

<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>	2012	<b>Том</b>		<b>Номер выпуска</b>	5		
	<b>Название статьи</b>					<b>Страницы</b>	<b>Цит.</b>
	<b>МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ</b>						
	<b>ОБРАБОТКА ДАННЫХ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ</b> <i>Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Дмитриев Е.В., Казанцев О.Ю., Персев И.В., Щербаков М.В.</i>					3	21
	<b>К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АСИММЕТРИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗВЫШЕНИЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ДАННЫМ АЛЬТИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ</b> <i>Запелалов А.С., Пустовойтенко В.В.</i>					12	3
	<b>ДЕШИФРИРОВАНИЕ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ LANDSAT</b> <i>Статакис Д., Перакис К., Савин И.Ю.</i>					22	3
	<b>ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА</b>						
	<b>ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗЛУЧЕНИЯ АРКТИЧЕСКОГО ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СПУТНИКОВОЙ МИКРОВОЛНОВОЙ РАДИОМЕТРИИ</b> <i>Репина И.А., Тихонов В.В., Алексеева Т.А., Иванов В.В., Раев М.Д., Шарков Е.А., Боярский Д.А., Комарова Н.Ю.</i>					29	9
	<b>СПУТНИКОВОЕ ТЕМПЕРАТУРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ В ОБЛАЧНЫХ УСЛОВИЯХ</b> <i>Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Косцов В.С.</i>					37	3
	<b>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ</b>						
	<b>ИЗУЧЕНИЕ ХЛОРОФИЛЛЬНОГО ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПОСЕВОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР ЮГА КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ И РЕСПУБЛИКИ ХАКАСИЯ СПУТНИКОВЫМИ МЕТОДАМИ</b> <i>Ботвич И.Ю., Сидько А.Ф., Письман Т.И., Шевырногов А.П.</i>					43	1
	<b>ОЦЕНКА ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ СОСТОЯНИЕМ РАСТИТЕЛЬНОСТИ СУБАРКТИКИ И КЛИМАТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ</b> <i>Платонов Н.Г., Мордвинцев И.Н., Алпацкий И.В.</i>					53	0
	<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОМКНУТОСТИ КРОН РЕДКОСТОЙНЫХ ЛИСТВЕННИЧНИКОВ ТАЙМЫРА ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ РАЗНОГО РАЗРЕШЕНИЯ</b> <i>Тюкавина А.Ю.</i>					64	0
	<b>ОБЗОРЫ</b>						
	<b>МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЛЬДИСТОСТИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ВИДИМОМ И ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ</b> <i>Корниенко С.Г.</i>					75	1

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

### ОБРАБОТКА ДАННЫХ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

© 2012 г. В. В. Козодеров<sup>1\*</sup>, Т. В. Кондранин<sup>2</sup>, Е. В. Дмитриев<sup>3</sup>,  
О. Ю. Казанцев<sup>4</sup>, И. В. Персев<sup>4</sup>, М. В. Щербаков<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный

<sup>3</sup> Институт вычислительной математики РАН, Москва

<sup>4</sup> НПО «Лептон», Москва

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

Поступила в редакцию 13.02.2012 г.

Показаны особенности приложений данных гиперспектрального (ГС) аэрозондирования для решения задач распознавания природно-техногенных объектов и оценки параметров, характеризующих состояние лесной растительности. Описаны основы калибровки аппаратного комплекса ГС-зондирования, регистрации спектральной плотности энергетической яркости на ПЗС-матрицах. Приведена постановка задачи формирования регистрируемых спектров на ГС-изображениях с учетом пропускания оптической системы, спектральной чувствительности и шумовой составляющей используемой аппаратуры. Демонстрируются примеры обработки данных ГС-аэрозондирования с классификацией выбранного изображения при разном спектральном разрешении и восстановлением параметров, характеризующих состояние лесной растительности разного породного состава, включая плотность лесного полога и плотность крон древостоев, объем фитомассы листвы/хвои, чистую первичную продукцию и долю поглощенной фотосинтетически активной радиации.

**Ключевые слова:** гиперспектральное зондирование, обработка данных, распознавание природно-техногенных объектов, восстановление параметров состояния лесной растительности

#### ВВЕДЕНИЕ

Создание системы мониторинга экологической ситуации из космоса признано одним из перспективных научно-технологических проектов модернизации и технологического развития экономики Российской Федерации. В настоящее время в сети Интернет не составляет большого труда получить космические снимки разного пространственного разрешения для практически любой территории, цифровые данные этих снимков и даже программные средства (расчетные коды) их обработки. Однако если ориентироваться на прорывные технологии для целей экологического мониторинга, то здесь наиболее перспективны два направления: гиперспектральное (ГС) аэрокосмическое зондирование, используемое для классификации и восстановления параметров растительного покрова на поверхности Земли, и использование данных лазерного сканирования (активные системы, лидары) для восстановления вертикальной структуры растительного полога.

Системы ГС-зондирования охватывают сотни спектральных каналов видимой и ближней ИК-областей, в отличие от традиционных систем многоспектрального зондирования (обычно 6–7 кана-

лов в указанной области). Отличительная особенность систем ГС-зондирования – предоставляемая ими возможность повышения информационного содержания регистрируемых данных в сравнении с данными многоспектрального зондирования (Plaza et al., 2009). Системы лидарного зондирования способны трехмерному отображению информации о продукции обработки данных, что необходимо для получения объективной информации о строении и структуре древостоев разного возраста и породного состава с учетом рельефа местности, склонов и других особенностей произрастания лесного покрова (Korpela et al., 2010). Уникальные возможности развития таких новых приложений данных лазерного сканирования возникли в последнее время в связи с появлением технологий точного определения местоположения и ориентации в пространстве самолетных средств, на которые устанавливаются соответствующие аппаратные комплексы. Объединение гиперспектральных и лидарных данных дистанционного зондирования (ДЗ) способствует решению прикладных задач оценки состояния лесной растительности в процессе разработки автоматизированных алгоритмов распознавания объектов (Dalponte et al., 2008).

Под распознаванием понимаются вычислительные процедуры классификации наблюдаемых природно-техногенных объектов и их идентификации при разработке указанных алгоритмов. При этом наиболее перспективными являются алгоритмы классификации с обучением при наличии множеств объектов и множеств ответов (меток классов). Прикладные задачи распознавания объектов решаются при наличии априорной информации в виде конечного множества таких пар множеств. В обоих случаях обработки гиперспектральных и лидарных изображений исходными для классификации объектов служат пиксели (отдельные элементы разрешения) используемой аппаратуры. Множество ответов содержит названия распознаваемых объектов (например, растительность, почва, водная поверхность, асфальт, бетон и т.п.).

Вместо непосредственно классифицируемых объектов часто рассматривают некоторые их характеристики (признаки), а множество таких объектов называют признаковым пространством. Соответственно каждый спектр пикселя ГС-изображения представляется точкой в  $N$ -мерном пространстве, как и каждый попиксельный “отпечаток” эхо-сигнала лидарного зондирования, где  $N$  – число спектральных каналов и число характерных мод регистрируемых лазерных импульсов соответственно. Характерные моды эхо-сигналов формируются при отражении когерентных импульсов лидарного зондирования от верхней границы лесного полога, от отдельных фитоэлементов, от его нижней границы и т.д.

При вероятностной постановке задачи классификации обоих типов указанных изображений (гиперспектральных и лидарных) требуется построить алгоритм, который приводит к минимальной вероятности ошибки классификации (байесовский алгоритм). Для каждого класса необходимо задать соответствующие функции правдоподобия, априорные вероятности и определить потери от ошибок классификации. Победителем считается тот класс, который имеет минимальное математическое ожидание потери. В итоге вычислительный алгоритм сводится к выполнению известного принципа максимума апостериорной вероятности, а в случае, если все классы равновероятны, к классической формулировке, известной как принцип максимального правдоподобия (Foody, 2004).

В России использование данных аэрокосмического зондирования обычно ассоциируют с дистрибьютерами зарубежной космической информации и средств ее обработки (программные средства ERDAS, ENVI и др.). Наиболее эффективные решения прикладных задач здесь видятся в распространении программных продуктов, поставляемых из-за рубежа. Соответствующее программное обеспечение не охватывает все области

существующих знаний и применимо, как правило, только для конкретных типов аппаратуры ДЗ. Например, традиционные подходы предлагаемых приложений часто основаны на концепции “вегетационных индексов” (различных комбинаций измерительных каналов). В работах (Kozoderov, Dmitriev, 2008; Козодеров, Кондранин, 2008) показаны реальные ограничения возникающих приложений к оценке состояния лесной растительности по данным многоспектрального зондирования. Приложения, основанные на этой концепции, становятся еще менее эффективными при наличии сотен каналов ГС-зондирования.

Цель научно-технологических исследований, проводимых в России (Козодеров, Дмитриев, 2010), – повышение роли отечественных разработок, касающихся моделей формирования уходящего излучения, регистрируемого аппаратурой ГС-зондирования, для распознавания природно-техногенных объектов и восстановления параметров, характеризующих биологическую продуктивность растительного покрова. Конечная цель – параметризация средообразующей роли лесной растительности в моделях климата (Kozoderov, Dmitriev, 2011).

В рамках совместных исследований по летным испытаниям разных версий ГС-аппаратуры разработки НПО “Лептон”, в течение последних лет проводятся сбор, анализ, систематизация и обработка данных гиперспектрального авиационного зондирования и данных наземных лесотаксационных и других обследований выбранной тестовой территории Тверской области (Козодеров и др., 2009). Охватывая диапазон длин волн 400–1000 нм, спектральное разрешение аппаратуры достигает одного нанометра в коротковолновой части спектра и 5–10 нм в его длинноволновой части. Пространственное разрешение равно примерно 1–2 м при высоте полета 1.5–2 км. Съемка с самолета проводится синхронно с помощью ГС-камеры с ПЗС-матрицами и аэрофотоаппарата, которые устанавливаются на одной платформе вместе с аппаратурой глобального спутникового позиционирования. Полученные измерения записываются на лазерные диски и далее в наземных условиях обрабатываются с помощью компьютерных средств распознавания природно-техногенных объектов и оценки параметров, характеризующих состояние почвенно-растительного покрова.

Результаты, полученные в ходе выполнения данных исследований, изложены в ряде недавних публикаций. В статье (Козодеров и др., 2010) приводится описание современных методов использования данных аэрокосмической гиперспектрометрии для решения региональных прикладных задач. Показаны традиционные подходы к обработке данных ГС-зондирования и новые подходы

к решению задач распознавания образов наблюдаемых объектов и восстановлению параметров, характеризующих состояние почвенно-растительного покрова. Приведены примеры обработки данных ГС-аэрозондирования выбранной тестовой территории, для которой имеются также данные наземных лесотаксационных обследований.

В работе (Козодеров и др., 2011) показаны примеры создания вычислительной технологии быстрого просмотра спектров и их среднеквадратических отклонений для выбранных контуров характерных объектов по данным совмещенной гиперспектральной и аэрофотосъемки с использованием данных наземных лесотаксационных обследований территории. Исследовались исходные спектры, представленные в абсолютных энергетических единицах, и нормализованные спектры, полученные при нормировании исходных данных на их интегральные значения. С использованием обучающих спектров проведено распознавание природно-техногенных объектов на выбранной территории.

На основе разрабатываемых подходов формируется облик аппаратно-программной системы обработки ГС-изображений. Такая система включает в себя аппаратуру ГС-зондирования и технологию обработки получаемых данных для распознавания природно-техногенных объектов и оценки параметров, характеризующих состояние элементов разрешения, отнесенных к классу “лесная растительность”. Дополнение создаваемой аппаратно-программной системы аппаратурой лидарного зондирования позволит реализовать новейшие технологии оценки экологического состояния выбранной территории по данным аэрокосмического мониторинга.

#### ОСОБЕННОСТИ АППАРАТУРЫ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Основу используемого аппаратного комплекса дистанционного аэрозондирования составляет гиперспектральная камера (ГСК) с диспергирующим элементом, построенным на базе семикомпонентной призмы Амичи (Hagen, Tkaczyk, 2011). В этой призме осуществляется угловое дисперсионное разложение падающего на нее света. Принцип работы ГСК следующий. Входной объектив строит изображение объекта. В фокальной плоскости установлена спектральная щель, обеспечивающая выделение части изображения (эффективной строки). Пользователь прибора имеет возможность контролировать положение спектральной щели при проведении съемки для обеспечения перемещения прибора в строго перпендикулярном направлении. Выделенное щелью изображение с помощью коллиматора трансформируется в параллельный пучок света и попадает на многокомпонентную призму, где осуществляется спектраль-

ное разложение, исходящего от объекта наблюдения светового потока. В результате получается изображение, которое в некотором приближении можно рассматривать как набор состыкованных монохроматических изображений щели. Выходной объектив прибора трансформирует это изображение под размер фоточувствительной зоны матрицы ПЗС, в результате чего световой поток с конкретной длиной волны попадает в однозначно определенный участок, координата которого определяется дисперсионной кривой призмы и фокусным расстоянием выходного объектива.

Разработка конструкции ГСК, создание оптических элементов, сборка, юстировка, калибровка и измерение характеристик полностью производятся НПО “Лептон”. Достоинством видеоспектрометров данного типа является возможность одномоментного измерения яркостей во всех спектральных каналах. Недостатком является неравномерность расположения спектральных каналов по длине волны. При этом следует отметить, что применяемый многокомпонентный диспергирующий элемент обеспечивает значительное приближение направления распространения светового пучка со средней длиной волны к оси прибора и позволяет достичь значительной линейности дисперсионной кривой. Таким образом, при диапазоне углового разложения спектральных компонент входного светового потока в  $2^{\circ}$ – $3^{\circ}$  можно сформировать на фотоприемнике прямые изображения спектральных щелей на всех длинах волн спектральной полосы.

Одним из наиболее важных и трудоемких этапов разработки ГСК является энергетическая калибровка, которая позволяет трансформировать измеряемые дискретные уровни видеосигнала в стандартные единицы спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ). Для этого используется соотношение

$$L(i_x, i_\lambda) = K(i_x, i_\lambda) \frac{V(i_x, i_\lambda)}{\tau},$$

где  $V$  – видеосигнал ГСК (в дискретных уровнях аналого-цифрового преобразователя – АЦП),  $\tau$  – время накопления,  $K$  – коэффициент преобразования,  $i_x$  и  $i_\lambda$  – индексы ПЗС-матрицы, отвечающие соответственно пространственной и спектральной координатам. Калибровка состоит в измерении коэффициента преобразования для каждого элемента ПЗС матрицы. Последнее обстоятельство позволяет полностью отказаться от необходимости проведения последующей радиометрической коррекции в ее стандартном понимании, поскольку в зависимости от удаления от центрального пиксела будет изменяться лишь соотношение сигнал/шум, а не среднее значение СПЭЯ.

Калибровка проводится с помощью специального стенда, состоящего из следующих компонентов:

- фотометрический шар Ульбрихта с диаметром 600 мм и выходной круглой апертурой 160 мм, с водяным проточным резервуаром для охлаждения шара;
- спектро радиометр ASD 3 VNIR;
- 12 ламп накаливания суммарной мощностью 1200 Вт;
- блок коммутации ламп накаливания;
- два источника высокостабильного тока;
- блок запуска источников тока;
- элементы оптической скамьи;
- измеритель температуры поверхности шара;
- система отвода проточной воды из системы водоснабжения здания.

С использованием фотометрического шара на входную апертуру ГСК подается равномерный по пространству и стабильный по времени свет. Одновременно с помощью калиброванного спектро радиометра высокого разрешения измеряется спектральная плотность яркости шара. Коэффициент преобразования, определяющий отношение яркости входного светового потока к количеству уровней АЦП, порожденных этим потоком, определяется в соответствии с выражением

$$K(i_x, i_\lambda) = \tau \Phi(\lambda) / V(i_x, i_\lambda),$$

где  $\lambda$  – длина волны, соответствующая индексу  $i_\lambda$ , а  $\Phi(\lambda)$  – спектральная плотность яркости шара. Погрешность измерения коэффициента преобразования не превышает 4%.

Помимо получения характеристик ГСК, требующих применения специального точного измерительного оборудования в лабораторных условиях, проводится дополнительное тестирование ГСК с целью определения линейности зависимости регистрируемых сигналов от времени накопления и зависимости уровня шума от времени накопления. При этом с достаточно большого расстояния осуществляется съемка однородных поверхностей (экран, бетонная стена) при постоянном искусственном и естественном освещении с разным временем накопления. В течение съемки ГСК жестко фиксирована. Время съемки выбирается таким образом, чтобы обеспечить достаточно большую для анализа статистику кадров при каждом заданном времени накопления. Сами же значения времени накопления выбирались таким образом, чтобы сигнал пробегал с достаточно небольшим шагом значения от уровня черного (31 уровень АЦП) до максимального уровня оцифровки (4096 уровней АЦП). На основе полученных данных можно получить диапазон линейности для каждого из каналов и, таким образом, подобрать оптимальное время накопле-

ния, обеспечивающее наибольшую яркость объектов в пределах диапазона заявленной точности калибровки.

Также подобные измерения позволяют изучать распределение шумовых характеристик и производить оценки эффективного числа градаций яркости. Ошибка измерений, как правило, возрастает с увеличением измеряемой величины. В нашем случае уровень шума меняется в зависимости от уровня сигнала, т.е. и от времени накопления. По тестовым данным строится 2 типа зависимостей: разброс как функция сигнала АЦП и отношение АЦП/разброс. Под разбросом понимается интервал между квантилями 0.05 и 0.95, измерения с разбросом 0 выбраковываются. Проведенные тесты показали, что в диапазоне линейности шум растет пропорционально сигналу. Соотношение АЦП/разброс характеризует число реальных уровней серого.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Рассмотрим модель формирования СПЭЯ для наиболее сложного объекта – лесной растительности. В соответствии с работой (Kozoderov, Dmitriev, 2011) СПЭЯ (radiance) уходящего от лесного полога излучения запишем в виде

$$L(\lambda, D_{canopy}, D_{crown}) = \\ = \{ [E(\lambda)(1 - D_{canopy} - \delta_1) + H(\lambda)\delta_1] \rho_1(\lambda) + \\ + [E(\lambda)(D_{canopy} D_{crown} - \delta_2) + H(\lambda)\delta_2] \rho_2(\lambda) + \\ + E(\lambda) D_{canopy} (1 - D_{crown}) \rho_3(\lambda) \} \tau_a(\lambda) + L_b(\lambda),$$

где  $E(\lambda) = U(\lambda) + H(\lambda)$  – спектральный поток (освещенность объекта, irradiance) падающего на полог прямого  $U(\lambda) = S_0(\lambda) \cos \theta_0 \tau_s(\lambda)$  и диффузно рассеянного, приходящего со всех участков небесной сферы  $H(\lambda)$ , излучения при зенитном угле Солнца  $\theta_0$ , пропускании атмосферы  $\tau_s(\lambda)$  и исходном потоке на верхней границе атмосферы  $S_0(\lambda)$ ; три слагаемых в фигурной скобке {...} описывают соответственно межкрановую, крановую части и многократное рассеяние излучения внутри крон, которые попадают в поле зрения аппаратуры, имея спектральные отражательные способности  $\rho_1(\lambda)$ ,  $\rho_2(\lambda)$ ,  $\rho_3(\lambda)$  и доли теней между кронами и на кронах ( $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ) при плотности полога  $D_{canopy}$  и плотности крон деревьев  $D_{crown}$  соответствующего породного состава;  $\tau_a(\lambda)$  – атмосферное пропускание на трассе от объекта до аппаратуры;  $L_b(\lambda)$  – фоновая компонента атмосферы и объекта (path radiance). Можно убедиться, что произведение  $D_{canopy} D_{crown}$  характеризует проективное покрытие лесной растительности. Поскольку часто отсутствует информация о вертикальной структуре

лесного полога, мы принимаем, что интересующий нас в конечном итоге объем фитомассы листы/хвои  $B$  является функцией только проекционных характеристик, т.е. принимается эмпирическая модель  $B = B(D_{canopy}, D_{crown})$ .

Типичные для большинства существующих приложений предположения о сплошном однородном покрове без теней в поле зрения аппаратуры ( $D_{canopy} = 1, D_{crown} = 1, \delta_1 = \delta_2 = 0$ ), а также  $\tau_a(\lambda) = 1, L_b(\lambda) = 0$  приводят к выражению

$$L(\lambda) = E(\lambda)\rho,$$

в котором  $\rho = \rho(\lambda, \theta, \phi, \theta', \phi')$  – бинаправленная функция отражения (Bidirectional Reflectance Distribution Function – BRDF) (Deering et al., 1999) при зенитных углах падения ( $\theta'$ ), отражения ( $\theta$ ) излучения  $H(\lambda)$  и соответствующих азимутах ( $\phi, \phi'$ ) вводит угловые координаты ( $\theta, \phi$ ) в значения СПЭЯ. При ортотропном отражении  $\rho(\lambda) = \rho(\lambda)/\pi, \rho(\lambda)$  – коэффициенты спектральной яркости.

На основе значений

$$L_{ccd}(\lambda) = L(\lambda)\tau_o(\lambda),$$

где  $\tau_o(\lambda)$  – пропускание оптической системы ПЗС-матрицы (Charge Compactable Device – CCD), спектры в каждом из  $k = 1, \dots, K \sim 200$  каналов формируются в виде

$$x_k = \zeta_k \int_{\Lambda_k} L_{ccd}(\lambda)A(\lambda)d\lambda,$$

где обозначения  $\zeta_k$  учитывают влияние углов визирования ПЗС-матрицы для каждого из спектральных каналов шириной  $\Lambda_k$  и аппаратной функцией

$$A(\lambda) = \alpha(\lambda)F(\lambda) + \beta(\lambda),$$

$\alpha(\lambda)$  – спектральный коэффициент усиления регистрируемого сигнала при заданной функции спектральной чувствительности  $F(\lambda)$  и шумовой составляющей аппаратуры  $\beta(\lambda)$ .

Таким образом, для интерпретации спектров  $x_k$  надо иметь: наземные спектрофотометрические значения потоков  $U(\lambda)$  и  $H(\lambda)$  для заданного тестового участка; какие-то сведения об отражательных характеристиках объекта ( $\rho_1, \rho_2, \rho_3$ ); знать свойства ГС-аппаратуры:  $\zeta_k, \tau_o(\lambda), A(\lambda)$ .

Принципы распознавания объектов по ГС-изображениям строятся исходя из следующих постулатов:

– каждый спектр  $x = (x_1, \dots, x_k)$  как вектор отображается точкой в многомерном (здесь теоретически до  $K = 200$ ) признаковом пространстве;

– множество точек для близких по спектральным признакам классов объектов могут кластеризоваться (сгущаться) в этом пространстве;

– задача распознавания (классификации и идентификации) объектов на обрабатываемом изображении сводится к нахождению границ между разными классами. Например, при бинарной классификации множество всех спектров  $x_i$  разделяется на два класса в соответствии с выбранными признаками  $y_i$  нахождения разделяющей (дискриминатной) функции;

– при отсутствии каких-либо сведений о наблюдаемых объектах используются процедуры кластер-анализа без обучения по тестовой выборке. При наличии априорных сведений об объектах реализуются вычислительные процедуры классификации с обучением.

Специфика обработки данных ГС-зондирования:

– в регистрируемых спектрах наблюдается множество линий и полос поглощения солнечного излучения зондируемыми средами (атмосфера и подстилающая поверхность), их идентификация характеризует микроуровень взаимодействия излучения с молекулярными соединениями этих сред;

– требуется распознавание объектов на макроуровне их описания с помощью линейных или нелинейных уравнений связи спектральных признаков объектов и текущих данных, относящихся к обучающим пикселям, но возникают сложности решения соответствующих уравнений для такого большого числа спектральных каналов вследствие существования корреляций между каналами.

Обработка данных ГС-зондирования сводится в итоге к следующим вычислительным процедурам:

– создание программ RGB-синтезирования обрабатываемых ГС-изображений для выделения на них контуров характерных объектов по данным наземных лесотаксационных и других обследований территории (априорная информация);

– создание программ выделения спектров всех пикселей в пределах отобранных контуров;

– реализация собственно программ распознавания объектов разными методами;

– восстановление параметров лесной растительности (объем фитомассы, породный состав и др.) для каждого пикселя соответствующего класса объектов.

Существуют следующие возможности наземной валидации получаемой информационной продукции обработки ГС-изображений: лесотаксационные данные; лесотипологическая характеристика; геоботанические описания; данные по биологической продуктивности лесных экосистем.

Лесотаксационные обследования – наиболее стандартизованный вид наземных работ. Имеются нормативные методы и приборы, существуют тысячи наименований нормативно-справочных материалов (числовые таблицы, графические материалы, математические модели), в которых

учитываются общие и региональные особенности роста и продуктивности лесов. Данные лесотаксации отображаются на картосхемах по отдельным кварталам и выделам внутри них. В идеале для каждого выдела фиксируется преобладающий породный состав древостоя, занимаемая площадь, возраст и бонитет – характеристика качества древостоя, которая строится на основе утверждения, что дерево определенной породы должно вырасти к определенному возрасту на определенную высоту. Измеряемые характеристики – запас древесины (объем ствола), высота (как функция возраста и бонитета), полнота (степень заполнения древостоями выбранного участка).

Лесотипологические обследования отличаются большим разнообразием. Содержат сотни уникальных понятий, относящихся к межкрупной растительности (болотный, кустарниковый, разнотравный, сфагновый, черничник, брусничник и т.д.). Для практических приложений интерес представляет связь этих описаний с бонитетом древостоя, но такие записи при наземных обследованиях делаются не всегда.

Геоботанические описания строятся исходя из наземных работ в пределах каждого выдела с учетом рельефа местности, почвенного покрова, ярусов древесной травянисто-кустарниковой, мохово-лишайниковой растительности. Дается информация о породном составе (приспевающие, спелые, перестойные деревья): сосняки, ельники, березняки, ольшаники и др.; подрост; подлесок; преобладающие виды покрова (мхи, лишайники, злаки, хвощи и т.д.).

Использование данных по оценке биологической продуктивности древостоев далеко не всегда относится к повышению эффективности ведения лесного хозяйства (лесоустройства), а к изучению средообразующей роли лесов, включая моделирование процессов обмена веществом и энергией с окружающей средой. Наиболее полной характеристикой биологической продуктивности лесной растительности являются значения чистой первичной продукции (Net Primary Productivity – NPP). Это масса углерода, поглощенного растениями из атмосферы на единичной площади в единичный период времени за вычетом дыхания растений. Имеющаяся база исследований – построение моделей отношения фитомассы фракций (листва/хвоя, ветви и т.д.) к запасу древесины как некоторых функций (обычно показательной и экспоненциальной) от класса бонитета, возраста и относительной полноты древостоя. При построении моделей используются известные таблицы хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии (Усольцев, 1988).

Традиционное использование спутниковых данных – подсчет площадей гарей от лесных по-

жаров, рубок, других возмущений лесных покровов (лесоповал, воздействия насекомых-вредителей и др.); определение лесистости (отношения площади наличия лесов к общей площади территории). Категория лесистости входит в современные модели оценок депонирования и высвобождения углерода в моделях климата без детализации породного состава, возраста и полноты древостоя и т.д.

В рамках предлагаемых новых подходов развития приложений данных гиперспектрального аэрокосмического зондирования решаются следующие задачи:

– обоснование реальных возможностей классификации ГС-изображений при использовании высокопроизводительных вычислительных средств;

– переход от имеющихся упрощенных описаний к более реалистичной картине тепло-, влаго-, энерго- и массообмена между пологом леса и атмосферой;

– улучшение параметризации соответствующих процессов для перехода от ключевых параметров (фитомасса листвы/хвои в координатах “плотность полога и ажурность крон”), восстанавливаемых для каждого элемента ГС-изображения класса “лесная растительность”, к характеристикам биологической продуктивности (NPP и др.).

При этом выходная продукция модуля решения обратной задачи для каждого элемента обрабатываемого изображения содержит следующие дополнительные элементы (Козодеров и др., 2008). Наряду с введенными ранее параметрами (тип объекта, прозрачность атмосферы, объем фитомассы листвы/хвои со среднеквадратической ошибкой восстановления, тип леса и межкрупной растительности, сомкнутости полога и ажурности крон, изрезанность верхней границы леса), определяются также параметры: площадь проективного покрытия, доля поглощенной фотосинтетически активной радиации (ФАР) и чистой первичной продукции. ФАР называют ту часть солнечной радиации, которая поглощается растением при фотосинтезе (диапазон длин волн 380–710 нм – в российских работах, 400–700 нм – в зарубежных работах). Для расчета доли поглощенной ФАР (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation – FAPAR), идущей на фотосинтез, используется параметризация

$$FAPAR = A * F * [1 + R * (1 - (1 - T)) * F],$$

где  $A = A$  (Тип леса) – коэффициент поглощения фитоэлементами деревьев различного типа;  $F = D_{canopy} D_{crown}$  – значение площади проективного покрытия, рассчитанное в нашей модели;  $R = R$  (Тип межкрупной растительности) – коэффициенты отражения межкрупной растительностью

различного типа;  $T = T$  (Тип леса) – коэффициент пропуска фитоземлементами деревьев различного типа.

