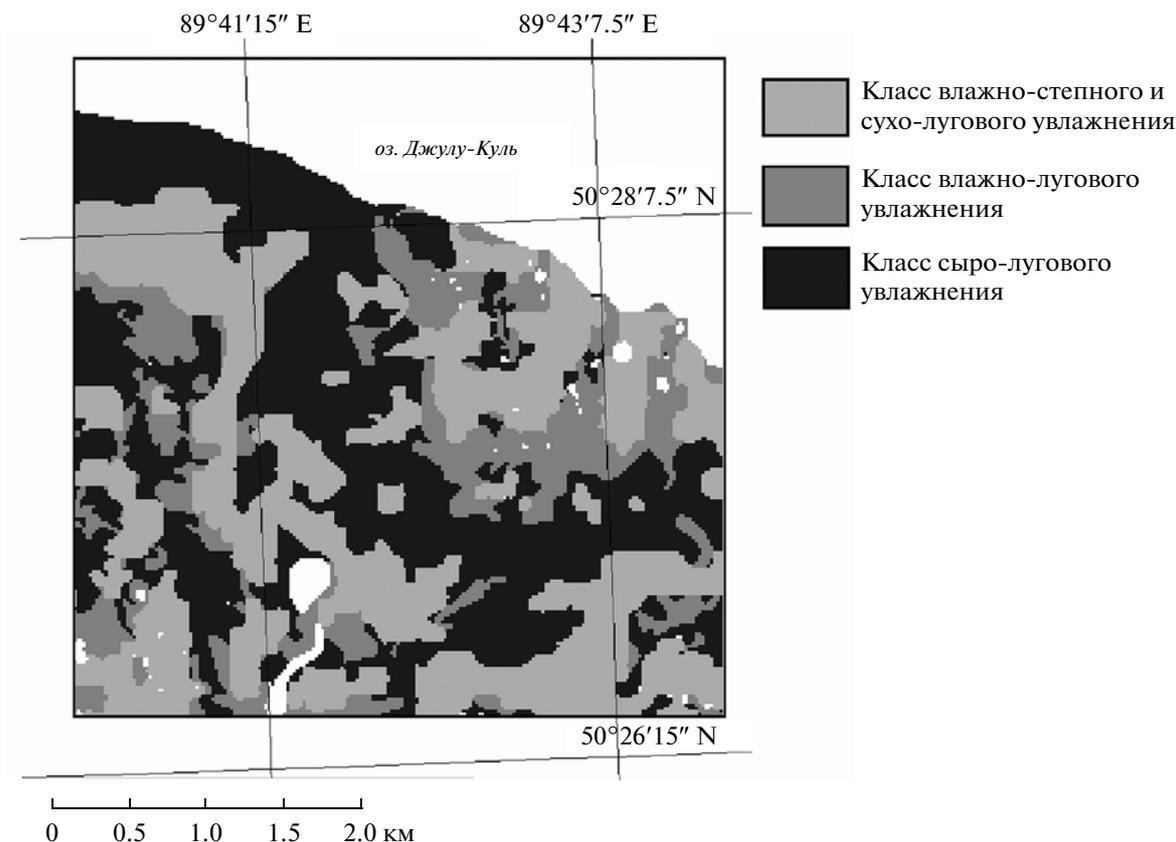


Рис. 6. Карта-схема увлажненности почв.

(табл. 3). Для моделирования пространственной неоднородности свойств почв по содержанию гумуса (определяет вид почв) произведены расчеты

уравнений регрессий (табл. 3) и составлен алгоритм (рис. 9), позволяющий автоматизированно построить карту содержания гумуса (рис. 10).

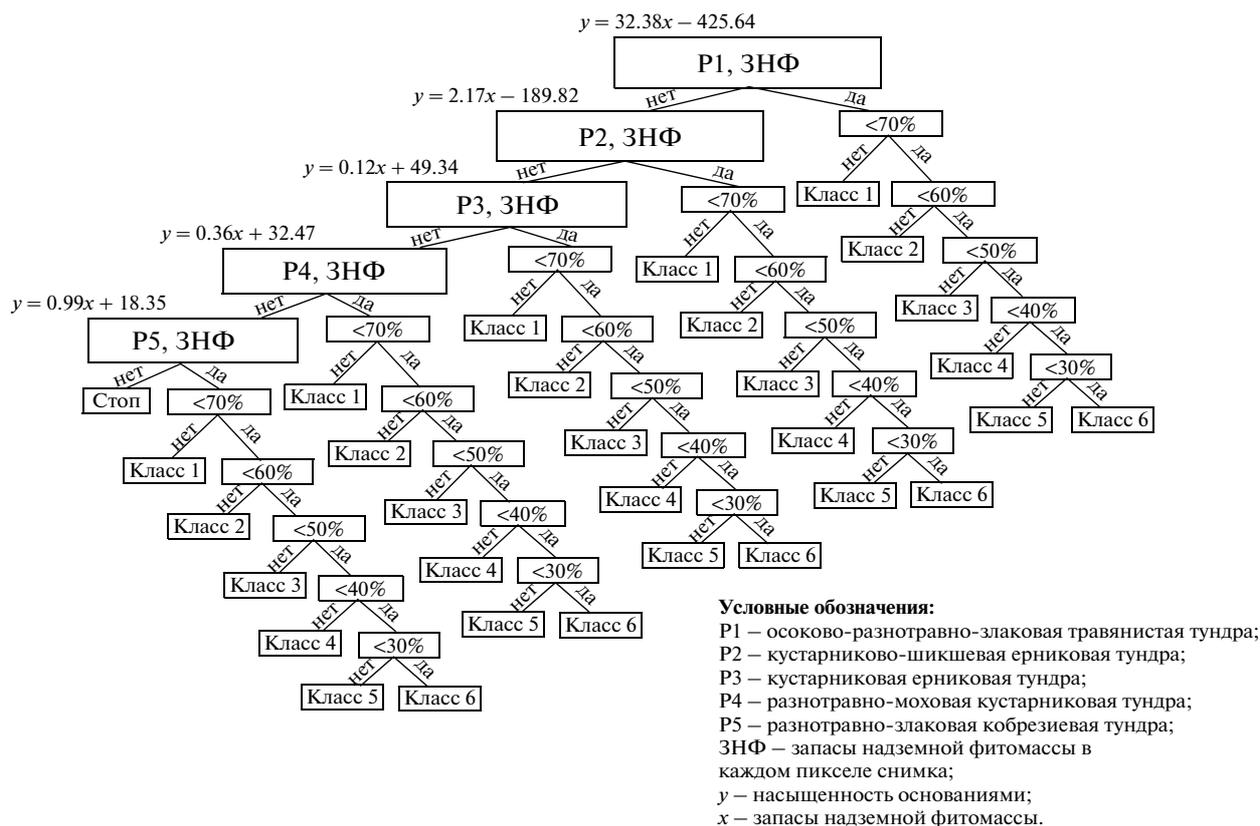


Рис. 7. Схема алгоритма “дерево решений” для расчета карты степени насыщенности почвенного поглощающего комплекса основаниями.

### Слой “Содержание физической глины”

Разновидность почв, определяемая в изучаемых почвах по содержанию физической глины, коррелирует с параметрами рельефа (табл. 4). В целом, рассматривая корреляцию между параметрами рельефа и содержанием физической глины, обнаруживается, что перераспределение содержания физической глины по элементам рельефа связано также и с процессами поверхностного и внутрпочвенного стока, а не только с вертикальным перемещением вниз по профилю. Для

моделирования пространственной изменчивости содержания физической глины в верхнем горизонте произведен линейный прогноз (рис. 11) по формуле регрессии

$$x = ak_{\max} + bZ + cMCA + d,$$

где  $a = 3.731797$ ,  $b = 0.201934$ ,  $c = 11.758459$ ,  $d = 19.41544$ ;  $x$  – содержание физической глины;  $k_{\max}$  – максимальная кривизна;  $Z$  – высота;  $MCA$  – площадь максимального сбора.

Таблица 4. Коэффициенты корреляции Спирмана ( $r_s$ ) между параметрами рельефа и гранулометрическими фракциями образцов почв

Гранулометрические фракции почв (для верхнего горизонта), $n = 25$	Морфометрические величины рельефа					
	$MCA^*$	$F$	$Z$	$k_{\max}^{**}$	$k_h^*$	$GA^*$
Физическая глина	0.86 $p < 0.000001$	нз	-0.44 $p < 0.05$	-0.63 $p < 0.001$	-0.60 $p < 0.01$	-0.55 $p < 0.01$
Физический песок	-0.70 $p < 0.0001$	нз	нз	0.48 $p < 0.05$	0.46 $p < 0.05$	нз

Примечание. \* – величины, описывающие поверхностный сток; \*\* – величины, описывающие геометрические формы;  $MCA$  – максимальная площадь сбора;  $F$  – освещенность в % (склонение  $35^\circ$ , азимут  $180^\circ$ );  $Z$  – высота;  $k_{\max}$  – максимальная кривизна;  $k_h$  – горизонтальная кривизна;  $GA$  – крутизна склонов;  $p$  – уровень значимости;  $n$  – количество почвенных проб; нз – незначимое значение.

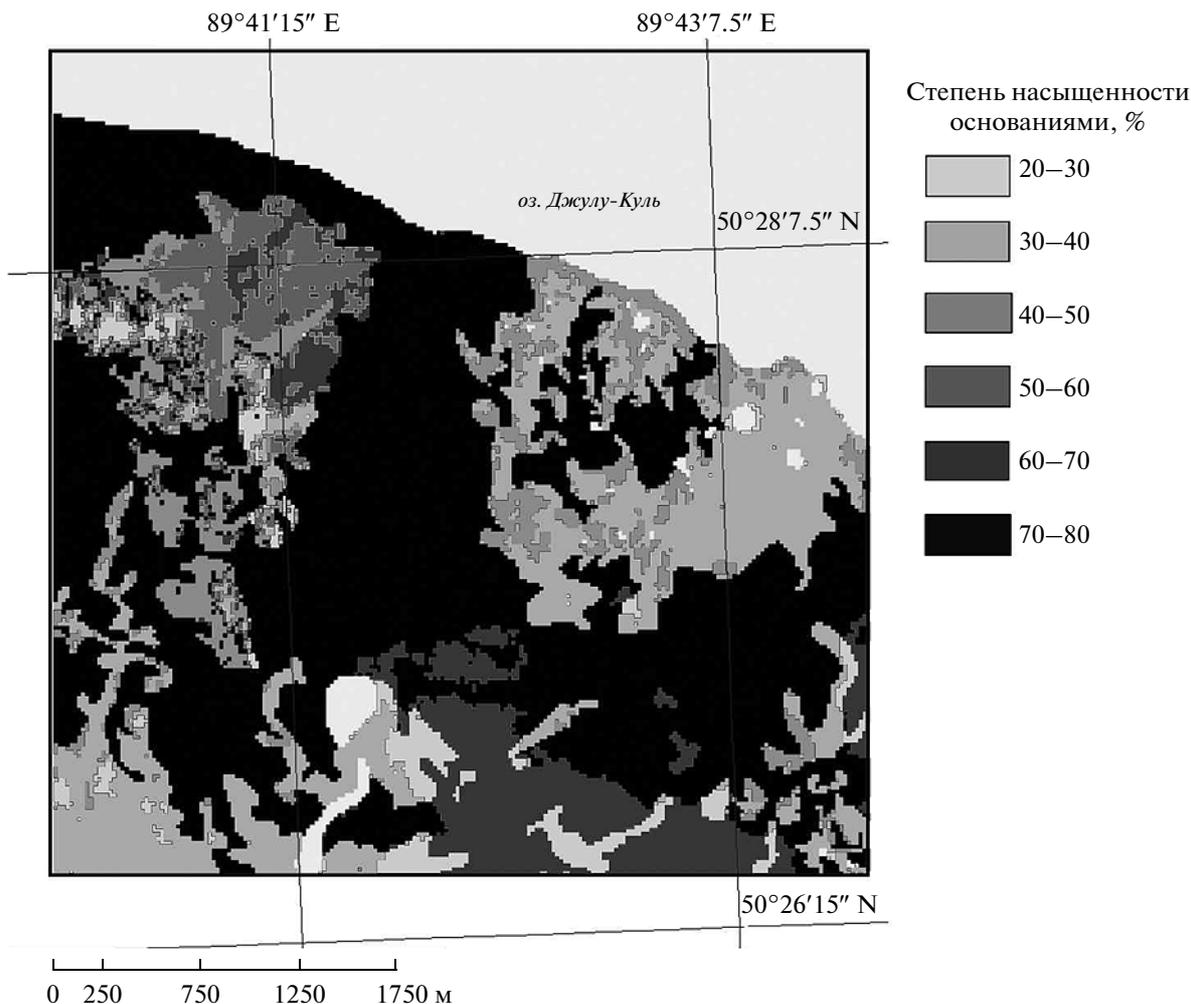
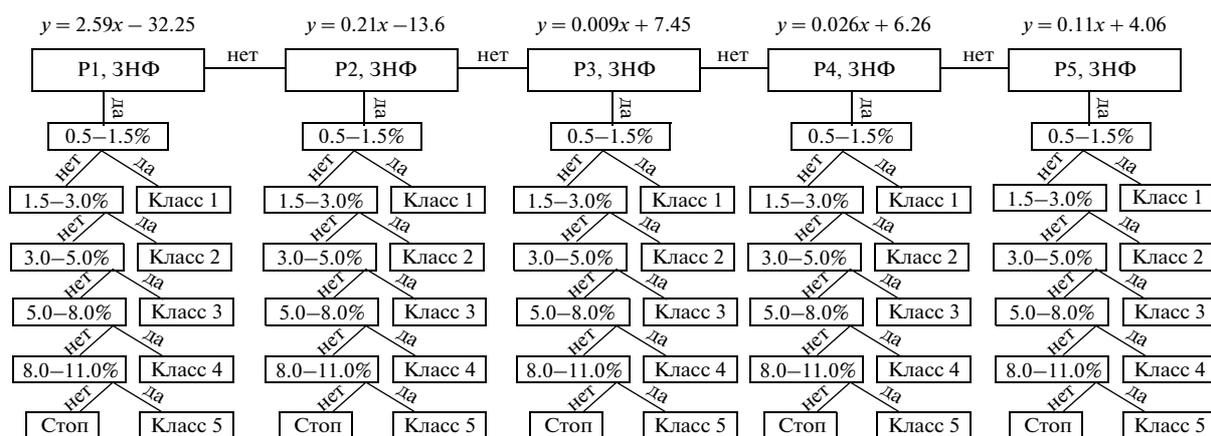


Рис. 8. Карта-схема степени насыщенности почв основаниями.



Условные обозначения: P1 – осоково-разнотравно-злаковая травянистая тундра; P2 – кустарниково-шикшевая ерниковая тундра; P3 – кустарниковая ерниковая тундра; P4 – разнотравно-моховая кустарниковая тундра; P5 – разнотравно-злаковая кобрезиевая тундра; ЗНФ – запасы надземной фитомассы в каждом пикселе снимка; y – содержание органического углерода, %; x – запасы надземной фитомассы.

Рис. 9. Схема алгоритма “дерево решений” для расчета карты содержания гумуса.

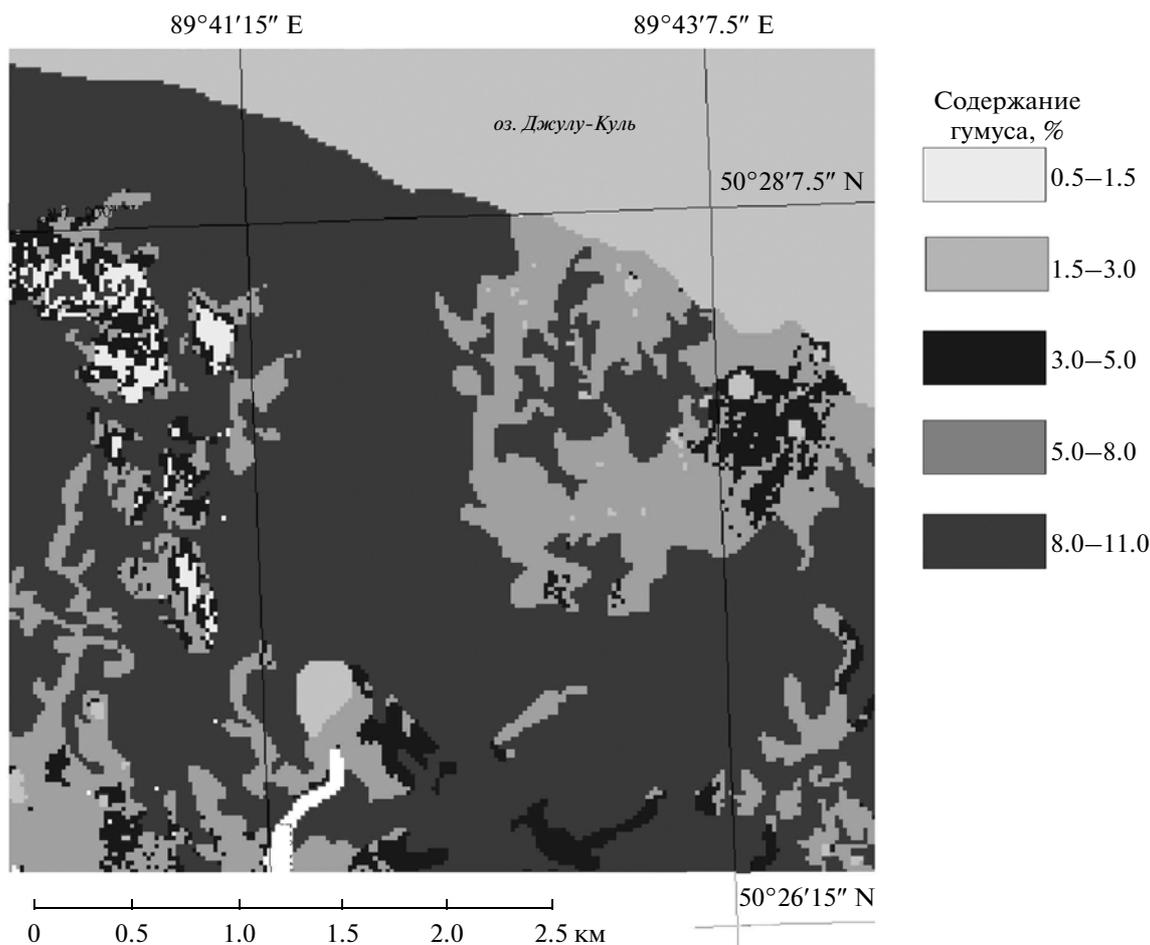


Рис. 10. Карта-схема содержания гумуса.

Для характеристики разряда почв была использована цифровая карта четвертичных отложений Джулукульской котловины. На изучаемой территории распространены два типа: озерно-моренные отложения и элюво-делювий коренных пород.

На следующем этапе полученная серия тематических карт используется в алгоритме “дерево решений” (рис. 12), который позволяет автоматически выделить географические ареалы почв согласно заданным условиям. Входные данные для алгоритма получают в процессе проведения полевых, дистанционных, аналитических и статистических исследований параметров почв, растительности и рельефа. К отличительным особенностям данного алгоритма можно отнести возможность его редактирования при привлечении новых дешифровочных признаков с последующей автоматической корректировкой карты. Разработанный алгоритм обеспечивает частичную замену ручного труда при составлении почвенных

карт. Результаты работы алгоритма представлены на рис. 13.

Для оценки точности выделенных географических ареалов почв использовалась контрольная почвенная карта, составленная классическим ручным способом. Качественная оценка результатов сопряженной классификации тематических слоев на уровне типа и подтипа почв производилась на основе матрицы погрешностей. Согласно матрице погрешностей (табл. 5) из 37537 пикселей правильно были идентифицированы 35227. Таким образом, общая точность классификации для всей карты составляет 93.8%, что больше порогового значения 85%, поэтому результаты классификации следует признать удовлетворительными. Недиагональные элементы матрицы (табл. 5) содержат информацию о ложной классификации (информация в столбцах) и пропусках (информация в строках). Ошибки пропусков классификации и ложной классификации представлены в табл. 6.

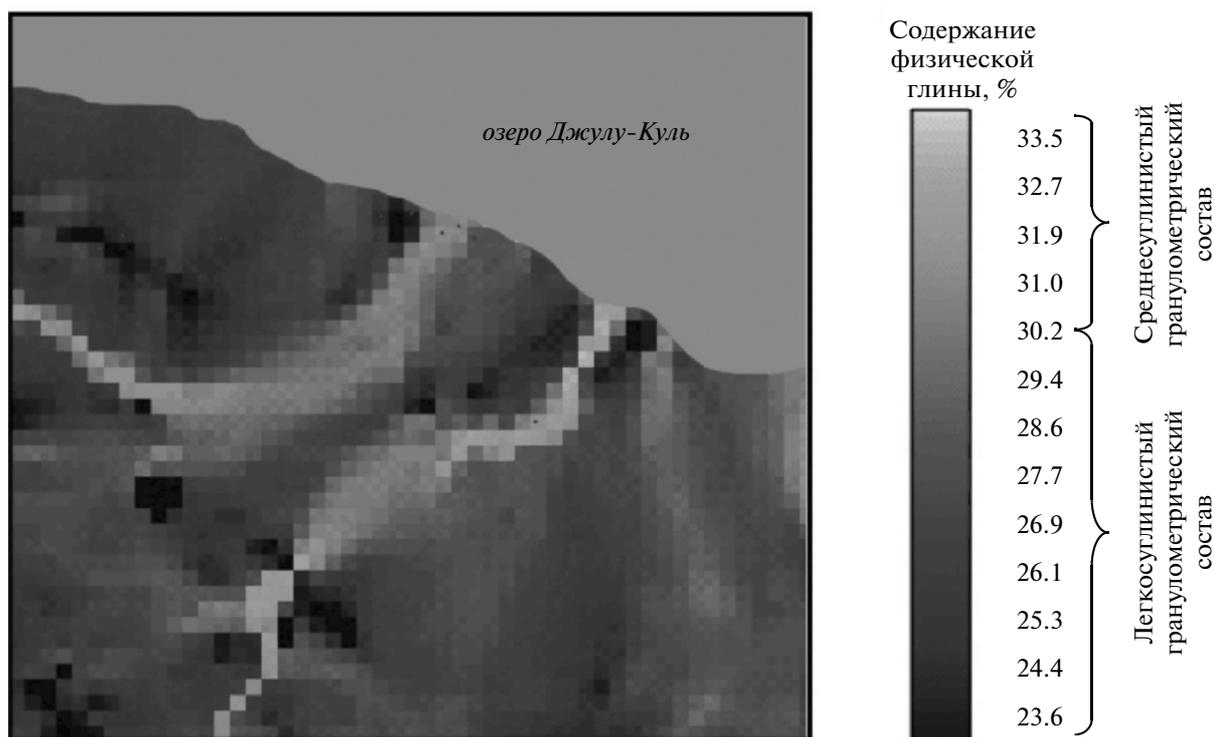


Рис. 11. Карта-схема содержания физической глины в верхнем горизонте.

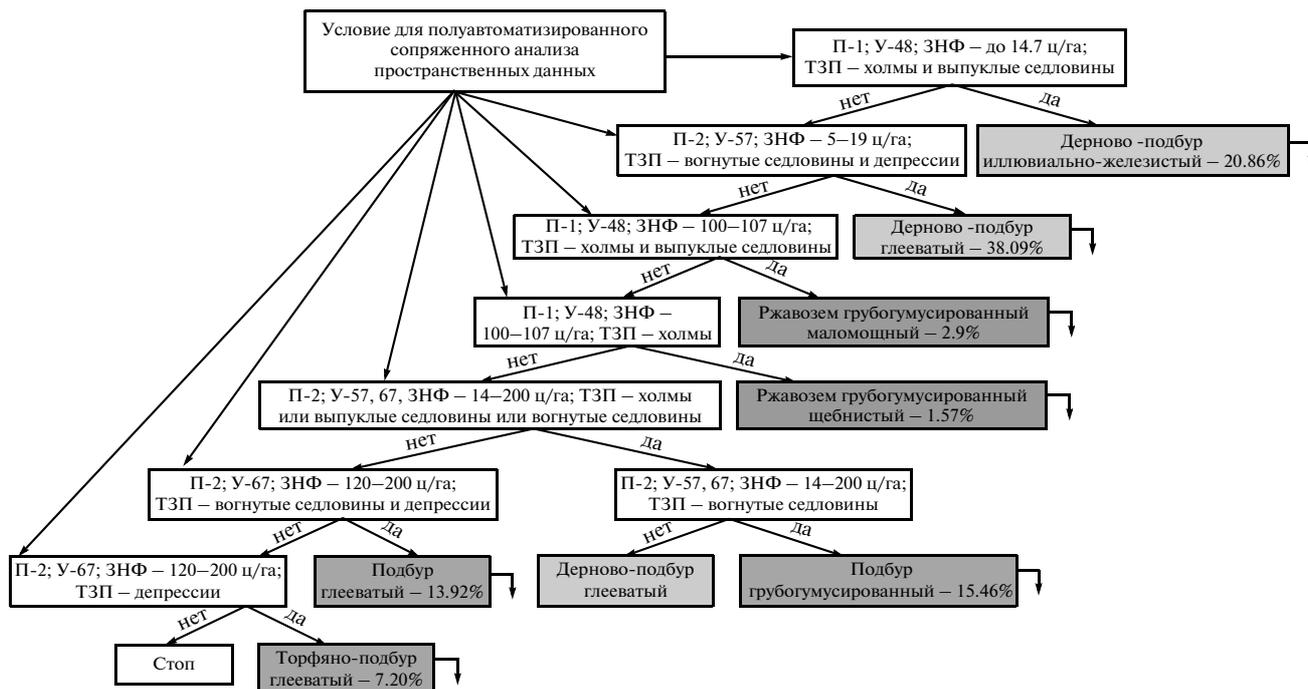
При использовании порогового значения 85% и данных табл. 7 видно, что все классы соответствуют заданному критерию, так как все гранич-

ные значения доверительного интервала больше 85%. Таким образом, используемые тематические слои и обучающие правила в алгоритме “дерев

Таблица 5. Матрица ошибок классификации

Фактический класс на контрольной карте	Расчетный класс на анализируемой карте						Всего для контрольной карты
	ПБд <sup>ИЖ</sup>	ПБд <sup>Г</sup>	ПБ <sup>ГР</sup>	ПБ <sup>Г</sup>	ПБт <sup>ИЖ</sup>	РЖ <sup>ГР</sup>	
ПБд <sup>ИЖ</sup>	<b>3600</b>	195	53	30	0	9	3887
ПБд <sup>Г</sup>	211	<b>16913</b>	90	226	300	160	17900
ПБ <sup>ГР</sup>	0	134	<b>3340</b>	57	28	0	3559
ПБ <sup>Г</sup>	0	187	121	<b>5665</b>	20	0	5993
ПБт <sup>ИЖ</sup>	0	219	0	144	<b>3848</b>	0	4211
РЖ <sup>ГР</sup>	87	39	0	0	0	<b>1861</b>	1987
Всего для анализируемой карты	3898	17687	3604	6122	4196	2030	<b>35227</b>

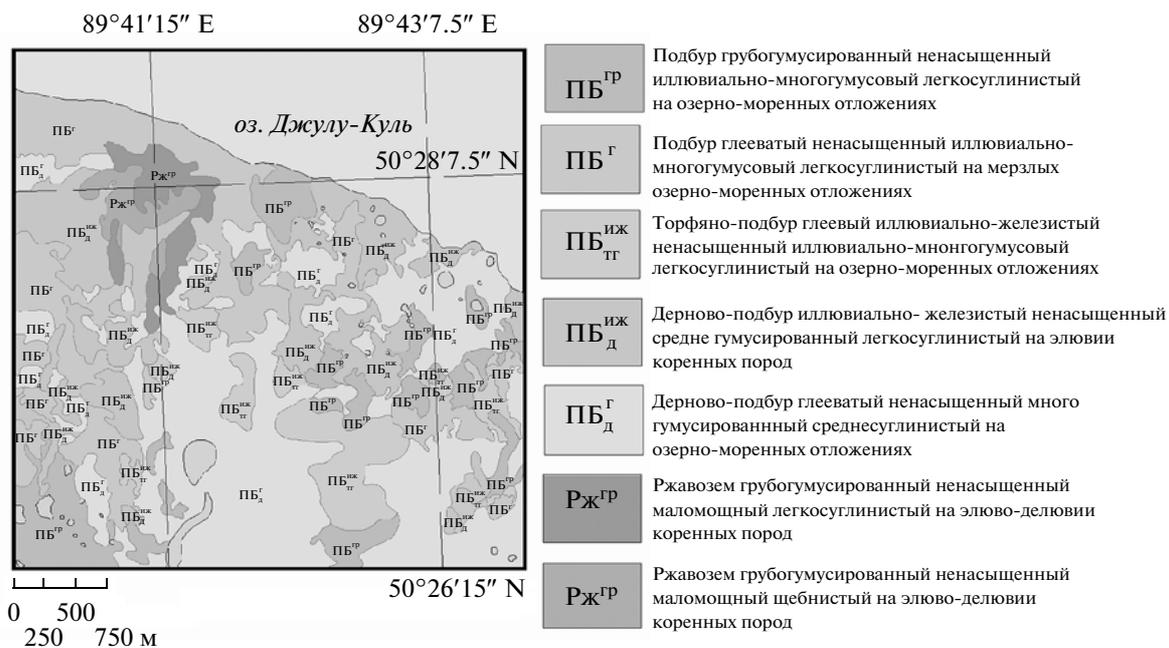
Примечание. Для табл. 5–7: ПБд<sup>ИЖ</sup> – дерново-подбур иллювиально-железистый; ПБд<sup>Г</sup> – дерново-подбур глееватый; ПБ<sup>ГР</sup> – подбур грубогумусированный; ПБ<sup>Г</sup> – подбур глееватый; ПБт<sup>ИЖ</sup> – торфяно-подбур глеевый иллювиально-железистый; РЖ<sup>ГР</sup> – ржавозем грубогумусированный.



**Условные обозначения:**

- П-1 – элювий и делювий коренных пород;
- П-2 – озерно-моренные отложения;
- ЗНФ – запасы надземной фитомассы;
- ТЗП – типы земной поверхности
- У – увлажненность (48 – класс влажно степного и сухо-лугового увлажнения; 57 – класс влажно-лугового увлажнения; 67 – класс сыро-лугового увлажнения).
- ↘ – переход к тематическим слоям, характеризующим степень насыщенности почв основаниями (род почв), содержание гумуса (вид почв), содержание физической глины (разновидность почв), тип почвообразующих пород (разряд почв).

**Рис. 12.** Схема алгоритма “дерево решений”.



**Рис. 13.** Почвенная карта, построенная алгоритмом “дерево решений”.

**Таблица 6.** Ошибки, связанные с ложной классификацией и пропусками классификации

Класс	Пропуск			Ложная классификация		
	Пропущенные пиксели	Общее кол-во пикселей	Процент ошибок	Ложная классификация	Общее кол-во пикселей	Процент ошибок
ПБд <sup>ИЖ</sup>	287	3887	7.3	298	3898	7.6
ПБд <sup>Г</sup>	987	17900	5.5	774	17687	4.3
ПБ <sup>ГР</sup>	219	3559	6.1	264	3604	7.3
ПБ <sup>Г</sup>	328	5993	5.4	457	6122	7.9
ПБт <sup>ИЖ</sup>	363	4211	8.6	348	4196	8.2
РЖ <sup>ГР</sup>	126	1987	6.3	169	2030	8.3

**Таблица 7.** Доверительные интервалы для пропусков и ложной классификации

Класс	Пропуски				Ложная классификация		
	Правильная классификация	Размер выборки	% попаданий	95%-ный доверительный интервал	Размер выборки	% попаданий	95%-ный доверительный интервал
ПБд <sup>ИЖ</sup>	3600	3887	92.6	93.0–94.5	3898	92.4	93.0–94.6
ПБд <sup>Г</sup>	16913	17900	94.5	93.4–94.1	17687	95.6	93.4–94.1
ПБ <sup>ГР</sup>	3340	3559	93.9	92.9–94.6	3604	92.7	92.9–94.6
ПБ <sup>Г</sup>	5665	5993	94.5	93.2–94.4	6122	92.5	93.2–94.4
ПБт <sup>ИЖ</sup>	3848	4211	91.4	93.0–94.6	4196	91.7	93.0–94.6
РЖ <sup>ГР</sup>	1861	1987	93.7	92.7–94.9	2030	91.7	92.7–94.9

решений” содержат в себе достаточно информации для правильного распределения пикселей по классам.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований позволяют сделать следующие выводы.

1. Разработана и апробирована методика картографирования почв, полностью покрытых растительностью, с использованием спутниковых и лабораторно-полевых данных, а также матриц высот поверхности Земли.

2. Выявлены наиболее значимые косвенные индикаторные признаки для установления географических ареалов почв на уровне типа и под-типа, к которым относятся: запасы надземной фитомассы, основные типы земной поверхности, увлажненность. Установлено, что эти признаки могут использоваться только для выявления пространственных границ и не позволяют идентифицировать классификационную принадлежность почв, так как они строго не приурочены к тем или иным разновидностям и могут в свою очередь встречаться на других территориях, но уже с другими почвами.

3. Выявлена зависимость между количественными параметрами почв, характеризующими род

(по степени насыщенности основаниями) и вид (по содержанию гумуса) с запасами надземной фитомассы. Выявлена зависимость между содержанием физической глины (характеризует разновидность почв) и параметрами рельефа (максимальная кривизна, высота, площадь максимального сбора). Рассчитаны уравнения регрессий и соответствующие тематические карты.

4. Разработан алгоритм “дерево решений” для сопряженной классификации результатов обработки многозональных снимков и матриц высот поверхности Земли, позволяющий выделять ареалы почв с определенным сочетанием признаков из разных тематических слоев, параметры которых соответствуют заданным экспертом условиям.

5. По результатам сравнения контрольной карты с выделенными географическими ареалами почв алгоритмом “дерево решений” можно судить об удовлетворительной точности классификации. Таким образом, используемые тематические слои и обучающие правила в алгоритме “дерево решений” содержат в себе достаточно информации для правильного распределения пикселей по классам.

Работа выполнена в рамках проекта “Мониторинг и оценка почвенных ресурсов Западной Сибири” VI.44.1.13.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. 487 с.
- Атлас. Алтайский край. М.-Барнаул: ГУГК при СМ СССР, 1978. 222 с.
- Виноградов Б.В.* Аэрокосмический мониторинг экосистем. М.: Наука, 1984. 320 с.
- Викторов С.В., Чикишев А.Г.* Ландшафтная индикация и ее практическое применение. М.: МГУ, 1990. 198 с.
- Гопп Н.В.* Моделирование запасов надземной фитомассы тундровых сообществ растений с использованием наземных и спутниковых данных // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. Вып. 18. С. 200–206.
- Гопп Н.В., Куликова Е.А., Пестунов И.А., Синявский Ю.Н., Смирнов В.В.* Распознавание формаций лесной растительности с близкими спектрально-яркостными характеристиками по данным съемки со спутника LANDSAT 7 ETM+ // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12. № 2. С. 194–201.
- Кашкин В.Б., Сухинин А.И.* Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений. М.: Логос, 2001. 264 с.
- Общесоюзная инструкция по почвенным обследованиям и составлению крупномасштабных почвенных карт землепользований / Под ред. Т.А. Ищенко. М.: Колос, 1973. 95 с.
- Пестунов И.А., Будкина Е.А., Синявский Ю.Н.* Алгоритм кластеризации многоспектральных изображений на основе формирования сеточной структуры в пространстве признаков // Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании. Павлодар, 2006. Т. 2. С. 124–131.
- Почвенная съемка / Руководство по полевым исследованиям и картированию почв / Под ред. И.В. Тюрина, И.П. Герасимова, Е.Н. Иванова, В.А. Носина. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 348 с.
- Практикум по почвоведению / Под ред. И.С. Кауричева. М.: Агропромиздат, 1986. 336 с.
- Раменский Л.Г.* Введение в комплексное почвенно-геоботаническое исследование земель. М.: Сельхозгиз, 1938. 620 с.
- Родин Л.Е., Ремезов Н.П., Базилевич Н.И.* Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах. Л.: Наука, 1968. 143 с.
- Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И.* Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Chavez P.S., Berlin G.L., Sowers L.B.* Statistical method for selecting Landsat MSS ratios // J. Appl. Photograph. Engin. 1984. V. 8. P. 23–30.
- Personal research website on geomorphometry and applications / Shary P.A. 2006. Electronic resource [www.giseco.info/](http://www.giseco.info/)
- Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V.* Fundamental quantitative methods of land surface analysis // Geoderma. 2002. V. 107. № 1–2. P. 1–32.
- Vermote E.F., Kotchenova S.* Atmospheric correction for the monitoring of land surfaces // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. № D23S90. P. 1–12. doi:10.1029/2007JD009662.