На основе разрабатываемой технологии восстановления фитомассы листвы/хвои, по данным ГС-зондирования возможно использование параметризации, построенной на основе модели биопродуктивности (Швиденко и др., 2004). Параметризация адаптирована к растительности восточно-европейской части России (данные по сосне, ели, березе, клену, осине и ясеню)

$$Y = (1 - W) \left( \frac{X}{B_{deciduous}} \right)^{A_{deciduous}} + W \left( \frac{X}{B_{conifer}} \right)^{A_{conifer}},$$

где  $Y$  – чистая первичная продукция (текущий прирост углерода в  $г/м^2/год$ );  $X$  – фитомасса листвы/хвои (в  $т/Га$ );  $W$  – процент хвойного леса в лиственном;  $A$  и  $B$  – параметры (характеризуют лиственные – *deciduous* и хвойные – *conifer* породы соответственно). Значения  $F$  и  $FAPAR$ , наряду со значениями площади листвы поверхности (Leaf Area Index – LAI) – упрощенного аналога  $X$ , содержания хлорофилла в листве/хвое и оптической толщины атмосферы, являются основой теоретических исследований по использованию спутниковых данных для оценки модельных значений  $Y$  (Prieto-Blanco et al., 2009).

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБРАБОТКИ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В иллюстрируемых ниже примерах реализованы перечисленные этапы обработки данных ГС-аэрозондирования тестовой территории. При распознавании объектов используются вычислительные процедуры квадратичного дискриминантного анализа. При восстановлении характеристик распознанных типов лесной растительности использовались результаты обращения записанного выше функционала СПЭЯ.

На рис. 1а (см. на вклейках с цветн. рис.) приведен пример RGB-синтезированного ГС-изображения выбранной территории в пределах выделенной рамки рис. 1б (там же). Приведенная на рис. 1б картосхема наземной лесотаксации этой территории дает представление о породном составе лесной растительности. Традиционным в лесотаксации является отображение результатов наземных обследований в виде отдельных кварталов (цифры 54–58 на рис. 1б) и выделов внутри них. Цветовые оттенки характеризуют преобладающую породу в пределах соответствующих выделов (более темные цвета относятся к преобладающим древостоям более значительного возраста), а горизонтальные заштрихованные линии характеризуют вырубки. Как видно из данных рис. 1б, на выбранной территории преобладают сосняки (коричневые цвета) и березняки (сине-голубые

цвета) разного возраста. В левой части рис. 1а можно видеть характерные признаки дорожной сети и населенный пункт, а в правой его части можно заметить вырубку (обозначена на рис. 1б как березовый выдел) и еще одну дорогу.

Результаты распознавания объектов в пределах выделенной рамки рис. 1б приведены на рис. 1в и рис. 1г (на цветных вклейках) при использовании 48 каналов (разрешение 10 нм) и шести каналов (разрешение 100 нм) соответственно. Цвета на изображениях рис. 1в и рис. 1г: синий – вода, черный – асфальт, желтый – песок, темно-красный – открытые почвы, оранжевый – трава, светло-зеленый – молодые березняки, темно-зеленый – спелые березняки, цвет морской волны – спелые сосняки, фиолетовый – другие объекты. Можно видеть преобладание спелых сосняков на большей части наблюдаемой территории (цвет морской волны) и вкрапления березняков (зеленые цвета) в нижних частях рис. 1а и рис. 1б. Можно заметить также открытые почвы, песчаные образования и даже открытый водоем (пруд) в пределах населенного пункта. Данные рис. 1в и рис. 1г отличаются тем, что на рис. 1г больше пикселей фиолетового цвета (другие объекты). Наличие таких пикселей на рис. 1г при разрешении, соответствующем многоспектральному разрешению, снижает точность распознавания выбранной сцены в сравнении с данными рис. 1в.

Данные рис. 1д, рис. 1е (на цветных вклейках) характеризуют тип леса и преобладающий тип межкрупной растительности соответственно. Черный цвет на данных рис. 1д и рис. 1е соответствует пикселям, относящимся к нелесным объектам. Цветовая шкала данных рис. 1д (градации от 0 до 1) характеризует преобладание хвойных пород (красные цвета), лиственных пород (сине-зеленые цвета) и смешанных пород (желто-зеленые цвета) лесной растительности. По данным рис. 1д можно видеть соответствие отмеченным выше распределениям сосняков и березняков на выбранной территории. Цветовая шкала данных рис. 1е (градации от 1 до 12) соответствует принятым в работе (Козодеров и др., 2007) обозначениям: 1 – яркая трава, 2 – более темная трава, ..., 6 – кустарники, подлесок, 12 – болотистая местность. По данным рис. 1е можно отметить большее проявление заболоченности местности в нижней части выбранной рамки, чем на остальной части иллюстрируемой территории.

Возвращаясь к карте наземной лесотаксации, приведем увеличенный фрагмент (рис. 2а на цветн. вклейках) картосхемы рис. 1б для более наглядной демонстрации восстановленных характеристик лесной растительности. Из приведенных данных, касающихся плотности лесного полога (рис. 2б, там же), можно видеть попиксельную неоднородность, присущую как березня-

кам, так и соснякам. Цветовая шкала, близкая к 1 (темно-зеленые оттенки), соответствует на рис. 2б преобладанию сосняков, в то время как на порядок менее плотный полог (красные оттенки) характерен для березняков на иллюстрируемом фрагменте. Ажурность (плотность) крон хвойных пород также более однородна (значения близки к 1, зеленые цвета) для сосновых насаждений на рис. 2в (на цветн. вклейках), а в нижней части рис. 2в можно видеть на порядок меньшие значения этой характеристики. Сводная величина произведения плотности полога и плотности крон вбирает в себя (рис. 2г там же) особенности каждой из этих характеристик лесной растительности.

Восстановленные в соответствии с описанной выше моделью характеристики биологической продуктивности лесной растительности выбранной территории приведены на рис. 2е, ж, з (на цветн. вклейках). Для сравнения на рис. 2д представлено распределение индекса нормализованной разности (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI). Значения этого индекса изменяются от нуля (нелесные объекты, красный цвет на рис. 2д) до 0.756 (сине-зеленый цвет). Можно видеть, что для преобладающих березняков значения этого индекса больше, чем для сосняков. Объем фитомассы листвы/хвои (рис. 2е) более велик для преобладающих сосняков (5–7 т/га) в сравнении с преобладающими березняками (1–3 т/га). В соответствии с используемой моделью значения чистой первичной продукции (в граммах углерода на кв. метр в год) изменяются почти в 3 раза и имеют меньшие значения для сосняков, чем для березняков (рис. 2ж). Значения доли поглощенной ФАР (FAPAR) изменяются примерно в два раза при переходе от березовых к сосновым насаждениям (рис. 2з).

В целом можно отметить перспективность развиваемого здесь подхода для распознавания природно-техногенных объектов и оценки параметров состояния лесной растительности по данным гиперспектрального аэрокосмического зондирования. Значительные перспективы такого подхода просматриваются в связи с тем, что он создает условия для разработки такой аппаратуры ГС-зондирования, которая будет адаптирована к используемой программной среде, учитывающей спектральное разрешение и распределение каналов по спектру при решении конкретной прикладной задачи. Это означает автоматизированную настройку аппаратуры под конкретную задачу с обоснованным более плотным спектральным разрешением в одних случаях и менее плотным разрешением в других случаях, как это достигается в некоторых современных зарубежных комплексах аэрокосмического ГС-зондирования. Дополнительное использование самолетных систем лазерного сканирования создает предпосылки для получения трехмерной структуры лесного

полога при изменяющейся геометрии и пространственных масштабах наблюдений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были показаны основные этапы обработки данных ГС-аэрозондирования с использованием перечисленных особенностей используемой аппаратуры, методов описания формирования регистрируемых спектров и восстановления параметров, характеризующих биологическую продуктивность хвойных и лиственных пород лесной растительности. Перспективы соответствующих приложений связаны с доведением до конечного информационного продукта разрабатываемых вычислительных процедур (классификаторов) распознавания природно-техногенных объектов с учетом составных элементов технологии географической привязки аэрокосмических изображений, их трансформирования в определенную проекцию карты, проведения радиометрической и других видов коррекции данных ГС-аппаратуры. Требуется дальнейшая отработка процедур наземной валидации получаемой информационной продукции обработки ГС-изображений для отображения результатов обучения классификатора в терминах плотности полога и ажурности крон – основных координат, в которых представлены результаты модельных расчетов.

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.* Методы оценки состояния почвенно-растительного покрова по данным оптических систем дистанционного аэрокосмического зондирования. Уч. пособие. М.: МФТИ, 2008. 222 с.
- 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., Каменцев В.П.* Исследование лесных и торфяных пожаров по данным гиперспектрального аэрозондирования // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 5. С. 70–79.
- 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 многогоспектральных спутниковых изображений // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 1. С. 57–65.
- Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Райкунов Г.Г., Казанцев О.Ю., Белоцерковский А.В., Асташкин А.А., Бобылев В.И., Дмитриев Е.В., Каменцев В.П., Борзяк В.В., Щербakov М.В., Лесуновский А.А.* Аэрокосмическая гиперспектрометрия: летные испытания аппаратуры, программно-алгоритмическое обеспечение обработки данных // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 5. С. 59–68.
- Усольцев В.А.* Принципы и методы расчета таблиц биопродуктивности // Лесоведение. 1988. № 2. С. 24–33.
- Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г., Нильссон С., Булуй Ю.И.* Система моделей роста и динамики продуктивности лесов России (таблицы биологической продуктивности) // Лесное хозяйство. 2004. № 2. С. 40–44.
- Dalponte M., Bruzzone L., Gianelle D.* Fusion of hyperspectral and LIDAR remote sensing data for classification of complex forest areas // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2008. V. 46. № 5. P. 1416–1427.
- Deering D.W., Eck T.F., Banerjee B.* Characterization of the reflectance anisotropy of three boreal forest canopies in spring-summer // Rem. Sens. Environ. 1999. V. 67. № 2. P. 205–229.
- Foody G.M.* Thematic map comparison: evaluating the statistical significance of differences in classification accuracy // Photogram. Engin. Rem. Sens. 2004. V. 70. № 5. P. 627–633.
- Korpela I., Orka H.O., Heikkinen V., Tokola T., Hyypaa J.* Range and AGC normalization of LIDAR intensity data for vegetation classification // ISPRS J. Photogram. Rem. Sens. 2010. V. 65. P. 369–379.
- Kozoderov V.V., Dmitriev E.V.* Remote sensing of soils and vegetation: regional aspects // Int. J. Rem. Sens. 2008. V. 29. № 9. 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. P. 5699–5717.
- Hagen N., Tkaczyk T.S.* Compound prism design principles, I // Appl. Opt. 2011. V. 50. P. 4998–5011.
- Plaza A., Benediktsson J.A., Boardman J.W., Brazile J., Bruzzone L., Camps-Valls G., Chanussot J., Fauvel M., Gamba P., Gualtieri A., Marconcini M., Tilton J.C., Trianni G.* Recent advances in techniques for hyperspectral image processing // Rem. Sens. Environ. 2009. V. 113. P. 110–122.
- Prieto-Blanco A., North P.R.J., Barnsley M.J., Fox N.* Satellite-driven modelling of Net Primary Productivity (NPP): Theoretical analysis // Rem. Sens. Environ. 2009. V. 113. P. 137–147.

## Hyperspectral Airborne Remote Sensing Data Processing

V. V. Kozoderov<sup>1</sup>, T. V. Kondranin<sup>2</sup>, E. V. Dmitriev<sup>3</sup>, O. Yu. Kazantsev<sup>4</sup>,  
I. V. Persev<sup>4</sup>, M. V. Tscherbakov<sup>4</sup>

<sup>1</sup> *M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow*

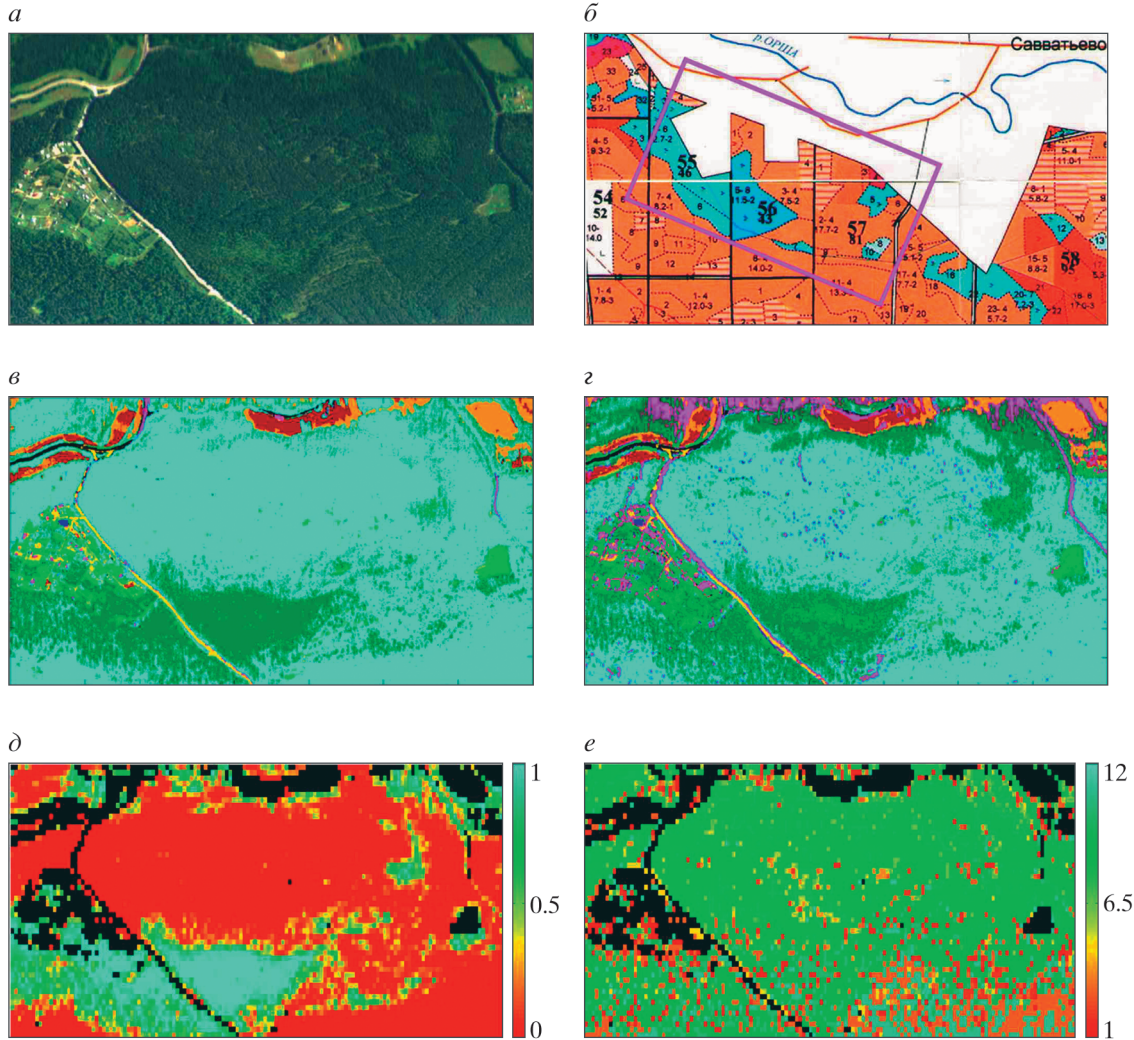
<sup>2</sup> *Moscow Institute for Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Moscow Region*

<sup>3</sup> *Institute of Numerical Mathematics of Russian Academy of Sciences, Moscow*

<sup>4</sup> *Scientific and Production Organization "Lepton", Moscow*

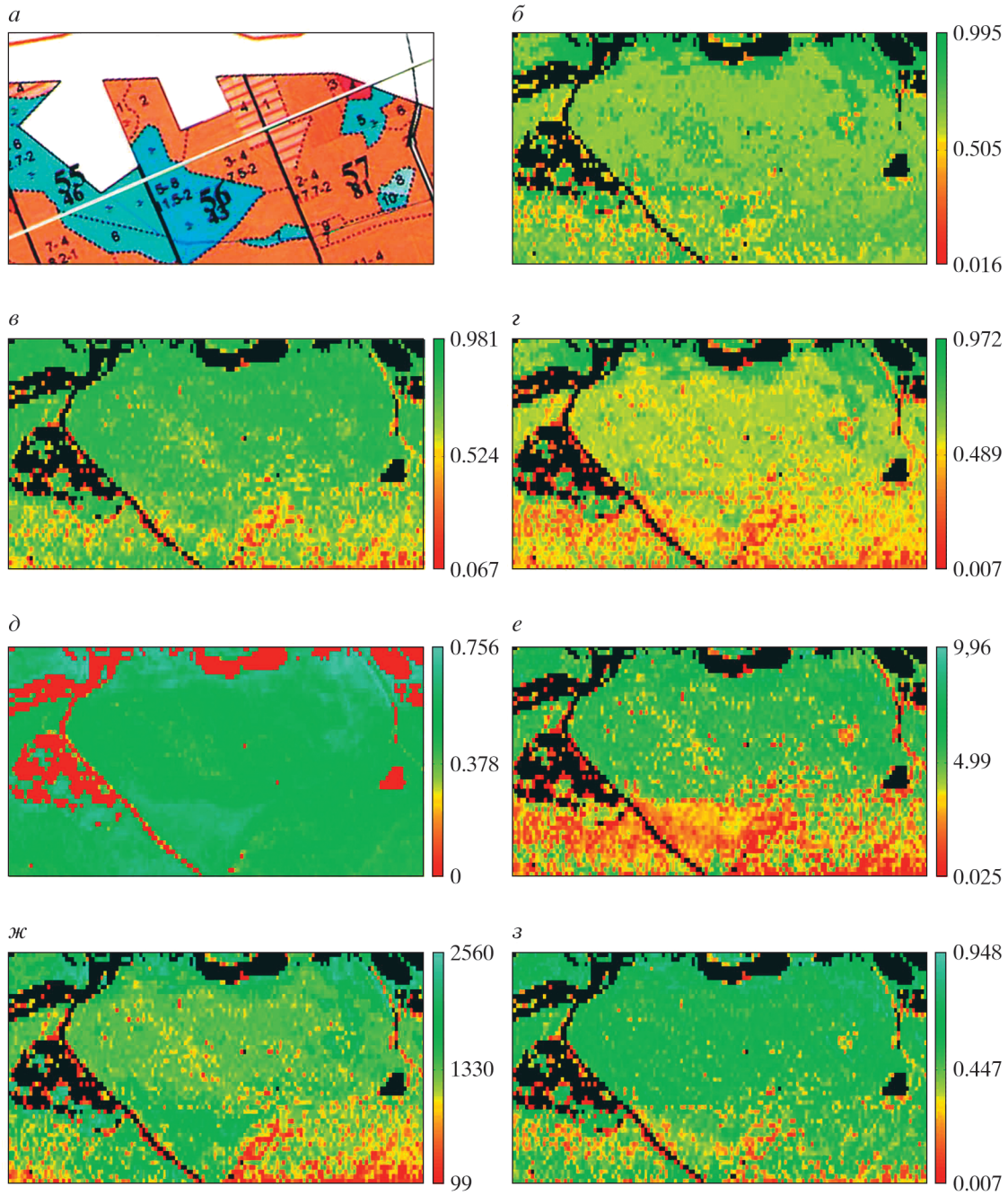
Specific features are outlined of hyperspectral airborne remotely sensed data applications to solve problems of natural and anthropogenic objects recognition and assessment of parameters characterizing the forest vegetation state. Basis of remote sensing hyperspectral apparatus complex calibration and spectral radiances registration on CCD-matrices is described. The assertion of the problem is revealed concerning the registered spectra formation on hyperspectral images having into account the transmission of the optical system, its spectral sensitivity and the noise component of the instrument used. Examples are depicted of hyperspectral airborne remote sensing data processing with classification of the selected image under different spectral resolution as well as with the parameters retrieval, which characterize the forest vegetation state of various species including the forest canopy density and the forest stand crowns density, the leaves/needles phytomass volume, the net primary productivity and the effective fraction of the absorbed photosynthetically active radiation.

**Keywords:** hyperspectral remote sensing, data processing, natural and anthropogenic objects recognition, forest stand parameters retrieval



**Рис. 1.** Классификация ГС-изображения: *a* – синтезированное RGB-изображение выбранной территории; *б* – расположение рассматриваемой сцены на лесотаксационной карте (выделено фиолетовой рамкой); *в* и *з* – результаты распознавания классов наземных объектов на основе характерных спектров отраженного солнечного излучения при различном спектральном разрешении (соответственно по 48 каналам с разрешением 10 нм и по шести каналам с разрешением 100 нм); *д* – пространственное распределение преобладающего породного состава лесной растительности, редуцированное к разрешению “прямой” модели; *е* – то же для типов межкрупной растительности.





**Рис. 2.** Восстановленные характеристики лесной растительности на основе предлагаемого метода обращения расчетной модели интенсивности излучения, регистрируемого аппаратурой ГС-зондирования: *а* – карта наземной лесотаксации выбранной территории; *б* – попиксельные значения плотности лесного полога; *в* – ажурности крон древостоев; *г* – проективного покрытия почв; *д* – индекса NDVI; *е* – объема фитомассы листвы/хвои; *ж* – чистой первичной продукции; *з* – доли поглощенной фотосинтетически активной радиации.



МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ  
КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АСИММЕТРИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
ВОЗВЫШЕНИЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ДАННЫМ  
АЛЬТИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

© 2012 г. А. С. Запевалов\*, В. В. Пустовойтенко

Морской гидрофизический институт Национальной академии наук Украины, Севастополь

\*E-mail: sevzepter@mail.ru

Поступила в редакцию 23.08.2011 г.

Показано, что при вертикальном зондировании морской поверхности с использованием космических аппаратов основной вклад в формирование переднего фронта отраженного радиоимпульса дают отражения от участков морской поверхности, где ее возвышения  $\eta$  лежат в пределах  $-m\sigma_s < \eta < m\sigma_s$ , при значении численного коэффициента  $2.5 < m < 3$ , ( $\sigma_s^2$  – дисперсия возвышений поверхности). Расчет асимметрии распределения возвышений морской поверхности по данным альтиметрических измерений соответствует расчету асимметрии усеченного распределения, что приводит к значительным ошибкам. Асимметрия распределения, полученная для усеченной модели Грама–Шарлье, оказывается заниженной примерно в 2 раза.

**Ключевые слова:** возвышения морской поверхности, спутниковые альтиметрические измерения, асимметрия, SEASAT-1, Jason-2

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы появился ряд работ, в которых предпринимаются попытки оценить асимметрию распределения возвышений морской поверхности по данным измерений радиоальтиметров, установленных на космических аппаратах (КА) (Callahan, Rodriguez, 2004; Gómez-Enri et al., 2006, 2007). Информация об асимметрии необходима для коррекции данных измерений рельефа морской поверхности вдоль трассы КА (Haune et al., 1994; Запевалов, 2012). Погрешность, обусловленная отклонением распределения возвышений морской поверхности от распределения Гаусса, в определении расстояния от спутника до уровня невозмущенной поверхности может достигать величин порядка 10 см (Rodríguez, 1988). Информация об асимметрии может быть использована для выделения потенциально опасных регионов, где возникают аномальные волны (волны, высота которых более чем в 2 раза превышает значимую высоту). В присутствии аномальных волн асимметрия распределения возвышений поверхности возрастает (Guedes Soares et al., 2003).

В основе альтиметрического определения асимметрии лежит модель Брауна, описывающая форму радиоимпульса, отраженного от морской поверхности при квазивертикальном зондировании (Brown, 1977). Согласно данной модели, от-

раженный радиоимпульс можно представить в виде свертки трех функций, одна из которых определяется распределением возвышений поверхности. Модель Брауна создает принципиальную возможность определения характеристик морской поверхности по данным альтиметрических измерений (Callahan, Rodriguez, 2004; Fedor, 1979).

Всю информацию о расстоянии от альтиметра до уровня невозмущенной морской поверхности и о статистических характеристиках взволнованной поверхности несет передний фронт отраженного радиоимпульса. В частности, угол наклона переднего фронта позволяет оценить дисперсию возвышений морской поверхности  $\sigma_s^2$  (или значимую высоту волн  $H_s = 4\sigma_s$  (Basu, Pandey, 1991; Callahan, Rodriguez, 2004)). Сопоставление данных измерений с КА и измерений с волнографических буев показывает, что достигнутая точность дистанционного определения значимой высоты приближается к точности измерений *in situ* (Queffelec, 2004).

Отклонение распределения возвышений морской поверхности от распределения Гаусса приводит к изменениям формы переднего фронта импульса, что и позволяет определять асимметрию распределения по данным альтиметрических измерений (Gómez-Enri et al., 2007). Морское вол-

нение является слабонелинейным процессом, отклонения от распределения Гаусса невелики и, как правило, описываются с помощью моделей, построенных на основе рядов Грама–Шарлье (Запелов и др., 2011). Небольшие значения асимметрии накладывают более жесткие требования на модель формы отраженного радиосигнала, чем при определении значимой высоты волн.

В настоящей работе проводится анализ возможности и ограничений расчета асимметрии распределения возвышений морской поверхности по данным альтиметрических измерений.

### МОДЕЛЬ ОТРАЖЕННОГО РАДИОИМПУЛЬСА

Средняя форма отраженного от морской поверхности радиоимпульса при квазивертикальном зондировании описывается моделью Брауна (Brown, 1977), представляющей свертку трех функций

$$V(t) = \chi(t) * s(t) * q(t),$$

где  $\chi(t)$  – форма радиоимпульса, отраженного от плоской поверхности;  $s(t)$  – форма зондирующего радиоимпульса;  $q(t)$  – функция, связанная с плотностью вероятностей высот точек зеркального отражения; символ  $*$  – означает свертку;  $t$  – время.

В случае, когда форма зондирующего радиоимпульса задана выражением

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_r}} \exp\left(-\frac{t^2}{2D_r}\right)$$

и форма отраженного от плоской поверхности радиоимпульса

$$\chi(t) = a \exp\left[-\frac{\ln 4c}{\cos^2(\theta/2)h} t\right] H(t),$$

их свертка

$$I(t) = \chi(t) * s(t) = \frac{a}{2} \exp\left[\delta^2 \frac{D_r}{2} - \delta t\right] \times \left[1 - \operatorname{erf}\left(\left(\delta - \frac{t}{D_r}\right) \sqrt{\frac{D_r}{2}}\right)\right],$$

где  $\delta = \frac{\ln 4c}{\cos^2(\theta/2)h}$ ;  $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-y^2) dy$  –

функция ошибок;  $a$  – амплитуда; параметр  $D_r$  определяет ширину зондирующего радиоимпульса;  $c$  – скорость света;  $\theta$  – ширина луча антенны, определенная по уровню половинной мощности;  $h$  – высота орбиты КА;  $H(t)$  – единичная функция Хевисайда. Таким образом, форму отраженного радиоимпульса можно представить как свертку двух функций

$$V(t) = I(t) * q(t), \tag{1}$$

где первая функция определяется характеристиками альтиметра, вторая – характеристиками морской поверхности.

Функция  $q(t)$  рассчитывается путем преобразования плотности вероятностей возвышений морской поверхности  $P(\eta)$  с помощью соотношения, связывающего возвышение поверхности  $\eta$  и время  $t$  (Hayne et al., 1994)

$$t = \eta/(c/2).$$

Переход от плотности вероятностей  $P(\eta)$  к функции  $q(t)$  осуществляется с помощью стандартной процедуры замены переменных

$$q(t) = \frac{d\eta}{dt} P(\eta(t)). \tag{2}$$

Из выражений (1) и (2) следует, что существует принципиальная возможность определения распределения возвышения поверхности по данным альтиметрических измерений.

### РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗВЫШЕНИЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Длительное время линейная модель являлась основной моделью поля морских поверхностных волн. В рамках линейной модели поле волн представляют в виде суммы большого числа независимых синусоидальных составляющих, амплитуды которых являются случайными переменными, а фазы случайно распределены с равной вероятностью в интервале  $(0, 2\pi)$ . В силу центральной предельной теоремы подобная модель предполагает, что моделируемая характеристика (возвышение поверхности или ее уклон) подчиняются распределению Гаусса (Лонге-Хиггинс, 1962).

Взаимодействия между составляющими волнового поля должно приводить к отклонениям распределений его характеристик от распределения Гаусса. Поскольку взаимодействия являются слабыми, то отклонения от распределения Гаусса являются небольшими, что позволяет отнести распределения уклонов морской поверхности к классу квазигауссовых распределений. Плотность вероятностей подобных распределений принято описывать с помощью рядов Грама–Шарлье (Кендалл, Стьюарт, 1966).

При расчете асимметрии распределения возвышений взволнованной морской поверхности  $\lambda$  по данным альтиметрических измерений функция  $q(t)$  представляется в виде (Gómez-Enri et al., 2006, 2007)

$$q(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_c}} \exp\left[-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma_c^2}\right] \left\{1 - \frac{\lambda}{6} H_3\left(\frac{t-t_0}{\sigma_c}\right)\right\}, \quad (3)$$

где  $t_0 = 2h/c$ ;  $\sigma_c = (2/c)\sigma_s$ .