## Algorithms of Decision-Making for the Automated Drawing up of Digital Soil Maps on the Basis of Land, Analytical and Satellite Data

N. V. Gopp

*Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk*

The paper deals with the technology of drawing up of digital soil maps with use of parameters of vegetation and a relief. These parameters are calculated by satellite data (Landsat ETM+, SPOT 4) and matrix of heights of a surface of Earth (SRTM90). By the example of test plot, the possibility of effective application of analytical, land and satellite data has been shown for interpretation areas of soils on indirect signs.

**Keywords:** mapping of soils, remote sensing, digital soil cartography

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ  
КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ПРОЦЕДУРЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ  
ПРИ СИГНАЛЬНО-ЗАВИСИМЫХ ПОМЕХАХ В ОКРЕСТНОСТИ  
ОПТИМАЛЬНОЙ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ И ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

© 2013 г. А. Н. Земляченко<sup>1\*</sup>, Р. А. Кожемякин<sup>1</sup>, С. К. Абрамов<sup>1</sup>, В. В. Лукин<sup>1</sup>, М. К. Чобану<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “Харьковский авиационный институт”,  
Харьков, Украина

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”, Москва

\*E-mail: cmk2@orc.ru

Поступила в редакцию 25.06.2012 г.

Рассмотрены подходы к сжатию с потерями одноканальных изображений дистанционного зондирования (ДЗ) Земли, которые искажены сигнально-зависимыми помехами. Анализ проведен для кодеров на основе дискретного косинусного преобразования и вейвлет-преобразования. Сравнение эффективности сжатия выполнено в соответствии с несколькими критериями как при прямом применении кодеров к изображениям, так и при использовании вариационно-стабилизирующего преобразования. Показано, что различия в эффективности несущественны, но применение вариационно-стабилизирующих преобразований обеспечивает определенные преимущества для применения трехмерных кодеров для сжатия многоканальных данных ДЗ. Предложены процедуры автоматического сжатия в окрестности оптимальной рабочей точки. Проанализированы их достоинства и недостатки.

**Ключевые слова:** сжатие изображений ДЗ с потерями, сигнально-зависимый шум

DOI: 10.7868/S0205961413020140

ВВЕДЕНИЕ

Современные средства дистанционного зондирования (ДЗ) широко используются для разнообразных приложений (Шовенгердт, 2010). Формируемые ими изображения характеризуются все лучшим пространственным разрешением, увеличивается количество каналов (спектральных зон) как для систем оптического и ИК-диапазонов, так и радиолокационных (РЛ) средств (вследствие применения многочастотных и поляризационных систем). В результате резко возрастает объем данных, которые необходимо в первую очередь передать в наземные центры обработки и хранения (космической) информации, а затем и предоставить (в удобном виде) потребителям. В связи с этим часто приходится применять сжатие данных ДЗ (Бабкин и др., 2004; Бехтин, 2007; Каага, 2007).

В зависимости от приоритета требований технических характеристик канала связи и организации передачи данных с борта носителя системы ДЗ, возможны различные стратегии сжатия. Некоторые ученые и разработчики настаивают на том, что необходимо использовать только сжатие

без потерь (Бабкин и др., 2004; Бехтин, 2007; Ренпа et al., 2007) или, в крайнем случае, с ограниченными потерями. В этом случае наилучшие современные методы сжатия, учитывающие как пространственную, так и спектральную избыточность многоканальных данных, обеспечивают коэффициент сжатия (КС) порядка 4 (при сжатии с ограниченными потерями немного больше), что часто недостаточно для практических приложений. Вторая стратегия – сжатие в заданное число раз, определяемое исходным объемом данных, пропускной способностью канала и временем передачи данных. В рамках этой стратегии желательно использовать методы сжатия, обеспечивающие при заданном КС наименьший уровень вносимых потерь (искажений). Наконец, третья стратегия – автоматически обеспечить на борту носителя заданный в соответствии с каким-либо критерием уровень вносимых потерь при максимальном возможном КС (Lukin, 2009). При этом важное значение имеют также простота и быстродействие аппаратно-алгоритмической реализации используемого метода сжатия. Методы, рассмат-

риваемые в данной статье, относятся именно к этой стратегии сжатия.

Для многих практических приложений сжатия многомерных сигналов (одноканальных и многоканальных изображений, видео) обработка осуществляется в предположении, что помехи отсутствуют (Чобану, 2009) или, по крайней мере, присутствие помех при анализе игнорируется. Однако на практике помехи с большим или меньшим уровнем присутствуют на любых изображениях, хотя на некоторых типах изображений шум может быть визуально незаметен (Лукин и др., 2010; Liu et al., 2006). В частности, для гиперспектральных данных ДЗ с аэрокосмических носителей помехи хорошо заметны для изображений в каналах с малым отношением сигнал/шум (ОСШ) и практически не видны для изображений в других каналах (Кривенко и др., 2009; Ponomarenko et al., 2006). При этом присутствие помех при использовании сжатия без потерь резко снижает достигаемые значения КС (Во, 2011). Если помехи являются интенсивными, как, например, для одно-взглядовых РСА-изображений, то достигаемый даже для наилучших кодеров (архиваторов) КС оказывается лишь немного большим единицы (Ponomarenko et al., 2011). Поэтому тип и характеристики помех желательно учитывать при выборе известного метода сжатия и установке его параметров, а также при разработке новых методов сжатия.

Присутствие помех вынуждает использовать специальные подходы к их учету при сжатии изображений (Бехтин, 2007; Ponomarenko et al., 2011; Al-Chaykh, Mersereau, 1998; Shahnaz et al., 1999; Chang et al., 2000). Целесообразным, оказывается, использовать сжатие с потерями при условии, что тип и характеристики помех надлежащим образом учтены. Во-первых, сжатие с потерями позволяет обеспечить гораздо более высокие значения КС (Lukin, 2009; Christophe et al., 2008). Во-вторых, сжатие с потерями изображений ДЗ, искаженных помехами, может при определенных условиях приводить к повышению вероятности их правильной классификации (Blanes et al., 2009; Lukin et al., 2006a). В-третьих, положительным моментом является эффект фильтрации, который может быть весьма существенным при устанавливаемых параметрах алгоритмов сжатия с потерями. Этот эффект был впервые отмечен в работах (Al-Chaykh, Mersereau, 1998; Shahnaz et al., 1999; Chang et al., 2000). Характерно, что эффект фильтрации наблюдается для методов сжатия, основанных на использовании различных ортогональных преобразований, включая дискретное косинусное преобразование (ДКП) и дискретное вейвлет-преобразование (ДВП) (Бехтин, 2007; Al-Chaykh, Mersereau, 1998; Shahnaz et al., 1999; Chang et al., 2000; Lim, 2006; Ponomarenko et al., 2005, 2006).

Важной задачей является выбор параметров кодера таким образом, чтобы сжатие осуществлялось в окрестности так называемой оптимальной рабочей точки (ОРТ) (Al-Chaykh, Mersereau, 1998; Lim, 2006; Ponomarenko et al., 2005, 2006, 2010a; Lukin et al., 2006b), и чтобы декодированное изображение было “максимально похожим” на истинное – в соответствии с выбранным критерием. ОРТ наблюдается (хотя и не всегда) для разных типов помех (Chang et al., 2000; Lim, 2006; Lukin et al., 2006b, 2008) и различных методов сжатия. ОРТ может иметь место как для традиционных критериев – среднеквадратической ошибки (СКО) или отношения пикового сигнала к шуму (ПОСШ, PSNR) (Бехтин, 2007; Lukin, 2009; Chang et al., 2000; Lim, 2006; Ponomarenko et al., 2005a, 2006, 2010a; Lukin et al., 2006b, 2008), так и для метрик, учитывающих визуальное качество (Ponomarenko et al., 2010a), например PSNR-HVS-M (Ponomarenko et al., 2007) и MSSIM (Wang et al., 2003). Более того, ОРТ может наблюдаться и в соответствии с критерием вероятности правильной классификации данных многоканального ДЗ (Lukin, 2009; Blanes et al., 2009).

С практической точки зрения факт существования ОРТ очень важен. Но не менее важно и то, как обеспечить сжатие с потерями в окрестности ОРТ, причем в автоматическом режиме (на борту носителя системы ДЗ). Эта задача успешно решена для случая аддитивных помех (Ponomarenko et al., 2005a, 2006, 2010) в предположении, что дисперсия помех для каждого сжимаемого изображения априорно известна или оценена с необходимой точностью (Vozel et al., 2009). Если сначала предложенные автоматические процедуры сжатия в окрестности были итеративными (Ponomarenko et al., 2005a), то позднее для кодеров на основе ДКП удалось разработать метод определения шага квантования (ШК) и последующего сжатия без итераций (Ponomarenko et al., 2006, 2010a), в том числе и для гиперспектральных изображений с использованием трехмерных кодеров (Lukin et al., 2010a; Ponomarenko et al., 2010b).

Если изображения искажены сигнально-зависимыми помехами простых видов – мультипликативным или пуассоновским шумом, – то ситуация является немного более сложной (Lukin et al., 2006b, 2008). Положительным моментом является тот факт, что к изображениям, искаженным этими типами помех, можно применить вариационно-стабилизирующие (гомоморфные) преобразования (ВСП), позволяющие после соответствующего прямого преобразования получить изображения, искаженные аддитивными помехами (Lukin et al., 2006b, 2008; Зряхов и др., 2011; Anscombe, 1948). Тогда сжатие с автоматическим обеспечением компрессии в окрестности ОРТ

можно выполнять с использованием многоэтапной процедуры обработки, включающей применение прямого ВСП и последующее сжатие на этапе кодирования, декомпрессию и обратное преобразование при декодировании.

Достижимые при сжатии в окрестности ОРТ значения КС зависят от многих факторов: степени сложности изображения (насыщенности деталями, текстурности), уровня помех, используемого критерия качества, применяемого метода сжатия. Для случая сжатия одноканальных изображений (или поканального, раздельного сжатия) многоканальных изображений КС меняется в пределах от трех для сложных изображений с низким уровнем помех до 30–40 для простых изображений с высоким уровнем помех. Если для сжатия многоканальных изображений используются трехмерные кодеры, позволяющие учесть спектральную избыточность (коррелированность компонентных изображений в соседних каналах), то достигаемые КС в 2–4 раза выше (Lukin et al., 2010a; Ponomarenko et al., 2010b). При этом предполагается, что для группируемых каналов помехи аддитивные с практически одинаковой дисперсией, что не выполняется при сигнально-зависимых помехах.

В связи с этим проблемой остается автоматическое обеспечение сжатия в окрестности ОРТ при сложных видах сигнально-зависимых помех (Зряхов и др., 2011). Ее актуальность на практике обусловлена тем, что для изображений, формируемых сенсорами нового поколения, характерна явная сигнальная зависимость помех, т.е. зависимость дисперсии помех от локального среднего (или истинного значения) для изображения (Foi, 2007; Murtagh, 2001; Kerekes, 2003; Uss et al., 2010; Barducci et al., 2005). В частности, не ясно, можно ли обойтись без выполнения ВСП. Кроме того, не изучены особенности сжатия при использовании сложных ВСП типа обобщенного преобразования Энскомба (Murtagh, 2001).

Поэтому цель данной статьи состоит в исследовании характеристик сжатия с потерями изображений, искаженных помехами со сложной сигнально-зависимой структурой, а также в разработке процедур и алгоритмов обеспечения сжатия в окрестности ОРТ. Для простоты рассматривается случай сжатия одноканального изображения (или поканального сжатия многоканальных данных ДЗ) в предположении, что полученные результаты послужат в будущем основой разработки более эффективных трехмерных кодеров. Анализ проводится для нескольких современных методов сжатия с потерями на основе ДКП и ДВП.

## МОДЕЛЬ ПОМЕХ И ТЕСТОВЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

В системах формирования изображений на основе ПЗС-матриц, которые часто используются в средствах многоканального ДЗ, есть два основных источника шумов (Kerekes, 2003): фотонный шум, возникающий в результате дискретной природы света (формирование изображения осуществляется путем подсчета количества детектированных фотонов), который подчиняется пуассоновскому закону распределения, и тепловой шум (возникающий в результате нагрева аппаратуры), который можно считать аддитивным и подчиняющимся гауссову распределению. В результате помеха, искажающая изображение после операций калибровки, имеет сложную природу и описывается моделью одновременно присутствующих сигнально-зависимой (квази-пуассоновской) и аддитивной сигнально-независимой (гауссовой) компонент

$$I_{ij} = n_{ij}^{\text{пуас}}(I_{ij}^{\text{ист}}, k) + n_{ij}^{\text{алд}}(g, \sigma_a^2), \quad (1)$$

где  $I_{ij}$  — значение зашумленного изображения в  $ij$ -м пикселе;  $n_{ij}^{\text{пуас}}$  — квази-пуассоновская компонента шума;  $I_{ij}^{\text{ист}}$  — истинное значение незашумленного изображения;  $k$  — коэффициент коррекции динамического диапазона изображения;  $n_{ij}^{\text{алд}}$  — аддитивная компонента шума с дисперсией  $\sigma_a^2$  и математическим ожиданием  $g$ , которое положим равным нулю. Тогда дисперсия помех для  $ij$ -го пиксела равна  $\sigma_{ij}^2 = kI_{ij}^{\text{ист}} + \sigma_a^2$ . В зависимости от  $k$ ,  $\sigma_a^2$  и диапазона значений  $I_{ij}^{\text{ист}}$  превалирующей может быть как сигнально-зависимая, так и аддитивная компонента. Шумы для компонент полагались независимыми и пространственно-некоррелированными.

Исследование проводилось с использованием тестовых изображений Airfield (рис. 1а), а также стандартных для оптики тестовых изображений Baboon, Barbara, Goldhill, Lenna, Peppers, различающихся степенью сложности (наиболее сложное — Baboon, наиболее простые — Lenna и Peppers). Все изображения имеют размер  $512 \times 512$  пикселей. К сожалению, для систем ДЗ нет общепринятых тестовых изображений. Тем не менее результаты сжатия в большей степени зависят от общих характеристик изображений (процентного отношения числа пикселей, принадлежащих однородным участкам, текстурности), чем от их конкретного контента. Поэтому выводы, полученные ниже для указанных тестовых изображений, справедливы и для данных ДЗ.

На каждое из этих изображений накладывался искусственно сгенерированный шум согласно модели (1). Использовались следующие парамет-



Рис. 1. Исходное (а), зашумленное ( $k = 1$  и  $\sigma_a^2 = 20$ ) тестовое изображение Airfield (б).

ры модели:  $k = 0.2; 0.4;$  и  $1$  а  $\sigma_a^2 = 20$  оставалось неизменным. В случае  $k = 0.4$  и  $1$  превалирующим является сигнально-зависимая помеха, а при  $k = 0.2$  сигнально-зависимая и аддитивная компоненты примерно одинаковы по степени негативного воздействия на качество изображения. На рис. 1б представлено зашумленное изображение Airfield. Шум визуально заметен, особенно на однородных участках, причем это имеет место для всех трех комбинаций параметров модели.

#### КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ СЖАТИИ С ПОТЕРЯМИ

Как отмечено выше, особенностью сжатия с потерями является наличие эффекта подавление помех при задании определенных управляющих параметров, позволяющих сжимать изображения в окрестности ОРТ. Этот эффект обусловлен тем, что вследствие квантования часть коэффициентов используемого ортогонального преобразования, которые имеют относительно малые исходные значения и в первую очередь обусловлены шумом, принимает нулевые значения, в результате чего помеха частично подавляется. Вместе с тем такая “фильтрация” при использовании сжатия с потерями является менее эффективной, чем обычная фильтрация с использованием того же самого ортогонального преобразования (Ponomarenko et al., 2005a).

Для контроля эффективности сжатия и подавления помех нами использовались как упомянутые ранее традиционные критерии качества СКОш и ПОСШ, так и метрики, учитывающие визуальное качество, PSNR-HVS-M (Ponomaren-

ko et al., 2007) и MSSIM (Wang et al., 2003). При наличии исходных истинного ( $I_{ij}^{\text{ист}}$ ), искусственно зашумленного ( $I_{ij}$ ) и декодированного после сжатия ( $I_{ij}^{\text{дек}}$ ) изображений имеется возможность рассчитать количественные характеристики двумя способами. Первый из них – традиционный (Чобану, 2009) – предусматривает расчет СКО<sub>тр</sub> в виде

$$\text{СКО}_{\text{тр}} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (I_{ij} - I_{ij}^{\text{дек}})^2 / IJ, \quad (2)$$

где  $I, J$  – количество пикселей в строках и столбцах изображений. Зависимость СКО<sub>тр</sub> от КС при сжатии изображений, искаженных помехами, традиционная – такая же, как и при сжатии изображений без помех: увеличение КС приводит к увеличению СКО<sub>тр</sub>.

Второй способ – сравнить декодированное зашумленное изображение  $I_{ij}^{\text{дек}}$  и исходное незашумленное  $I_{ij}^{\text{ист}}$ . В этом случае СКО<sub>ш</sub><sup>эт</sup> рассчитывается для эталонного  $\{I_{ij}^{\text{ист}}\}$  и декодированного  $\{I_{ij}^{\text{дек}}\}$  изображений как

$$\text{СКО}_{\text{ш}}^{\text{эт}} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (I_{ij}^{\text{ист}} - I_{ij}^{\text{дек}})^2 / IJ, \quad (3)$$

отношение пикового сигнала к шуму при 8-битном представлении истинного изображения определяется как

$$\text{ПОСШ}^{\text{эт}} = 10 \lg(255^2 / \text{СКО}_{\text{ш}}^{\text{эт}}). \quad (4)$$

При определенных условиях зависимости  $СКО_{ш}^{ЭТ}$  и  $ПОСШ^{ЭТ}$  от  $КС$  имеют соответственно минимум и максимум. Координаты минимума метрики  $СКО_{ш}^{ЭТ}$  и максимума метрики  $ПОСШ^{ЭТ}$  являются ОПТ. При этом ОПТ можно характеризовать коэффициентом сжатия  $КС_{ОПТ}$ ,  $bpp_{ОПТ}$  (bits per pixel – количеством бит на пиксель) и шагом квантования  $ШК_{ОПТ}$ , поскольку эти параметры жестко ( $КС_{ОПТ} = 8/bpp_{ОПТ}$ ) или нелинейно взаимосвязаны (при увеличении шага квантования коэффициентов ортогонального преобразования возрастает  $КС$ ).

Наряду с традиционными метриками (критериями) нами рассматривались и другие метрики, в частности, характеризующие визуальное качество изображений. Одной из лучших является метрика PSNR-HVS-M, которая учитывает особенности зрительной системы человека. В ее основе лежит дискретное косинусное преобразование. Значения метрики PSNR-HVS-M измеряются в децибелах, большие значения соответствуют лучшему визуальному качеству. При PSNR-HVS-M > 40 дБ внесенные искажения (отличия между изображениями) можно считать практически незаметными (Lukin et al., 2010б). Метрика MSSIM основана на вейвлет-преобразовании, диапазон изменения ее значений лежит в пределах от 0 (очень плохое качество) до 1 (отличное качество). Отличия между изображениями можно считать визуально незаметными, если значения этой метрики превышают 0.99 (Lukin et al., 2010б).

На первый взгляд, использование метрик визуального качества правомерно при сжатии цветных изображений или видео, но бесполезно при анализе качества сжатия данных ДЗ. Однако необходимо иметь в виду два аспекта. Во-первых, для многих приложений ДЗ по-прежнему используется интерпретация и анализ данных ДЗ опытными дешифровщиками, для которых визуальное качество имеет значение. Во-вторых, как показано в работе (Fevrale et al., 2010), вероятность правильной классификации данных многоканального ДЗ различными автоматическими классификаторами (на основе нейросетей или метода опорных векторов) сильно коррелирована с  $ПОСШ^{ЭТ}$  для классов, представляющих собой в основном однородные объекты (поля, луга, водные поверхности большой площади), и с метриками визуального качества для классов, представляющих собой малоразмерные объекты и текстуры (дороги, урбанизированные участки). Последняя взаимосвязь не удивительна, так как метрики визуального качества ориентированы в первую очередь на описание уровня искажений для окрестностей границ и мелких деталей.

## ПРОЦЕДУРЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО СЖАТИЯ НА ОСНОВЕ ДКП

В данной работе исследования проводились с использованием кодеров AGU (Ponomarenko et al., 2005б) и ADCT (Ponomarenko et al., 2008), принцип работы которых основан на ДКП. Кодер ADCT использует адаптивное разбиение изображения на блоки различного размера и контекстное кодирование. Кодер AGU использует несколько иную схему обработки коэффициентов ДКП и работает с блоками изображения фиксированного размера  $32 \times 32$  пиксела. Как и для ADCT, используется контекстное кодирование квантованных ДКП-коэффициентов, а также деблокинг после декомпрессии.

Для этих кодеров управляющим параметром является ШК. Оптимальный ШК, при котором наблюдается максимальный эффект подавления помех в соответствии с критериями  $СКО_{ш}^{ЭТ}$  или MSSIM, можно определить, сжимая тестовые изображения и варьируя значения параметра, управляющего сжатием, в широком диапазоне (например, значения ШК нами варьировались от 1 до 100) (рис. 2 и 3).

Как видно из зависимостей, приведенных на рис. 2, в большинстве случаев для используемых метрик увеличение ШК сначала приводит к росту  $СКО_{ш}^{ЭТ}$  (уменьшению MSSIM), но при дальнейшем возрастании ШК имеет место уменьшение и минимум  $СКО_{ш}^{ЭТ}$  (увеличение и максимум MSSIM), соответствующие ОПТ. При этом значения  $СКО_{ш}^{ЭТ}$  в ОПТ могут быть примерно в 2 раза меньше, чем  $СКО_{ш}^{ЭТ}$  при ШК = 1. Анализируя зависимости, приведенные на рис. 2, можно также прийти к выводу, что при рассматриваемых параметрах шума ОПТ в соответствии с метриками  $СКО_{ш}^{ЭТ}$  и MSSIM наблюдается для значения ШК порядка 40. При этом для изображений с малым количеством текстурных участков (Lenna, Peppers) значения  $СКО_{ш}^{ЭТ}$  значительно ниже (а MSSIM заметно выше), чем для высокотекстурных (Airfield, Baboon). Соответственно для таких изображений наблюдается более высокий эффект фильтрации. Иными словами, ОПТ более “ярко выражена” для простых изображений (Peppers, Lenna, Barbara). С увеличением количества текстурных объектов и границ на изображении ОПТ имеет менее выраженный характер (изображение Airfield) или может вообще отсутствовать (изображение Baboon).

На рис. 3 представлены зависимости значений метрик  $СКО_{ш}^{ЭТ}$  и MSSIM от ШК для кодера ADCT. Видно, что для кодера ADCT сохраняются характерные для кодера AGU зависимости. Но для кодера ADCT ОПТ находится при значении ШК,

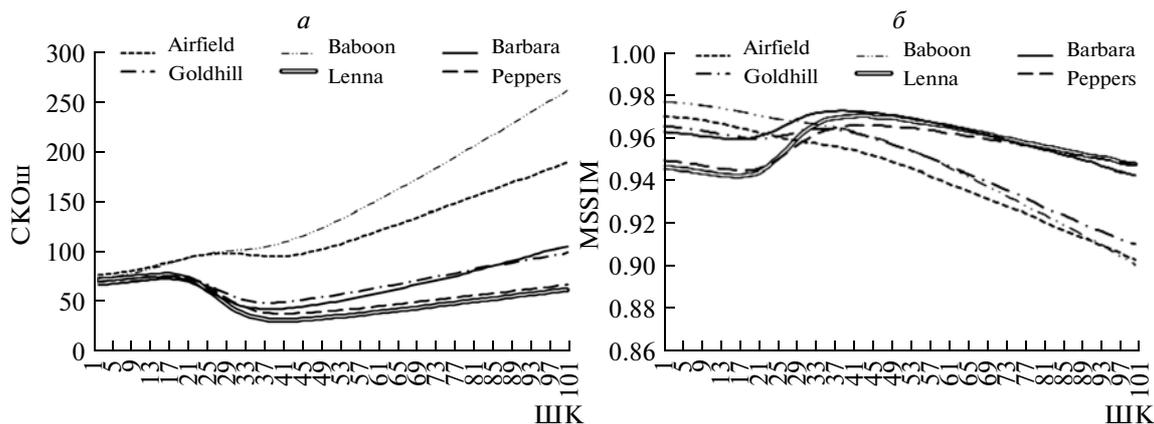


Рис. 2. Зависимости метрик (а) и MSSIM (б) от ШК для тестовых изображений, сжатых кодером AGU при  $\sigma_a^2 = 20$ ,  $k = 0.4$ .

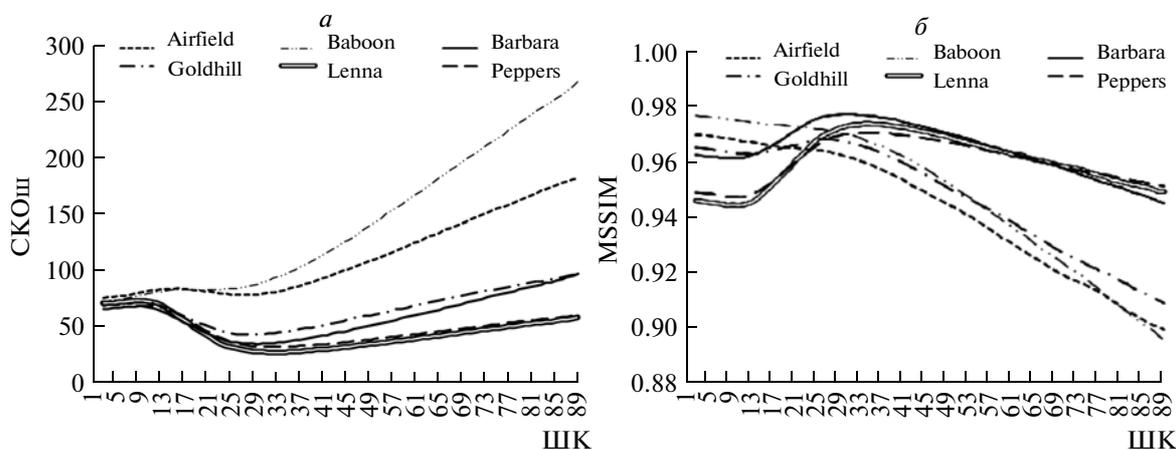


Рис. 3. Зависимости значений (а) и MSSIM (б) от ШК для тестовых изображений, сжатых кодером ADCT, при  $\sigma_a^2 = 20$ ,  $k = 0.4$ .

близком к 33, что несколько меньше, чем оптимальный ШК для AGU.

В табл. 1 представлены значения ШК для ОПТ ( $ШК_{ОПТ}$ ) и полученные для ОПТ значения КС ( $КС_{ОПТ}$ ) для кодера AGU. При  $k = 1$ ,  $\sigma_a^2 = 20$  значения  $ШК_{ОПТ}$  лежат в пределах от 51 до 58, а при  $k = 0.2$ ,  $\sigma_a^2 = 20$  значения  $ШК_{ОПТ}$  существенно меньше и лежат в пределах от 24 до 31. Поэтому можно предположить, что  $ШК_{ОПТ}$  зависит как от свойств самого изображения (в меньшей степени), так и от свойств (уровня) помех. При чисто аддитивных помехах в ряде работ предложено устанавливать шаг квантования как  $4.5\sigma_a$ . При сигнално-зависимых помехах можно для тестовых изображений рассчитать эквивалентную дисперсию помех в виде

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (I_{ij} - I_{ij}^{ист})^2 / IJ = \\ &= \sigma_a^2 + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (I_{ij}^{ист} k) / IJ. \end{aligned} \quad (5)$$

Рассчитаем шаг квантования  $ШК_B$  как  $4.5\sigma$  и проверим, какие значения КС ( $КС_B$ ) и метрик при этом получаются. Значения  $\sigma^2$ ,  $ШК_B$  и  $КС_B$  представлены в табл. 1. Как показывает анализ, вычисленные значения параметра  $ШК_B$  и полученные значения  $КС_B$  с небольшой погрешностью соответствуют оптимальным параметрам сжатия. С возрастанием уровня помех для простых изображений отмечается немного заниженное значение  $ШК_B$  относительно  $ШК_{ОПТ}$ , но при этом все равно наблюдается попадание в окрест-

**Таблица 1.** Сжатие кодером AGU в области ОРТ при  $k = 1, k = 0.2$  и  $\sigma_a^2 = 20$

Изображение	$k = 1, \sigma_a^2 = 20$						$k = 0.2, \sigma_a^2 = 20$					
	$I_{cp}$	$\sigma^2$	КС <sub>B</sub>	КС <sub>ОРТ</sub>	ШК <sub>B</sub>	ШК <sub>ОРТ</sub>	$I_{cp}$	$\sigma^2$	КС <sub>B</sub>	КС <sub>ОРТ</sub>	ШК <sub>B</sub>	ШК <sub>ОРТ</sub>
Airfield	143	163	12.25	12.5	57.45	58	143	49	6.61	6.5	31.39	31
Baboon	129	149	9.27	8.1	54.93	51	130	46	5.71	4.58	30.50	24
Barbara	112	132	18.00	20.8	51.70	55	112	42	11.81	11.60	29.33	29
Goldhill	То же	То же	20.90	26.0	51.70	56	112	То же	11.54	11.29	29.31	То же
Lenna	124	144	31.11	35.0	54.00	57	124	45	18.01	19.15	30.13	31
Peppers	120	140	25.95	33.6	53.24	58	120	44	24.83	16.06	29.88	То же

ность ОРТ. Так как в предложенной процедуре ШК зависит от уровня помех, то соответственно с их увеличением КС тоже увеличивается.

Таким образом, имеется возможность автоматически сжимать изображения в окрестности ОРТ, если имеются достаточно точные оценки  $\sigma^2$ . Оценить эту величину можно как

$$\hat{\sigma}^2 = \hat{\sigma}_a^2 + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (I_{ij} \hat{k}) / IJ,$$

где  $\hat{\sigma}_a^2$  и  $\hat{k}$  – оценки параметров сигнално-зависимых помех. Поэтому на практике возникает необходимость их определения непосредственно по обрабатываемому изображению и, желательно, в автоматическом режиме.

Для случая смеси пуассоновского и аддитивного шумов (т.е. модели (1)) существует метод (Абрамов, 2011; Лукин и др., 2012), позволяющий вычислять параметры шума автоматически. Он основан на вписывании регрессионной прямой по скаттерограмме пар локальных оценок дисперсии и среднего, вычисленных по детектированным однородным участкам изображения. Ордината точки пересечения вписанной прямой с осью  $Y$  определяет оценку дисперсии аддитивной компоненты  $\sigma_a^2$ , а наклон прямой – коэффициент усиления пуассоновского шума  $k$ .

Существует еще один подход к методу сжатия изображений в окрестности ОРТ. Перед сжатием к изображению применяется гомоморфное преобразование на основе прямого обобщенного преобразования Энскомба (ОПЭ) (Murtagh et al., 2001), разработанное специально для случая наличия на изображении сложных помех

$$I_{ij}^{энс} = 2/k(kI_{ij} + 3/8k^2 + \sigma_a^2)^{1/2}. \quad (6)$$

Применение ОПЭ позволяет на основе имеющихся или полученных автоматически оценок параметров смешанного шума преобразовать смесь квазипуассоновского и аддитивного шума в чисто аддитивный с фиксированной дисперсией,

равной 1. Однако применение ОПЭ (6) к изображению приводит к уменьшению динамического диапазона его представления и к дополнительным ошибкам квантования, поскольку многие используемые кодеры разработаны таким образом, что сжимаемые изображения должны быть представлены как массив 8-битных целых чисел. Чтобы минимизировать ошибки, обусловленные квантованием при выполнении прямого и обратного ОПЭ, нами применялась операция приведения динамического диапазона изображения к 8-битному (0–255) виду

$$G_{ij}^p = \left[ X(I_{ij}^{энс} - I_{мин}^{энс}) \right], \quad (7)$$

где  $X = 255 / (I_{макс}^{энс} - I_{мин}^{энс})$ ;  $I_{макс}^{энс}$ ,  $I_{мин}^{энс}$  – максимальное и минимальное значения динамического диапазона изображения после ОПЭ;  $[ \cdot ]$  – операция округления до ближайшего целого числа.

Как отмечалось ранее, после применения прямого ОПЭ (6) получаем  $\sigma^2 \approx 1$ . Поэтому после последующего растяжения динамического диапазона (7) имеем дисперсию помех  $\sigma_{ОПЭ}^2 \approx X^2$ . В соответствии с рекомендациями (Ропотаренко et al., 2006) для аддитивных помех значение ШК при последующем сжатии в окрестности ОРТ определяется как  $4.5X$ . После декодирования к изображению применялась операция, обратная (7),

$$G_{ij}^{ip} = \left[ G_{ij}^p / X + I_{мин}^{энс} \right]. \quad (8)$$

Для возвращения динамического диапазона изображения в исходные пределы применялось обратное ОПЭ

$$I_{ij}^{энс.обр} = (G_{ij}^{ip} / 2)^2 k - 3/8k - \sigma_a^2 / k. \quad (9)$$

Анализ показал, что незначительные ошибки, возникающие в результате нелинейности преобразований и операций округления, не приводят к существенным искажениям.

При данном подходе также обеспечивается попадание ШК<sub>B</sub> в окрестность ШК<sub>ОРТ</sub> для разных значений интенсивности шума (табл. 2). Из анализа данных в табл. 2 также видно, что при рас-

**Таблица 2.** Сжатие кодером AGU в области ОПТ с применением ОПЭ

Изображение	$k = 1, \sigma_a^2 = 20$					$k = 0.2, \sigma_a^2 = 20$				
	$X$	КС <sub>В</sub>	КС <sub>ОПТ</sub>	ШК <sub>В</sub>	ШК <sub>ОПТ</sub>	$X$	КС <sub>В</sub>	КС <sub>ОПТ</sub>	ШК <sub>В</sub>	ШК <sub>ОПТ</sub>
Airfield	10.55	11.39	10.15	47.49	45	6.45	6.47	6.76	29.03	30
Baboon	То же	8.97	6.96	То же	40	6.85	5.66	5.61	30.81	То же
Barbara	11.01	18.48	17.70	49.54	49	6.86	11.81	11.00	30.88	29
Goldhill	10.84	20.07	20.00	48.79	48	6.71	11.13	10.42	30.20	То же
Lenna	10.65	28.78	30.12	47.93	52	7.13	17.28	18.55	32.11	33
Peppers	То же	24.83	32.65	47.49	54	6.67	13.25	15.40	30.03	31

смаатриваемом подходе при различных уровнях помех наблюдается приемлемая точность попадания в ОПТ. Сравнение описанных выше методов, проведенное с учетом визуального качества (согласно метрикам MSSIM и PSNR-HVS-M) и достигаемых КС, может быть выполнено на основе данных, приведенных в табл. 3, 4. Метод без использования ОПЭ обозначен БВС, соответственно с применением ОПЭ—ВС.

Исходя из анализа данных, полученных для кодера AGU (табл. 3), методы БВС и ВС обеспечивают сравнимые результаты в плане значений КС и метрик СКО<sub>ш</sub><sup>эт</sup>, MSSIM, PSNR-HVS-M при малых интенсивностях шума. С увеличением интенсивности шума наблюдается небольшое преимущество метода ВС, согласно метрикам СКО<sub>ш</sub><sup>эт</sup>, MSSIM и PSNR-HVS-M, при небольшом снижении достигаемого КС.