Выражение (3) получено в рамках предположения, что кумулянты возвышения поверхности четвертого и более высоких порядков равны нулю. Данной форме функции  $q(t)$  соответствует модель плотности вероятностей возвышений морской поверхности, построенная на основе Эджвортской формы типа А рядов Грама–Шарлье (Huang, Long, 1980)

$$P_{GC}(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_s}} \exp\left[-\frac{\eta^2}{2\sigma_s^2}\right] \left\{1 + \frac{\lambda}{6} H_3\left(\frac{\eta}{\sigma_s}\right)\right\}, \quad (4)$$

в которой учитываются только первые четыре (считая нулевой) члена ряда. При анализе данных альтиметрических измерений, как правило, вместо параметра  $\sigma_s$  используется значимая высота волны  $\sigma_s = H_s/4$

$$P_{GC}(\eta) = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}H_s} \exp\left[-\frac{8\eta^2}{H_s^2}\right] \left\{1 + \frac{\lambda}{6} H_3\left(\frac{4\eta}{H_s}\right)\right\}. \quad (5)$$

Следует отметить, что понижение уровня морской поверхности приводит к увеличению времени возврата радиоимпульса альтиметра. Следовательно, нечетные статистические моменты распределения  $q(t)$ , в частности асимметрия, должны иметь противоположный знак, чем моменты возвышения морской поверхности, положительно направленного вверх. В настоящей работе это учтено введением разных знаков перед  $\lambda$  в выражениях (3) и (5).

Как известно, моделям Грама–Шарлье, построенным при относительно малом числе членов ряда, присущи искажения на “крыльях” распределения, в том числе появление отрицательных значений  $P(\eta)$ . Модели Грама–Шарлье плотности вероятностей возвышений морской поверхности справедливы в ограниченной области, определяемой неравенством (Запелалов и др., 2011)

$$|\eta|/(H_s/4) < 2.5. \quad (6)$$

Таким образом, применение модели (4) приводит к некорректному описанию распределения возвышений морской поверхности в области высоких гребней и глубоких впадин волн.

Необходимо ответить на вопрос, позволяет ли модель (4), учитывая ограничение (6), определить асимметрию  $\lambda$  по данным альтиметрических измерений. Этот вопрос включает две составляющие. Первая – как искажения распределения возвышений поверхности влияют на форму отражен-

ного радиоимпульса? Вторая – какова величина погрешности, с которой, решая обратную задачу, можно определить асимметрию  $\lambda$  по распределению (4)?

### ВЛИЯНИЕ ИСКАЖЕНИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗВЫШЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ФОРМУ ОТРАЖЕННОГО РАДИОИМПУЛЬСА

В ситуации, когда модель плотности вероятностей корректно описывает только некоторую ограниченную область возвышений морской поверхности, необходимо использовать усеченную модель. В общем виде ее можно представить следующим образом

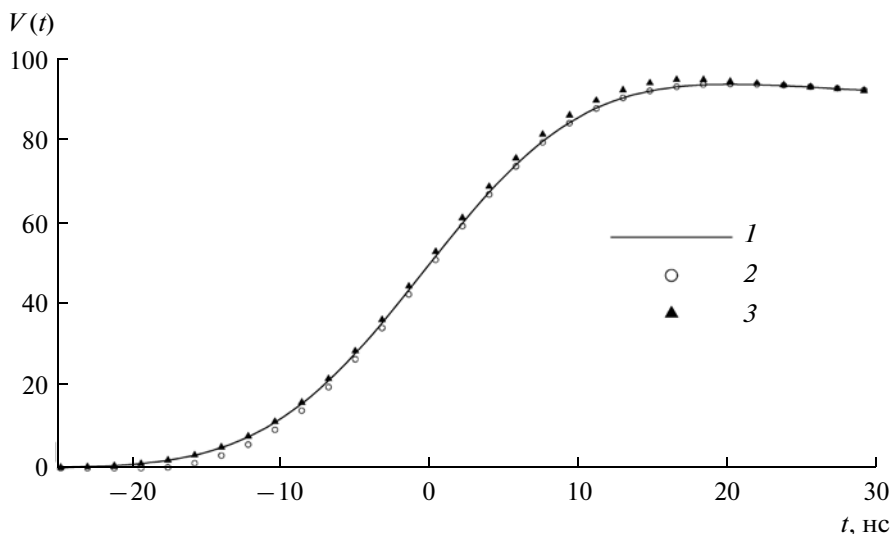
$$P^{(b)}(\eta) = \begin{cases} 0 & \text{при } \eta \leq b_1\sigma_s \\ N_b P(\eta) & \text{при } b_1\sigma_s < \eta < b_2\sigma_s, \\ 0 & \text{при } \eta \geq b_2\sigma_s \end{cases}, \quad (7)$$

где параметры  $b_1$  и  $b_2$  определяют область, в которой справедлива модель  $P(\eta)$ ;  $N_b$  – множитель, который определяется из условия нормировки  $\int_{-\infty}^{\infty} P^{(b)}(\eta) d\eta = 1$ .

Анализ начнем с ситуации, в которой распределение возвышений морской поверхности является гауссовым. При расчетах здесь и далее предполагается, что значения параметров  $\theta$ ,  $\sqrt{D_r}$  и  $h$  соответствуют параметрам альтиметра, установленного на КА SEASAT-1:  $\theta = 1.6^\circ$ ,  $\sqrt{D_r} = 1.327$  нс и  $h = 8 \times 10^5$  м (Mac-Arthur, 1978). Принято, что амплитудный множитель в выражении (4)  $a = 100$ .

На рис. 1 представлена форма отраженных радиоимпульсов, рассчитанных для трех ситуаций: когда поверхность описывается распределением Гаусса  $P_G(\eta)$ ; распределением Гаусса  $P_G^{(b)}(\eta, b_1 = -\infty, b_2 = 2)$ , усеченным в области положительных значений возвышений (в области гребней волн); распределением Гаусса  $P_G^{(b)}(\eta, b_1 = -2, b_2 = \infty)$ , усеченным в области отрицательных значений. Расчеты проведены для значимой высоты волн  $H_s = 5$  м. Видно, что искажение распределения возвышений поверхности в области гребней волн приводит к изменению формы отраженного радиоимпульса у его подошвы. Искажение распределения возвышений в области впадин волн приводит к изменению формы отраженного радиоимпульса у его вершины.

Оценим, как изменение параметров  $b_1$  и  $b_2$  в модели (7) влияет на форму отраженного радиоимпульса. Для этого рассмотрим отраженный радиоимпульс в ситуации, когда распределение воз-



**Рис. 1.** Изменение формы отраженного радиоимпульса  $V(t)$  при использовании полного и усеченных распределений возвышений морской поверхности: 1 –  $V_G(t)$ ; 2 –  $V_G^{(b)}(t, b_1 = -\infty, b_2 = 2)$ ; 3 –  $V_G^{(b)}(t, b_1 = -2, b_2 = \infty)$ . Расчет для КА SEASAT-1.

вышений описывается симметрично усеченным распределением Гаусса. Будем полагать  $b_2 = -b_1 = b$ . Форма радиоимпульса, отраженного от морской поверхности, и ее относительное изменение  $V_G^{(b)}(t)/V_G(t)$ , рассчитанное при разных значениях параметра  $b$ , представлены на рис. 2. Здесь и далее индексы функции, описывающей форму отраженного радиоимпульса, соответствуют индексам модели распределения возвышений поверхности, по которой рассчитывался отраженный радиоимпульс.

В верхней части рисунка представлена форма отраженного радиоимпульса, построенная при  $H_s = 5$  м для возвышений морской поверхности, подчиняющихся распределению Гаусса. Горизонтальными штриховыми линиями показаны уровни, рассчитанные относительно максимального значения отраженного радиоимпульса,  $M = \max(V(t))$ .

В области малых значений отраженного радиоимпульса ( $0.1M - 0.2M$ ) отношение  $V_G^{(b)}(t)/V_G(t)$  при  $b = 2.5$  находится в пределах  $0.96-0.98$ , при  $b = 2$  – в пределах  $0.85-0.94$ . В окрестности пика отраженного радиоимпульса искажения формы имеют место в случае  $b < 2.5$ , при  $b = 2$  максимум отношения  $V_G^{(b)}(t)/V_G(t)$  равен 1.022, при  $b = 1.5$  – равен 1.062. При  $b = 2.5$  в этой области отношение  $V_G^{(b)}(t)/V_G(t)$  не превышает уровня 1.007. С ростом

параметра  $b$  отношение  $V_G^{(b)}(t)/V_G(t)$  стремится к единице.

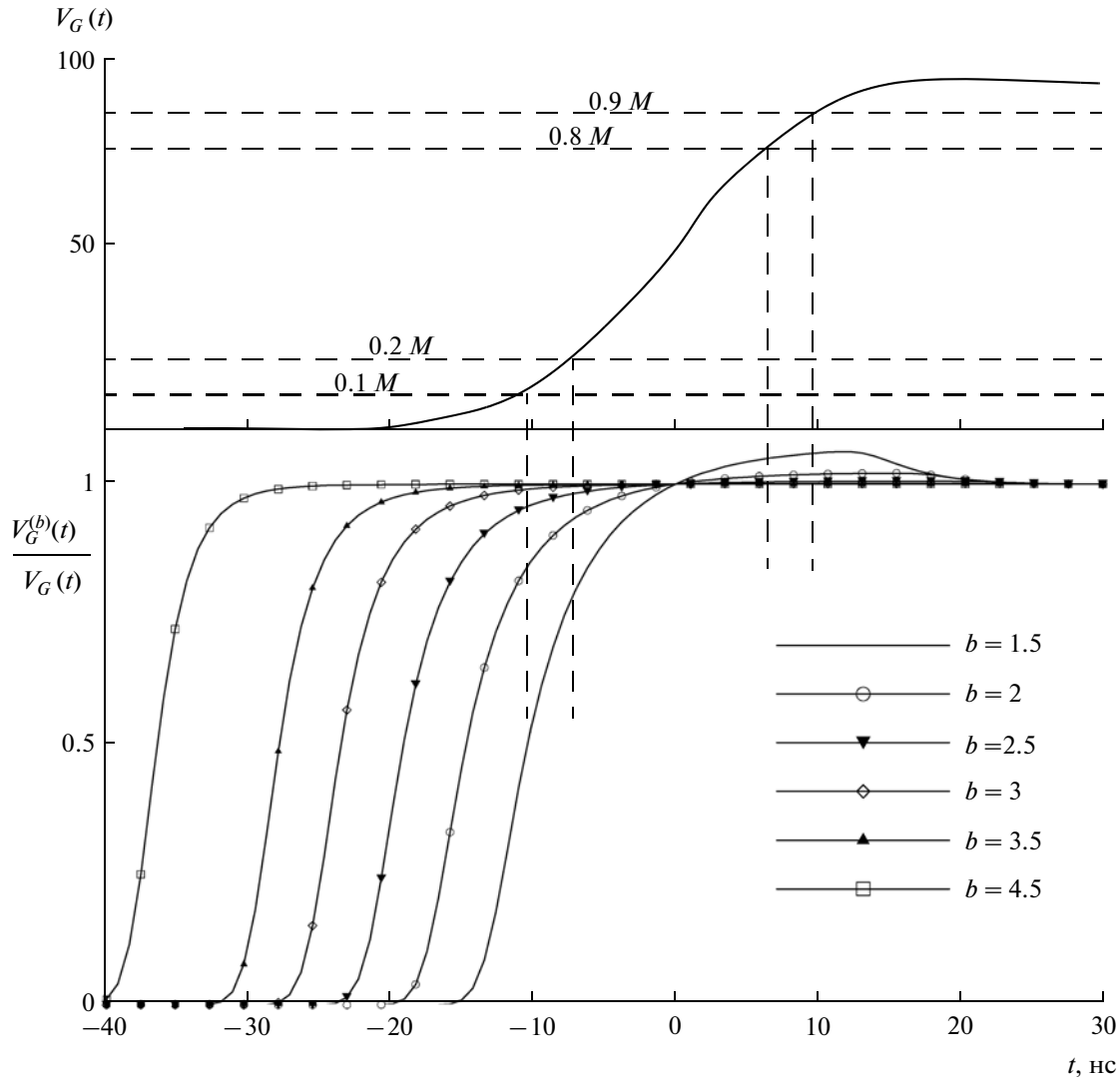
Таким образом, передний фронт отраженного радиоимпульса, несущий информацию об уровне морской поверхности и ее характеристиках, в основном формируют отражения от участков морской поверхности, где возвышения удовлетворяют условию

$$|\eta| < m\sigma_s, \tag{8}$$

где значения коэффициента  $m$  лежат в пределах от 2.5 до 3. Учитывая, что при анализе альтиметрических измерений, как правило, вместо параметра  $\sigma_s$  используется значимая высота волн, выражение (8) можно переписать в виде  $|\eta| < mH_s/4$ .

Перейдем к рассмотрению ситуаций, когда распределение возвышений морской поверхности описывается выражением (5). В натуральных условиях асимметрия  $\lambda$  меняется в широких пределах. По данным прямых измерений возвышений морской поверхности, значения  $\lambda$  обычно лежат в пределах от  $-0.05$  до  $0.4$  (Guedes Soares et al., 2003; Jha, Winterstein, 2000).

Распределение (5), рассчитанное при  $\lambda = 0.4$ , представлено на рис. 3. Там же для сравнения приводится распределение Гаусса. Чтобы исключить зависимость плотности вероятностей от значимой высоты волн, введена нормировка  $\tilde{\eta} = \eta/(H_s/4)$ . Искажения, связанные с использованием в модели (5) небольшого числа членов ряда Грама–Шарлье, на-



**Рис. 2.** Влияние границ задания усеченной модели плотности вероятностей возвышений морской поверхности  $P_G^{(b)}(\eta)$  на форму отраженного радиоимпульса  $V_G^{(b)}(t)$ . Расчет для космического аппарата SEASAT-1.

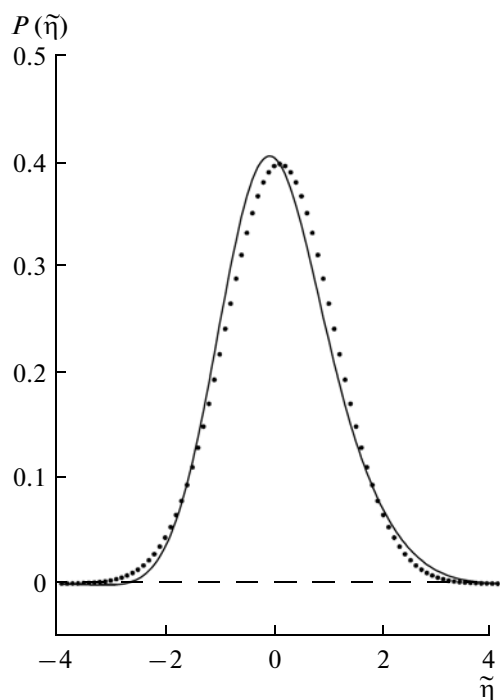
глядно проявляются в появлении отрицательных значений. Граница появления отрицательных значений равна  $-2.9$ .

Форма отраженного радиоимпульса, рассчитанная для поверхности, описываемой моделью (5), показана на рис. 4. Влияние асимметрии  $\lambda$ , в частности, проявляется в запаздывании переднего фронта радиоимпульса относительно переднего фронта радиоимпульса, отраженного от гауссовой поверхности. Запаздывание составляет около  $0.5$  нс, что соответствует ошибке в определении уровня поверхности, равной  $7.5$  см.

Поведение функции  $V_{GC}^{(b)}(t)/V_{GC}(t)$  в целом подобно поведению представленной на рис. 2 функции  $V_G^{(b)}(t)/V_G(t)$ . Это подтверждает вывод о том,

что передний фронт отраженного радиоимпульса в основном формируют отражения от участков морской поверхности, где возвышения удовлетворяют условию (8).

Следует отметить, что хотя при численных расчетах в настоящей работе использовались параметры альтиметра, установленного на КА SEASAT-1, данный результат остается справедливым и для других КА. Для сравнения на рис. 5 приведены отраженные импульсы, рассчитанные для альтиметров КА Jason-2 с высотой орбиты  $1336$  км. На борту Jason-2 установлены два альтиметра, работающие в Ku- и в C-диапазонах длин радиоволн, с шириной диаграммы направленности  $1.26^\circ$  и  $3.38^\circ$  соответственно (Vignudelli et al., 2011). Длительность импульсов  $3.125$  нс. Видно, что и при



**Рис. 3.** Модели плотности вероятностей: сплошная линия – распределение (10)  $\lambda = 0.4$ ; пунктир – распределение Гаусса.

существенно отличных параметрах альтиметра подтверждается вывод о том, что основной вклад в отраженный импульс дают участки, удовлетворяющие условию (8).

### СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОМЕНТЫ УСЕЧЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАМА–ШАРЛЬЕ

Выше было показано, что, оценивая асимметрию распределения возвышений морской поверхности по переднему фронту отраженного радиоимпульса, мы фактически оцениваем асимметрию усеченного распределения. Проанализируем ошибку, с какой, решая обратную задачу, можно определить асимметрию распределения (4)

$$\lambda_{GC}(b) = \int_{-b}^b \tilde{\eta}^3 P_{GC}(\tilde{\eta}) d\tilde{\eta}. \quad (9)$$

В данном случае значение  $\lambda$  является истинным, поскольку именно его мы используем при описании моделируемого волнового поля.

Зависимости  $\lambda_{GC}(b)$  от  $\lambda$ , полученные при разных значениях параметра  $b$ , представлены на рис. 6а. При  $b = 2.5$  связь расчетной и истинной асимметрии можно аппроксимировать линейной зависимостью  $\lambda_{GC}(b) \approx 0.4\lambda$ , при  $b = 3$  – зависимостью

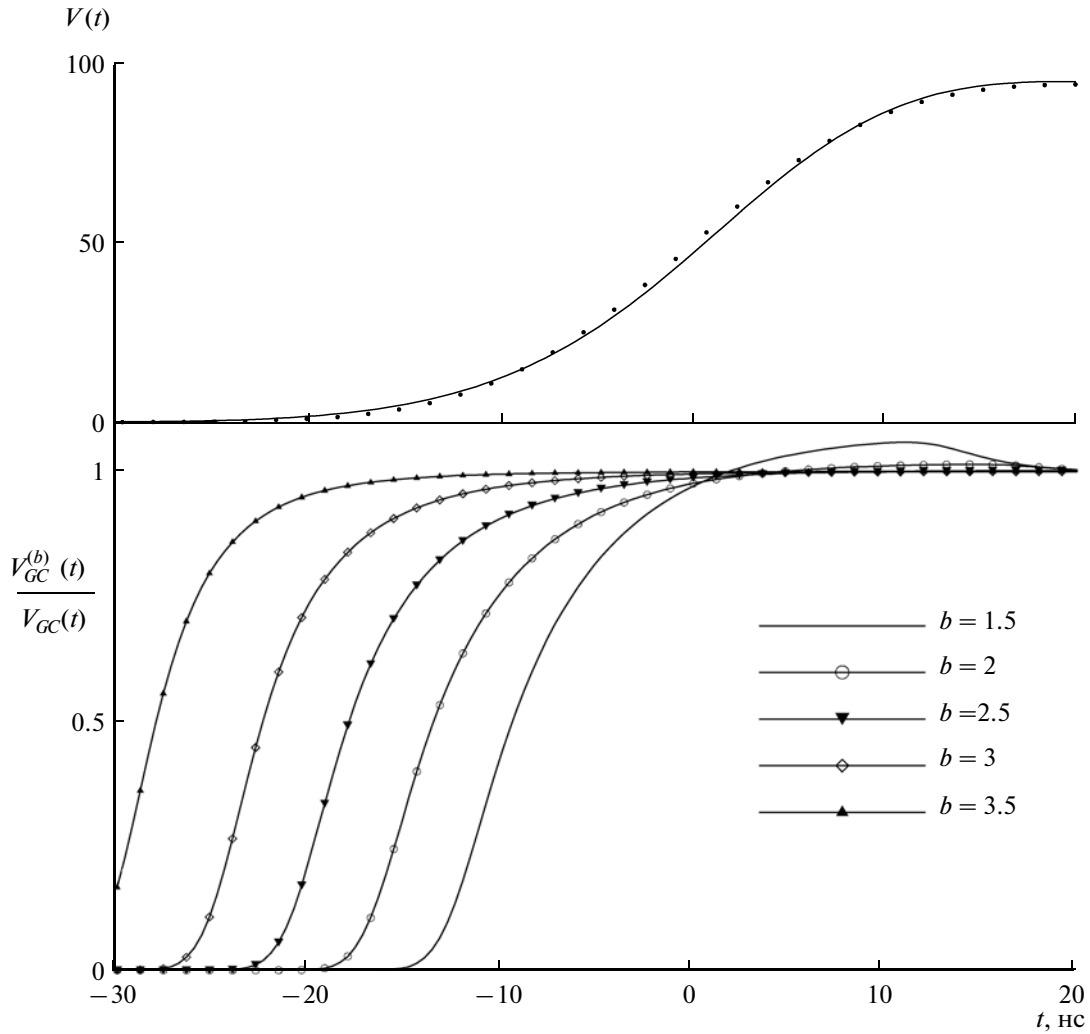
$\lambda_{GC}(b) \approx 0.65\lambda$ . В модели (4) не учитывается, что эксцесс и кумулянты возвышений взволнованной поверхности более высоких порядков отличны от нуля (Huang, Long, 1980). При фиксированном значении параметра  $b$  расчеты по моделям, включающим разное число членов ряда Грама–Шарлье, могут приводить к несколько различающимся значениям коэффициентов в зависимостях  $\lambda_{GC}(b)$  от  $\lambda$ .

Учитывая, что основной вклад в формирование переднего фронта отраженного радиоимпульса дают возвышения морской поверхности, удовлетворяющие условию (6), данное обстоятельство накладывает ограничения на возможность определения третьего статистического момента с помощью модели (4).

Можно добавить, что на дисперсию усеченного распределения Грама–Шарлье

$$D_{GC}(b) = \int_{-b}^b \tilde{\eta}^2 P_{GC}(\tilde{\eta}) d\tilde{\eta} \quad (10)$$

изменение пределов интегрирования при  $b \geq 2.5$  оказывает относительно небольшое влияние (см. рис. 6б). При этом изменения асимметрии  $\lambda$  в пределах от  $-0.05$  до  $0.4$ , практически не влияют на величину  $D_{GC}(b)$ . Оценки  $D_{GC}(b)$ , полученные при разных значениях асимметрии  $\lambda$ , отличаются



**Рис. 4.** Влияние границ задания усеченной модели плотности вероятностей возвышений морской поверхности  $P_{GC}^{(b)}(\eta)$  на форму отраженного радиоимпульса  $V_{GC}^{(b)}(t)$ . В верхней части рисунка: сплошная линия –  $V_{GC}(t)$ ; пунктир –  $V_G(t)$ . Расчет для КА SEASAT-1.

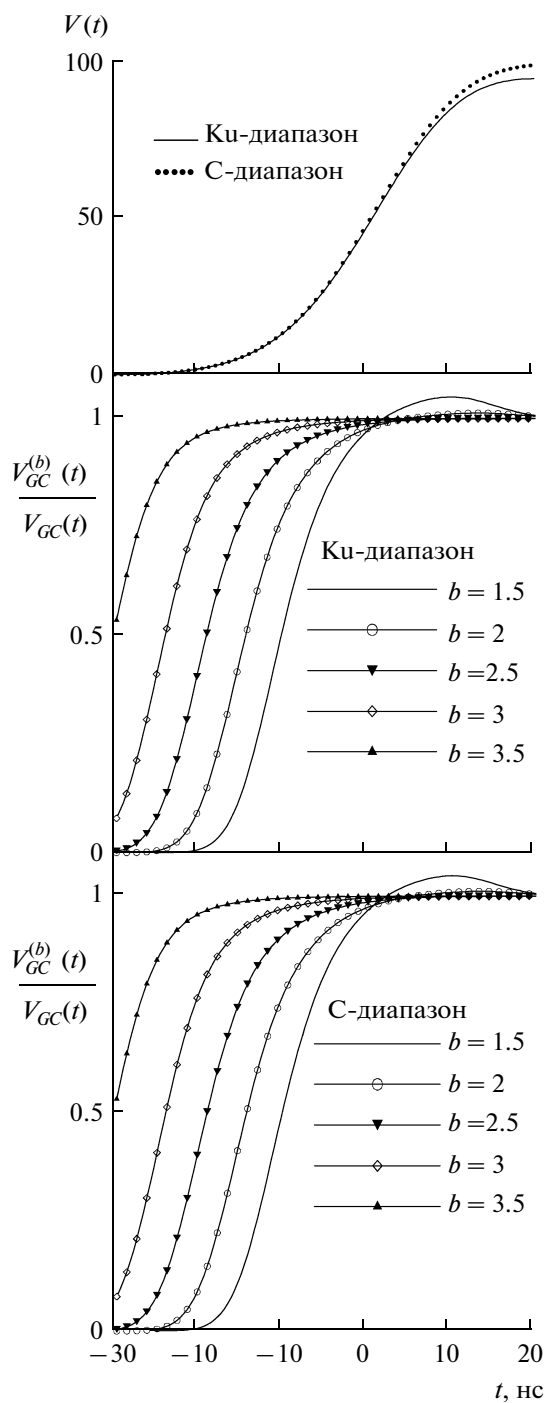
менее чем на 0.2%. Выбранные пределы изменения  $\lambda$  соответствуют наблюдаемым изменениям асимметрии распределения возвышений морской поверхности, в том числе наблюдаемым при штормовых условиях (Guedes Soares et al., 2003; Jha, Winterstein, 2000).

Таким образом, использование модели Грама–Шарлье, ограниченной условием (6), слабо влияет на расчет значимой высоты волн по данным альтиметрических измерений. При  $b = 2.5$  относительная ошибка определения  $H_s$  равна 5%, при  $b = 3$  равна 1.5%. В то же время при использовании усеченной модели Грама–Шарлье нельзя точно определить асимметрию распределения возвышений морской поверхности. Выводы об ограничении возможностей решения обратной

задачи (восстановление характеристик морской поверхности по данным вертикального зондирования) справедливы для всех альтиметров, установленных на действующих в настоящее время и закончивших свои миссии КА.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При вертикальном зондировании морской поверхности с КА информацию об уровне морской поверхности и ее состоянии несет передний фронт отраженного радиоимпульса. Проведенный анализ показал, что основной вклад в формирование переднего фронта отраженного радиоимпульса вносят отражения от участков морской поверхности, где возвышения лежат в



**Рис. 5.** Влияние границ задания усеченной модели плотности вероятностей возвышений морской поверхности  $P_{GC}^{(b)}(\eta)$  на форму отраженного радиоимпульса  $V_{GC}^{(b)}(t)$  для альтиметров КА Jason-2.

пределах  $-m\sigma_s < \eta < m\sigma_s$ , при значении численно-го коэффициента  $2.5 \leq m \leq 3$ .

Решение обратной задачи – восстановление по данным альтиметрических измерений дисперсии и асимметрии распределения возвышений морской

поверхности – соответствует расчету по усеченной модели плотности вероятностей. Асимметрия распределения, полученная для усеченной модели Грама–Шарлье в форме (9), значительно отличается от истинной асимметрии. Она оказывается

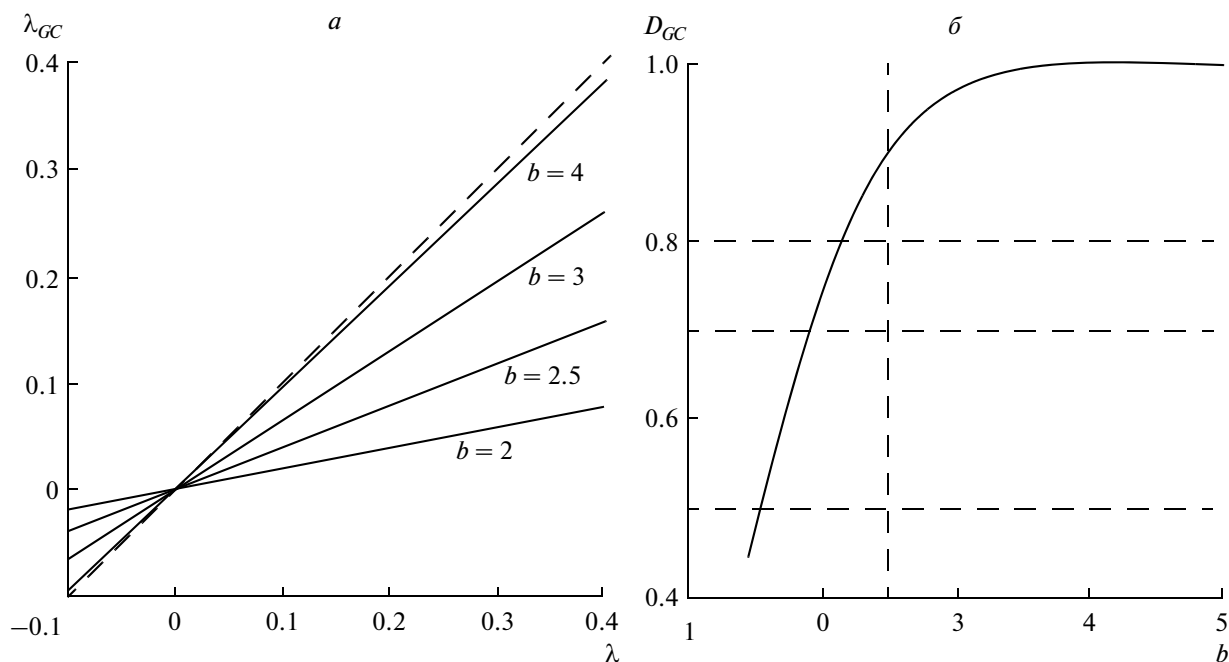


Рис. 6. Статистические моменты возвышений морской поверхности при разных границах задания усеченной модели Грама–Шарлье: а – зависимости  $\lambda_{GC}(b)$  от  $\lambda$  (сплошные линии) и  $\lambda_{GC} = \lambda$  (пунктир); б – зависимость  $D_{GC}$  от  $b$ .

заниженной примерно в 2 раза. На расчет значимой высоты волн использование усеченной модели плотности вероятностей практически не влияет.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Запелов А.С. Влияние асимметрии и эксцесса распределения возвышений взволнованной морской поверхности на точность альтиметрических измерений ее уровня // Изв. РАН Сер. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 2. С. 224–231.
- Запелов А.С., Большаков А.Н., Солов В.Е. Моделирование плотности вероятностей возвышений морской поверхности с помощью рядов Грама–Шарлье // Океанология. 2011. Т. 51. № 3. С. 432–439.
- Кендалл М.Дж., Стьюарт А. Теория распределений. М.: Наука, 1966. 587 с.
- Лонге-Хиггинс М.С. Статистический анализ случайной движущейся поверхности / Ветровые волны. М.: Иностранная литература, 1962. С. 125–218.
- Basu S., Pandey P.C. Numerical experiment with modelled return echo of a satellite altimeter from a rough ocean surface and a simple iterative algorithm for the estimation of significant wave height // Proc. Indian Acad. Sci. (Earth Planet. Sci.). 1991. V. 100. № 2. P. 155–163.
- Brown G.S. The average impulse response of a rough surface and its applications // IEEE Trans. Antennas Propagat. 1977. V. AP-25. P. 67–74.
- Callahan P.S., Rodriguez E. Retracking of Jason-1 Data // Marine Geodesy. 2004. V. 27. P. 391–407. doi: 10.1080/01490410490902098.
- Fedor L.S., Godbey T.W., Gower J.F.R., Guptill R., Hayne G.S., Rufenach C.L., Walsh E.J. Satellite altimeter measurements of sea state – An algorithm comparison // J. Geophys. Res. 1979. V. 84. № B8. P. 3991–4001.
- Gómez-Enri J., Gommenginger C.P., Challenor P.G., Srokosz M.A., Drinkwater M.R. ENVISAT radar altimeter tracker bias // Marine Geodesy. 2006. V. 29. P. 19–38. doi: 10.1080/01490410600582296.
- Gómez-Enri J., Gommenginger C.P., Srokosz M.A., Challenor P.G. Measuring global ocean wave skewness by retracking RA-2 Envisat waveforms // J. Atm. Ocean. Tech. 2007. V. 24. P. 1102–1116.
- Guedes Soares C., Cherneva Z., Antão E.M. Characteristics of abnormal waves in North Sea storm sea states // Appl. Ocean Res. 2003. V. 25. P. 337–344.
- Hayne G.S., Hancock D.W., Purdy C.L. The corrections for significant wave height and attitude effects in the TOPEX radar altimeter // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. № C12. P. 24941–24955.
- Huang N.E., Long S. R. An experimental investigation of the surface elevation probability distribution and statistics of wind-generated waves // J. Fluid Mech. 1980. V. 101. № 1. P. 179–200.
- Jha A.K., Winterstein S.R. Nonlinear random ocean waves: prediction and comparison with data // Proc., 19th Intl. Offshore Mech. Arctic Eng. Symp. ASME. February 2000. New Orleans, Louisiana, USA. Paper №. OMAE 00–6125. 2000.
- Mac-Arthur J.L. SEASAT-A radar altimeter design description // Applied Physics Lab. Laurel, MD. SDO-5232. Nov. 1978.
- Queffeuol P. Long-term validation of wave height measurements from altimeters // Marine Geodesy. 2004. V. 27. P. 495–510. doi: 10.1080/01490410490883478.
- Rodriguez E. Altimetry for non-Gaussian oceans: Height biases and estimation of parameters // J. Geophys. Res. 1988. V. 93. № C11. P. 14107–14120.
- Vignudelli S., Kostianoy A., Cipollini P., Benveniste J. Coastal altimetry. 1st Edition. Springer, 2011. XII. 566 p.

## About Estimation of Skewness of Sea Surface Elevations from Altimeter Measurements

A. S. Zapevalov, V. V. Pustovoytenko

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

It is shown that at the vertical sounding of sea surface from satellites a basic contribution to forming of leading edge of return impulse is given reflection from the areas of sea surface, where its elevations  $\eta$  lie scope  $-m\sigma_s < \eta < m\sigma_s$ , at the value of numeral coefficient  $2.5 < m < 3$ , ( $\sigma_s$  it is RMS of surface elevations). The calculation of skewness of sea surface elevations from the altimetry data corresponds the calculation of skewness of the truncated distribution that results in considerable errors. Skewness got for the truncated Gram–Charlier model of appears understated approximately in two times.

**Keywords:** sea surface elevations, satellite altimeter measurements, skewness, SEASAT-1, Jason-2

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

### ДЕШИФРИРОВАНИЕ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ LANDSAT

© 2012 г. Д. Статакис<sup>1</sup>, К. Перакис<sup>1</sup>, И. Ю. Савин<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup> Университет Фессалии, Волос, Греция

<sup>2</sup> Почвенный институт им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, Москва

<sup>3</sup> Институт космических исследований Российской академии наук, Москва

\*E-mail: savigory@gmail.com

Поступила в редакцию 04.11.2011 г.

Несмотря на то, что распознавание урбанизированных территорий может быть сделано на основе подходов простой классификации изображений, более эффективным представляется создание подхода, базирующегося на специально разработанных индексах, – так например, как это сделано в случае NDVI и растительного покрова. В статье приведен обзор существующих на данный момент индексов, позволяющих выделять урбанизированные территории, а также их сравнение на конкретном примере. На основе анализа предложен новый, более эффективный индекс (VIBI), который представляет собой нормализованную комбинацию широко известных индексов NDVI и NDBI. Апробация разработанного подхода на тестовом участке показала его преимущество над существующими индексами.

**Ключевые слова:** Landsat, урбанизированные территории, дешифрирование, NDVI, UI, IBI, NDBI

#### ВВЕДЕНИЕ

После запуска первых спутников не потребовалось много времени для того, чтобы понять, что комбинация отдельных спектральных каналов может служить источником большого количества дополнительной информации о состоянии земной поверхности. Уже через год после того, как стали доступными спутниковые данные Landsat, появилась публикация с предложением индекса, основанного на комбинации его спектральных каналов: был предложен широко известный индекс NDVI (Rouse et al., 1973) как интегральный индикатор состояния растительности. Несмотря на это, подобного по качеству надежного индекса для распознавания селитебных, застроенных мест до сих пор не предложено, что связано, скорее всего, с большей сложностью данного объекта для дешифрирования.

В действительности некоторые попытки все же были предприняты для разработки индекса, аналогичного NDVI, но предназначенного для распознавания урбанизированных мест. Их подробное описание приведено в статье ниже. Их было немного, и их эффективность оказалась недостаточно высокой, что в большинстве случаев было связано с недостаточно достоверной делимостью застроенных территорий и открытостью почв. Особенно четко это проявляется в аридных регионах.

Альтернативным подходом для дешифрирования застроенных мест является использование контролируемой классификации изображений (Haack et al., 1987; Stathakis, Vasilakos, 2006; Stathakis, 2009). Хороший обзор этих подходов приведен в (Lu, Weng, 2004). Этот метод может быть надежно распространен на другие территории, когда речь идет о выделении одного класса, а не нескольких. К тому же, использование метода контролируемой классификации – более трудоемкий процесс по сравнению с вычислением одного индекса.

Выделение единого класса урбанизированных территорий – достаточно амбициозная задача, так как урбанизированные территории могут включать в себя совершенно различные с точки зрения спектральных свойств объекты: крыши строений, дороги, тротуары, газоны и др. Более того, набор этих первичных элементов урбанизированных территорий может меняться от места к месту в зависимости от климата, геологического строения территории, рельефа, почв, национальных традиций при возведении строений и т.п. Наиболее важное значение при этом имеют доля и характер открытой поверхности почв. Спектральные особенности открытой поверхности почв сильно переменчивы в пространстве и во времени (Савин, 1995; Савин, Столбовой, 1998). Следовательно, использования лишь сведений о спектральной отражательной способности для отделения застроенных мест от открытой поверх-

ности почв будет недостаточно. При построении алгоритма разделения этих объектов теоретически можно опираться на их разницу во влажности и шероховатости поверхности, т.е. индекс территории теоретически будет наиболее успешным, если для его построения использовать каналы съемки, наиболее чувствительные именно к перечисленным параметрам. Косвенным подтверждением последнего является и то, что имеющиеся на сегодняшний момент индексы в большей степени опираются на ИК-диапазоны съемки, чем на съемку в видимом спектре длин волн.

Урбанизация оказывает большое влияние на ландшафты и сильно изменяет наземный покров (Grimm et al., 2008). Особенно быстро эти процессы протекают в развивающихся странах, территории которых занимают большую часть поверхности Земли. Это в значительной степени предопределяет необходимость разработки эффективных методов спутникового мониторинга процессов урбанизации. Разработка надежного индекса для дешифрирования и мониторинга урбанизированных территорий является важной задачей, которой и посвящена данная статья.

Необходимо отметить, что термин “урбанизированная территория” в данной статье эквивалентен классу “искусственные поверхности” (artificial surfaces) первого уровня классификации наземного покрова CORINE (Bossard et al., 2000). Согласно определению, этот класс включает в себя прерывные и непрерывные городские, коммерческие и промышленные постройки, автомобильные и железные дороги, земли портов и аэропортов, карьеры для добычи полезных ископаемых, озеленение городов, спортивные сооружения.

Также хотелось бы обратить внимание на то, что в тексте статьи каналы съемки Landsat TM пронумерованы от коротких длин волн к длинным, как это сделано на сайте спутника (<http://landsat.gsfc.nasa.gov/>).

### СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ

Перед тем, как рассматривать индексы, разработанные для дешифрирования урбанизированных территорий, необходимо вкратце остановиться на индексах, используемых для оценки тех компонентов наземного покрова, от которых урбанизированные территории должны быть отделены.

Индекс нормализованной разности почв (NDSI) (Rogers, Kearney, 2003) опирается на тот факт, что почвы, в отличие от других типов наземного покрова, больше отражают света в канале съемки TM5, чем в TM4:

$$NDSI = \frac{TM5 - TM4}{TM5 + TM4}. \quad (1)$$

По данным авторов, этот индекс позволяет более надежно, чем NDVI, отделять территории с открытой поверхностью почв от территорий, покрытых растительностью.

Индекс нормализованной разности открытости поверхности (NDBaI), предложенный в (Zhao, Chen, 2005), предназначен для установления отличий между разными типами почв, а также для их отделения от изображения построек. Он базируется больше на различиях в температурных характеристиках поверхности почв и иных материалов. Вычисляется индекс следующим образом:

$$NDBaI = \frac{TM5 - TM6}{TM5 + TM6}. \quad (2)$$

В работе (McFeeters, 1996) предложил индекс нормализованной разницы для водных поверхностей (NDWI) для выделения участков с открытой водной поверхностью. В основе индекса лежит тот факт, что вода отражает гораздо меньше света в ИК-области спектра, чем в видимой

$$NDWI = \frac{TM2 - TM4}{TM2 + TM4}. \quad (3)$$

Индекс с таким же названием, но использующий другие каналы, был предложен в работе (Rogers, Kearney, 2003)

$$NDWI = \frac{TM3 - TM5}{TM3 + TM5}. \quad (4)$$

Позднее он был модифицирован (Xu, 2006) с целью подавления шумов, создаваемых строениями

$$NDWI = \frac{TM2 - TM5}{TM2 + TM5}. \quad (5)$$

В работе (Xu, 2006) автор использовал именно эти каналы съемки, потому что в других каналах водные объекты и строения по его данным имеют близкие спектральные характеристики.

При описании существующих методов дешифрирования непосредственно урбанизированных территорий нужно начать с того, что для этих целей широко используется все тот же индекс NDVI (Silleos et al., 2006)

$$NDVIc = \frac{TM4 - TM3}{TM4 + TM3}. \quad (6)$$

В работе (Crippen, 2000) вместо NDVI предложен более рациональный индекс, но имеющий тот же смысл

$$NDVIc = \frac{TM4}{TM4 + TM3}. \quad (7)$$

В работе (Greenhill et al., 2003) использован NDVI для выделения урбанизированных территорий по спутниковым данным IKONOS. Здесь использовалось фиксированное критическое значение индекса для того, чтобы отделить покрытые

растительностью территории от непокрытых, которые и считались урбанизированными.

Из индексов, непосредственно разработанных для дешифрирования урбанизированных территорий, в первую очередь необходимо упомянуть UI (Urban Index), который был разработан Kawamura et al. (1996, 1997, 1998). Индекс рассчитывается по следующей формуле:

$$UI = \left( \frac{TM7 - TM4}{TM7 + TM4} + 1 \right) 100. \quad (8)$$

Выбор каналов для приведенной формулы был осуществлен авторами следующим образом. На тестовых участках была изучена спектральная отражательная способность различных компонентов наземного покрова. Каналы TM1, TM2 и TM3 были отброшены из-за того, что они наиболее чувствительны к оптическим свойствам наземных объектов, а также наиболее подвержены влиянию атмосферных условий. Из оставшихся каналов Landsat для построения формулы были выбраны TM4 и TM7, которые обнаруживали отрицательную зависимость с яркостью урбанизированных объектов. Необходимо отметить, что для дешифрирования урбанизированных территорий авторы использовали как UI, так и NDVI, но последовательно. Результаты анализа представлялись в виде графика, где по осям были отложены значения этих индексов.

Другой индекс, в дословном переводе «Индекс строений, базирующийся на индексах» (IBI), был разработан Xu (2008). Автор исходил из того, что любую урбанизированную территорию можно разделить на три части: постройки, растительность и водные поверхности. Вклад каждого из этих компонентов оценивался с помощью соответствующего индекса. Так, индекс NDBI использовался для оценки вклада застроенных участков, NDVI – для оценки вклада растительности и MNDWI (модификация формулы (5)) – для оценки вклада воды. Все три индекса были автором увязаны в одну формулу, которая и служила основой для выделения урбанизированных территорий

$$IBI = \frac{2TM5}{TM5 + TM4} - \left[ \frac{TM4}{TM4 + TM3} + \frac{TM2}{TM2 + TM5} \right] \quad (9)$$

$$= \frac{2TM5}{TM5 + TM4} + \left[ \frac{TM4}{TM4 + TM3} + \frac{TM2}{TM2 + TM5} \right]$$

Оказалось, что при анализе по этой формуле застроенные территории не отделяются от участков с открытой поверхностью почв. Для решения этой проблемы автор предложил использовать векторный слой с границами городов, маскируя как не урбанизированные, все участки, лежащие за пределами этой векторной маски. Этот шаг анализа значительно сузил возможности приме-

нения данного метода, так как при нем выбрасываются из анализа застроенные участки вне городской черты, нелегальные постройки, объекты инфраструктуры и т.д.

Авторы работы (Zha et al., 2003) предложили «бинарный индекс строений» (BUb). Индекс базируется на предположении, что отражение света строениями и открытой поверхностью почв значительно возрастает от канала TM4 к каналу TM5, что не характерно для иных компонентов наземного покрова. Вычисление индекса осуществляется в три этапа. На первом этапе вычисляются индексы NDBI (формула расчета аналогична (1)) и NDVI. На втором этапе всем негативным значениям NDVI и NDBI присваивается значение 0, а не негативным – значение 254. Полученные производные индексы обозначаются как NDVIb и NDBIb (т.е. бинарные) (He et al., 2010). На третьем этапе вычисляется их разница и получается индекс BUb:

$$BUb = NDBIb - NDVIb. \quad (10)$$

Урбанизированные территории и открытая поверхность почв при этом получают значение индекса 254. В работе (Zhang, He, 2006) авторы также использовали индекс BUb для мониторинга урбанизированных территорий.

Некоторые авторы (Jiang et al., 2005; Chen et al., 2006) использовали не BUb, а только NDBI для дешифрирования участков без растительности и водных поверхностей.

Научная группа (He et al., 2010) предложила иной способ вычисления индекса застроенных территорий, который базируется не на бинарных, а на исходных значениях индексов NDBIc и NDVIc (где в отличие от бинарных индексов значок «с» соответствует «continuous»)

$$BUc = NDBIc - NDVIc. \quad (11)$$

После расчета этого индекса выбирается пороговое значение, на основе которого и выделяют застроенные территории.

## ТЕСТИРОВАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ ИНДЕКСОВ

Наиболее широко используемые из описанных выше индексов были протестированы на ключевом участке, расположенном в окрестностях города Волос (Греция). Участок имеет размеры 12 × 14 км (рис. 1). Волос является быстрорастущим городом с населением более 150 тыс. человек. На западе от города расположена большая промышленная зона. На северо-востоке город примыкает к горе Пелион, покрытой густым лесом.

Для анализа этого участка было отобрано изображение Landsat, полученное 24 июля 2009 г. Перед вычислением индексов для всех каналов съемки была осуществлена атмосферная коррек-

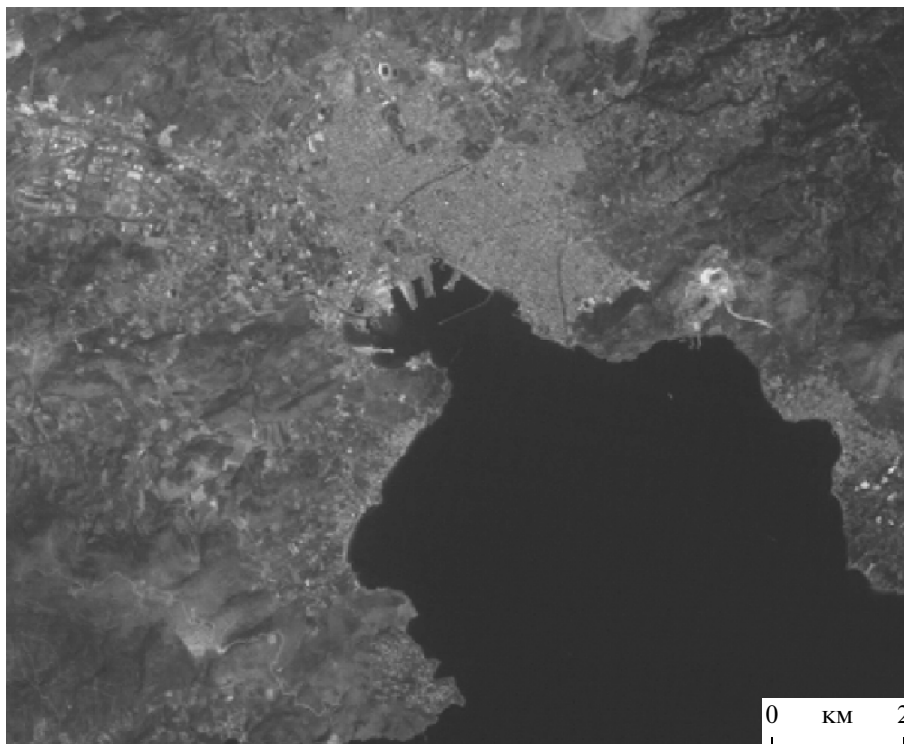


Рис. 1. Тестовый участок. Изображение Landsat, канал ТМ4.

ция. Для этого использовался алгоритм 6S (Ver-mote et al., 1997). Застроенные территории ключевого участка были отдешифрированы визуально на основе ортофотоаэроснимков, полученных из Греческого Национального кадастра. Аэроснимки были получены на период 2007–2009 гг. с пространственным разрешением менее 1 м. Результаты дешифрирования использовались в качестве базовой информации при сравнении с результатами анализа спутниковых снимков и для оценки точности (рис. 2).

Оценивались индексы  $IBI$ ,  $BUb$  и  $BUc$ , соответственно формулы (9), (10) и (11). Результаты расчета индексов показаны на рис. 3. Визуальный анализ рис. 3 показывает, что использование этих трех индексов не позволило отделить урбанизированные территории от открытой поверхности почв. Использование разных граничных значений индексов для бинаризации изображения также не привело к улучшению результата. Наиболее близкими к реальности оказались результаты, полученные при использовании индекса  $BUb$ , но и в этом случае часть урбанизированных территорий оказалась смешанной с водной поверхностью, а значительная часть территории с разреженной застройкой не была детектирована.

#### ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД

Приведенный выше анализ литературных данных показывает, что в большинстве случаев авторы при конструировании индексов используют подход, аналогичный построению  $NDVI$ , т.е. пытаются строить индексы нормализованной раз-



Рис. 2. Маска застроенных территорий, полученная в результате визуального дешифрирования ортофото-снимков.

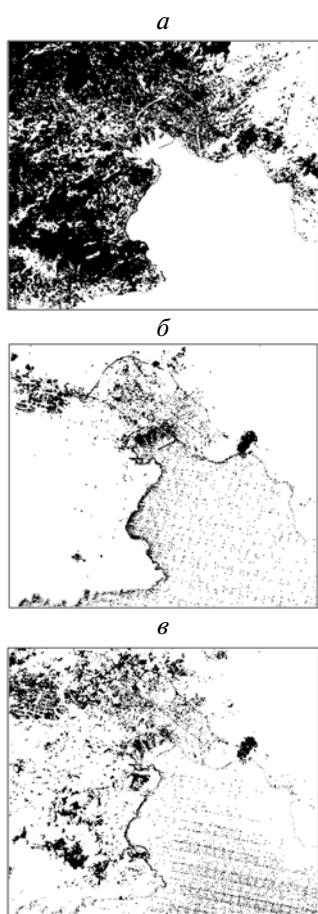


Рис. 3. Маски застроенных территорий, полученные на основе разных индексов: *а* – IBI (пороговое значение 0.13); *б* – BUb; *в* – BUc (пороговое значение 0.25).

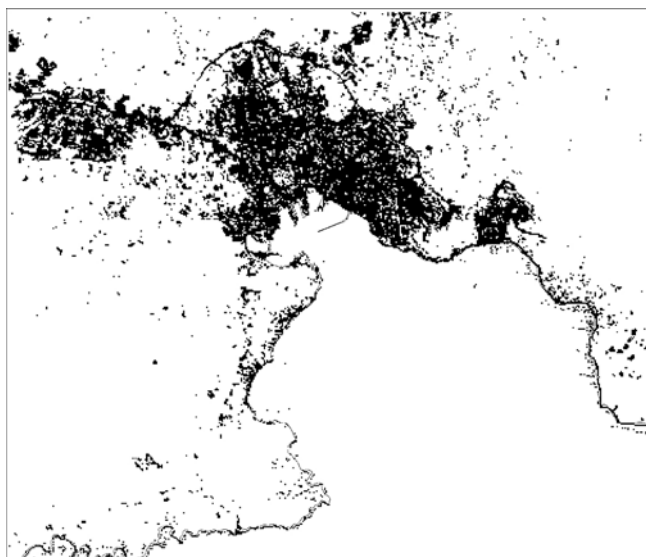


Рис. 4. Результаты выделения застроенных территорий с использованием индекса VIBI (пороговое значение = 0.2).

ницы. Одни из них, в качестве разницы, используют отдельные спектральные каналы (отличные от тех, которые используются в NDVI), другие, вместо каналов, используют их некие производные, как, например, это делается при расчете индекса IBI. Третьи используют метод построения диаграмм, оси которых представляют собой отдельные каналы или же их производные.

Интересно отметить, что во многих случаях авторы пытаются комбинировать индексы из NDVI и NDBI, что, в общем-то, логично. Открытым остается вопрос как их лучше скомбинировать, и какой канал съемки брать для расчета NDBI.

Путем апробации разных вариантов мы пришли к выводу, что наилучшие результаты дает следующая комбинация, названная нами как индекс VIBI (Vegetation Index – Built-up Index):

$$\begin{aligned} \text{VIBI} &= \frac{\text{NDVIc}}{\text{NDVIc} + \text{NDBIc}} = \\ &= \frac{\text{TM4} - \text{TM3}}{\text{TM4} + \text{TM3}} + \frac{\text{TM5} - \text{TM4}}{\text{TM4} + \text{TM3}} \end{aligned} \quad (12)$$

Результат использования этого индекса для тестового участка показан на рис. 4. Граничное значение индекса для выделения урбанизированных территорий было получено экспериментальным путем.

Теоретически, предложенный индекс может быть неопределенным в случае нулевого значения знаменателя в формуле (12). Но это не имеет принципиального значения, когда задачей использования индекса является его бинаризация по заданному порогу.

Для оценки точности выделения урбанизированных территорий с использованием разных индексов результаты сравнивались с данными, полученными при визуальном дешифрировании по ортофотоснимкам.

Тестовый участок покрыт  $\approx 185000$  пикселями изображения Landsat. Из них около 1/9 принадлежат к классу урбанизированных территорий, а остальные к иным объектам. При таком неравномерном распределении классов, согласно (Congalton, 1998), более правильно, наряду с расчетом обычного коэффициента точности, дополнительно использовать каппа-статистику (Kapra Statistic) для оценки точности классификации

$$K = \frac{P(A) - P(E)}{1 - P(E)}, \quad (13)$$

где  $P(A)$  – доля совпавших классов;  $P(E)$  – ожидаемая доля случайно совпавших классов.

Результаты оценки приведены в таблице.

Согласно (Fleiss, 1971) при значении  $K < 0.40$  согласованность результатов классификации с

Оценка точности классификации урбанизированных территорий

Точность				Кappa			
IBI	BUb	BUc	VIBI	IBI	BUb	BUc	VIBI
62.5%	88.3%	66.8%	91.2%	0.14	0.24	0.15	0.56

Примечание. “Точность” – процент правильно расклассифицированных пикселей класса от их общего количества.

результатами визуального дешифрирования должна считаться слабой, при К от 0.40 до 0.75 – хорошей и выше 0.75 – отличной.

Из таблицы следует, что точность классификации с использованием индексов VIBI и BUb наиболее высокая из всех протестированных индексов. Но учитывая, что каппа-статистика индекса VIBI более чем в 2 раза выше, можно говорить о большей устойчивости результатов, получаемых с его помощью.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен индекс VIBI, на основе которого можно более точно выделять урбанизированные территории. Для расчета индекса используются каналы TM3, TM4 и TM5 спутника Landsat. По аналогии с индексом NDVI, построенном на разнице в отражении света в красном и ИК-каналах, индекс VIBI базируется также на нормализованной разнице, но не отдельных каналов, а индексов NDVI и NDBI. Для использования предложенного индекса нет необходимости в привлечении дополнительной информации.

В результате исследований было продемонстрировано, что предложенный авторами индекс VIBI дает лучшие результаты при дешифрировании урбанизированных территорий, чем существующие на сегодняшний день аналоги.

По существу с помощью предложенного индекса выделяется класс базы данных CORINE первого уровня “искусственные поверхности” (artificial surfaces), за исключением подкласса “зеленые массивы в поселениях” (urban green), которые, конечно же, с использованием данного индекса выделить невозможно.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (ГК №16.515.11.5062).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Савин И.Ю. Влияние ливневого дождя на интегральную отражательную способность поверхности черноземных почв // Почвоведение. 1995. № 8. С. 976–980.

Савин И.Ю., Столбовой В.С. Спектрально-отражательная способность красноцветных почв Сирии // Почвоведение. 1998. № 4. С. 427–434.

Bossard M., Ferenac J., Otahel J. CORINE land cover technical guide- addendum 2000 // Tech. Rep. № 40. May 2000. European Environmental Agency. <http://www.eea.eu.int>.

Chen X., Zhao H., Li P., Yin Z. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes // Rem. Sens. Env. 2006. V. 104. P. 133–146.

Congalton R. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices. Boca Raton-FL-Lewis, 1998.

Crippen R. Calculating the Vegetation Index faster // Rem. Sens. Env. 1990. V. 34. P. 71–73.

Fleiss J.L. Measuring nominal scale agreement among many raters // Psychol. Bull. 1971. V. 76. № 5. P. 378–382. doi:10.1037/h0031619.

Greenhill D., Ripke L., Hitchman A., Jones G., Wilkinson G. Characterization of suburban areas for land use planning using landscape ecological indicators derived from Ikonos-2 multispectral imagery // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2003. V. 41. № 9. P. 2015–2021.

Grimm N., Faeth S., Golubiewski N., Redman C., Wu J., Bai X., Briggs J. Global Change and the Ecology of Cities // Science. 2008. V. 319. February 8. P. 756–760.

Haack B., Bryant N., Adams S. An assessment of landsat MSS and TM data for urban and near-urban land-cover digital classification // Rem. Sens. Env. 1987. V. 21. № 2. P. 201–213.

He C., Shi P., Xie D., Zhao Y. Improving the normalized difference built-up index to map urban built-up areas using a semiautomatic segmentation approach. // Rem. Sens. Lett. 2010. V. 1. № 4. P. 213–221.