Исходя из зависимостей, приведенных на рис. 3, и предложенной выше методики выбора ШК<sub>В</sub> для обеспечения автоматического сжатия кодером ADCT в области ОПТ, ШК<sub>В</sub> рекомендуется устанавливать равным  $3.5X$  для метода на основе ОПЭ и равным  $3.5\sigma$  для метода без использования вариационно-стабилизирующего преобразования. Результаты приведены в табл. 4.

Из анализа приведенных в табл. 3 и 4 данных видно, что кодер ADCT обеспечивает лучшее визуальное качество сжатых изображений по сравнению с AGU при небольшом снижении КС.

При этом для сложных изображений обеспечивается более заметное улучшение визуального качества, согласно метрикам PSNR-HVS-M (улучшение до 1.5 дБ) и MSSIM (до 0.08), чем для простых изображений (увеличение PSNR-HVS-M до 1 дБ и MSSIM до 0.04). Значение СКО<sub>ш</sub><sup>эт</sup>, полученные для кодера ADCT, меньше на 5–17% по сравнению с соответствующими значениями для кодера AGU. Такое улучшение достигается благодаря адаптивности кодера ADCT к контенту изображения за счет использования схемы разбиения.

Однако оптимизация схемы разбиения требует дополнительных затрат, поэтому быстрое действие кодера ADCT заметно ниже, чем для AGU. Таким образом, имеется возможность выбрать процедуру автоматического сжатия, которая в любом случае предусматривает оценивание характеристик помех вслепую, но может отличаться в используемом кодере и выражениями для установки его параметров. Вопрос о том, применять ли ОПЭ, будет обсужден позднее.

#### ПРОЦЕДУРЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО СЖАТИЯ НА ОСНОВЕ ДВП

Наряду с методами сжатия на основе ДКП, широко используются и методы сжатия изображений на основе дискретного вейвлет-преобразования (Чобану, 2009; Chang et al., 2000). Одними из наиболее распространенных кодеров на основе ДВП являются JPEG2000 (Чобану, 2009; Taubman, Marcellin, 2002) и его альтернативная реализация SPIHT (Чобану, 2009; Said, 1996). Специфика многих методов сжатия на основе ДВП состоит в том, что параметром, управляющим степенью сжатия, является bpp (bits per pixel — количество бит в сжатом изображении на один пиксел исходного изображения). Задавая bpp, можно варьировать КС, который для обычного 8-битного представления данных равен  $8\text{bpp}$ .

Прежде всего, покажем, что и для методов сжатия на основе ДВП могут иметь место ОПТ для разных критериев. На рис. 4 представлены зависимости значений метрик СКО<sub>ш</sub><sup>эт</sup> и MSSIM от управляющего параметра для шести тестовых изображений, сжатых кодером JPEG2000 без использования ВСП. Рассмотрен случай сигнально-зависимых помех с  $\sigma_a^2 = 20$ ,  $k = 1$ . Очевидно, что для большинства тестовых изображений зависимости СКО<sub>ш</sub><sup>эт</sup> от bpp имеют минимумы (или, по крайней мере, большие плоские участки). Большинство зависимостей MSSIM от bpp имеют максимумы, причем ОПТ  $\text{bpp}_{\text{ОПТ}}$  тем меньше, чем менее сложным является сжимаемое изображение —

Таблица 3. Сравнение эффективности методов сжатия в окрестности ОПТ для кодера AGU

Изображение	Параметры шума	Метод	ШК <sub>В</sub>	СКО <sub>ш</sub> <sup>ЭТ</sup>	КС	MSSIM	PSNR-HVS-M
Airfield	$k = 0.2$	БВС	31.39	71.57	6.61	0.967	32.01
		ВС	29.03	70.50	6.47	0.966	32.02
	$k = 0.4$	БВС	39.57	93.37	8.19	0.955	30.03
		ВС	34.94	91.85	7.89	0.955	30.07
	$k = 1$	БВС	57.48	138.67	12.27	0.931	27.00
		ВС	47.49	134.34	11.39	0.932	27.15
Baboon	$k = 0.2$	БВС	30.50	76.81	5.71	0.974	32.59
		ВС	30.81	75.63	5.66	0.974	32.66
	$k = 0.4$	БВС	38.15	105.01	6.76	0.965	30.48
		ВС	35.13	103.11	6.63	0.965	30.52
	$k = 1$	БВС	55.06	168.93	9.31	0.943	27.17
		ВС	47.49	164.76	8.97	0.944	27.35
Barbara	$k = 0.2$	БВС	29.33	31.06	11.81	0.979	34.07
		ВС	30.88	30.93	11.81	0.979	34.11
	$k = 0.4$	БВС	36.27	40.70	13.89	0.972	32.38
		ВС	36.24	40.47	13.85	0.973	32.44
	$k = 1$	БВС	51.79	65.24	18.05	0.958	29.65
		ВС	49.64	62.22	18.48	0.961	29.74
Goldhill	$k = 0.2$	БВС	29.31	37.45	11.54	0.973	33.13
		ВС	30.20	36.88	11.13	0.974	33.25
	$k = 0.4$	БВС	36.25	47.07	14.48	0.964	31.34
		ВС	35.65	45.62	13.77	0.966	31.57
	$k = 1$	БВС	51.74	67.28	20.93	0.946	28.84
		ВС	48.79	64.01	20.07	0.949	29.03
Lenna	$k = 0.2$	БВС	30.13	23.70	18.01	0.976	34.47
		ВС	32.11	23.16	17.28	0.977	34.61
	$k = 0.4$	БВС	37.55	29.78	21.92	0.969	32.79
		ВС	37.11	28.86	20.56	0.971	32.97
	$k = 1$	БВС	54.02	42.96	31.13	0.957	30.29
		ВС	47.93	40.70	28.78	0.960	30.58
Peppers	$k = 0.2$	БВС	29.88	29.76	14.49	0.971	34.05
		ВС	30.03	29.49	13.95	0.972	34.09
	$k = 0.4$	БВС	37.16	36.69	18.45	0.965	32.52
		ВС	34.94	35.65	17.33	0.966	32.58
	$k = 1$	БВС	53.33	51.67	26.05	0.951	30.00
		ВС	47.49	49.51	24.83	0.953	30.03

наименьшее значение  $bpr_{\text{ОПТ}}$  наблюдается для тестового изображения Peppers.

Аналогичные зависимости для кодера SPIHT приведены на рис. 5. Сравнение графиков на рис. 4а и 5а, а также 4б и 5б показывает, что зависимости для одного и того же тестового изображения мало отличаются. Таким образом, можно утверждать, что ОПТ могут иметь место и для методов сжатия

на основе ДВП. Для процедур сжатия с использованием ВСП (6) и (7) получены аналогичные зависимости. Тогда вопрос заключается в том, каким образом можно автоматически обеспечить сжатие изображений в окрестности ОПТ?

Обеспечить автоматическое сжатие изображений, искаженных помехами, при отсутствии эталона, т.е. на практике, в области ОПТ для рассмат-

**Таблица 4.** Сравнение эффективности методов сжатия в окрестности ОПТ для кодера ADCT

Изображение	Параметры шума	Метод	ШК <sub>в</sub>	СКО <sub>ш</sub> <sup>ЭТ</sup>	КС	MSSIM	PSNR-HVS-M
Airfield	$k = 0.2$	БВС	24.42	59.02	6.01	0.972	33.24
		ВС	22.58	58.48	5.87	0.972	33.20
	$k = 0.4$	БВС	30.78	78.09	7.23	0.962	31.21
		ВС	27.17	76.56	6.95	0.962	31.24
	$k = 1$	БВС	44.71	119.85	9.90	0.940	28.08
		ВС	36.94	115.61	9.39	0.941	28.23
Baboon	$k = 0.2$	БВС	23.72	61.83	5.02	0.979	34.02
		ВС	23.96	60.89	4.98	0.979	34.08
	$k = 0.4$	БВС	29.67	85.75	5.86	0.971	31.76
		ВС	27.32	83.91	5.77	0.971	31.85
	$k = 1$	БВС	42.82	141.75	7.79	0.951	28.39
		ВС	36.94	138.12	7.54	0.953	28.54
Barbara	$k = 0.2$	БВС	22.81	26.39	9.92	0.982	35.31
		ВС	24.02	26.14	9.89	0.983	35.39
	$k = 0.4$	БВС	28.21	35.06	11.39	0.977	33.57
		ВС	28.19	34.72	11.35	0.977	33.58
	$k = 1$	БВС	40.28	57.60	14.14	0.963	30.66
		ВС	38.61	55.40	14.24	0.965	30.78
Goldhill	$k = 0.2$	БВС	22.80	32.84	9.18	0.976	34.24
		ВС	23.49	32.19	9.05	0.977	34.40
	$k = 0.4$	БВС	28.19	42.71	10.94	0.968	32.39
		ВС	27.73	40.65	10.76	0.970	32.61
	$k = 1$	БВС	40.24	63.89	14.61	0.950	29.64
		ВС	37.95	59.35	14.34	0.955	29.93
Lenna	$k = 0.2$	БВС	23.43	21.93	13.28	0.978	35.38
		ВС	24.98	21.30	12.90	0.979	35.54
	$k = 0.4$	БВС	29.21	28.32	15.32	0.972	33.77
		ВС	28.87	26.92	14.82	0.974	33.98
	$k = 1$	БВС	42.02	43.00	19.45	0.959	31.22
		ВС	37.28	39.79	19.12	0.962	31.44
Peppers	$k = 0.2$	БВС	23.24	26.24	11.64	0.976	35.14
		ВС	23.35	25.49	11.36	0.976	35.29
	$k = 0.4$	БВС	28.90	33.09	13.88	0.970	33.53
		ВС	27.17	31.63	13.33	0.971	33.67
	$k = 1$	БВС	41.48	50.05	17.42	0.955	30.88
		ВС	36.94	46.31	16.93	0.959	31.14

риваемых кодеров на основе ДВП сложнее, чем для методов сжатия на основе ДКП. Для выполнения автоматического сжатия воспользуемся особенностями поведения кривых  $СКО_{тр}$  и  $СКО_{ш}^{ЭТ}$  от  $bpp$ . На рис. 6 для изображений Airfield и Barbara приведены обе эти зависимости. Предположим, что  $\sigma^2$  априорно известно или оценено

с приемлемой точностью ( $\sigma^2 = 163$  для случая на рис. 6а и 132 для изображения на рис. 6б, эти уровни показаны горизонтальными линиями). Совместный анализ зависимостей  $СКО_{тр}$  и  $СКО_{ш}^{ЭТ}$  от  $bpp$  на каждом из рисунков показывает, что  $СКО_{ш}^{ЭТ}$  близко к минимальному значению для такого  $bpp$ , где  $СКО_{тр}$  равно  $\sigma^2$ .

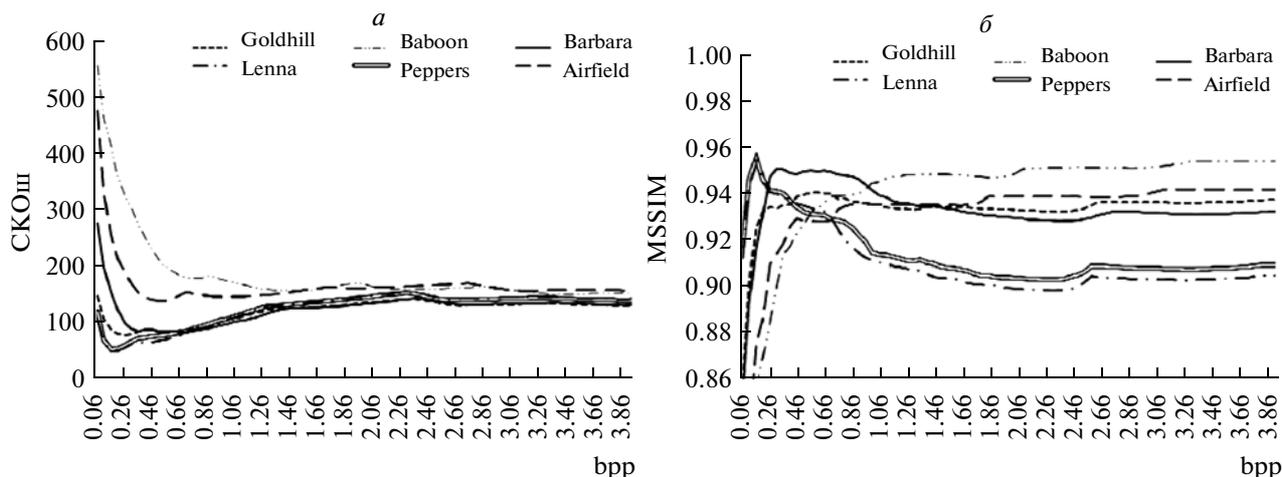


Рис. 4. Зависимости значений (а) и MSSIM (б) от bpp для тестовых изображений, сжатых кодером JPEG2000, при  $\sigma_a^2 = 20$ ,  $k = 1$ .

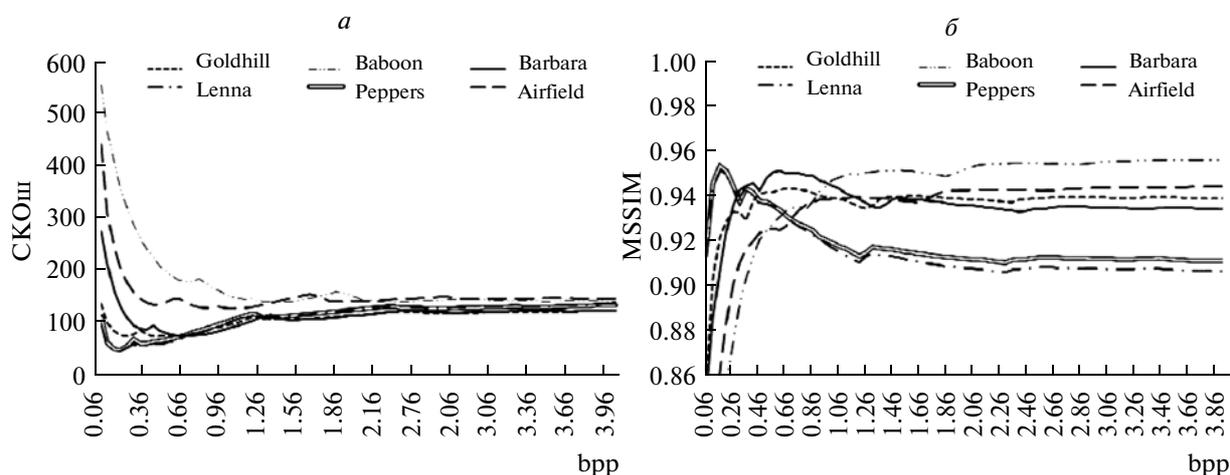


Рис. 5. Зависимости значений (а) и MSSIM (б) от bpp для тестовых изображений, сжатых кодером SPIHT, при  $\sigma_a^2 = 20$ ,  $k = 1$ .

Напомним, что на практике нет возможности определить  $SKO_{ш}^{ЭТ}$ , но есть возможность рассчитать  $SKO_{тр}$  для сжатого и затем декодированного изображения. Таким образом, имеется возможность реализовать итерационную процедуру сжатия, для которой на нулевом шаге выполняется сжатие с некоторым фиксированным  $bpp_0$ , а затем выполняется декодирование и определяется  $SKO_{тр0}$ . Это значение сравнивается с  $\sigma^2$ ; если  $SKO_{тр0}$  меньше  $\sigma^2$ , то на следующем шаге задается  $bpp_1 = bpp_0 - \delta bpp$ , где  $\delta bpp$  – шаг изменения bpp. Если же  $SKO_{тр0}$  больше  $\sigma^2$ , то для следующей итерации используют  $bpp_1 = bpp_0 + \delta bpp$ . Рекомендованной исходной точкой для запуска процедуры является  $bpp_0 = 1.6$ , а  $\delta bpp$  можно выбрать

порядка 0.2. Далее с помощью итеративной процедуры уточняются параметры сжатия, при которых достигается выполнение условия  $SKO_{трl} \approx \sigma^2$ , где  $SKO_{трl}$  – ошибка для  $l$ -й итерации. Обычно количество итераций не превышает 8. Для уточнения  $bpp_{ОПТ}$  на последнем этапе может использоваться линейная интерполяция. Более подробно итеративная процедура описана в работе (Ponomarenko et al., 2005a).

При использовании ВСП вместо  $\sigma^2$  в итерационной процедуре используется  $\sigma_{ОПЭ}^2 \approx X^2$ , а  $SKO_{тр}$  для изображения после сжатия и декодирования определяется относительно изображения  $\{G_{ij}^p\}$ . Рекомендации по выбору  $bpp_0$  и  $\delta bpp$  те же, что и ранее.

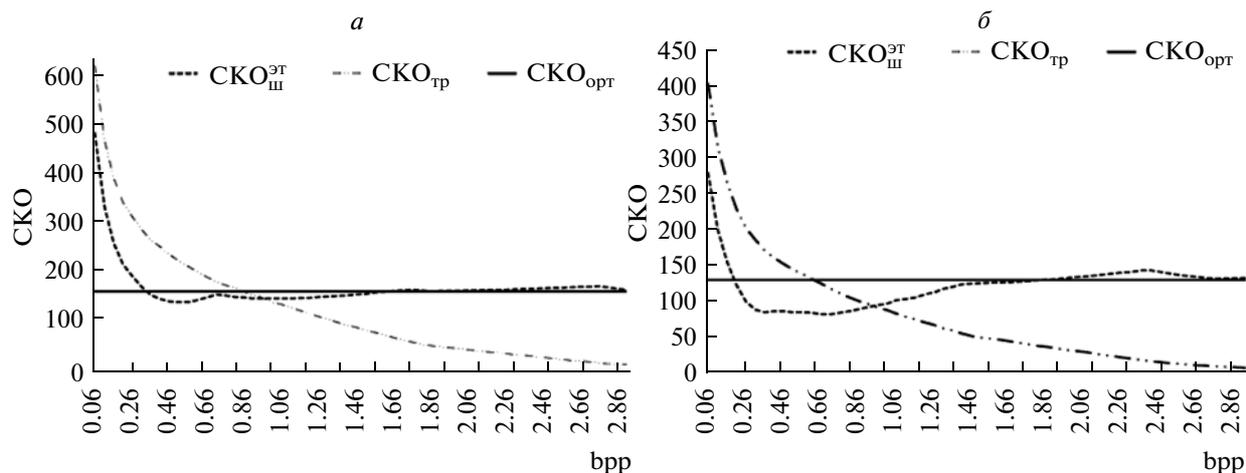


Рис. 6. Зависимости значений СКО от bpp для изображений Airfield (а) и Barbara (б), сжатых кодером JPEG2000, при  $\sigma_a^2 = 20, k = 1$ .