Herold M., Scepan J., Clarke K. The use of remote sensing and landscape metrics to describe structures and changes in urban land uses // Environment and Planning. 2002. V. 34. № 8. P. 1443–1458.

Jiang J., Zhou J., Wu H., Ai L., Zhang H., Zhang L., Xu J. Land cover changes in the rural-urban interaction of Xi'an region using Landsat TM/ETM data // J. Geograph. Sci. 2005. V. 4. № 15. P. 423–430.

Kawamura M., Jayamanna S., Tsujiko Y. Relation between social and environmental conditions in Colombo-Sri Lanka and the urbanindex estimated by satellite remote sensing data // ISPRS XXXI Conf. Commission VII. Working Group 9. 09–19 July 1996. Vienna, Austria.

Kawamura M., Jayamanna S., Tsujiko Y. Quantitative evaluation of urbanization in developing countries using satellite data // J. Env. Syst. Eng. (JSCE). 1997. V. 580. № VII-5. P. 45–54.

Kawamura M., Jayamanna S., Tsujiko Y., Sugiyama A. Comparison of urbanization of four Asian cities using satellite data // J. Env. Syst. Eng. (JSCE). 1998. V. 608. № VII-9. P. 97–105.

- Lu D., Weng Q.* Spectral mixture analysis of the urban landscape in Indianapolis with Landsat ETM+ imagery // *Photogram. Engin. Rem. Sens.* 2004. V. 70. № 9. P. 1053–1062.
- McFeeters K.* The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features // *Int. J. Rem. Sens.* 1996. V. 17. P. 1425–1432.
- Rogers A., Kearney M.* Reducing signature variability in unmixing coastal marsh Thematic Mapper scenes using spectral indices // *Int. J. Rem. Sens.* 2003. V. 25. № 12. P. 2317–2335.
- Rouse J., Haas H., Schell A., Deering W.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // 3d ERTS-1 Symp. NASA Goddard Space Flight Center. 1973. V. 1. Sect. A. P. 309–317.
- Silleos N., Alexandridis T., Gitas I., Perakis K.* Vegetation indices: 30 years advances in biomass estimation and vegetation monitoring // *Geocarto Int.* 2006. V. 21. № 4. P. 21–28.
- Stathakis D.* How many hidden layers and nodes? // *Int. J. Rem. Sens.* 2009. V. 30. № 8. P. 2133–2148.
- Stathakis D., Vasilakos A.* Comparison of several computational intelligence based classification techniques for remotely sensed optical image classification // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2006. V. 44. № 8. P. 2305–2318.
- Vermote E., Tanre D., Deuze J.-L., Herman M., Morcrette J.-J.* Second simulation of the satellite signal in the Solar spectrum, 6S: An overview // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 1997. V. 35. № 3. P. 675–686.
- Xu H.* A new index for delineating built-up land features in satellite imagery // *Int. J. Rem. Sens.* 2008. V. 29. № 14. P. 4269–4276.
- Zhao H., Chen X.* Use of normalized difference bareness index in quickly mapping bare areas from TM/ETM+ // *Proc. IGARSS Symp.* July 25–29, 2005. Seoul, Korea.
- Zha Y., Gao J., Ni S.* Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery // *Int. J. Rem. Sens.* 2003. V. 24. № 3. P. 583–594.
- Zhang Z., He G.* A study on urban growth, vegetation space variation and thermal environmental changes of Beijing city based on TM imagery data // *Proc. 2<sup>nd</sup> WSEAS Int. Conf. Rem. Sens.* December 16–18, 2006. Tenerife, Canary Islands, Spain. P. 33–38.

## Masking of Urban Areas Based on Landsat Data

D. Stathakis<sup>1</sup>, K. Perakis<sup>1</sup>, I. Savin<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> University of Thessaly, Volos, Greece

<sup>2</sup> V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Russian Academy of Agricultural Sciences, Moscow

<sup>3</sup> Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

In order to monitor expansion, urban land has to be separated first from other land covers. Although this can be done by standard classification processes it is much more convenient to establish an urban index as the analogous to the widely used NDVI index for vegetation. This paper reviews existing efforts to establish such an urban index and compares them in a common context. It is found that existing methods are at best prone to mixing urban with bare land. Following that, a novel urban index is introduced that is able to overcome the limitations of existing indexes. The calculation of the new index is straightforward. The results are very promising as the index can efficiently segment the image in urban and non-urban areas, even in the presence of bare land.

**Keywords:** Landsat, urban areas, identification, NDVI, UI, IBI, NDBI

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗЛУЧЕНИЯ АРКТИЧЕСКОГО  
ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СПУТНИКОВОЙ  
МИКРОВОЛНОВОЙ РАДИОМЕТРИИ

© 2012 г. И. А. Репина<sup>1,2\*</sup>, В. В. Тихонов<sup>2</sup>, Т. А. Алексеева<sup>3</sup>, В. В. Иванов<sup>3</sup>,  
М. Д. Раев<sup>2</sup>, Е. А. Шарков<sup>2</sup>, Д. А. Боярский<sup>2</sup>, Н. Ю. Комарова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Москва

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

<sup>3</sup> Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург

\*E-mail: repina@ifaran.ru

Поступила в редакцию 03.05.2012 г.

Начиная с 1978 г. сканирующий многоканальный микроволновый радиометр и специальный микроволновый сенсор (SSM/I) позволяют ежедневно оценивать распределение и общую сплоченность морского льда. Используемые в настоящее время алгоритмы Картографирования состояния ледового покрова по данным пассивного микроволнового зондирования ввиду разных причин дают существенные ошибки. Эти ошибки особенно критичны в важных для развития судоходства прикромочных зонах и в районах с интенсивным ледообразованием. В работе данные визуальных наблюдений за состоянием ледяного покрова в Арктике, полученные в ряде экспедиций Арктического и Антарктического научно-исследовательского института, используются в качестве входных параметров электродинамической модели, разработанной для определения яркостной температуры ледяных и снежных покровов. Сравнение модельных расчетов и данных SSM/I на различных частотах показало хорошие результаты. Это позволяет приступить к разработке физически обоснованной методики определения характеристик ледового покрова по данным спутниковой радиометрии и тем самым значительно улучшить прогнозирование ледовой обстановки арктического региона.

**Ключевые слова:** пассивное микроволновое зондирование, яркостная температура, электродинамическая модель, эффективная диэлектрическая проницаемость, морской лед, климат полярных регионов

## ВВЕДЕНИЕ

Морской лед является одной из важнейших характеристик полярных регионов. Ледяной покров оказывает определяющее влияние на энергетический баланс, так как изменяет альбедо поверхности и вертикальные потоки тепла, вещества и импульса между океаном и атмосферой (Репина, Смирнов, 2000). Морской лед влияет на океаническую циркуляцию из-за появления холодной и тяжелой воды во время замерзания и пресных поверхностных вод в период таяния. Таким образом, между характеристиками ледяного покрова, состоянием атмосферы и океана существует мощная связь. По этой причине, морской лед четко реагирует на все климатические изменения (Wagyu et al., 1993; Алексеев, 2003). Информация о ледовых условиях в полярных регионах играет важную роль для решения ряда практических задач, являясь основой организации судоходства и добычи полезных ископаемых в полярных широтах.

Анализ спутниковых данных, доступных в последние десятилетия, показал, что площадь льда в

Северном Ледовитом океане в летний сезон неуклонно уменьшается с начала 1990-х гг. (Comiso, Nishio, 2009; Алексеев и др., 2009). Сентябрьская площадь льда за несколько последних десятилетий уменьшалась со скоростью  $11.1 \pm 3.3\%$  в десятилетие (NSIDC..., 2009). Это уменьшение было гораздо более быстрым, чем рассчитанное климатическими моделями, участвовавшими в докладе IPCC (МГЭИК ..., 2007; Stroeve et al., 2007). Рекордная за всю историю спутниковых наблюдений минимальная площадь льда наблюдалась в сентябре 2007 г. (4.13 млн. км<sup>2</sup>). При этом драматические изменения произошли не только в летней площади ледяного покрова, но и в толщине льда в зимний период: переход к преобладанию сезонного льда (66%) над многолетним (34%) произошел в период между 2004 и 2008 гг. (Kwok, Rothrock, 2009; Фролов и др., 2009). Толщина льда в центральном Арктическом бассейне уменьшилась в среднем на 1.3–1.5 м за период 1970–2000 гг., и это снижение толщины продолжается.

Очевидно, что мониторинг площади, сплоченности и толщины морского льда в пределах всего полярного бассейна (как северного, так и южного) может выполняться только с использованием средств дистанционного зондирования (ДЗ), установленных на современных искусственных спутниках Земли, осуществляющих, в частности, регулярные, длительные, глобальные микроволновые наблюдения поверхности Земли. Спутниковые измерения в микроволновом диапазоне, начавшиеся в октябре 1978 г. с использованием сканирующего многоканального микроволнового радиометра SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer), продолженные в 1987 г. с использованием специального микроволнового сенсора SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager) и продолжающиеся по настоящий день благодаря запущенному недавно спутнику F17 серии DMPS (Defense Meteorological Satellite Program) с новым сенсором SSMIS (Special Sensor Microwave Imager/Sounder), предоставляют беспрецедентную возможность мониторинга современной изменчивости климата нашей планеты (Special Sensor Microwave..., 2010). Уникальность миссии DMSP определяется тем, что в настоящее время это единственная программа долговременного мониторинга, поставляющая оперативную метеорологическую, океанографическую и солнечно-геофизическую информацию, и тем самым позволяющая решать глобальные климатические проблемы (Астафьева и др., 2006; Sharkov, 2003). Спутники этой серии имеют солнечно-синхронную, близкую к полярной, низкую круговую орбиту. Смеканальные четырехчастотные микроволновые радиометрические комплексы SSM/I принимают линейно-поляризованное излучение на частотах 19.35, 22.24, 37.0 и 85.5 ГГц в режиме конусного сканирования. На частоте 22.24 ГГц измеряется только вертикально-поляризованное излучение; на остальных – и горизонтально- и вертикально-поляризованное. Ширина полосы обзора приборов составляет 1400 км, размер разрешения на поверхности Земли зависит от канала прибора и варьируется от 12.5 до 25 км (Гранков, Мильшин, 2004). Специфика траекторий аппаратов этой серии и полей обзора радиометров такова, что наилучшее покрытие и разрешение наблюдается именно в высоких широтах. Орбита и геометрия сканирования SSM/I позволяют охватывать полярные регионы в пределах 60° с.ш. и 60° ю.ш. один раз в сутки. Полное покрытие достигается при использовании трех DMSP спутников (Hollinger et al., 1987).

В настоящее время существует около десятка алгоритмов обработки SSM/I изображений для получения карт сплоченности морского льда (Cavalieri et al., 1991, 1999; Comiso, 1995; Comiso et al., 1992; Kaleschke et al., 2001; Pedersen, 1998; Ramseier, 1991; Smith, Barry, 1994; Svendgen et al., 1983; Swift et al., 1985; Kern, Heygster, 2001). На

практике для построения ледовых карт наиболее часто применяются NASA Team (Cavalieri et al., 1991, 1999) и Comiso Bootstrap (Comiso, 1995) алгоритмы. Оба алгоритма используют для анализа каналы 37 и 19 ГГц на двух поляризациях. Алгоритмы, берущие за основу данные канала 85 ГГц, дают лучшее пространственное разрешение, но более подвержены влияниям атмосферных процессов (Kaleschke et al., 2001). Но по ряду причин, связанных с законами взаимодействия излучения с веществом, сложностью и многообразием строения морского льда и изменчивостью гидрометеорологических условий, объективная интерпретация спутниковых данных в карты сплоченности морского льда пока не является полностью решенной задачей. Сплоченность морского льда, полученная по данным пассивного микроволнового зондирования, чувствительна к смещению калибровок, изменению характеристик датчиков, заданию границ океана и суши. Другим источником ошибок являются ранние формы льда (молодой лед, нилас, шуга), снежницы (лужи, образующиеся на поверхности ледяных полей в летний период), всевозможные атмосферные процессы (туман, дождь, снегопад) (Cavalieri et al., 1995; Comiso, Kwok, 1996). Самые значительные ошибки наблюдаются в прикомочных зонах, что следует как из сравнения результатов применения различных алгоритмов (Meier, 2005), так и из сравнения с данными визуальных наблюдений (Алексеева, Фролов, 2012). Одним из источников ошибок может служить тот факт, что существующие в настоящее время алгоритмы восстановления характеристик ледяного покрова по данным SSM/I используют эмпирические зависимости и подгонные коэффициенты, пренебрегая физикой процесса. Задача данной работы: на основе использования результатов прямых наблюдений за состоянием льда в Арктическом бассейне разработать методики расчета яркостных температур ледяного и снежного покрова, учитывающие физические и структурные характеристики сред.

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В качестве входных данных модели используется массив наблюдений за морским льдом Арктического и Антарктического научно-исследовательского института. Измерения проводились в летне-осенний период 2002–2009 гг. с борта ледокола “Капитан Драницын” в рамках российско-американского проекта NABOS-АВЛАП в регионе, ограниченном 75°–85° с.ш., 30°–150° в.д. (Polyakov et al., 2007). Наблюдения включали визуальное определение комплекса основных характеристик ледяного покрова: возрастного состава, общей и частной сплоченности каждого из наблюдаемых возрастных видов льда, а также их форм (горизон-

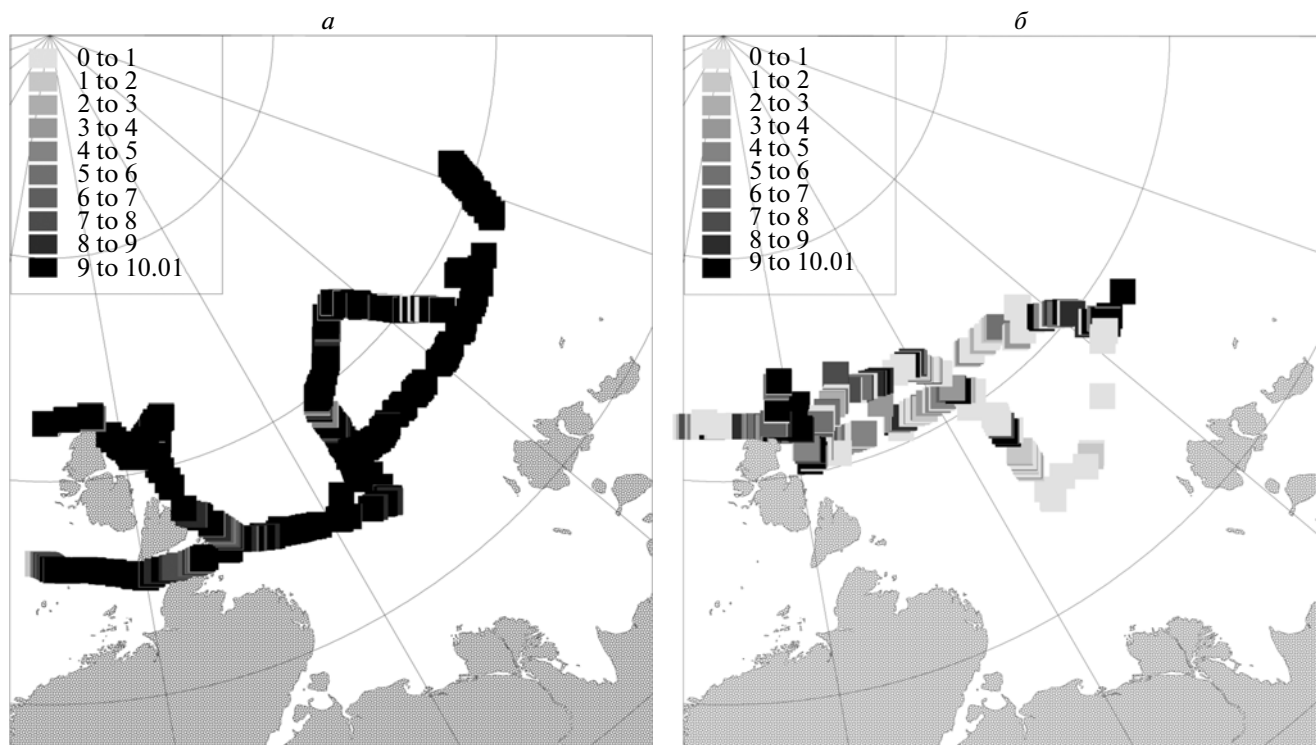


Рис. 1. Сплоченность льда в районе исследований ледокола “Капитан Драницын”: *а* – в октябре 2008 г.; *б* – в августе–сентябре 2009 г.

тальных размеров льдин), диапазона толщин ровного льда и высот снега, степени торосистости, разрушенности и сжатий льда. Сплоченность льда определялась по десятибалльной шкале и делилась на следующие градации: 0 – чистая вода; 1–3 – редкие льды; 4–6 – разреженные льды; 7–8 – сплоченные льды; 9, 9–10 – очень сплоченные льды; 10 – сплошные льды (Руководство по производству..., 1981). Градации 7–8, 9, 9–10, 10 в основном характерны для ледяного массива. Прикромочная область характеризуется редкими (1–3 балла) и разреженными льдами (4–6 баллов). Чтобы учесть избирательный характер судна, основные характеристики ледяного покрова определяются раздельно по пути (в зоне по курсу судна, ширина которой равна шестикратной ширине корпуса судна) и в районе движения (в пределах горизонтальной видимости) (Бузев, Федяков, 1981). Данные по пути движения отображают более легкие ледовые условия навигации, поэтому в качестве входных использовались результаты наблюдений в районе движения. Все наблюдения сопровождалась полной метеорологической информацией, в том числе и о теплообмене через льды различных форм (Репина и др., 2011).

На рис. 1 представлены примеры распределения сплоченности льдов в районе следования судна. В 2008 г. работы проводились в начале арктической зимы при начале интенсивного ледообра-

зования, когда наблюдались сплоченные льды различных возрастов. Напротив, в 2009 г. в разгар арктического лета, преобладали старые редкие и разреженные льды.

Расчеты яркостной температуры арктического ледяного покрова с использованием натуральных данных были сопоставлены с данными приборов SSM/I. В качестве источника информации использовалась база изображений SSM/I полярных районов POLE-RT-Fields, созданная на основе разработанной в Институте космических исследований (ИКИ РАН) базы данных GLOBAL-RT (Астафьева и др., 2006; Ермаков и др., 2007, 2011; Sharkov, 2003). В базу входят данные непрерывных измерений в период 1995–2011 гг., выполненных на аппаратах F10–F17 серии DMSP. Разработанный в ИКИ РАН алгоритм межвиткового и кросс-аппаратного выравнивания и дополнения позволяет на основе полосовых данных базы GLOBAL-RT сформировать по два полных глобальных радиотепловых поля Земли в сутки. База данных POLE-RT-Fields включает в себя радиотепловые поля Северной и Южной полярной шапок Земли – от широты 85° до широты 60° за период с 1995 по 2011 г. на частотах 19.35, 22.24, 37.0 и 85.5 ГГц. На рис. 2 (см. на цветн. вклейках) приведены примеры радиотепловых полей, построенных по данным канала 19 ГГц с горизонтальной поляризацией (H19). Рисунок 2*а* представляет данные за 12 января 2009 г., когда наблю-

далось максимальное для данного года ледовое и снежное покрытие, рис. 2б – данные за 20 августа 2009 г. – вариант минимального ледового покрытия.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Для интерпретации данных пассивного микроволнового зондирования была рассмотрена задача, в которой излучающей системой является водная поверхность, покрытая несколькими слоями ледяного и снежного покрова, над которыми расположен толстый слой атмосферы (рис. 3 на цветн. вклейках). Для расчета яркостной температуры такой системы был использован метод, подробно изложенный в работах (Клепиков, Шарков, 1992; Sharkov, 2003). Это метод расчета показал хорошие результаты при интерпретации данных SSM/I по снежному покрову севера Европейской части России (Tikhonov et al., 2008). Согласно этому методу, яркостная температура слоистой среды  $T_{br}$  определяется из следующих выражений:

– для вертикальной поляризации

$$T_{br}^v = \sum_{j=1}^N \frac{T_j |W_j|^2}{|1 - R_j^- R_j^+ \exp(2i\psi_j)|^2} \times \left[ (1 - \exp(-2\text{Im}\psi_j)) \left( 1 + |R_j^- \exp(i\psi_j)|^2 \right) + 4 \frac{\text{Im}\psi_j}{\text{Re}\psi_j} \text{Re}(R_j^- \exp(i\psi_j)) \text{Im}(\exp(i\psi_j)) \times \left( \frac{|k_{zj}|^2 - k_x^2}{|k_j|^2} \right) \right] \frac{\text{Re} Z_j}{\text{Re} Z_0} + T_{N+1} |W_{N+1}|^2 \frac{\text{Re} Z_{N+1}}{\text{Re} Z_0},$$

– для горизонтальной поляризации

$$T_{br}^h = \sum_{j=1}^N \frac{T_j |W_j|^2}{|1 - R_j^- R_j^+ \exp(2i\psi_j)|^2} \times \left[ (1 - \exp(-2\text{Im}\psi_j)) \left( 1 + |R_j^- \exp(i\psi_j)|^2 \right) + 4 \frac{\text{Im}\psi_j}{\text{Re}\psi_j} \text{Re}(R_j^- \exp(i\psi_j)) \text{Im}(\exp(i\psi_j)) \right] \times \frac{\text{Re} Z_j}{\text{Re} Z_0} + T_{N+1} |W_{N+1}|^2 \frac{\text{Re} Z_{N+1}}{\text{Re} Z_0},$$

где  $T_j$  – температура слоя;  $R_j^+$ ,  $R_j^-$  – коэффициенты отражения амплитуд электрического поля от верхней и нижней границ слоя соответственно;  $W_j$  – коэффициенты пропускания по амплитуде электрического поля от внутренней стороны верхней граница слоя  $j$  на границу среды;  $Z_j$  – вол-

новой импеданс слоя с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_{eff}^j$ ;  $k_j = \frac{2\pi}{\lambda} \{\sin\theta_j, 0, \cos\theta_j\} \sqrt{\varepsilon_j}$  – волновой вектор;  $\psi_j = k_{zj} h_j$ ;  $h_j$  – толщина слоя;  $N$  – количество слоев. Индексом  $j = 1$  обозначена атмосфера, индексом  $j = N + 1$  – подстилающая поверхность – вода.

Принимаемое радиометром излучение определяется диэлектрическими свойствами каждого слоя системы. Диэлектрические свойства арктического льда сильно зависят от его возраста и метеорологических условий формирования. В молодом (однолетнем) льде присутствует большое количество пузырьков воздуха, на которых происходит рассеяние электромагнитного излучения. Старый (многолетний) лед менее пористый, и рассеяние излучения в нем менее значительно. При температурах, близких к  $0^\circ\text{C}$ , воздушные поры в ледяном покрове начинают заполняться рассолом. Пузырьки рассола в ледяной толще не только рассеивают, но и поглощают электромагнитное излучение. Эффекты рассеяния и поглощения излучения в ледяном покрове сильно изменяют его диэлектрические свойства.

Присутствие снежного покрова на ледяной поверхности также влияет на излучательные характеристики всей системы. Излучение, проходящее сквозь снежную толщу, поглощается и рассеивается снежными кристаллами, а появление влаги в снежном покрове приводит к значительному изменению его радиофизических характеристик. Таким образом, для описания диэлектрических свойств слоев системы (льда и снега) необходим учет эффектов рассеяния и поглощения излучения на структурных неоднородностях (включения воздуха, воды, рассола) среды.

Для определения диэлектрических характеристик ледяных и снежных слоев была использована модель многофазной дисперсной среды, которая успешно применялась при интерпретации данных ДЗ снежного покрова (Boyarskii et al., 1994; Boyarskii, Tikhonov, 2000). Указанная модель учитывает физические и структурные особенности среды, а также эффекты рассеяния и поглощения излучения на ее неоднородностях. Согласно этой модели, морской лед представлялся как сплошная ледяная среда, в которой находятся сферические включения воздуха и рассола. Предполагалось, что размеры включений подчинены логарифмически-нормальному распределению. Эффективная диэлектрическая проницаемость слоя морского льда определяется из следующего выражения:

$$\varepsilon_{eff\_ice} = \varepsilon_i \left[ 1 - \frac{4\pi n_a (\varepsilon_a + 2\varepsilon_i) \langle f_{\omega} \rangle_a}{2\varepsilon_{eff\_ice} + \varepsilon_a} - \frac{4\pi n_{sw} (\varepsilon_{sw} + 2\varepsilon_i) \langle f_{\omega} \rangle_{sw}}{2\varepsilon_{eff\_ice} + \varepsilon_{sw}} \right]^{-1},$$

где  $\varepsilon_{eff\_ice} = \varepsilon'_{eff\_ice} + i\varepsilon''_{eff\_ice}$  – эффективная диэлектрическая проницаемость ледяного слоя;  $k$  – волновое число;  $n_a$  и  $n_{sw}$  – концентрации воздушных пор и капель водного рассола соответственно;  $\varepsilon_i$ ,  $\varepsilon_a$  и  $\varepsilon_{sw}$  – диэлектрическая проницаемость льда, воздуха и водяного рассола соответственно;  $\langle f_{\omega} \rangle_a$  и  $\langle f_{\omega} \rangle_{sw}$  – усредненные по размерам амплитуды рассеяния вперед воздушных пор и капель рассола соответственно.

Снежный покров моделировался как воздушная среда, содержащая сферические ледяные зерна, покрытые пленкой воды, и капли воды. Согласно такому представлению, эффективная диэлектрическая проницаемость снежной среды определялась так:

$$\varepsilon_{eff\_snow}^{-1} = 1 - \frac{4\pi n_i (\varepsilon_i^w + 2) \langle f_{\omega} \rangle_i}{2\varepsilon_{eff\_snow} + \varepsilon_i^w} - \frac{4\pi n_w (\varepsilon_w + 2) \langle f_{\omega} \rangle_w}{2\varepsilon_{eff\_snow} + \varepsilon_w},$$

где  $\varepsilon_{eff\_snow} = \varepsilon'_{eff\_snow} + i\varepsilon''_{eff\_snow}$  – эффективная диэлектрическая проницаемость снежного слоя;  $n_i$  и  $n_w$  – концентрации ледяных зерен и капель воды соответственно;  $\varepsilon_i^w$  – эффективное значение диэлектрической проницаемости ледяной частицы, покрытой оболочкой воды (Boyarskii et al., 2001);  $\varepsilon_w$  – диэлектрическая проницаемость воды;  $\langle f_{\omega} \rangle_i$  и  $\langle f_{\omega} \rangle_w$  – усредненные по размерам частиц амплитуды рассеяния вперед ледяной частицы с оболочкой воды и капли воды соответственно. Амплитуды рассеяния вперед рассчитывались по теории Ми.

На рис. 4 (на цветн. вклейках) представлено изменение диэлектрических свойств льда в зависимости от наличия в нем включений воздуха и рассола. Из рисунка видно, что при появлении воздушных пор в ледяной толще сильно увеличивается мнимая часть диэлектрической проницаемости льда по отношению к чистому льду, в то время как действительная часть уменьшается незначительно. При заполнении пор влагой происходит значительное увеличение как действительной (на частотах 10–25 ГГц), так и мнимой части диэлектрической проницаемости, а вид зависимостей полностью повторяет вид зависимостей действительной и мнимой части диэлектри-

ческой проницаемости воды. Различия диэлектрических свойств разных типов льда должны отражаться и на излучательных характеристиках ледяного покрова, в частности на величинах яркостной температуры, получаемые прибором SSM/I.

Расчеты яркостной температуры арктического ледяного покрова, проведенные по представленным выше моделям, были сопоставлены с данными прибора SSM/I за период с 18.08.2009 г. по 01.09.2009 г. на тех же пикселях, что и результаты используемых в моделях натуральных наблюдений. В расчетах использовались прямые наблюдения характеристик ледового и снежного покрова, а также метеорологические измерения. На рис. 5а–е представлены результаты сравнения, полученные из модельных расчетов частотные зависимости яркостной температуры ледового покрова Арктического региона с горизонтальной и вертикальной поляризацией. Для сравнения используется спутниковая информация SSM/I на всех существующих каналах.

Как видно из рис. 5 (на цветн. вклейках), модельные расчеты хорошо соответствуют спутниковым данным. Свободная водная поверхность проявляется на частотах 19.35 и 22.235 ГГц (рис. 5а–в, д). Связано это с тем, что в выбранном диапазоне электромагнитных волн (10–100 ГГц) на данных частотах значения действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости воды максимальны (см. рис. 4), вследствие чего яркостная температура на этих частотах понижается. Присутствие снежного покрова на ледяной поверхности уменьшает крутизну зависимостей на частотах 19.35 и 22.235 ГГц (рис. 5з, е). Снежный покров может удерживать влаги не более 12% от его общего объема (Boyarskii et al., 1994). Однако даже при такой влажности снега глубина формирования излучения составляет всего несколько сантиметров (Боярский, Тихонов, 2004). Стоит отметить, что для сухого снега глубина формирования излучения на этих частотах составляет всего 20–30 см (Боярский, Тихонов, 2004). Таким образом, при наличии небольшого снежного покрова на ледяной поверхности основной вклад в излучение на частотах выше 10 ГГц будет давать слой снега, т. е. ледяной покров практически не будет вносить вклад в яркостную температуру системы. Диэлектрическая проницаемость снега, как влажного, так и сухого, значительно ниже диэлектрической проницаемости воды и влажного льда (рис. 4). Этот факт и приводит к сглаживанию зависимости яркостной температуры на низких частотах данного диапазона.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время широкое применение в климатических исследованиях находят методы

ДЗ, позволяющие исследовать природную среду на расстоянии, без непосредственного контакта с ней. В основе большинства этих методов лежит анализ собственного или рассеянного средой электромагнитного излучения. Мониторинг ледяного покрова с применением соответствующих методов интерпретации данных многочастотного ДЗ имеет большое практическое значение. Одно из важных свойств морского ледяного покрова, редко учитываемое в алгоритмах его восстановления по данным спутниковой радиометрии, — его вертикальная неоднородность; такой покров представляет собой среду, состоящую из двух и более слоев с различными физическими свойствами. Интерпретация микроволновых данных ДЗ подобных слоистых сред сложна и неоднозначна из-за отсутствия эффективной теории взаимодействия электромагнитного излучения с гетерогенными средами. В настоящее время эта проблема, как правило, решается с помощью создания различных калибровочных соотношений между радиофизическими характеристиками и физическими параметрами ледяного покрова, которые носят частный и региональный характер. Таким образом, для решения задач восстановления ледового покрова из данных ДЗ возникает необходимость дальнейшего экспериментального и теоретического исследования процессов взаимодействия микроволнового излучения с гетерогенными средами, а для надежной интерпретации данных ДЗ необходим учет стратиграфии льда и снега.

Представленная в данной работе электродинамическая модель излучения арктического ледяного покрова была разработана с учетом физических и структурных характеристик сред (льда, снега, воды и атмосферы). Проведенные расчеты радиояркостной температуры арктического льда различной сплоченности и степени заснеженности на основе предложенной модели хорошо согласуются с экспериментальными данными в рассмотренном диапазоне частот. Это согласие было достигнуто благодаря учету в модели структурных особенностей льда и снега.

Сравнение проведенных в данной работе модельных расчетов с данными прибора SSM/I показало правильность выбранного пути, что позволяет приступить к разработке методики определения характеристик ледового покрова Арктического региона по данным спутниковой радиометрии. Предполагается, что разрабатываемая методика будет учитывать только реальные физические и структурные характеристики сред и в ней не будут использоваться эмпирические и подгоночные коэффициенты, что будет отличать ее от существующих алгоритмов.

Необходимо также отметить, что проведенный анализ и сравнение модельных расчетов со спут-

никовыми данными показали невозможность прямого определения толщины ледового покрова Арктического региона по данным SSM/I. Для частот, принимаемых радиометрическим комплексом SSM/I, глубина формирования излучения ледового и снежного покрова составляет в лучшем случае десятки сантиметров, что значительно меньше реальных толщин льда в данном регионе. Таким образом, определение толщины ледового покрова Арктического региона по данным SSM/I возможно только косвенными способами, например, посредством анализа возраста льда по его диэлектрическим свойствам.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 11-05-12019-офи-м, 11-05-00679, 11-05-01143), а также в рамках гранта Правительства РФ (договор № 11.G34.31.0078) для поддержки исследований под руководством ведущих ученых.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев Г.В.* Исследования изменений климата Арктики в XX столетии // Тр. ААНИИ. 2003. Т. 446. С. 6–21.
- Алексеев Г.В., Данилов А.И., Катцов В.М., Кузьмина С.И., Иванов Н.Е.* Морские льды Северного полушария в связи с изменениями климата в XX и XXI веках по данным наблюдений и моделирования // Изв. РАН. Сер. ФАО. 2009. Т. 45. № 6. С. 723–735.
- Алексеева Т.А., Фролов С.В.* Сравнительный анализ спутниковых и судовых данных о ледяном покрове в морях Российской Арктики // Исслед. Земли из космоса. 2012. (в печати).
- Астафьева Н.М., Раев М.Д., Шарков Е.А.* Портрет Земли из космоса: глобальное радиотепловое поле // Природа. 2006. № 9. С. 17–27.
- Боярский Д.А., Тихонов В.В.* Влияние пространственного распределения влаги и слоистости снежного покрова на его радиояркостную температуру: Препринт. М.: ИКИ РАН, 2004. Пр-2103. 21 с.
- Бузуев А.Я., Федяков В.Е.* Изменчивость ледовых условий на пути плавания судов // Метеорология и гидрология. 1981. № 2. С. 69–76.
- Гранков А.Г., Мильшин А.А.* Взаимосвязь радиоизлучения системы океан–атмосфера с тепловыми и динамическими процессами на границе раздела. М.: Физматлит, 2004. 166 с.
- Ермаков Д.М., Раев М.Д., Сулов А.И., Шарков Е.А.* Электронная база многолетних данных глобального радиотеплового поля Земли в контексте многомасштабного исследования системы океан–атмосфера // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 1. С. 7–13.
- Ермаков Д.М., Чернушич А.П., Шарков Е.А., Шрамков Я.Н.* Возможности построения краткосрочных глобальных радиотепловых изображений системы океан–атмосфера на базе программной платформы Stream Handler // Совр. проблемы дист. зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 9–16.
- Клепиков И.Н., Шарков Е.А.* Теоретические исследования собственного излучения резконеоднородных не-

- изотермических сред // Исслед. Земли из космоса. 1992. № 6. С. 3–15.
- МГЭИК: Изменение климата, 2007 г.: Обобщающий доклад. Вклад рабочих групп I, II, III в Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата / Под ред. Пачаури Р.К., Райзингер А. Женева, Швейцария: МГЭИК, 2007. 104 с.
- Репина И.А., Артамонов А.Ю., Смирнов А.С., Чечин Д.Г. Исследование взаимодействия океана и атмосферы в полярных районах в рамках международного полярного года // Метеорологические и геофизические исследования / Под ред. Алексеева Г.В. М.-СПб., 2011. С. 236–250.
- Репина И.А., Смирнов А.С. Обмен теплом и импульсом между атмосферой и льдом по данным наблюдений в районе Земли Франца-Иосифа // Изв. РАН. Сер. ФАО. 2000. Т. 36. № 5. С. 672–680.
- Руководство по производству ледовой авиаразведки. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 240 с.
- Фролов С.В., Федяков В.Е., Третьяков В.Ю., Клейн А.Э., Алексеев Г.В. Новые данные об изменении толщины льда в Арктическом бассейне // Докл. РАН. 2009. Т. 425. № 1. С. 104–108.
- Barry R.G., Serreze M.C., Maslanik J.A., Preller R.H. The Arctic Sea Ice–Climate System: Observations and modeling // Rev. Geophysics. 1993. V. 31. № 4. P. 397–422. doi:10.1029/93RG01998.
- Boyarskii D.A., Tikhonov V.V. The Influence of Stratigraphy on Microwave Radiation from Natural Snow Cover // J. Electromag. Waves Appl. 2000. V. 14. № 9. P. 1265–1285.
- Boyarskii D.A., Tikhonov V.V., Kleeorin N.I., Mirovskii V.G. Inclusion of scattering losses in the models of the effective permittivity of dielectric mixtures and applications to wet snow // J. Electromag. Waves Appl. 1994. V. 8. № 11. P. 1395–1410.
- Boyarskii D.A., Tikhonov V.V., Komarova N.Yu. Model of Dielectric Constant of Bound Water in Soil for Applications of Microwave Remote Sensing // Progr. Electromag. Res. PIER 35. 2001. P. 251–270.
- Cavaliere D., Gloerson P., Zwally J. updated daily. Near-Real-Time DMSP SSM/I-SSMIS Daily Polar Gridded Brightness Temperatures. 01.01.2010–15.12.2010 / Ed. Maslanik J., Stroeve J. Boulder, Colorado USA: NSIDC, 1999.
- Cavaliere D.J., Crawford J.P., Drinkwater M.R., Eppler D.T., Farmer L.D., Jentz R.R., Wackermann C.C. Aircraft active and passive microwave validation of the sea ice concentration from the defense meteorological satellite program special sensor microwave imager // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. № C12. P. 21 998–22 008.
- Cavaliere D.J., St. Germain K.M., Swift C.T. Reduction of weather effects in the calculation of sea ice concentration with the DMSP SSM/I // J. Glaciology. 1995. V. 41. P. 455–464.
- Comiso J.C. SSM/I Sea Ice Concentrations Using the Bootstrap Algorithm. NASA Reference Publication / Goddard Space Flight Center 1380, 1995.
- Comiso J.C., Nishio F. Trends in the sea ice cover using enhanced and compatible AMSR-E, SSM/I and SMMR data // J. Geophys. Res. 2009. V. 113. № C02S07.
- Comiso J.C., Kwok R. Surface and radiative characteristics of the summer Arctic sea cover from multisensor satellite observations // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. № C12. P. 28 397–28 416.
- Comiso J.C., Grenfell T.C., Lange M., Lohanick A., Moore R., Wadhams P. Microwave remote sensing of the Southern Ocean Ice Cover. Chapt. 12 In Microwave remote sensing of sea ice / Ed. Carsey F. Amer. Geophys. Union. Washington, D.C., 1992. P. 243–259.
- Hollinger J.P., Lo R., Poe G. Special Sensor Microwave/Imager User's Guide. Washington, DC.: U.S. Naval Research Lab., 1987.
- Hufford G. A Model for the Complex Permittivity of Ice at Frequencies Below 1 THz // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. 1991. V. 12. № 7. P. 677–682.
- Kaleschke L., Lupkes C., Vihma T., Haarpaintner J., Bochert A., Hartmann J., Heygster G. SSM/I Sea Ice Remote Sensing for Mesoscale Ocean – Atmosphere Interaction Analysis // Can. J. Rem. Sens. 2001. V. 27. № 5. P. 526–537.
- Kern S., Heygster G. Sea-ice concentration retrieval in the Antarctic based on the SSM/I 85.5 GHz polarization // Ann. Glaciol. 2001. V. 33. P. 109–114.
- Kwok R., Rothrock D.A. Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICESat records: 1958–2008 // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. № L15501.
- Meier W.N. Comparison of passive microwave ice concentration algorithm retrievals with AVHRR imagery in Arctic Peripheral Seas // IEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2005. V. 43. № 6.
- NSIDC – National Snow and Ice Data Center. 2009. ([http://nsidc.org/news/press/20091005\\_minimumpr.html](http://nsidc.org/news/press/20091005_minimumpr.html)).
- Pedersen L.T. Improved spatial resolution of SSM/I products // IMSI rep. № 8. Nansen Environmental and Remote Sensing Center, Bergen, Norway, 1998.
- Polyakov I.V. et al. Observational program tracks Arctic Ocean transition to a warmer state // Eos. Trans. AGU. 2007. V. 88. P. 398–399.
- Ramseier R.O. Sea Ice Validation. Final Report. Naval Research Lab. Washington, DC, 1991.
- Ray P.S. Broadband Complex Refractive Indices of Ice and Water // J. Appl. Opt. 1972. V. 11. № 8. P. 1836–1844.
- Sharkov E.A. Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations. Berlin–N.Y., – L., – P. – Tokyo: Springer/PRAXIS, 2003. 613 p.
- Smith D.M., Barrett E.C. Satellite mapping and monitoring of sea ice. CB/RAE/9/2/4/2034/113/ARE. RSU. Univ. of Bristol, 1994.
- Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) and Special Sensor Microwave Imager Sounder (SSMIS) Global Gridded Products. National Environmental Satellite, Data, and Information Service (NESDIS), NOAA. <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/rsad/ssmi/gridded/index.php>. (Retrieved 24 Dec. 2010).
- Stroeve J., Holland M.M., Meier W., Scambos T., Serreze M. Arctic sea ice decline: Faster than forecast // Geophys. Res. Lett.. 2007. V. 34. № L09501. doi:10.1029/2007GL029703.
- Svendsen E., Kloster K., Farrelly B., Johannessen O.M., Johannessen J.A., Campbell W.J., Gloersen P. Cavaliere D.,

*Matzler C.* Norwegian Remote Sensing Experiment' Evaluation of the Nimbus 7 Scanning Multichannel Microwave Radiometer for Sea Ice Research // *J. Geophys. Res.* 1983. V. 88. № C5. P. 2781–2791.

*Swift C., Fedor L., Ramseier R.* An Algorithm to Measure Sea Ice Concentration with Microwave Radiometers // *J. Geophys. Res.* 1985. V. 90. № C1.

*Tikhonov V.V., Bojarskiy D.A., Kitaev L.M., Raev M.D., Cherenkova E.A.* Regional Features of Microwave Radiation and Snow Cover Interaction on the Example of the North of the European Part of Russia // 10<sup>th</sup> Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of Environment. 11–14 March 2008, Firenze, Italy. 1 CD-ROM. Rep. 152. 4 p.

## **Electrodynamics Model of Arctic Sea Ice Radiation to Solve the Problems of Satellite Microwave Radiometry**

**I. A. Repina<sup>1,2</sup>, V. V. Tikhonov<sup>2</sup>, T. A. Alexeeva<sup>3</sup>, V. V. Ivanov<sup>3</sup>, M. D. Raev<sup>2</sup>,  
E. A. Sharkov<sup>2</sup>, D. A. Boyarskii<sup>2</sup>, N. Yu. Komarova<sup>2</sup>**

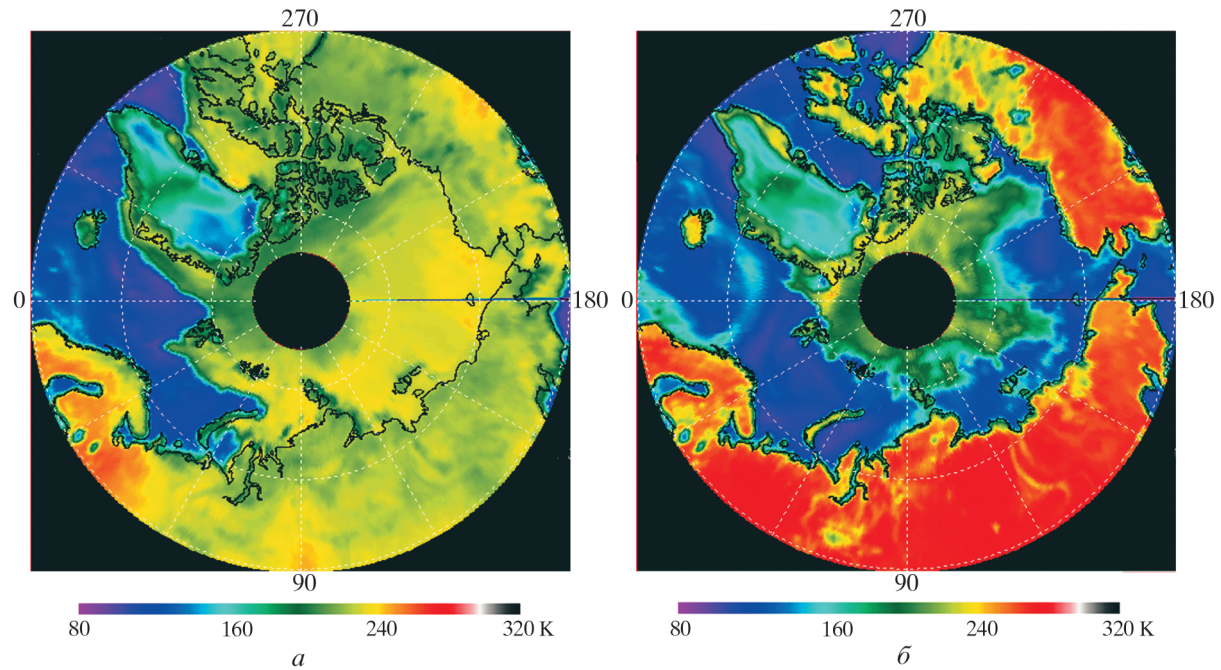
<sup>1</sup> *A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow*

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

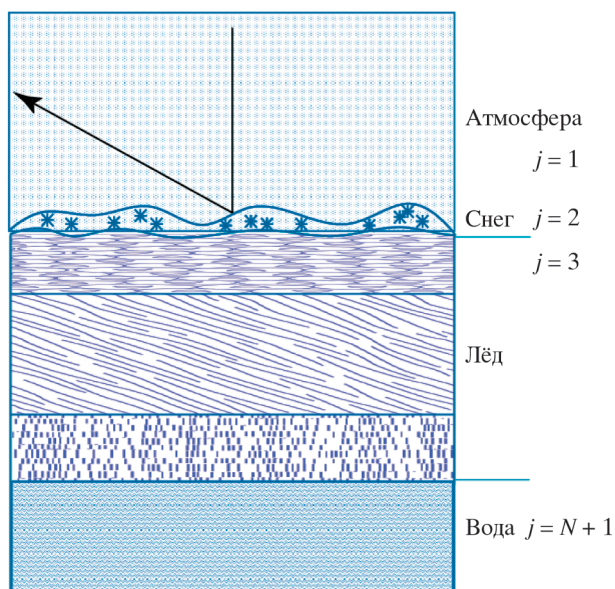
<sup>3</sup> *Arctic and Antarctic Research Institute, St.-Petersburg*

Passive microwave sensors provide full coverage of Polar Regions with the sea ice information despite of meteorological conditions. This is an important advantage of this sensor type compared to visual and infrared ones. Since 1978 Scanning Multichannel Microwave Radiometer and Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) allow making estimation of sea ice distribution and total sea ice concentration. Currently used algorithms of sea ice cover properties calculation on the basis of initial data obtained by passive microwave sensors are not free from severe errors due to multiple reasons. These errors are especially critical in the marginal ice zones, which are important navigation routes, and in the regions of intensive ice formation. In the present work we used unique SSM/I dataset, collected in the department of “Satellite-based Earth studies” of the Space Research Institute – the dataset GLOBAL-RT, and the array of visual observations of the Arctic sea ice cover, which were obtained in the research cruises by Arctic and Antarctic Research Institute. Field observations data are used as initial parameters in the electrodynamic model, developed for determination of brightness temperature of ice and snow covered surfaces. Comparison of model results and SSM/I data at a variety of frequencies has shown reasonable correspondence. This outcome provides justification for development of physically-based method of determination of parameters of the ice cover from satellite radiometric data. This new approach is expected to improve the quality of the Arctic sea ice prediction.

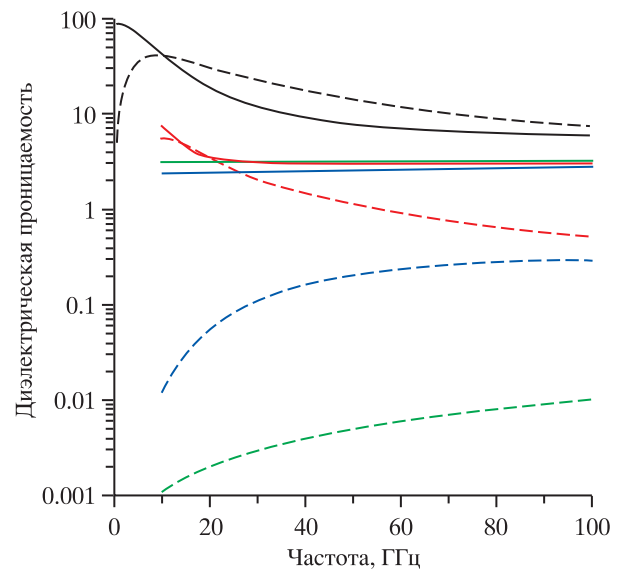
**Keywords:** passive microwave remote sensing, brightness temperature, electrodynamic model, effective dielectric permittivity, sea ice, polar region climate



**Рис. 2.** Радиотепловые поля по данным канала 19 ГГц (Н19), горизонтальная поляризация: *a* — для максимального ледового и снежного покрытия 12 января 2009 г.; *б* — вариант минимального ледового покрытия 20 августа 2009 г.

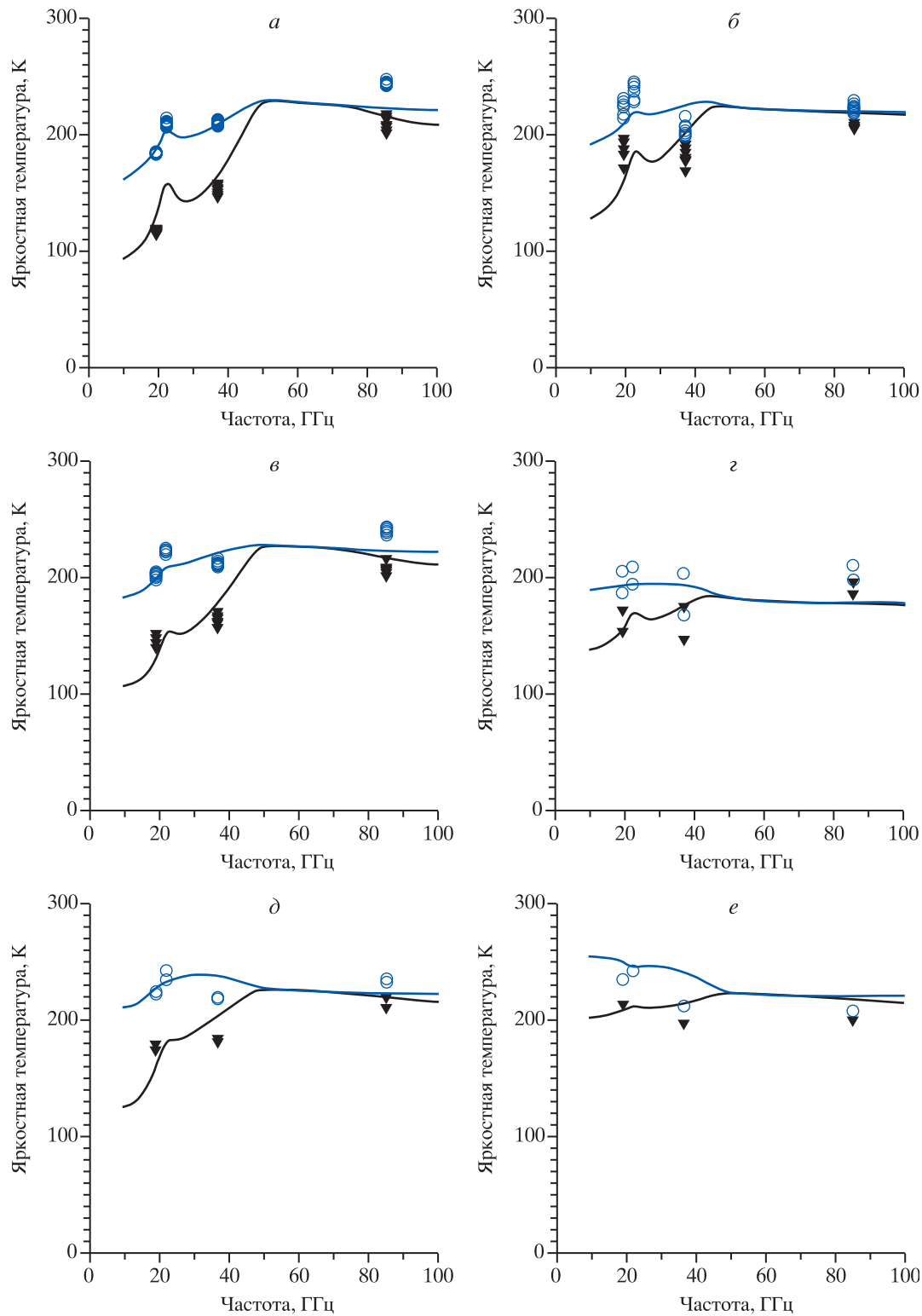


**Рис. 3.** Схема задачи о расчете яркостной температуры ледяного покрова.



**Рис. 4.** Частотные зависимости действительной (сплошная линия) и мнимой (пунктир) части диэлектрической проницаемости льда. Зеленый цвет – чистый лед (данные (Hufford, 1991)), синий – лед с пористостью 30 % и средним диаметром пор 1.5 мм (модельный расчет), красный – тот же лед, но поры заполнены водой (модельный расчет), черный – вода при температуре 0° (Ray, 1972).





**Рис. 5.** Частотные зависимости яркостной температуры ледового покрова Арктического региона. Сплошные линии – расчет по предложенным моделям, значки – данные SSM/I. Черный цвет – горизонтальная поляризация, синий – вертикальная. Сплоченность льда: *a* – 0 баллов (сплошная водная поверхность); *b* – 3 балла, снег отсутствует; *в* – 4.5 балла, снег отсутствует; *г* – 7 баллов, толщина снежного покрова 6 см; *д* – 9 баллов, снег отсутствует; *e* – 10 баллов (сплошной ледовый покров), толщина снежного покрова 10 см.



---

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

---

**СПУТНИКОВОЕ ТЕМПЕРАТУРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ  
В ОБЛАЧНЫХ УСЛОВИЯХ**

© 2012 г. А. В. Поляков\*, Ю. М. Тимофеев, В. С. Косцов

*Санкт-Петербургский государственный университет, Физический факультет*

\*E-mail: polyakov@troll.phys.spbu.ru

Поступила в редакцию 21.10.2011 г.

На основе численных экспериментов по замкнутой схеме анализируются погрешности определения вертикальных профилей температуры в условиях облачной атмосферы с помощью российских приборов спутника “Метеор”: ИКФС-2, МТВЗА-ГЯ и МСУ-МР. Показано, что погрешности спутникового зондирования в инфракрасном (ИК) диапазоне с помощью отдельно используемого прибора ИКФС-2 в условиях облачной атмосферы значительно возрастают в тропосфере и их средне-квадратичные величины могут достигать ~5 К и более. Погрешности при использовании прибора МТВЗА-ГЯ в тропосфере могут составлять 2.0–3.5 К независимо от наличия облачности. Совместное использование микроволновых (МКВ) измерений и 40 стратосферных каналов в ИК-области позволяет существенно повысить точности температурного зондирования только в стратосфере. Использование МКВ-измерений и квазиоптимального набора ИК-измерений (273 канала прибора ИКФС-2) позволяет определять вертикальный профиль температуры в большей части тропосферы с погрешностями 1–2 К при наличии облачности.

**Ключевые слова:** спутниковое комплексное ИК- и МКВ-зондирование атмосферы, ИКФС-2, МТВЗА-ГЯ, МСУ-МР, численное моделирование, погрешности температурного зондирования, облачные условия

### ВВЕДЕНИЕ

При решении классической задачи спутниковой метеорологии – определении вертикальных профилей температуры – используются одновременные измерения уходящего теплового излучения в полосах CO<sub>2</sub> и O<sub>2</sub> в инфракрасной (ИК) и микроволновой (МКВ) областях спектра (Кондратьев, Тимофеев, 1978). Подобная спутниковая система температурного зондирования создается в настоящее время в России на базе приборов ИКФС-2 и МТВЗА-ГЯ (Дядюченко и др., 2010) с привлечением данных о параметрах облачности оптического сканера малого разрешения МСУ-МР. Спутниковое температурное зондирование осуществляется в различных условиях облачного состояния атмосферы: в безоблачной, частично облачной и сплошной облачной ситуациях. В условиях сплошной облачности основная роль в решении задачи температурного зондирования тропосферы отводится, как правило, измерениям уходящего излучения в МКВ-области спектра. Эту роль в планируемой российской системе спутникового температурного зондирования атмосферы будет играть прибор МТВЗА-ГЯ. В условиях частичной облачности разработаны различные следующие подходы к использованию ИК-измерений уходящего излучения для температурного зондирования:

1) методики определения излучения безоблачной атмосферы на основе анализа последовательности кадров измерений (Chahine, 1974, 1977; Smith, 1968; Susskind et al., 2003, 2006). С учетом особенностей пространственного сканирования прибора ИКФС-2 этот подход неприменим, так как прибор не обеспечивает обязательного для этого сплошного покрытия области измерений;

2) определение различных параметров облаков из самих многоспектральных ИК-измерений или ИК- + МКВ-измерений (Menzel et al., 1983; Eyre, 1989; Li et al., 2005; Zhou et al., 2005; Zhou et al., 2007). При этом часто привлекаются данные одновременных измерений сканеров более высокого пространственного разрешения. Для спутника “Метеор” таким прибором будет сканер МСУ-МР, который может давать информацию о балльности и высоте облаков.

При втором подходе рассматриваются также возможности определения более детальных характеристик облаков, например, оптической толщины облаков и эффективных размеров облачных частиц из многоспектральных ИК-измерений (Liu et al., 2009).

В данной работе анализируются погрешности температурного зондирования в условиях облачной атмосферы при использовании различных наборов измерений на спутнике “Метеор”. Отме-

тим, что для измерений прибора ИКФС-2 в безоблачной атмосфере погрешности определения температуры и других параметров атмосферы и поверхности рассматривались в работах (Поляков и др., 2009, 2010а, 2010б).