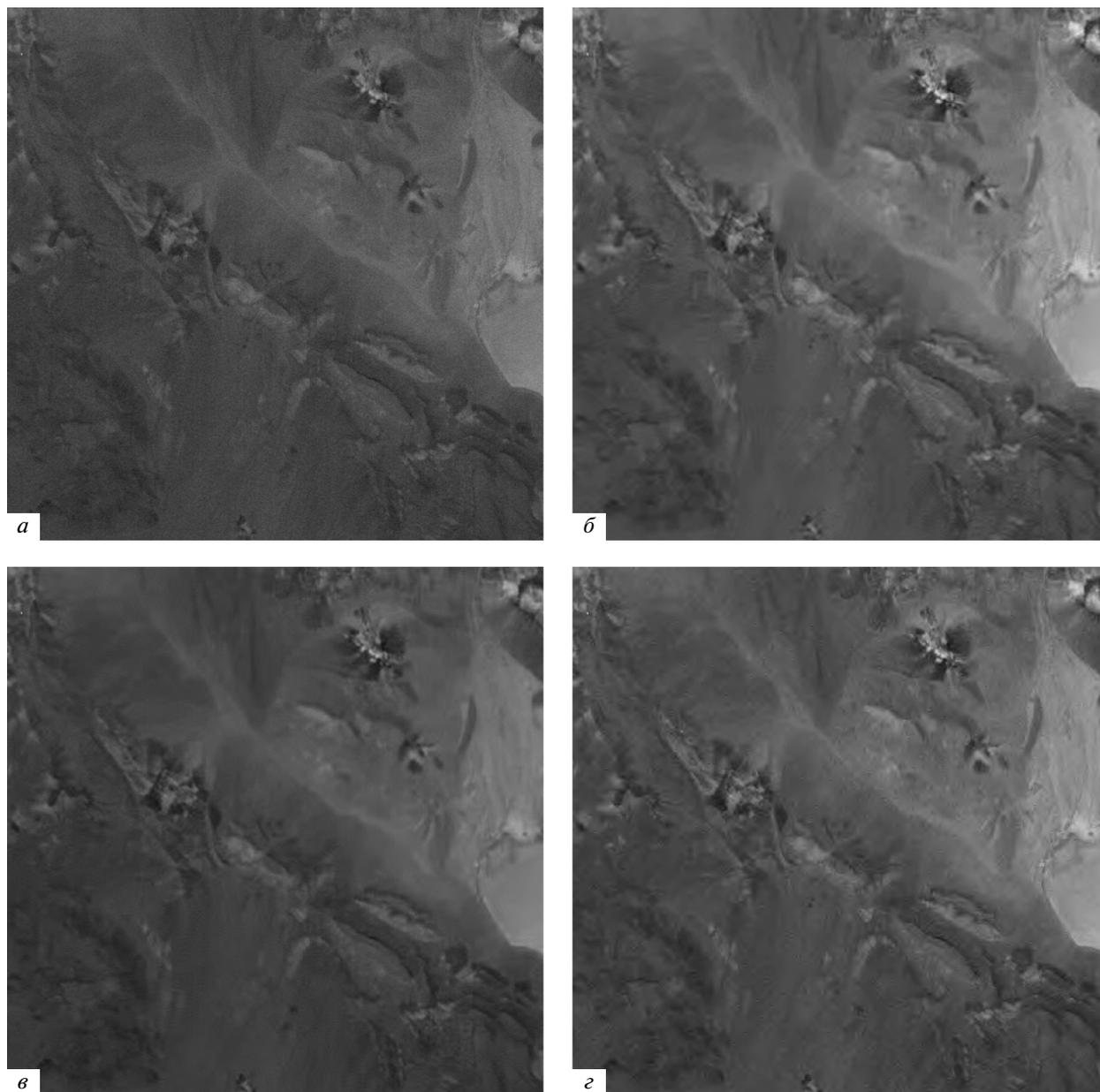
Рассмотрим некоторые результаты применения описанных выше процедур автоматического сжатия. Данные для JPEG2000 без вариационно-стабилизирующего преобразования приведены в табл. 5 для двух разных значений  $k$  и фиксированной дисперсии аддитивной компоненты. Очевидно, что выбранные в результате применения процедуры значения  $\text{bpp}_B$  и оптимальные значения  $\text{bpp}_{\text{ОРТ}}$ , полученные на основании анализа зависимостей  $\text{СКО}_{\text{ш}}^{\text{ЭТ}}$  от bpp, отличаются, причем значения  $\text{bpp}_B$  могут быть как заметно больше, так и немного меньше, чем значения  $\text{bpp}_{\text{ОРТ}}$ . В первом случае КС оказывается меньше, чем КС, который можно было бы достигнуть при более высокой точности автоматической процедуры. Во втором случае в сжатое изображение вносятся несколько большие искажения, чем было бы желательно. Тем не менее сжатие в обоих случаях осуществляется в окрестности ОРТ. Естественно, что чем меньше  $k$  и  $\sigma^2$ , тем меньше КС. Наибольшие значения КС достигаются для менее сложных изображений, а наименьшие — для наиболее сложных изображений (текстурного изображения Baboon).

Проведем сравнительный анализ для двух рассматриваемых подходов — с ВСП и без него. Результаты для кодера JPEG2000 приведены в табл. 6. Визуальное качество сжатых изображений для обоих подходов практически одинаковое. Но при этом использование ВСП позволяет несколько уменьшить  $\text{СКО}_{\text{ш}}^{\text{ЭТ}}$  при интенсивных помехах (см. данные для  $k = 1$ ) и достичь немного больших значений КС. Аналогичные выводы можно сделать из анализа данных, приведенных в табл. 7, для метода сжатия SPIHT. При этом SPIHT обеспечивает немного лучшие значения  $\text{СКО}_{\text{ш}}^{\text{ЭТ}}$  и КС, чем JPEG2000. Кроме того, имеется возможность сравнить данные для кодера SPIHT на основе ДВП (табл. 7) и ADCT на основе ДКП (табл. 4). Для одного и того же изображения при одинаковых характеристиках помех ADCT обеспечивает меньшие значения  $\text{СКО}_{\text{ш}}^{\text{ЭТ}}$  и немного большие значения КС, т.е. более эффективное сжатие.

ражений, а наименьшие — для наиболее сложных изображений (текстурного изображения Baboon).

Таблица 5. Сжатие кодером JPEG2000 в области ОРТ при  $k = 1, k = 0.2$  и  $\sigma_a^2 = 20$

Изображение	$k = 1, \sigma_a^2 = 20$						$k = 0.2, \sigma_a^2 = 20$					
	$I_{\text{ср}}$	$\sigma^2$	КС <sub>B</sub>	КС <sub>ОРТ</sub>	$\text{bpp}_B$	$\text{bpp}_{\text{ОРТ}}$	$I_{\text{ср}}$	$\sigma^2$	КС <sub>B</sub>	КС <sub>ОРТ</sub>	$\text{bpp}_B$	$\text{bpp}_{\text{ОРТ}}$
Airfield	143	163	9.56	15.73	0.84	0.51	143	49	5.47	6.37	1.47	1.26
Baboon	129	149	6.71	10.57	1.20	0.76	130	46	4.43	3.4	1.81	2.36
Barbara	112	132	12.93	11.33	0.63	0.71	112	42	8.62	11.29	0.94	0.71
Goldhill	112	132	14.43	13.22	0.56	0.61	112	42	8.23	6.12	0.98	1.31
Lenna	124	144	21.44	50.48	0.38	0.16	124	45	12.31	8.88	0.66	0.91
Peppers	120	140	18.60	51.12	0.44	0.16	120	44	10.72	22.4	0.75	0.36



**Рис. 7.** Исходное изображение в канале 222 гиперспектрального изображения Lunar Lake системы AVIRIS (а) и результаты его автоматического сжатия кодерами AGU без ВСП (б), ADCT с ВСП (в) и JPEG2000 без ВСП (г).

Таким образом, и для методов сжатия с потерями на основе ДВП имеется возможность осуществить автоматическую компрессию данных в окрестности ОРТ. Тот факт, что сделать это более сложно вследствие необходимости применять описанную выше итеративную процедуру, не означает, что сжатие на основе ДВП для рассматриваемого применения менее перспективно, чем сжатие на основе ДКП. Для кодеров на основе ДВП имеется принципиальная возможность управлять степенью сжатия путем изменения шага квантования коэффициентов вейвлет-преобразования. При этом возможно использовать разные

шаги квантования для разных уровней декомпозиции (Чобану, 2009; Chang et al., 2000). Вопрос о том, какой из алгоритмов является в этом плане наилучшим, будет предметом дальнейших исследований.

В двух последних разделах эффективность рассматриваемых методов сжатия анализировалась в предположении, что параметры шума  $k$  и  $\sigma_a^2$  точно оценены, что позволяет оценить  $\sigma^2 = \hat{\sigma}_a^2 + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (I_{ij}\hat{k})/IJ$  и выполнить соответствующее вариационно-стабилизирующее преобразо-

Таблица 6. Сравнение эффективности методов сжатия в окрестности ОПТ для кодера JPEG2000

Изображение	Параметры шума	Метод	bpp <sub>B</sub>	СКО <sub>ш</sub> <sup>ЭТ</sup>	КС	MSSIM	PSNR-HVS-M
Airfield	$k = 0.2$	БВС	1.47	65.39	5.47	0.973	33.74
		ВС	1.45	65.14	5.51	0.973	33.52
	$k = 0.4$	БВС	1.22	87.37	6.62	0.959	30.86
		ВС	1.14	84.80	7.05	0.958	30.82
	$k = 1$	БВС	0.84	151.60	9.56	0.936	27.84
		ВС	0.73	133.14	10.92	0.936	27.81
Baboon	$k = 0.2$	БВС	1.81	66.91	4.43	0.979	34.33
		ВС	1.69	69.04	4.76	0.977	33.58
	$k = 0.4$	БВС	1.53	92.90	5.23	0.968	31.32
		ВС	1.44	93.67	5.57	0.967	31.02
	$k = 1$	БВС	1.20	166.27	6.71	0.948	28.43
		ВС	1.03	160.92	7.79	0.949	28.08
Barbara	$k = 0.2$	БВС	0.94	38.35	8.62	0.977	34.42
		ВС	0.88	37.25	9.21	0.977	34.27
	$k = 0.4$	БВС	0.80	47.78	10.13	0.968	32.56
		ВС	0.70	45.90	11.40	0.971	32.47
	$k = 1$	БВС	0.63	86.04	12.93	0.950	29.37
		ВС	0.47	82.76	17.37	0.953	28.96
Goldhill	$k = 0.2$	БВС	0.98	43.06	8.23	0.973	34.05
		ВС	0.94	43.63	8.61	0.973	33.89
	$k = 0.4$	БВС	0.78	55.20	10.29	0.961	31.73
		ВС	0.67	49.30	11.94	0.963	31.66
	$k = 1$	БВС	0.56	85.72	14.43	0.941	28.92
		ВС	0.38	76.66	21.49	0.945	28.61
Lenna	$k = 0.2$	БВС	0.66	34.25	12.31	0.969	34.30
		ВС	0.63	29.73	12.90	0.970	34.38
	$k = 0.4$	БВС	0.53	37.54	15.16	0.956	32.37
		ВС	0.44	30.79	18.46	0.967	33.14
	$k = 1$	БВС	0.38	66.05	21.44	0.939	29.69
		ВС	0.19	49.84	43.08	0.953	29.42
Peppers	$k = 0.2$	БВС	0.75	38.97	10.72	0.966	34.32
		ВС	0.67	37.98	11.98	0.966	33.89
	$k = 0.4$	БВС	0.59	46.16	13.57	0.955	32.40
		ВС	0.50	39.49	16.20	0.958	32.43
	$k = 1$	БВС	0.44	76.55	18.60	0.937	29.69
		ВС	0.22	54.19	36.75	0.951	29.56

вание, если применяется сжатие с использованием ВСП. При этом влияние неточности оценок  $\hat{\sigma}_a^2$  и  $\hat{k}$  не принималась во внимание. Поэтому в будущем целесообразно провести дополнительные исследования, направленные на анализ точностных характеристик оценок  $\hat{\sigma}_a^2$  и  $\hat{k}$ , а также влияние неточности оценивания этих параметров на харак-

теристики предложенных выше автоматических процедур сжатия с потерями в окрестности ОПТ.

#### ПРИМЕР АВТОМАТИЧЕСКОГО СЖАТИЯ

Приведем пример автоматического сжатия одноканального изображения для гиперспектральных данных ДЗ, полученных системой AVIRIS.

Таблица 7. Сравнение эффективности методов сжатия в окрестности ОПТ для кодера SPIHT

Изображение	Параметры шума	Метод	bpp <sub>B</sub>	СКО <sub>ш</sub> <sup>ЭТ</sup>	КС	MSSIM	PSNR-HVS-M
Airfield	$k = 0.2$	БВС	1.41	60.40	5.69	0.972	33.59
		BC	1.39	59.58	5.75	0.971	33.59
	$k = 0.4$	БВС	1.16	84.02	6.92	0.960	30.90
		BC	1.09	86.09	7.31	0.957	30.44
	$k = 1$	БВС	0.80	136.70	10.04	0.936	28.11
		BC	0.69	127.32	11.64	0.936	27.85
Baboon	$k = 0.2$	БВС	1.77	62.33	4.53	0.978	34.51
		BC	1.66	66.73	4.83	0.976	33.70
	$k = 0.4$	БВС	1.48	92.03	5.39	0.968	31.32
		BC	1.39	93.67	5.75	0.967	30.97
	$k = 1$	БВС	1.16	151.70	6.92	0.950	28.74
		BC	1.00	153.90	8.00	0.948	28.28
Barbara	$k = 0.2$	БВС	0.97	35.70	8.26	0.978	34.92
		BC	0.92	41.20	8.68	0.975	33.95
	$k = 0.4$	БВС	0.83	50.35	9.66	0.969	32.39
		BC	0.72	46.13	11.13	0.973	32.60
	$k = 1$	БВС	0.63	82.71	12.80	0.951	29.80
		BC	0.48	87.32	16.52	0.952	29.27
Goldhill	$k = 0.2$	БВС	0.95	38.74	8.39	0.974	34.35
		BC	0.91	39.56	8.83	0.974	34.06
	$k = 0.4$	БВС	0.78	53.93	10.24	0.962	31.53
		BC	0.66	48.50	12.19	0.965	31.70
	$k = 1$	БВС	0.55	83.40	14.63	0.941	29.01
		BC	0.36	78.35	22.26	0.942	28.58
Lenna	$k = 0.2$	БВС	0.63	30.34	12.80	0.971	34.69
		BC	0.63	31.64	12.80	0.969	33.83
	$k = 0.4$	БВС	0.53	36.99	15.06	0.964	32.53
		BC	0.44	30.48	18.29	0.970	33.00
	$k = 1$	БВС	0.36	61.77	22.26	0.944	30.05
		BC	0.19	51.72	42.67	0.952	28.90
Peppers	$k = 0.2$	БВС	0.72	34.47	11.13	0.969	34.74
		BC	0.64	36.38	12.49	0.967	33.84
	$k = 0.4$	БВС	0.59	44.24	13.47	0.960	32.33
		BC	0.47	37.58	17.07	0.964	32.46
	$k = 1$	БВС	0.39	66.89	20.48	0.943	30.06
		BC	0.23	61.81	34.13	0.946	28.77

На рис. 7а приведено изображение в канале 222 реального изображения Lunar Lake. Шум на этом изображении достаточно хорошо заметен и имеет сигнально-зависимый характер (Uss et al., 2010). Для этого изображения характерен относительно узкий динамический диапазон. Для его представления достаточно 8 бит, хотя для большинства компонентных изображений гиперспектральных

данных ДЗ AVIRIS разность между максимальным и минимальным значениями имеет порядок тысяч и для их представления используют 16 бит.

Характеристики шума неизвестны, но они были оценены двумя различными автоматическими методами. Для метода, реализующего функцию Матлаба Robustfit устойчивого вписывания прямой в скаттерограмму локальных оценок диспер-

сии, получены значения  $\hat{\sigma}_a^2 = 7.09$  и  $\hat{k} = 0.381$  (Lukin et al., 2011). Если же используется метод устойчивого вписывания прямой по центрам кластеров с двойным взвешиванием (Lukin et al., 2011), то оценки соответственно равны  $\hat{\sigma}_a^2 = 5.91$  и  $\hat{k} = 0.345$ . Таким образом, для обоих методов оценки примерно одинаковы и можно считать, что  $\hat{\sigma}_a^2 \approx 6.5$  и  $\hat{k} \approx 0.363$ . Тогда получаем

$$\sigma^2 = \hat{\sigma}_a^2 + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (I_{ij} \hat{k}) / IJ = 29.16,$$

и для кодера AGU без ВСП ШК<sub>В</sub>, выбираемый как  $4.5\sigma$ , равен 21.94. Результат сжатия приведен на рис. 7б, КС = 45.51. Хорошо виден эффект фильтрации.

При использовании кодера ADCT с ВСП используемый ШК = 27.87, сжатое изображение приведено на рис. 7в, а КС = 23.08. Эффект фильтрации также хорошо заметен, но границы объектов и текстуры хорошо сохранены. При использовании кодера JPEG2000 достигаемый КС = 32.6, а полученное изображение приведено на рис. 7г. Шум также подавлен, но в некоторых местах сжатого изображения можно заметить небольшие артефакты.