### ДЕТАЛИ РАСЧЕТОВ

Для численного анализа погрешностей температурного зондирования в облачных условиях необходимо располагать представительным ансамблем возможных значений физических параметров состояния облачной атмосферы и поверхности. При создании этого ансамбля нами использовался ансамбль данных вертикальных профилей температуры, влажности, отношения смеси озона (широко используемый за рубежом ансамбль TIGR), также использованный ранее в работах (Поляков и др., 2009, 2010а, 2010б) ансамбль для безоблачной атмосферы. За основу модели облачности была взята база данных, созданная на основе судовых аэрологических и гидрометеорологических измерений, а также измерений на островных станциях и использовавшаяся в исследованиях (Заболотских и др., 2000, 2007). Сформированная база данных облачной атмосферы для данного исследования содержит 2311 реализаций и включает:

- вертикальные профили температуры, К;
- профили отношения смеси водяного пара, г/г;
- профили отношения смеси озона, метана, закиси азота;
- температуру поверхности суши, град;
- профили водности облаков, г/м<sup>3</sup>;
- балльность облаков;
- скорость приводного ветра и соленость поверхностного слоя воды;
- излучательную способность поверхности суши (ИСПС) в ИК- и МКВ-диапазонах спектра.

Конкретные реализации ИСПС вычислялись по методике (Тимофеев, Мартынов, 1996) для ИК-диапазона и брались из банка данных AMSR-E Emissivity Database (<http://www.aer.com/scienceResearch/mwrs/emis.html>) для МКВ-диапазона.

Для излучательной способности водной поверхности (ИСВП) в ИК-области использовалась неизменная спектральная зависимость (Nalli, 2001). В МКВ-области ИСВП вычислялась из значений скорости ветра и солености воды. Балльность облаков разыгрывалась с применением программного генератора (датчика) случайных чисел как случайная величина, равномерно распределенная в интервале [0, 10].

Исследование погрешностей температурного зондирования осуществлялось на основе замкнутых численных экспериментов для большого числа реализаций состояния атмосферы и поверхно-

сти для различных широтных зон (по классификации ансамбля TIGR).

Расчет яркостной температуры уходящего МКВ-излучения осуществлялся с помощью известной интегральной формы уравнения переноса с учетом поглощения кислородом, водяным паром и жидкокапельной влагой облаков.

В ИК-области спектра использовалась простейшая модель облачной атмосферы, определяемая балльностью облаков и их высотой. Облака предполагались абсолютно черными излучателями. Верхние границы облаков находились в диапазоне высот 1–10 км, но большая часть их относилась к облакам нижнего яруса (верхние границы облаков 1–3 км), для которых приближение абсолютно черных излучателей выполняется с высокой точностью.

Излучение при наличии облаков в обеих областях спектра вычислялось по формуле

$$J^{\uparrow} = ((10 - N)J_{\text{BO}}^{\uparrow} + NJ_{\text{O}}^{\uparrow})/10,$$

где  $J_{\text{BO}}^{\uparrow}$  и  $J_{\text{O}}^{\uparrow}$  – уходящие излучения в безоблачной и облачной атмосфере,  $N$  – балльность облачности.

В численных экспериментах по замкнутой схеме решалась комплексная обратная задача по определению профилей температуры, влажности и малых газовых составляющих (МГС), водности облаков, температуры поверхности, ИСПС в ИК- и МКВ-областях спектра, а также (в случае водной поверхности) – скорости приводного ветра. Относительно солености задача оказалась малоинформативна, поэтому соленость не определялась.

Решение обратной задачи по определению указанных параметров осуществлялось с помощью метода множественной линейной регрессии. Использование этого метода для оценки погрешностей правомерно, так как применение дополнительных итераций на основе физико-математического подхода мало меняет результаты при определении профиля температуры (Успенский, 2003). Расчеты проводились для различных широтных зон и поверхностей, и при моделировании случайных погрешностей измерений уходящего излучения соответствующими приборам ИКФС-2 и МТВЗА-ГЯ. Далее анализировались среднеквадратические погрешности определения температуры в основном тропосфере, где наблюдается существенное влияние облаков, полученные на основе проведения численных экспериментов для большого числа (от нескольких сотен до тысячи) реализаций состояния атмосферы и поверхности для различных широтных зон. Проиллюстрируем полученные результаты для условий средних широт и наблюдений над водной поверхностью.

### ПОГРЕШНОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

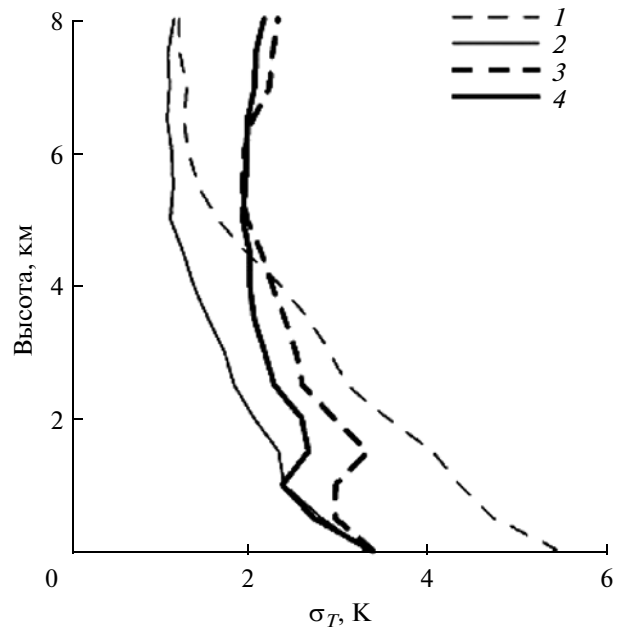
При проведении численных экспериментов по температурному зондированию облачной атмосферы с помощью различных приборов и их комбинаций предполагалось, что сканер МСУ-МР позволяет получать оценки балльности облаков и их высот верхней границ с погрешностями 2 балла и 1 км соответственно.

Проанализируем погрешности температурного зондирования в облачной атмосфере с помощью приборов ИКФС-2 и МТВЗА-ГЯ.

Напомним, что прибор ИКФС-2 позволяет определять вертикальный профиль температуры с погрешностями, близкими к 1 К в широком диапазоне высот (за исключением нижней части тропосферы 0–2 км) при отсутствии облаков (Поляков и др., 2009). Уменьшение точности температурного зондирования в нижнем слое обусловлено влиянием на излучение не только температуры атмосферы в этом слое, но и температуры поверхности океанов и суши, а также излучательной способности. На рис. 1 кривые 1 и 2 демонстрируют погрешности определения температуры по измерениям ИКФС-2 при различной балльности облачности. Из сравнения кривых следует, что влияние облаков на ИК-температурное зондирование в слое 0–5 км значительно. Погрешности при большой балльности облачности (более 8) могут достигать в нижней тропосфере более 5 К. При малой балльности (менее 2) они близки к 3 К.

Расчеты уходящего МКВ-излучения показали, что влияние облаков на уходящее излучение, измеряемое прибором МТВЗА-ГЯ, существенно только в прозрачных каналах прибора. В окнах прозрачности и слабой линии водяного пара это влияние может достигать 40 К в терминах радиояркостной температуры, но оно очень мало в полосе поглощения кислорода (0.5 см), используемой для решения задачи температурного зондирования. Эта особенность формирования МКВ излучения наглядно проявляется на рис. 1, где кривые 3 и 4 показывают погрешности определения температуры при использовании измерений МКВ зондировщика для различных балльностей облаков (случай водной поверхности, средние широты). Из приведенного рисунка видно, что в нижней и средней тропосфере (0–8 км) влияние облаков на МКВ-температурное зондирование (прибор МТВЗА-ГЯ) относительно невелико (0.2–0.8 К). Но при этом сами погрешности достаточно значительны и составляют 2–3.4 К. Важно подчеркнуть, что один МКВ-прибор не позволяет достичь точности определения температуры в 1 К даже в безоблачной атмосфере.

Для более наглядного сопоставления возможностей спутниковых приборов в ИК- и МКВ-областях спектра сравним на рис. 1 кривые 1 и 3, кото-



**Рис. 1.** Погрешности определения температуры  $\sigma_T$  при высоких  $N > 8$  (1 и 3) низких  $N < 2$  (2 и 4) балльностях облачности по данным ИК- (1 и 2) и МКВ- (3 и 4) измерений. Случай водной поверхности, средние широты.

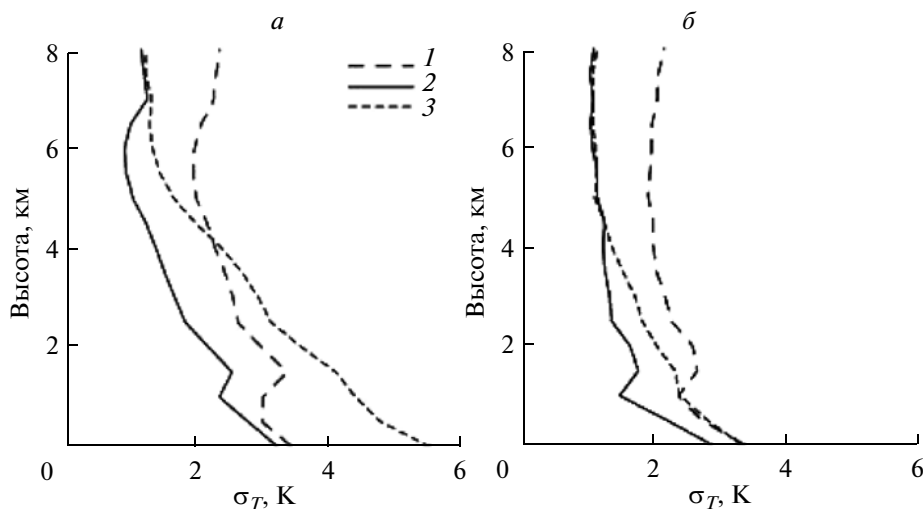
рые показывают погрешности приборов ИКФС-2 и МТВЗА-ГЯ для средних широт над водной поверхностью для больших значений балльности облачности ( $\geq 8$ ). Из рисунка видны значительные преимущества МКВ-измерений в слое 0–4 км по сравнению с ИК-измерениями. При этом одни МКВ-измерения при большой балльности облаков позволяют определять температуру в этом слое с погрешностями 2.3–3.4 К. Выше 4 км прибор ИКФС-2 начинает иметь преимущества — на высоте 8 км его погрешности приближаются к 1 К.

При анализе потенциальных погрешностей определения температуры с помощью использования совместных измерений в ИК- и МКВ-диапазонах спектра рассматривались два варианта:

1) использование МКВ-измерений и 40 каналов ИКФС-2, расположенных в полосе  $\text{CO}_2$  при 15 мкм, формирование уходящего излучения в которых осуществляется в стратосфере и не подвержено влиянию облаков тропосферы;

2) использование МКВ-измерений и квазиоптимального набора ИК-измерений (специально отобранные 273 канала измерений в спектральной области 660–2000  $\text{cm}^{-1}$ ).

Сравнение погрешностей температурного зондирования в облачной атмосфере одним прибором МТВЗА-ГЯ и комбинацией измерений МТВЗА-ГЯ + 40 стратосферных каналов ИКФС показало следующее: в безоблачных условиях прибор ИКФС-2 в высотной области 0–20 км да-



**Рис. 2.** Погрешности определения температуры  $\sigma_T$ : *a* – при высоких ( $N > 8$ ) и *б* – при низких ( $N < 2$ ) балльности облачности по данным МКВ (1), МКВ- + ИК- (2) и ИК-измерений (3). Случай водной поверхности, средние широты.

ет высокую точность 0.5–1 К (за исключением нижнего 1 км слоя). Одни МКВ-измерения позволяют получить погрешности в 1.5–2.8 К. Добавление 40 стратосферных ИК-каналов заметно влияет на погрешности только выше 10 км. Ниже 10 км погрешности определяются только МКВ-измерениями, что естественно, так как в этой схеме используются только стратосферные каналы ИКФС-2. Выше 13 км основную роль играют ИК-измерения, и погрешности определения температуры приближаются к 1 К, как и в безоблачном случае.

На рис. 2*a*, 2*б* сравниваются погрешности температурного зондирования атмосферы для различных значений балльности облачности при использовании только МКВ- или ИК-измерений и совместно МКВ- и ИК-измерений. В этом случае для ИК-области используется квазиоптимальный набор из 273 каналов для прибора ИКФС-2.

При большой балльности облаков (более 8, рис. 2*a*) совместное ИК- и МКВ-температурное зондирование позволяет получить в большей части тропосферы погрешности в 1–2 К. При этом уже на высоте 6 км и выше точность совместного зондирования приближается к 1 К. МКВ-температурное зондирование дает в тропосфере погрешности 2.2–3.3 К. ИК-измерения позволяют получать профиль температуры с большими погрешностями, чем МКВ-измерения ниже 4 км, причем у поверхности они могут достигать более 5 К.

Рисунок 2*a* показывает, что ИК-измерения, в случае использования большого числа каналов измерений, в том числе в оптически прозрачных спектральных интервалах, содержат определенную значимую информацию о температуре нижней тропосферы и в условиях облачной атмосфе-

ры. Привлечение этих измерений в алгоритме интерпретации повышает точность температурного зондирования на 0.5–1.0 К.

Рисунок 2*б* демонстрирует подобные же сравнения для ситуаций с малой (менее 2) балльностью облаков. Здесь погрешности температурного зондирования в среднем меньше, чем для большой балльности облаков. При малой балльности облаков совместное ИК- + МКВ-зондирование позволяет получать погрешности 1–2 К (за исключением первого километрового слоя, где погрешности близки к 3 К). Рост погрешностей в нижней тропосфере связан с тем, что на формирование излучения вблизи поверхности влияет еще и неопределенность ее температуры и излучательной способности. Сходное ухудшение наблюдается и в безоблачной атмосфере (Поляков и др., 2009).

Приведенный пример снова подтверждает важность включения в системы обработки спутниковых измерений ИК-каналов в прозрачных областях, “чувствующих облака”.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На основе численных экспериментов по моделированию спутникового температурного зондирования в облачной атмосфере с помощью приборов для измерений уходящего ИК- и МКВ-излучений (ИКФС-2 и МТВЗА-ГЯ) определены потенциальные погрешности при различном использовании измерений приборов. В численных экспериментах по замкнутой схеме решалась комплексная обратная задача по определению профилей температуры и влажности, водности облаков, температуры и излучательной способности поверхности и ряда других параметров.

Для проведения этих численных экспериментов был сформирован ансамбль состояний облачной атмосферы на основе базы данных TIGR и характеристик облаков, включающий балльности облаков и профиль водности. В исследованиях предполагалось наличие данных о балльности и высотах верхней границы облаков (по данным сканера МСУ-МР) с погрешностями 2 балла и 1 км соответственно.

Основные выводы исследований:

1) в облачной атмосфере погрешности ИК-температурного зондирования с помощью прибора ИКФС-2 значительно возрастают в тропосфере и их среднеквадратичные величины могут достигать ~5 К и более для большой балльности облаков;

2) погрешности МКВ-температурного зондирования в тропосфере могут составлять 2.0–3.5 К независимо от наличия облачности;

3) совместное использование МКВ-измерений и 40 стратосферных каналов в ИК-области позволяют существенно повысить точности температурного зондирования в стратосфере, однако в тропосфере погрешности заметно превышают 1 К;

4) использование МКВ измерений и квазиоптимального набора ИК-измерений (273 канала прибора ИКФС-2), а также данных о балльности облаков и их высоте из измерений сканера МСУ-МР позволяет определять вертикальный профиль температуры в большей части тропосферы с погрешностями 1–2 К даже при наличии облачности.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ 09-05-00797-а и грантов НИР СПбГУ № 11.31.547.2010 и № 11.37.28.204.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дядюченко В.Н., Селин В.А., Шилов А.Е., Волков С.Н., Горбунов А.В., Макриденко Л.А., Трифонов Ю.В., Асмус В.В., Милехин О.Е., Соловьев В.И., Успенский А.Б., Шмельков К.И. Развитие космического комплекса гидрометеорологического и океанографического обеспечения на базе системы полярно-орбитальных ИСЗ серии "Метеор-М" // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 1. С. 13–19.
- Заболотских Е.В., Митник Л.М., Бобылев Л.П., Йоханнессен О.М. Разработка и валидация алгоритмов восстановления скорости приводного ветра по данным SSM/I с применением Нейронных Сетей и физических ограничений // Исслед. Земли из космоса. 2000. № 2. С. 62–71.
- Заболотских Е.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б., Митник Л.М., Бобылев Л.П., Йоханнессен О.М., Черный И.В. О точности микроволновых спутниковых измерений скорости приводного ветра, влагосодержания атмосферы и водозапаса облаков // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 5. № 38. С. 592–600.
- Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 280 с.
- Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б. Температурно-влажностное зондирование атмосферы по данным спутникового ИК-зондирующего высокого спектрального разрешения ИКФС-2 // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 5. С. 3–10.
- Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б. Возможности определения содержания озона и малых газовых составляющих по данным спутниковых ИК-зондирующих высокого спектрального разрешения (ИКФС-2) // Исслед. Земли из космоса. 2010а. № 3. С. 3–11.
- Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б. Возможности определения температуры и излучательной способности поверхности суши по данным спутниковых ИК-зондирующих высокого спектрального разрешения (ИКФС-2) // Исслед. Земли из космоса. 2010б. № 4. С. 85–90.
- Тимофеев Ю.М., Мартынов А.А. Об определении температуры и излучательной способности поверхности суши // Исслед. Земли из космоса. 1996. № 4. С. 12–17.
- Успенский А.Б. Дистанционное зондирование атмосферы с помощью спутниковых Фурье спектрометров // Междунар. конф. Математические методы в геофизике / Под ред. Михайленко Б.Г. Новосибирск: Изд-во ИВМиМГ, 2003. Ч. II. С. 579–584.
- Chahine M.T. Remote sounding cloudy atmospheres. I. The Single Cloud Layer // J. Atmos. Sci. 1974. V. 31. P. 233–243.
- Chahine M.T. Remote sounding cloudy atmospheres. II. Multiple Cloud Formations // J. Atmos. Sci. 1977. V. 34. P. 744–757.
- Eyre J.R. Inversion of cloudy satellite sounding radiances by nonlinear optimal interpolation. I: Theory and simulation for TOVS // Q. J. Roy. Meteorol. Soc. 1989. V. 115. P. 1001–1026.
- Liu X., Zhou D.K., Larar A.M., Smith W.L., Schuessel P., Newman S.M., Taylor J.P., Wu W. Retrieval of atmospheric profiles and cloud properties from IASI spectra using superchannels // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9. P. 9121–9142.
- Menzel W., Smith T., Stewart T.R. Improved cloud motion vector and altitude assignment using VAS // J. Appl. Meteorol. 1983. V. 22. P. 377–384.
- Nalli N.R., Smith W.L., Huang B. Quasi-specular model for calculation the reflection of atmospheric-emitted infrared radiation from a rough water surface // Appl. Opt. 2001. V. 40. № 9. P. 1343–1353.
- Smith W.L. An improved method for calculating tropospheric temperature and moisture from satellite radiometer measurements // Mon. Weather Rev. 1968. V. 96. P. 387–396.
- Susskind J., Barnet C.D., Blaisdell J.M. Retrieval of atmospheric and surface parameters from AIRS/AMSU/HSB data in presence of clouds // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2003. V. 41. P. 390–409.
- Susskind J., Barnet C., Blaisdell J., Iredell L., Keita F., Kouvaris L., Molnar G., Chahine M. Accuracy of geophysical parameters derived from Atmospheric Infrared Sounder/Advanced Microwave Sounding Unit as a function of fractional cloud cover // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. № D09S17. doi:10.1029/2005JD006272.
- Zhou D.K., Smith W.L., Liu X., Larar A.M., Huang H.-L.A., Li J., McGill M.J., Mango S.A. Thermodynamic and cloud parameters retrieval using infrared spectral data // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. № L15805. doi:10.1029/2005GL023211.
- Zhou D.K., Smith W.L., Liu X., Larar A.M., Mango S.A., Huang H.-L. Physically retrieving cloud and thermodynamic parameters from ultraspectral IR measurements // J. Atmos. Sci. 2007. V. 64. P. 969–982.

## Satellite Temperature Sounding of the Atmosphere under Cloudiness Conditions

A. V. Polyakov, Yu. M. Timofeyev, V. S. Kostsov

*Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg*

On the basis of closed-loop numerical experiments, errors of determining the vertical temperature profiles in a cloudy atmosphere with the help of Russian instruments (IKFS-2, MTVZA-GYa and MSU-MR) onboard the satellite "Meteor" were analyzed. It has been shown that errors of infrared sounding using only IKFS-2 instrument under cloudiness conditions significantly increase in the troposphere and the rms value can reach ~5 K and more. The errors in the troposphere, when using MTVZA-GYa device, can range 2.0–3.5 K independently of the presence of clouds. The combined use of measurements in microwave and in 40 stratospheric infrared channels can significantly improve the accuracy of the temperature sounding only in the stratosphere. The combined use of microwave measurements and quasi-optimal set (273 channels of IKFS-2 device) of infrared measurements gives a possibility to determine the vertical temperature profile in most of the troposphere with errors of 1–2 K under cloudiness conditions.

**Keywords:** combined satellite infrared and microwave sounding, atmosphere, IKFS-2, MTVZA-GY, MSU-MR, numerical simulation, errors of the temperature sounding, cloudiness conditions

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

# ИЗУЧЕНИЕ ХЛОРОФИЛЛЬНОГО ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПОСЕВОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР ЮГА КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ И РЕСПУБЛИКИ ХАКАСИЯ СПУТНИКОВЫМИ МЕТОДАМИ

© 2012 г. И. Ю. Ботвич<sup>1\*</sup>, А. Ф. Сидько<sup>1</sup>, Т. И. Письман<sup>1,2</sup>, А. П. Шевырнов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Учреждение Российской академии наук Институт биофизики Сибирского отделения РАН, Красноярск

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск

\*E-mail: irina.pugacheva@mail.ru

Поступила в редакцию 28.06.2011 г.

Представлена новая методика оценки потенциальной урожайности посевов с.-х. культур на основе использования хлорофилльного фотосинтетического потенциала (ХФСП), вычисляемого по спутниковым данным. ХФСП определяется концентрацией пигментов (в основном хлорофилла и каротиноидов) и внутренней структурой тканей растений. Величина параметра ХФСП рассчитывается как площадь треугольника, координатами вершин которого являются значения спектрального отражения в зеленом, красном и ближнем инфракрасном каналах, и средние значения длин волн в соответствующих каналах. Проведено изучение ХФСП с.-х. культур в течение вегетационного периода по спутниковым данным среднего и высокого пространственного разрешения (MODIS/Terra и Landsat 7 ETM+). Определена степень взаимосвязи ХФСП и урожайности культур. Полученные спутниковые оценки хорошо согласуются с наземными наблюдениями.

**Ключевые слова:** хлорофилльный фотосинтетический потенциал, спутниковые данные, сельскохозяйственные культуры

### ВВЕДЕНИЕ

Важнейшими задачами спутникового мониторинга растительных покровов суши являются: идентификация с.-х. угодий, определение их видового состава (Foody, Cox, 1994; Erol, Akdeniz, 1996; Grignetti et al., 1997) и морфофизиологических характеристик растений (Терехов, 2011; Huete, 1986; Roberts et al., 1993; Pax-Lenney, Woodcock, 1997; MacDonald, Hall, 1980; Clevers, 1997). Съемки из космоса не только дают возможность улучшить сбор с.-х. статистики, повышая точность, однородность, объективность и частоту наблюдений, но и существенно усовершенствовать методы оперативного наблюдения, контроля за состоянием посевов и прогноза урожая (Шевырнов и др., 1996; Santhosh et al., 2003; Султангазин и др., 2004; Gitelson et al., 2005; Барталев и др., 2006).

Отражательная способность растительных покровов несет в себе значительный объем информации о физиологическом состоянии растений. Так, например, интенсивность и спектральный состав света, отраженного растительным покровом, несут информацию о пигментном и видовом составе, влажности растений, состоянии поверхности и архитектонике фитоэлементов. Наибольший вклад в формирование спектрального порт-

рета растительного покрова вносят зеленые пигменты — хлорофиллы. Известно, что до 95% вариаций значений спектральных коэффициентов яркости (СКЯ) растительного покрова в видимом диапазоне является следствием изменения содержания хлорофилла. На долю каротиноидов приходится от 10 до 20% лучистой энергии, поглощенной всеми пигментами, содержащимися в растениях. Отсюда следует, что оценка связей между содержанием хлорофилла и значениями СКЯ растительного покрова имеет практическое значение как для развития методов дистанционного зондирования (ДЗ), так и для детальной интерпретации получаемых дистанционных данных при исследовании урожайности растений (Sid'ko, Shevyrnov, 2000; Сидько, 1997, 2004; Sidko, 2004).

Ранее для поиска количественной взаимосвязи между СКЯ с.-х. посевов и концентрацией хлорофилла-а в листьях верхнего яруса растений было предложено использовать величину хлорофилльного фотосинтетического потенциала (ХФСП) растений (Сидько, Шевырнов, 1998; Сидько, 2003; Sid'ko, 2004). Предложенный оптический дистанционный метод определения ХФСП основывался на данных полевых наземных измерений СКЯ.

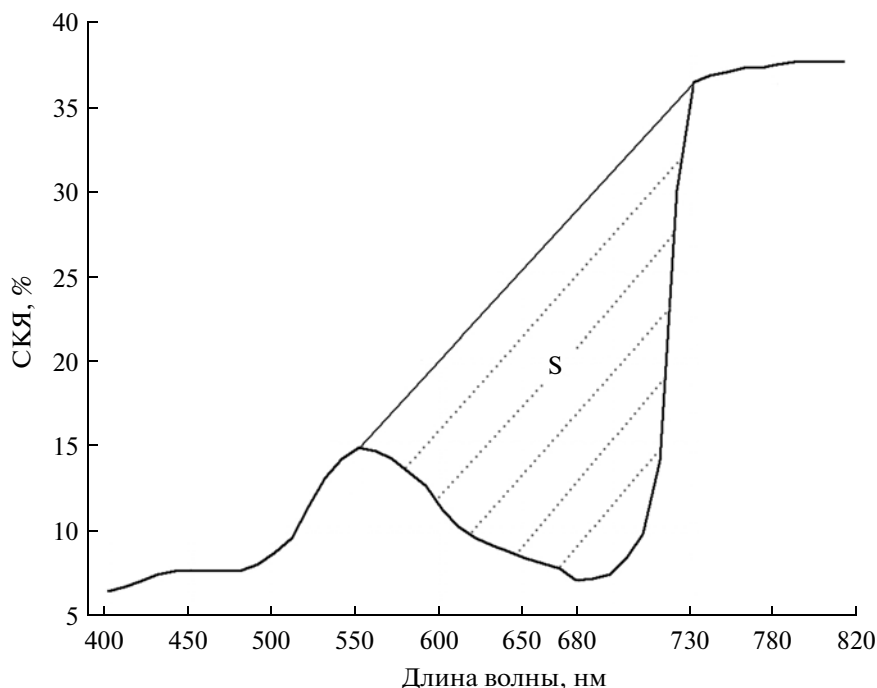


Рис. 1. Зависимость СКЯ посева пшеницы от длины волны.

В настоящей работе представлены результаты оценки возможности определения урожайности посевов с.-х. культур на основе изучения ХФСП, рассчитанного по спутниковым данным.

В ходе исследования были решены следующие задачи:

- на основе метода расчета величины ХФСП по наземным спектрофотометрическим данным модифицирован метод для расчета величины ХФСП по спутниковым материалам;

- проведено исследование ХФСП посевов с.-х. культур по спутниковым данным среднего и высокого пространственного разрешения (MODIS/Terra и Landsat 7 ETM+) в течение вегетационного периода;

- установлена степень взаимосвязи ХФСП агроценозов и их урожайностью.

#### МЕТОДИКА И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате проведенных ранее полевых исследований (Шевырнов и др., 1996; Сидько, Шевырнов, 1998; Sid'ko, Shevyrnogov, 2000; Shevyrnogov et al., 2000; Сидько, 2003, 2004) СКЯ посевов с.-х. культур было установлено, что существует возможность оценки концентрации хлорофилла-а в растениях и урожайности посевов по значениям СКЯ растений через параметр  $S$  – хлорофилльный фотосинтетический потенциал. Величина хлорофилльного фотосинтетического по-

тенциала (ХФСП) зависит прежде всего от величины поглощенного растениями света в области красной полосы поглощения хлорофилла ( $\lambda_{\max} = 680$  нм) в течение вегетационного периода растений (рис. 1). ХФСП наиболее полно отражает взаимосвязь СКЯ с физиологическими и биометрическими параметрами растений. Разработчиками было предложено производить расчет параметра ХФСП по площади “хлорофилльного провала” в интервале длин волн от 550 нм (зеленая область спектра) до 730 нм (ближняя ИК-область спектра), используя следующую формулу:

$$S = 90(\rho_{730}(t) + \rho_{550}(t)) - \int_{550}^{730} \rho(\lambda, t) d\lambda,$$

где  $\rho_{550}$  и  $\rho_{730}$  – значения СКЯ при  $\lambda = 550$  и  $\lambda = 730$  нм (при  $\lambda_{\max} = 680$  нм);  $t$  – границы временного интервала.