Аналогичный анализ был проведен и для других каналов реального изображения Lunar Lake. Для каналов с низким отношением сигнал-шум получены аналогичные указанным выше значения КС (от примерно 20 до 35), для каналов с высоким ОСШ значения КС в 2–3 раза меньше, от 7 до примерно 20.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены возможные подходы к автоматическому сжатию изображений ДЗ, искаженных сигнально-зависимыми помехами. Предложенные процедуры предусматривают автоматическое оценивание характеристик помех на первом этапе. Затем сжатие в окрестности оптимальной рабочей точки может выполняться как с использованием соответствующих вариационно-стабилизирующих преобразований, так и без них. В первом случае достигается несколько лучшее сжатие, особенно при явно выраженной зависимости дисперсии помех от локального среднего. Кроме того, использование ВСП обеспечивает лучшие предпосылки для применения трехмерного сжатия с учетом коррелированности изображений в соседних каналах (Lukin, 2009; Ponomarenko et al., 2010б). Благодаря ВСП, удается обеспечить практически одинаковые значения дисперсии аддитивных помех во всех компонентных изображениях, сжимаемых при использовании трехмерных кодеров совместно (Ponomarenko et al., 2010б).

Тогда появляется возможность одновременно достичь сжатия в окрестности ОРТ для всех компонентных изображений с установкой единого шага квантования. Авторы ожидают, что аналогично (Ponomarenko et al., 2010б) в этом случае может быть достигнут в 2–3 раза больший КС, чем при поканальном сжатии. Разработка соответствующих алгоритмов является направлением дальнейших исследований.

Автоматические процедуры разработаны как для кодеров на основе ДКП, так и ДВП. Для сжатия на основе ДВП процедуры более сложны, но в перспективе представляется возможным разработать неитеративные методы сжатия на основе ДВП. Дополнительное внимание в будущем необходимо уделить и анализу влияния точности оценки параметров сигнально-зависимых помех на эффективность сжатия с потерями. Однако очевидно, что сжатие с потерями на основе предложенных автоматических процедур компрессии в окрестности ОРТ способно обеспечить КС в десятки раз выше значений КС при использовании методов сжатия данных ДЗ без потерь.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 12-07-00762-а и 12-07-00388-а.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабкин В.Ф., Книжный И.М., Хрекин К.Е.* Сжатие многоспектральных изображений без потерь или с ограниченными потерями // Докл. сем. "Современные и перспективные разработки и технологии в космическом приборостроении". М.: ИКИ РАН, 2004. С. 87–94.
- Бехтин Ю.С.* Поиск оптимального распределения бит при сжатии данных зашумленных изображений на основе вейвлет-преобразования // Цифровая обработка сигналов. 2007. № 1. С. 17–24.
- Зряхов М.С., Кривенко С.С., Абрамов С.К., Пономаренко Н.Н., Лукин В.В.* Особенности сжатия изображений при сигнально-зависимых помехах // Авиационно-космическая техника и технология. Харьков: ХАИ, 2011. № 2/79. С. 87–95.
- Кривенко С.С., Лукин В.В., Зряхов М.С., Зеленский А.А.* Сжатие изображений дистанционного зондирования без визуально заметных искажений // Радиотехника. 2009. Т. 159. С. 248–254.
- Лукин В.В., Усс М.Л., Абрамов С.К., Чобану М.К.* Автоматическое определение характеристик помех на изображениях: методы и их точность // Тр. 14-й Межд. конф. "Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2012". М., 2012. Т. 2. С. 274–277.
- Лукин В.В., Февралев Д.В., Пономаренко Н.Н., Абрамов С.К.* Фильтрация цветных изображений: когда она необходима? // Радиотехніка та комп'ютерні системи. 2010. Т. 4. № 44. С. 65–74.
- Чобану М.К.* Многомерные многоскоростные системы обработки сигналов. М.: Техносфера, 2009. 480 с.
- Шовенгердт Р.А.* Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 594 с.

- Abramov S., Zabrodina V., Lukin V., Vozel B., Chehdi K., Astola J.* Methods for blind estimation of the variance of mixed noise and their performance analysis // Book Chapter in Numerical Analysis – Theory and Applications / Ed. J. Awrejcewicz. 2011. P. 49–70.
- Al-Chaykh O.K., Mersereau R.M.* Lossy compression of noisy images // IEEE Trans. Image Proc. 1998. V. 7. № 12. P. 1641–1652.
- Anscombe F.J.* The transformation of Poisson, binomial and negative-binomial data // Biometrika. 1948. V. 35. № 3–4. P. 246–254.
- Barducci A., Guzzi D., Marcoionni P., Pippi I.* CHRIS-Proba performance evaluation: signal-to-noise ratio, instrument efficiency and data quality from acquisitions over San Rossore (Italy) test site // Proc. 3-rd ESA CHRIS/Proba Workshop. 2005. 11 p.
- Blanes I., Zabala A., More G., Pons X., Serra-Sagrista J.* Classification of hyperspectral images compressed through 3D-JPEG2000 // Proc. LNAI. 2009. V. 5179. P. 416–423.
- Bo L.* Remote sensing image compression using two-dimensional oriented wavelet transform // Geosci. Rem. Sens. 2011. V. 49. № 1. P. 236–250.
- Chang S.G., Yu B., Vetterli M.* Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression // IEEE Trans. Image Process. 2000. V. 9. № 9. P. 1532–1546.
- Christophe E., Mailhes C., Duhamel P.* Hyperspectral image compression: Adapting SPIHT and EZW to anisotropic 3-D wavelet coding // IEEE Trans. Image Proc. 2008. V. 17. № 12. P. 2334–2346.
- Fevrale D., Lukin V., Ponomarenko N., Vozel B., Chehdi K., Kurekin A., Kwan L.* Classification of filtered multichannel images // Proc. SPIE/EUROPTO on Satellite Remote Sensing, Toulouse, France. 2010. SPIE 7830. 11 p.
- Foi A.* Pointwise shape-adaptive DCT image filtering and signal-dependent noise estimation // Thesis for the degree of Doctor of Technology; defense 05.12.2007. Tampere, Finland: Tampere University of Technology, 2007. 194 p.
- Kaarna A.* Compression of spectral images, Chapter 14 // Vision Systems: Segmentation and Pattern Recognition / Eds. G. Ohinata, A. Dutta. Vienna: I-Tech, 2007. P. 269–298.
- Kerekes J.P.* Hyperspectral imaging system modeling // Lincoln Laboratory J. 2003. V. 14. № 1. P. 117–130.
- Lim S.H.* Characterization of noise in digital photographs for image processing // Proc. Digital Photogr. I. SPIE 6069. 2006. P. 219–228.
- Liu C., Freeman W.T., Szeliski R., Kang S.B.* Noise estimation from a single image // Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition. 17–22 June 2006. N.Y., USA, 2006. P. 901–908.
- Lukin V.* Processing of multichannel RS data for environment monitoring // Proc. NATO Advanced Research Workshop on Geographical Information Processing and Visual Analytics for Environmental Security. July 2009. Trento, Italy: Springer Netherlands, 2009. P. 129–138.
- Lukin V., Abramov S., Ponomarenko N., Uss M., Zriakhov M., Vozel B., Chehdi K., Astola J.* Methods and automatic procedures for processing images based on blind evaluation of noise type and characteristics // SPIE J. Advanc. Rem. Sens. 2011.
- Lukin V., Ponomarenko N., Kurekin A., Lever K., Pogrebnyak O., Sanchez-Fernandez L.* Approaches to classification of multichannel images // Proc. CIAPR. Cancun, Mexico: Springer LNCS, 2006. V. 4225. P. 794–803.
- Lukin V., Ponomarenko N., Zriakhov M., Kaarna A., Astola J.* An automatic approach to lossy compression of AVIRIS hyperspectral data // Telecom. Radioengineer. 2010. V. 69. № 6. P. 537–563.
- Lukin V., Ponomarenko N., Zriakhov M., Zelensky A.* Quasi-optimal compression of noisy optical and radar images // Proc. SPIE Conf. Image and Signal Processing for Remote Sensing XII. Sweden: SPIE, 2006. V. 6365. 12 p.
- Lukin V., Zriakhov M., Krivenko S., Ponomarenko N., Miao Z.* Lossy compression of images without visible distortions and its applications // Proc. ICSP 2010. October 2010. Beijing, China, 2010. P. 694–697.
- Lukin V.V., Zriakhov M.S., Ponomarenko N.N., Kaarna A.* An automatic approach to lossy compression of images corrupted by Poisson noise // Proc. Microwaves, Radar and Remote Sensing Symp. MRRS-2008. Kiev, 2008. P. 139–142.
- Murtagh F.* Astronomical image and signal processing // IEEE Signal Proc. Magazine. 2001. V. 18. № 2. P. 30–40.
- Penna B., Tillo T., Magli E., Olmo G.* Transform coding techniques for lossy hyperspectral data compression // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2007. V. 45. № 5. P. 1408–1421.
- Ponomarenko N., Silvestri F., Egiazarian K., Carli M.* On between-coefficient contrast masking of DCT basis functions // Proc. 3-d Int. Workshop Video Processing and Quality Metrics. USA. 2007. 4 p. CD-ROM.
- Ponomarenko N., Krivenko S., Lukin V., Egiazarian K., Astola J.* Lossy compression of noisy images based on visual quality: A comprehensive study // EURASIP J. Adv. Signal Proc. 2010. № 976436. 13 p.
- Ponomarenko N.N., Lukin V.V., Egiazarian K.O.* Visually lossless compression of synthetic aperture radar images // Proc. ICATT. Kiev, Ukraine, 2011. 3 p. CD-ROM.
- Ponomarenko N.N., Lukin V.V., Egiazarian K., Astola J.* DCT based high quality image compression // Proc. 14th Scandinavian Conf. on Image Analysis. June 2005. Joensuu, Finland. 2005. V. 14. P. 1177–1185.
- Ponomarenko N., Lukin V., Egiazarian K., Astola J.* ADCT: A new high quality DCT based coder for lossy image compression // Proc. LNLA. Switzerland, 2008. 6 p. CD-ROM.
- Ponomarenko N., Lukin V., Zriakhov M., Egiazarian K.* Lossy compression of images with additive noise // Proc. Int. Conf. Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems. September 2005. Antwerpen, Belgium, 2005. P. 381–386.
- Ponomarenko N., Lukin V., Zriakhov M., Egiazarian K., Astola J.* Estimation of accessible quality in noisy image compression // Proc. EUSIPCO. Italy. 2006. 4 p. CD-ROM.
- Ponomarenko N., Lukin V., Zriakhov M., Kaarna A.* Preliminary automatic analysis of characteristics of hyperspectral AVIRIS images // Proc. MMET. Ukraine, 2006. P. 158–160.
- Ponomarenko N., Zriakhov M., Lukin V., Kaarna A.* Improved grouping and noise cancellation for automatic lossy compression of AVIRIS images // Proc. ACIVS. Springer, Heidelberg. LNCS-6475. Part II. December 2010. Australia, 2010. P. 261–271.
- Said A.* A new fast and efficient image codec based on the partitioning in hierarchical trees // IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technology. 1996. V. 6. P. 243–250.

*Shahnaz R., Walkup J.F., Krile T.F.* Image Compression in Signal-Dependent Noise // *Applied Optics*. 1999. V. 38. № 26. P. 560–5567.

*Taubman D., Marcellin M.* JPEG2000: Image compression fundamentals // *Standards and Practice*. Boston, USA: Kluwer, 2002.

*Uss M., Vozel B., Lukin V., Chehdi K.* Local Signal-Dependent Noise Variance Estimation from Hyperspectral Tex-

tural Images // *IEEE J. Selected Topics in Signal Proc.* 2010. V. 5. № 2. DOI: 10.1109/JSTSP.2010.2104312.

*Vozel B., Abramov S., Chehdi K., Lukin V., Ponomarenko N., Uss M.* Blind methods for noise evaluation in multi-component images // *Multivariate image processing*. ISTE Ltd, France, 2009.

*Wang Z., Simoncelli E.P., Bovik A.C.* Multi-scale structural similarity for image quality assessment // *IEEE Asilomar Conf. on Signals, Systems and Computers*. 2003. V. 6. 5 p.

## **Procedures for Automatic Image Compression in Remote Sensing of the Earth for Signal Dependent Noise Working in the Vicinity of Optimal Operating Point and their Effectiveness**

**A. N. Zemlyachenko<sup>1</sup>, R. A. Kozhemyakin<sup>1</sup>, S. K. Abramov<sup>1</sup>, V. V. Lukin<sup>1</sup>, M. K. Tchobanou<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *N.E. Zhukovsky National Aerospace University, Kharkov, Ukraine*

<sup>2</sup> *National Research University "MEI", Moscow*

Approaches to lossy compression of single-channel remote sensing (RS) images corrupted by signal-dependent noise are considered. Analysis is carried out for coders based on discrete cosine and wavelet transforms. Efficiency comparison is performed according to several criteria for both applying coders to images directly and with using variance-stabilizing transforms. It is shown that difference in performance is not essential although variance-stabilizing transforms possess certain advantages for 3D methods of multichannel RS data compression. Automatic procedures of compression in the neighborhood of optimal operation point are proposed. Their advantages and drawbacks are studied.

**Keywords:** lossy image compression, remote sensing, signal-dependent noise

## МЕТОД ОЦЕНКИ НЕОДНОРОДНОСТИ РЕЛЬЕФА ВЫДЕЛЕННОЙ ОБЛАСТИ

© 2013 г. А. И. Иоффе

Геологический институт РАН, Москва

E-mail: ai.ioffe39@gmail.com

Поступила в редакцию 20.09.2013 г.

Предлагается новый параметр и простой альтернативный метод оценки неоднородности поверхности с использованием цифровых моделей рельефа. Этот метод может быть полезен для интегральной характеристики выделенной области и позволяет проводить количественное сравнение различных областей поверхности.

**Ключевые слова:** неоднородности поверхности, цифровая модель рельефа, геоморфологические структуры

DOI: 10.7868/S0205961413020048

Широкое распространение цифровых моделей рельефа (ЦМР) поверхности Земли позволяет проводить количественную оценку и использовать полученные данные для описания различных участков поверхности.

Попытки количественного описания неоднородности рельефа уже имели место. Так, Райли с соавторами (Riley et al., 1999) предложили ввести локальный топографический индекс расчлененности (ТИР). В работах (Grohmann et al., 2011; Glenn et al., 2006; Hofer et al., 2008) предложены другие подходы к оценке локальной неоднородности рельефа.

Мы предлагаем некоторый простой альтернативный метод оценки неоднородности рельефа, который может быть полезен для интегральной характеристики выделенной области и который позволяет проводить количественное сравнение различных областей поверхности.

Для оценки неоднородности рельефа некоторой области мы предлагаем использовать величину

$$IOR = n/N,$$

где  $n$  — число локальных максимумов рельефа в исследуемой области, а  $N$  — общее число элементов матрицы ЦМР, покрывающей эту область.

При этом мы имеем в виду следующее.

Рассматриваемой области соответствует матрица значений высот, определяемая соответствующей ЦМР

$$h_{ij} (1 \leq i \leq c, 1 \leq j \leq r),$$

где  $c$  — количество столбцов,  $r$  — количество строк матрицы ЦМР).

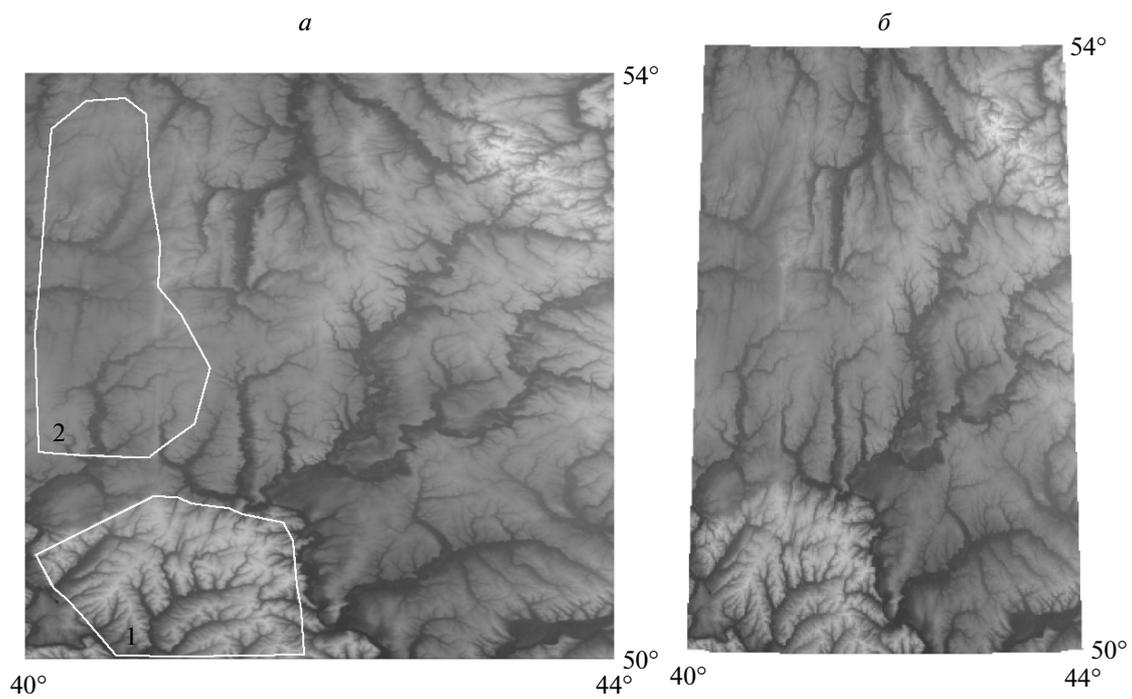
Мы выбираем окно, например размером  $3 \times 3$  элемента матрицы, и при помощи этого окна обычным образом сканируем по  $i$  и  $j$  всю исследуемую область. Если в окне с центром в точке  $(i, j)$

$$h[i, j] > h[i + k, j + l] (-1 \leq k \leq 1, -1 \leq l \leq 1),$$

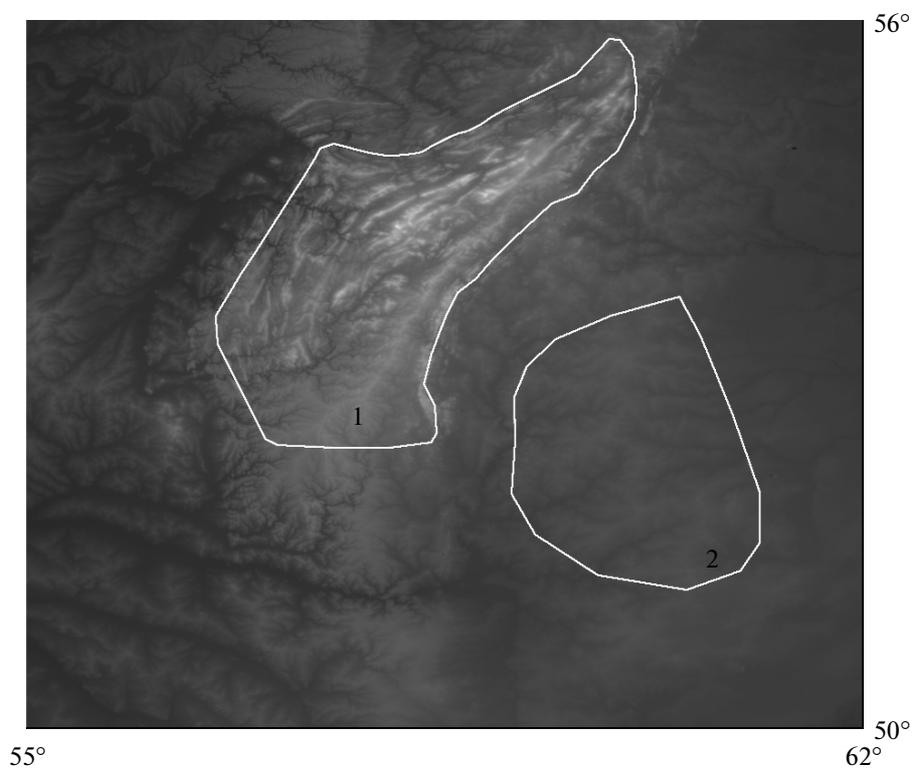
такая точка считается локальным максимумом. Величина  $n$  есть общее количество таких точек, а  $N$  — общее количество центров окон для заданной области, т.е. в простейшем случае прямоугольной области  $N = mn$ , где  $m$  — количество строк, а  $n$  — количество столбцов матрицы ЦМР. Если же мы хотим определить величину  $IOR$  для некоторой выделенной непрямоугольной области, то нам просто сначала необходимо подсчитать общее количество  $N$  элементов матрицы ЦМР, принадлежащих этой области, а затем определить величину  $n$  в этой же области.

Приведем несколько примеров определения  $IOR$ .

На рис. 1 показана визуализация ЦМР участка земной поверхности с координатами  $40^\circ$ – $44^\circ$  в.д. и  $50^\circ$ – $54^\circ$  с.ш. — это участок Восточно-Европейской платформы. Максимальная высота на всем участке составляет примерно 270 м, минимальная — около 80 м. На этом рисунке более высокие участки поверхности показаны более светлыми оттенками серого света, соответственно более низкие — более темными.



**Рис. 1.** Визуализация ЦМР участка поверхности Восточно-европейской платформы (а), и та же область, представленная в стандартной конической проекции (б).



**Рис. 2.** Визуализация части региона Урала.

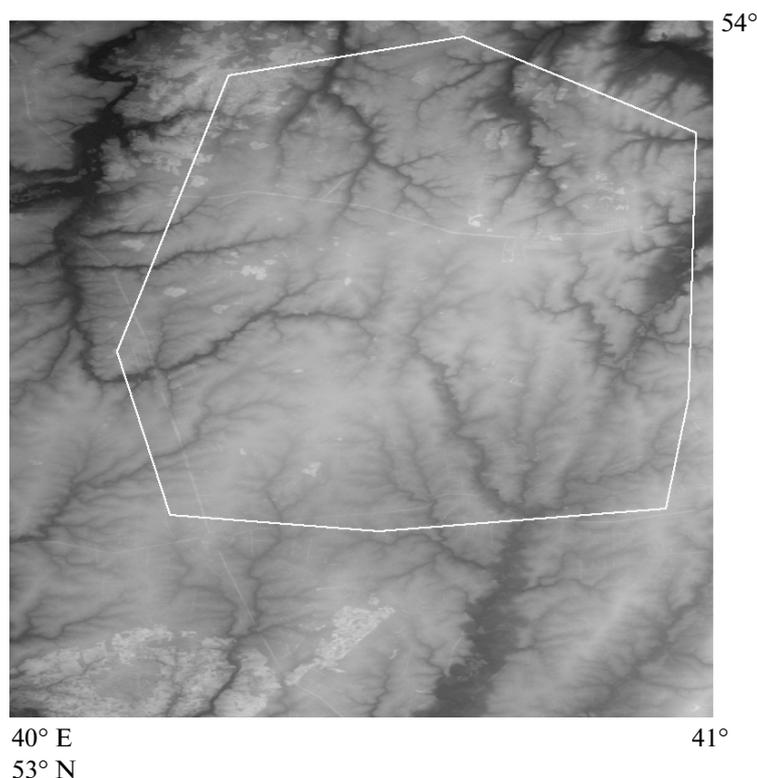


Рис. 3. Визуализация северной части области 2 на рис. 1а.

В модели, визуализация которой показана на рис. 1, расстояние между соседними точками составляет 24'' как по широте, так и по долготе, сама же модель построена автором с использованием данных SRTM с разрешением 3'' (шаттл Endeavour, 2000 г.); файлы с данными исходной модели свободно доступны в Интернете.

При построении визуализации, показанной на рис. 1, по данным ЦМР мы использовали равномерную шкалу оттенков серого цвета: весь интервал высот исследуемой области от минимального до максимального значений делился на 256 “субинтервалов”, и каждому такому интервалу ставился в соответствие определенный оттенок серого цвета. Рисунок 1а строился таким образом, что каждому значению высоты на модели соответствовал один пиксел изображения. На рис. 1б показана та же самая область земной поверхности, но представленная в стандартной конической картографической поверхности; преобразование изображения в коническую проекцию может привести к потере некоторой информации о самой поверхности.

На рис. 1 отмечены два района, для района 1 величина  $IOR = 0.023$ , для района 2 –  $IOR = 0.067$ . Различие в структуре этих районов видно и невооруженным глазом, но использование  $IOR$  дает возможность количественного описания этого различия.

На рис. 2 показана визуализация части региона Урала, для чего использовалась уже упоминавшаяся ЦМР с разрешением 24''. Для отмеченной на этом рисунке области 1 величина  $IOR = 0.025$ , для области 2 –  $IOR = 0.093$ . Минимальное и максимальное значения высоты для всего района составляют примерно 120 и 1500 м соответственно.

Очевидно, что значения  $IOR$  зависят от ЦМР, используемой для описания района. На рис. 3 показана визуализация участка поверхности региона, соответствующей северной части области 2 на рис. 1а (40°–41° в.д., 53°–54° с.ш.), реконструированная с использованием ЦМР с разрешением 3''. Для области, отмеченной многоугольником,  $IOR = 0.216$ .

Наконец, нам хотелось бы заметить, что количественное различие в структуре рельефа различных областей можно определить при использовании функций распределения различных параметров, описывающих рельеф исследуемых областей. В простейшем случае можно сравнивать функции распределения высот для различных регионов (конечно, удобнее сравнивать функции распределения с использованием безразмерных параметров, например, отношения высоты в некоторой точке к амплитуде высот для всего исследуемого региона). На рис. 4 показаны гистограммы двух “безразмерных” функций распределения для двух областей, отмеченных на рис. 1а. Различие этих

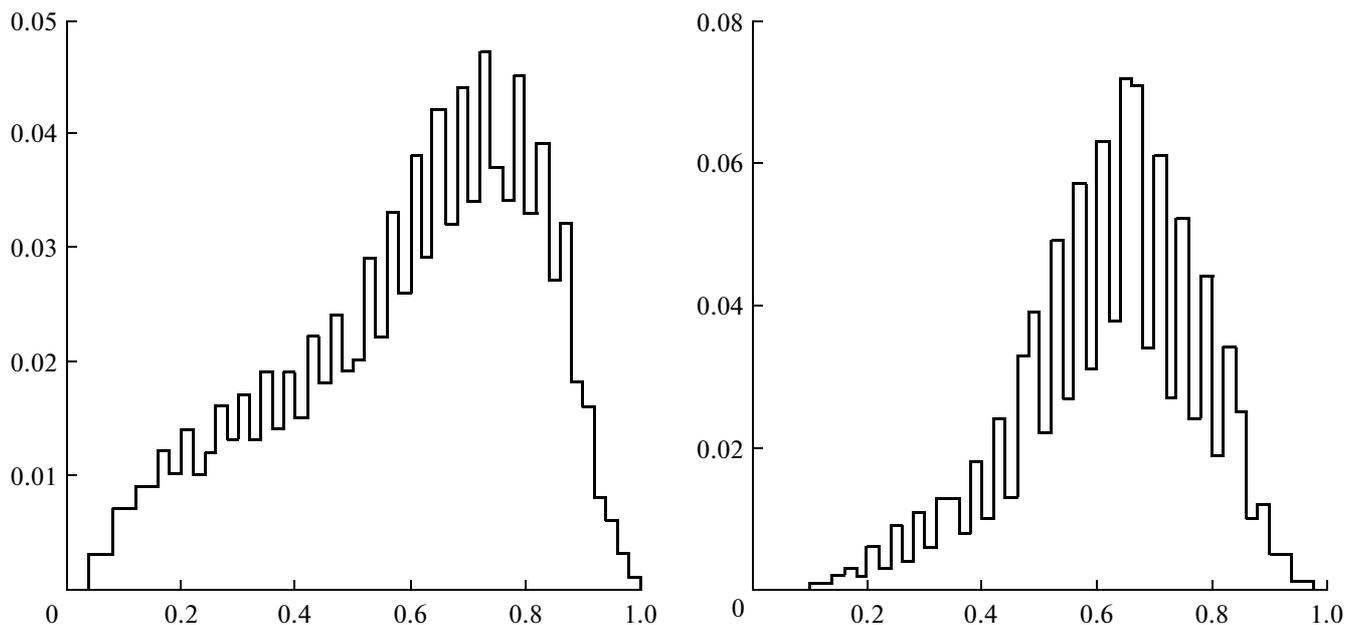


Рис. 4. Гистограммы функций распределения для двух областей, выделенных на рис. 1а.

функций очевидно. По оси  $X$  для функций, показанных на рис. 4, отложена безразмерная высота для исследуемой области ( $h_{local}/(h_{max} - h_{min})$ ).

Все результаты и рисунки, представленные в работе, получены с использованием программного обеспечения, созданного автором.

Автор благодарит В.Г. Трифонова за помощь и полезные замечания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Glenn N.F., Streutker D.R., Chadwick D.J., Thackray G.D., Dorsch S.J. Analysis of LiDAR-derived topographic infor-

mation for characterizing and differentiating landslide morphology and activity // *Geomorph.* 2006. V. 73. P. 131–148.

Grohmann C.H., Smith M.J., Riccomini C. Multiscale analysis of topographic surface roughness in the Midland Valley, Scotland // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2011. V. 49. P. 1200–1213.

Hofer G., Wagner H.H., Herzog F., Edwards P.J. Effects of topographic variability on the scaling of plant species richness in gradient dominated landscapes // *Ecography.* 2008. V. 31. P. 131–139.

Riley S.J., DeGloria S.D., Elliot R. A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneities intermountain // *J. Sci.* 1999. V. 5. № 1–4. P. 23–27.

## Method for Estimation of a Given Area Relief Roughness

A. I. Ioffe

*Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow*

New parameter and a simple method are proposed for estimation of a given area relief roughness in whole using Digital Elevation Model of the area. This method permits us to give quantitative distinction of different regions with different or similar geomorphologic structures.

**Keywords:** relief roughness, digital elevation model, geomorphologic structures

## ПАМЯТИ ГУРИЯ ИВАНОВИЧА МАРЧУКА (08.06.1925–24.03.2013)

DOI: 10.7868/S020596141303007X



Редакция журнала Президиума РАН “Исследование Земли из космоса” с глубоким прискорбием извещает, что 24 марта 2013 г. ушел из жизни выдающийся ученый, крупнейший государственный деятель и организатор науки, действительный член Российской академии наук, Герой Социалистического труда, лауреат Ленинской и Государственных премий ГУРИЙ ИВАНОВИЧ МАРЧУК, занимавший высокие посты Заместителя Председателя Совета Министров СССР, Председателя Государственного комитета СССР по науке и технике, Президента АН СССР.

Академик Г.И. Марчук с 1983 по 1991 годы был главным редактором журнала Президиума АН СССР “Исследование Земли из космоса” и оставался членом редколлегии до последних дней своей жизни.

Гурий Иванович Марчук родился 8 июня 1925 г. в пос. Петро-Херсонце Оренбургской обл. в семье сельского учителя. После окончания средней школы он поступает на математико-механический факультет Ленинградского государственного университета, который заканчивает в 1949 г.

Научная деятельность Г.И. Марчука началась сразу же по окончании учебы, когда он в 1949 г.

поступил в аспирантуру. В 1950 г. была опубликована его первая работа по теории упругости “О задаче Лэмба в случае полупространства”. Проявляя большой интерес к проблемам физики атмосферы, Г.И. Марчук переводится в аспирантуру Геофизического института АН СССР и в 1952 г. защищает кандидатскую диссертацию на тему “Динамика крупномасштабных полей метеорологических элементов в бароклинной атмосфере”.

С 1953 по 1962 г. Г.И. Марчук работал в Физико-энергетическом институте (г. Обнинск), где заведовал лабораторией, а затем математическим отделом. В этот период он предложил новые методы расчета ядерных реакторов, которые до настоящего времени составляют основу для моделирования и имитационных расчетов промышленных реакторов. Большую известность получили его работы по теории переноса излучения. Результаты этих исследований обобщены в монографии “Численные методы расчета ядерных реакторов” и в его докторской диссертации (1956 г.).

Классические результаты принадлежат Г.И. Марчуку в области исследований физики атмосферы, океана и методов кратко- и долгосрочных прогнозов погоды. На основе решения сопряженных уравнений гидротермодинамики он впервые выдвинул идею о существовании энергоактивных зон — зон с максимальной изменчивостью тепло-, влаго- и энергообмена между океаном и атмосферой. Существование таких зон было подтверждено в 1990-е годы на основе анализа межгодовой изменчивости компонентов радиационного баланса Земли по данным спутниковых наблюдений.

Значительный вклад внес Г.И. Марчук в развитие космических исследований с помощью искусственных спутников Земли. Так, в своих работах “О постановке некоторых обратных задач”, “Уравнение для ценности информации с метеорологических спутников и постановка обратных задач” и “О некоторых проблемах теории и планирования эксперимента” он предложил и обосновал новый метод оптимизации космических экспериментов на основе использования сопряженных уравнений. Эти идеи нашли применение при разработке методов определения содержания озона, водяно-

го пара и вертикальных профилей температуры в атмосфере Земли.

Он является автором нового научного направления в области прикладной математики — математического моделирования в иммунологии и медицине. Им построена система нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих иммунные реакции организма человека на вирусные и бактериологические инфекции.

Гурий Иванович Марчук был не только выдающимся ученым, но и крупным государственным деятелем и организатором науки:

— с 1964 по 1979 гг. — он директор Вычислительного центра СО АН СССР;

— с 1969 по 1975 гг. — Заместитель Председателя Сибирского отделения АН СССР;

— с 1975 по 1980 гг. — Председатель Сибирского отделения АН СССР, Вице-президент АН СССР;

— с 1980 по 1986 гг. — Заместитель Председателя Совета Министров СССР, председатель Государственного комитета СССР по науке и технике;

— с 1986 по 1991 гг. — Президент АН СССР.

С 1986 по 1991 гг. Г.И. Марчук возглавлял междугосударственный научно-технический совет по космосу, в рамках программ которого интенсивное развитие получили природно-ресурсные и экологические космические исследования. Энергичная поддержка Г.И. Марчуком новых направлений способствовала развитию исследований биосферы с помощью космических средств дистанционного зондирования Земли.

До последних дней он оставался в строю — являясь членом Президиума РАН, почетным директором созданного им Института вычислительной математики РАН.

За свои выдающиеся заслуги Г.И. Марчук был удостоен звания Героя Социалистического Труда, награждался четырьмя Орденами Ленина, орденами

“За заслуги перед отечеством” II и IV степеней. Ему были присуждены Ленинская и Государственные премии, а также премия А.А. Фрийдмана АН СССР и Демидовская премия. Он был награжден золотой медалью им. С.И. Вавилова и Большой золотой медалью им. М.В. Ломоносова Российской академии наук. За работы в области исследований космического пространства Г.И. Марчук был удостоен золотой медали им. М.В. Келдыша.

Научные успехи Г.И. Марчука были высоко оценены не только в России, но и за рубежом. Он являлся членом 11 иностранных академий наук, в том числе: Европейской академии наук, Академий наук Франции, Финляндии, Индии, Польши, Болгарии и др. Являлся почетным доктором Хьюстонского, Орегонского, Тулузского, Дрезденского, Тель-Авивского, Калькуттского, Карлова и Будапештского университетов. Он — лауреат международной премии им. А.П. Карпинского, Командор “Ордена Почетного Легиона” — государственной награды Франции, награжден орденами Индии и Кубы.

Г.И. Марчук на протяжении долгих лет был членом редколлегий пяти иностранных (США, Германия, Италия, Франция, Швеция), и ряда отечественных журналов.

Являясь в течение тридцати лет сначала главным редактором журнала “Исследование Земли из космоса”, а затем его активным членом редколлегии, Г.И. Марчук внес огромный вклад в становление и развитие журнала.

Имя Гурия Ивановича Марчука навсегда останется не только в истории отечественной и мировой науки, но также в памяти и сердцах его коллег, учеников и друзей.

*Редакционная коллегия журнала  
“Исследование Земли из космоса” РАН*

---

Сдано в набор 21.02.2013 г.	Подписано к печати 29.04.2013 г.	Дата выхода в свет 19 четв.	Формат 60 × 88 <sup>1</sup> / <sub>8</sub>
Цифровая печать	Усл. печ. л. 12.0 + 0.4 цв. вкл	Усл. кр.-отт. 2.3 тыс.	Уч.-изд. л. 12.0
	Тираж 143 экз.	Зак. 1297	Бум. л. 6.0
		Цена свободная	

---

Учредители: Российская академия наук, Президиум РАН

---

Издатель: Российская академия наук. Издательство “Наука”, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 90

Оригинал-макет подготовлен МАИК “Наука/Интерпериодика”

Отпечатано в ППП “Типография “Наука”, 121099 Москва, Шубинский пер., 6