Методы изучения отражательной способности растительных объектов по данным наземных спектрофотометрических измерений существенно отличаются от методов, основанных на данных спутниковых измерений. Причиной этого являются изменение оптической толщины атмосферы, облачность, изменение угла визирования сканера, изменение высоты Солнца и т.п. С учетом особенностей спектрального разрешения прибо-

ров ETM+ спутника Landsat 7 и MODIS спутника Terra, для изучения значений ХФСП посевов с.-х. культур используются следующие спектральные диапазоны:

– для MODIS/Terra (при необходимости получения информации с пространственным разрешением 250 м) рекомендуется использовать следующие каналы:

4 канал: 545–565 нм (зеленая область спектра),

1 канал: 620–670 нм (красная область спектра),

2 канал: 841–876 нм (ближняя ИК-область спектра);

– для Landsat 7 ETM+ (пространственное разрешение 30 м):

2 канал: 525–605 нм (зеленая область спектра),

3 канал: 630–690 нм (красная область спектра),

4 канал: 750–900 нм (ближняя ИК-область спектра).

В качестве тестовых участков выбраны с.-х. поля, засеянные пшеницей (*Triticum aestivum L.*), гречихой (*Fagopyrum esculentum*) и овсом (*Avena sativa L.*). Посевы пшеницы и гречихи расположены на территории Минусинского района Красноярского края, посевы овса – на территории Алтайского района республики Хакасия. Выбор этих объектов обусловлен следующими факторами: пшеница, гречиха и овес являются основными культурами, высеваемыми и культивируемыми на большей территории нашей страны. Они к настоящему времени достаточно хорошо изучены с физиологической и биологической точки зрения. Агрофитоценозы изучались на стационарных площадках (общая площадь 5.3 тыс. га) стандартными геоботаническими методами в течение вегетационного сезона 2006 г. (Жукова и др., 2009). Для определения сырой надземной биомассы отбирались пробы для взвешивания с площадок  $1 \times 1 \text{ м}^2$  в трех-пятикратной повторности. Координаты участков зарегистрированы с помощью GPS-навигатора.

Чтобы охватить весь период вегетации с.-х. полей на территории Красноярского края и республики Хакасия, использовались снимки MODIS/Terra за период с 10 июня по 10 сентября 2006 г. Особенностью 2006 г. является более позднее начало вегетации растений по сравнению со среднестатистическими показателями для данной территории. Переход среднесуточной температуры воздуха через  $5^\circ\text{C}$  наблюдался с 23 апреля, и запаздывание составило приблизительно 14–16 дней.

Для изучения значения ХФСП по спутниковым данным высокого пространственного разрешения, а также для географической привязки тестовых участков использовались спутниковые

данные, полученные Landsat 7 ETM+ 2 сентября 2006 г.

Обработка спутниковых снимков проводилась с помощью программного обеспечения ENVI. Статистическая обработка полученных данных, а также их визуализация (построение графиков), производились в программе Statistica. Для оценки силы связи между изучаемыми параметрами использовался коэффициент корреляции Пирсона.

## ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА СНИМКОВ

### *Предварительная обработка спутниковых снимков Modis/Terra*

Предварительная обработка спутниковых снимков MODIS/Terra проводилась поэтапно. С помощью программы MODIS Reprojection Tool производилось преобразование проекции снимков MOD09GQK и MOD09GHK, из Sinusoidal projection в Universal Transverse Mercator (UTM). В продуктах MOD09 (Surface Reflectance) предоставляются ежедневные данные об отражательной способности земной поверхности. Данные продуктов MOD09 имеют уровень обработки L2G, т.е. выполнены радиометрическая калибровка снимков, радиометрическая коррекция влияния атмосферы. Продукты MOD09 производятся командой “NASA MODIS MODLAND Science Team” и находятся в свободном доступе по адресу <http://modis.gsfc.nasa.gov/>.

Обеспечение возможности анализа развития растительности по спутниковым данным сопряжено с необходимостью построения временных рядов данных наблюдений, очищенных от влияния ряда негативных факторов, к числу которых, прежде всего, относится наличие облачного покрова и теней от облаков. Для детектирования облачного покрова и теней от облаков (построения масок) использовался метод, разработанный Барталевым и др. (Барталев и др., 2006). Полученные маски позволяют исключить из анализа пиксели облаков, теней от облаков, лежащие на границе облачного покрова.

### *Предварительная обработка спутниковых снимков Landsat 7 ETM+*

Для изучения значений ХФСП с.-х. посевов в осенний период был выбран наиболее чистый, с точки зрения облачности, снимок Landsat 7 ETM+ от 2 сентября 2006 г. Данный снимок имеет L1T уровень обработки. Радиометрическая и географическая коррекция снимков была произведена Геологической службой США (U.S. Geological Survey (USGS), EROS Data Center), с исполь-

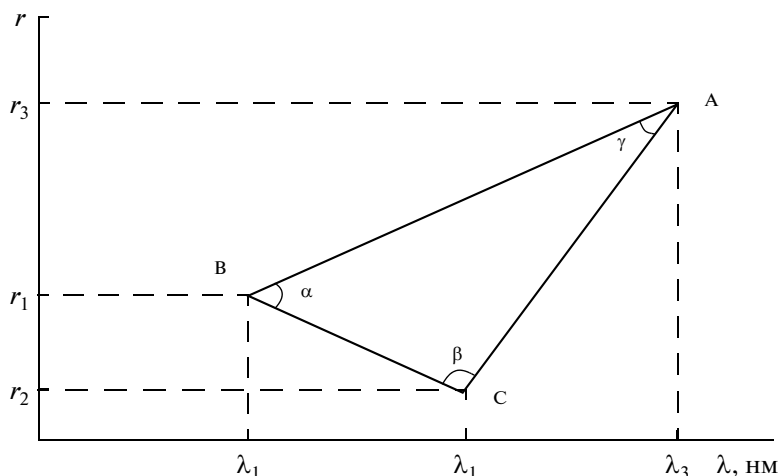


Рис. 2. Схематическое изображение треугольника с вершинами  $(\lambda_i, r_i)$  для расчета ХФСП.

зованием стандартных методов (Irish, 2000). Значения DN (Digital Numbers) пикселей конвертировались в излучение (Spectral Radiance), с использованием возможности программного обеспечения ENVI (модуль TM Calibration Parameters).

Атмосферная коррекция снимков проведена с помощью модуля FLAASH (Fast Line\_of\_sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes). Данный модуль разработан корпорацией Spectral Sciences в сотрудничестве с Американской научно-исследовательской лабораторией Воздушных сил (AFRL) и Центром прикладных технологий спектральной информации (SITAC) и включен в программное обеспечение ENVI. Модуль выполняет атмосферную коррекцию, с использованием моделей MODTRAN (MODerate resolution atmospheric TRANsmission), который учитывает солнечный зенитный угол, угол наблюдения, среднее значение высоты поверхности, и определенные модели атмосферы, типов аэрозолей и дальности видимости. FLAASH производит атмосферную коррекцию и конвертирует значения яркости снимков из Radiance в спектральное отражение (exoatmospheric reflectance).

Идентификация территорий, покрытых облаками, проводилась с помощью алгоритма, предложенного Richard R. Irish (Irish, 2000). Данный алгоритм основывается на двухэтапной обработке данных ETM+. На первом этапе для определения присутствия или отсутствия облаков на изображении используются отражательные и тепловые свойства отдельных пикселей сцены. Если облака присутствуют, то устанавливается конкретный для данной сцены тепловой профиль облачного покрова. На втором этапе производится идентификация оставшихся облаков на сцене пу-

тем использования уникальных тепловых сигнатур для облаков.

#### ТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СНИМКОВ

При разработке метода определения ХФСП по спутниковой информации учитывались особенности расчета ХФСП ( $S$ ) по наземным спектрофотометрическим данным, а также особенности спектральных диапазонов каждого из спутников (Landsat 7 ETM+ и MODIS/Terra). В результате проведенного анализа было установлено, что для определения величины параметра  $S$  необходимо рассчитать площадь треугольника, координатами вершин которого являются значения спектрального отражения в зеленом, красном и ближнем ИК-каналах ( $r_i$ ) и средние значения длин волн ( $\lambda_i$ ) в соответствующих каналах (рис. 2).

Площадь треугольника вычисляется с использованием геометрических свойств векторного произведения по формуле

$$S = |(\lambda_2 - \lambda_1)(r_3 - r_1) + (\lambda_3 - \lambda_1)(r_1 - r_2)|/2,$$

где  $\lambda_i$  — длина волны;  $r_i$  — значение спектрального отражения;  $i = 1, 2, 3$ .

При сравнительном анализе значений ХФСП нескольких тестовых участков, если не стоит задача получения количественных значений ХФСП, необходимо использовать нормализованный ХФСП ( $S_{norm}$ ). Использование нормализованного ХФСП позволяет уменьшить влияние таких явлений, как различия в освещенности снимка, облачности, дымки, поглощение радиации атмосферой и пр. Значения нормализованного ХФСП изменяются от 0 до 1.

Для нормализации ХФСП предложено использовать следующую формулу:

$$S_{norm} = (S - 1)/(S + 1).$$

При расчете ХФСП по спутниковой информации MODIS/Terra используются данные зеленого (545–565 нм), красного (620–670 нм) и ближнего ИК (841–876 нм) каналов, а при расчете ХФСП по спутниковой информации Landsat 7 ETM + используются данные зеленого (525–625 нм), красного (630–690 нм) и ближнего ИК (750–900 нм) каналов.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведенных ранее наземных исследований были получены следующие результаты. Анализ сезонных изменений ХФСП ( $\sum S(t)$ ) (определяемого по значениям СКЯ посевов), величин сухой и сырой биомассы, концентрации хлорофилла ( $C_{хл}$ ) по двумерному критерию случайных величин показал, что между ними имеется достаточно тесная положительная связь (рис. 3). Наиболее высокие коэффициенты корреляции ( $R = 0.9–0.95$ ) наблюдаются между  $\sum S(t)$  и  $\sum C_{хл}(t)$  за вегетационный период растений посевов, тогда как коэффициенты корреляции между величиной  $\sum S(t)$  и сухой и сырой биомассой за сезон исследований составляют  $R = 0.75–0.85$  (Sid'ko, 2004). Таким образом, показано, что по величине ХФСП можно судить о потенциальной урожайности посевов. Проведенные расчеты также показали, что между величиной  $\sum S(t)$  и урожайностью для одного типа посевов (например, 30 различных сортов пшеницы), независимо от их сортов, условий выращивания и обработки, существует хорошая взаимосвязь. Коэффициенты корреляции были порядка 0.85–0.90. Чем больше параметр  $\sum S(t)$  за вегетационный период, тем выше урожайность по зерну на исследуемых участках и полях (Sid'ko, Shevynogov, 2000).

На рис. 4 представлена зависимость урожайности посевов ( $U$ ) от величины  $\sum S(t)$ . Для построения данной зависимости использовались обобщенные многолетние результаты по исследуемым культурам (свыше 110 различных вариантов), независимо от условий их посевной и предпосевной обработки, количества внесенных в почву удобрений ( $N, K, P$ ) на один квадратный метр и сортов культур (пшеница, ячмень и овес), с явно различными сроками (Sid'ko, Shevynogov, 2000).

Далее представлены результаты обработки спутниковых данных среднего пространственно-

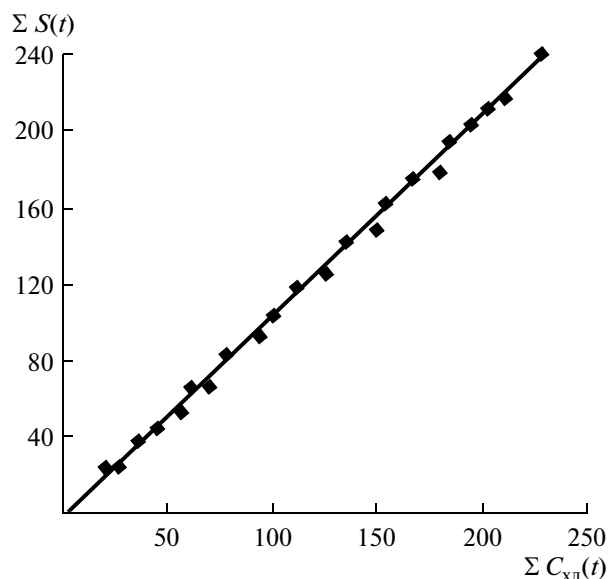


Рис. 3. Взаимосвязь между величинами  $\sum S(t)$  и суммарным содержанием хлорофилла  $\sum C_{хл}(t)$  в растениях исследуемого посева пшеницы в течение вегетации.

го разрешения (MODIS/Terra) посевов с.-х. культур в течение вегетационного периода (с 14 июня по 7 сентября: с фазы развития всходов до фазы полной спелости (для посевов пшеницы и овса) и конец плодоношения (для посевов гречихи)).

В результате проведенных исследований было установлено, что величина ХФСП может являться индикатором степени засоренности культур. На рис. 5 представлены графики изменений ХФСП и общей фитомассы посевов овса на двух участках. Как видно из представленных графиков, кривые ХФСП посевов значительно отличаются друг от друга. Поскольку обработка почвы, внесение удобрений, сроки сева, орошение были одинаковыми для данных полей, основной причиной отличий посевов является разная степень их засоренности. Посев овса на тестовом участке 6 был более засоренным, чем посев овса на тестовом участке 7 в течение всего вегетационного периода. Таким образом, величина ХФСП может являться индикатором степени засоренности культур.

В таблице представлены значения коэффициентов корреляции ХФСП с массой генеративных органов, вегетативной массой, массой сорных растений и общей фитомассой посевов пшеницы, гречихи и овса. При расчете коэффициентов корреляции использовались данные о величине ХФСП и фитомассы растений с интервалом 10–15 дней. Для оценки степени засоренности агроценозов в таблице представлены данные значений коэффициентов корреляции ХФСП с фитомассой посевов с

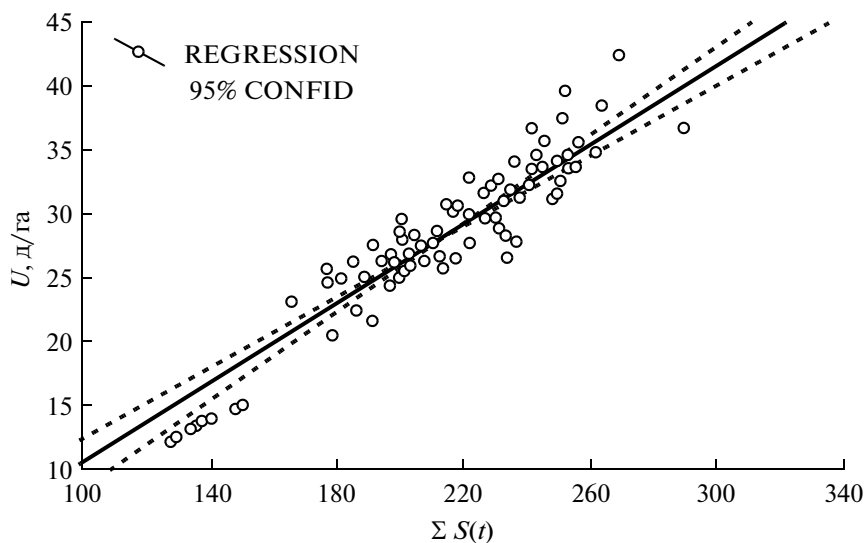


Рис. 4. Зависимость урожайности различных с.-х. посевов от величины хлорофилльного фотосинтетического потенциала.

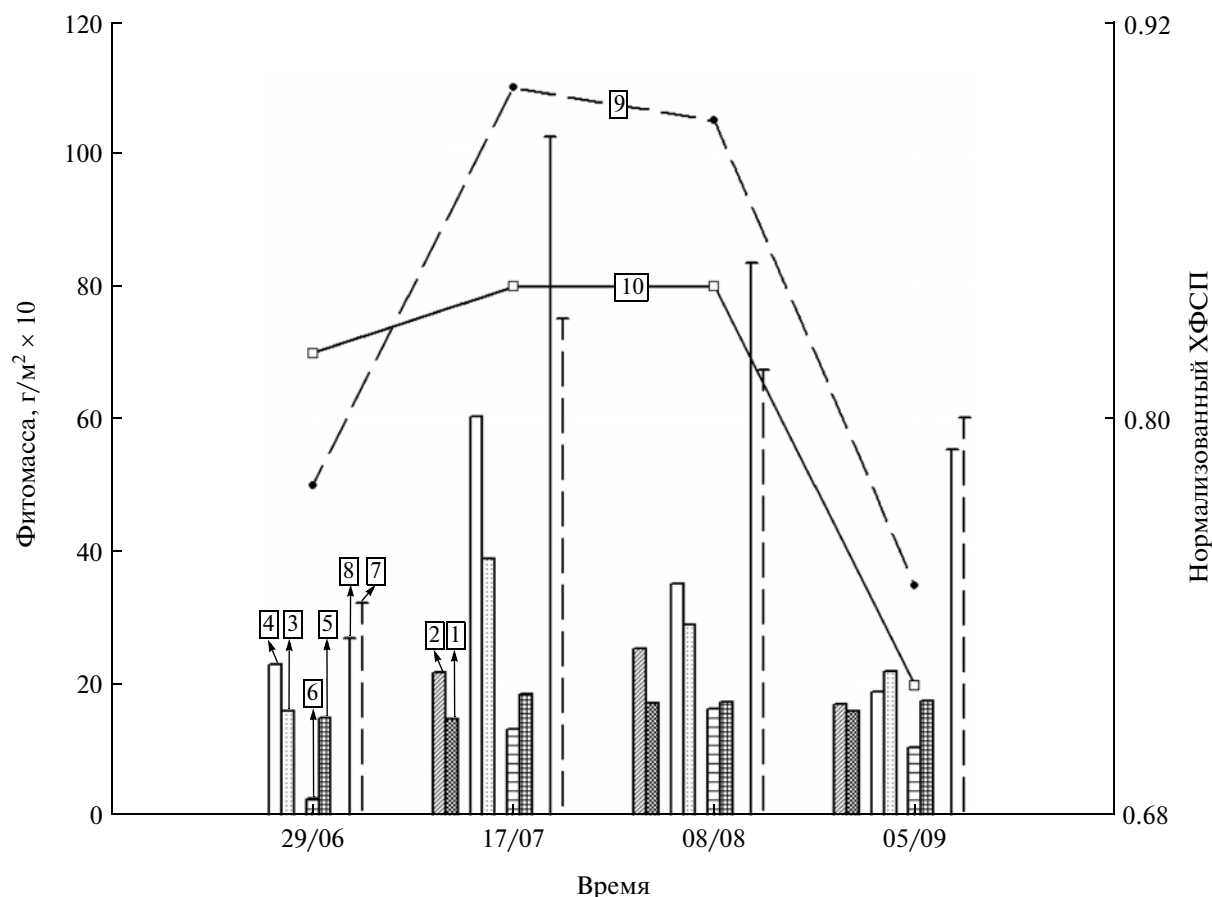


Рис. 5. 1 – Масса генеративных органов (тестовый участок № 6); 2 – масса генеративных органов (тестовый участок № 7); 3 – вегетативная масса (тестовый участок № 6); 4 – вегетативная масса (тестовый участок № 7); 5 – масса сорных растений (тестовый участок № 6); 6 – масса сорных растений (тестовый участок № 7); 7 – общая фитомасса (тестовый участок № 6); 8 – общая фитомасса (тестовый участок № 7); 9 – нормализованный ХФСП (тестовый участок № 6); 10 – нормализованный ХФСП (тестовый участок № 7).

Коэффициенты корреляции ХФСП со значениями фитомассы растений посевов пшеницы, овса, гречихи в течение вегетационного периода 2006 г.,  $p < 0.05$

Наименование посева, номер тестовой площадки	Коэффициент корреляции между ХФСП и фитомассой			
	генеративных органов	вегетативной	сорных растений	общей
посев пшеницы № 2 “низкая степень засорения” ( $n = 9$ )	0.87	0.9	0.13	0.68
посев пшеницы № 3 “высокая степень засорения” ( $n = 9$ )	0.7	0.45	0.75	0.9
посев гречихи № 4 “низкая степень засорения” ( $n = 7$ )	<i>n/a</i>	0.83	0.05	0.68
посев гречихи № 5 “высокая степень засорения” ( $n = 7$ )	<i>n/a</i>	0.75	0.44	0.75
посев овса № 7 “низкая степень засорения” ( $n = 7$ )	0.91	0.71	0.31	0.5
посев овса № 6 “высокая степень засорения” ( $n = 7$ )	0.2	0.93	0.68	0.77

Примечание. *n/a* – Данные отсутствуют,  $n$  – объем выборки.

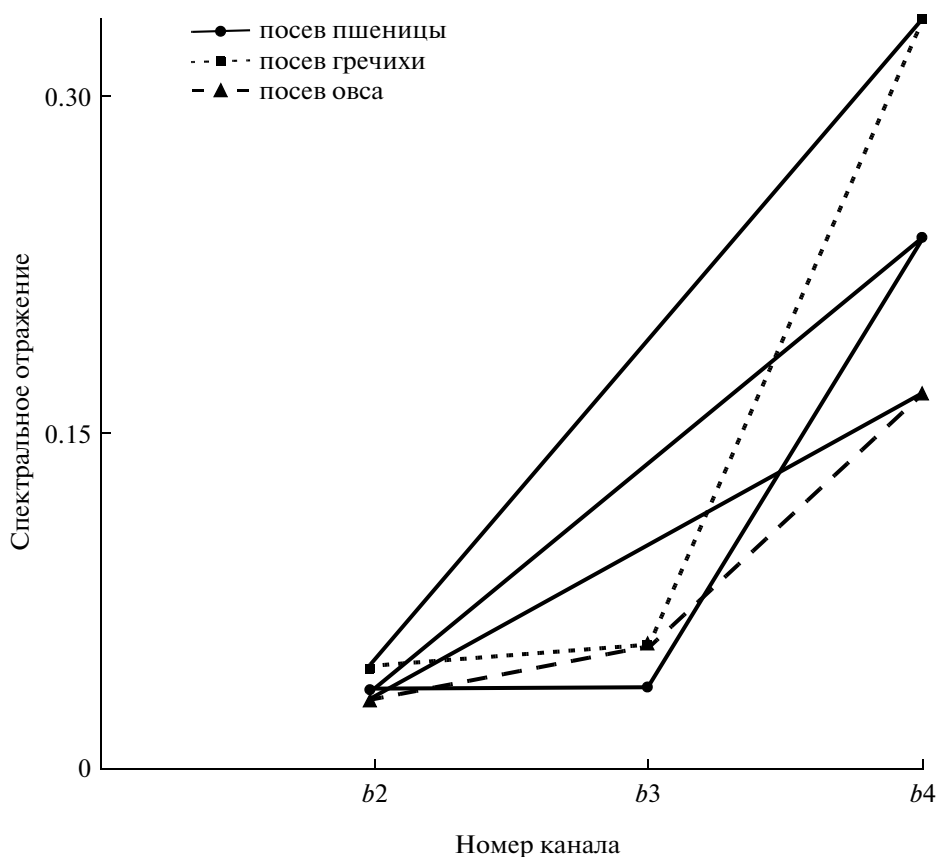
разной степени засорения. Принято, что если масса сорных растений в посеве превышает 20% от общей фитомассы (принята за 100%), то посев считается более засоренным и отмечен в таблице как “высокая степень засорения”. В случае, если масса сорных растений в посеве менее или равна 20% от общей фитомассы, то посев считается менее засоренным и отмечен как “низкая степень засорения”. В результате обработки спутниковых данных MODIS/Terra было установлено, что значения коэффициентов корреляции между ХФСП и массой сорных растений выше у посевов с высокой степенью засорения. Данная тенденция прослеживается для всех изучаемых видов посевов.

В результате анализа данных таблицы также было установлено, что значения коэффициентов корреляции ХФСП с массой генеративных органов выше 0.87 (для посевов с низкой степенью засоренности), что свидетельствует о высокой степени связи данных параметров. Анализ полученных результатов показал возможность использования ХФСП для оценки потенциальной урожайности посевов как по спутниковой, так и по наземной спектрометрической информации. И в том, и в другом случае коэффициенты корреляции урожайности с ХФСП посевов с низкой степенью засоренности принимают значения не ниже 0.85.

Далее представлены результаты обработки спутниковых данных с высоким пространственным разрешением (Landsat 7 ETM+), полученные 2 сентября 2006 г. В этот период времени растения

находятся на завершающей стадии развития (полная спелость – посевы пшеницы и овса, конец плодоношения – посевы гречихи).

В ходе проведенных исследований было установлено, что существует возможность разделения исследуемых с.-х. посевов по видовому составу с помощью величины ХФСП. На рис. 6 представлены графики значений отражения посевов пшеницы, гречихи и овса по данным спутника Landsat 7 ETM+. Графики построены по показаниям трех спектральных каналов (2, 3, 4): номер канала указан по оси абсцисс, величина отражения в каждом из каналов – по оси ординат. Полученные на графике точки соединены прямыми линиями. Для облегчения визуального восприятия информации – построения фигуры треугольника – произведено соединение точек  $(r_2, b2)$  и  $(r_4, b4)$  сплошной линией (где  $b2, b4$  – номер канала,  $r_2, r_4$  – значение отражения в каналах 2 и 4 соответственно). Расчет внутренних углов треугольника  $\alpha, \beta, \gamma$  (рис. 2) был произведен в системе координат  $(\lambda, r)$  для каждого тестового участка (посевов пшеницы, овса и гречихи). Объем выборки составил 12 тестовых участков для каждого посева (при степени засорения не более 20%). В результате обработки полученных данных было установлено, что, используя значения внутренних углов треугольника, можно разделить изучаемые посевы по видовому составу. Полученные значения углов формируют три непересекающихся подмножества – класса. Каждый образованный класс соответствует отдельной исследуемой культуре. Если учесть также тот



**Рис. 6.** Графики значений спектрального отражения с.-х. посевов, полученные по данным спутника Landsat 7 ETM+ (используются данные каналов 2, 3, 4).

факт, что по “Теореме о сумме углов треугольника” сумма углов  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  всегда равна  $180^\circ$ , то необходимым и достаточным является знание величин двух любых углов треугольника. Таким образом, показана возможность разделения посевов пшеницы, овса и гречихи (с низкой степенью засорения) по видовому составу между собой с помощью величины хлорофилльного фотосинтетического потенциала посевов.

Также было установлено, что величина ХФСП имеет тесную связь с массой генеративных органов культур. Значения коэффициентов корреляции ХФСП со значениями массы генеративных органов, вегетативной массы, массы сорных растений и общей фитомассы растений посевов пшеницы составили  $-0.9$ ;  $-0.12$ ;  $-0.6$ ;  $-0.72$  соответственно. Расчет ХФСП производился по спутниковой информации Landsat 7 ETM+ для полей, засеянных пшеницей, с разной степенью засорения (20 тестовых участков). Расчет коэффициентов корреляции ХФСП с фитомассой посевов пшеницы показал, что ХФСП имеет тесную связь с массой генеративных органов изучаемых культур. В осенний период времени кривая СКЯ вы-

равнивается (уменьшается площадь  $S$ , а, следовательно, значение ХФСП). В результате при увеличении массы генеративных органов значение ХФСП уменьшается.

## ВЫВОДЫ

1. Предложена методика расчета хлорофилльного фотосинтетического потенциала с.-х. посевов по спутниковым данным MODIS/Terra и Landsat 7 ETM+.

2. В результате анализа временных рядов значений ХФСП и массы сорных растений посевов с.-х. культур (в период с фазы развития всходы до фазы полная спелость (для посевов пшеницы и овса) и конец плодоношения (для посевов гречихи)) было установлено: величина значений ХФСП (по данным спутниковой информации MODIS/Terra) отражает степень засоренности культур на территории Красноярского края и республики Хакасия (Россия).

3. Установлено, что величина значений ХФСП (по данным Landsat 7 ETM+, полученным 2 сен-

тября 2006 г.) является индикатором урожайности с.-х. культур на исследуемых территориях.

4. Показана возможность разделения посевов пшеницы, овса и гречихи (на завершающей стадии развития: полная спелость — посевы пшеницы и овса, конец плодоношения — посевы гречихи) по видовому составу с помощью величины хлорофилльного фотосинтетического потенциала на основе спутниковой информации Landsat 7 ETM+.

Работа выполнена при поддержке проекта “Разработка методов космического мониторинга лесов Красноярского края с целью оценки динамики биоразнообразия под воздействием естественных и антропогенных факторов”, подпрограмма № 23 “Разнообразие и мониторинг лесных экосистем России”.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барталев С.А., Лупян Е.А., Нейштадт И.А., Савин И.Ю.* Классификация некоторых типов с.-х. посевов в южных регионах России по спутниковым данным MODIS // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 3. С. 68–75.
- Жукова Е.Ю., Шевырнов А.П., Жукова В.М., Зоркина Т.М., Пугачева И.Ю.* Сезонная динамика продуктивности агроценозов юга Минусинской котловины // Вестн. ТГУ. 2009. № 323. С. 354–357.
- Сидько А.Ф.* Аппаратура высокого разрешения и результаты исследования растительности и водных поверхностей // Очерки экологической биофизики / Под ред. Воловой Т.Г. Новосибирск: Наука, 2003. С. 356–370.
- Сидько А.Ф.* Дистанционный метод определения хлорофилльного фотосинтетического потенциала посевов сельскохозяйственных культур на примере пшеницы, ячменя и овса // Изв. РАН. Сер. биологическая. 2004. № 5. С. 547–555.
- Сидько А.Ф., Шевырнов А.П.* Спектральная яркость растений, как основа дистанционной диагностики посевов сельскохозяйственных культур // Докл. РАН. 1997. Т. 354. № 1. С. 120–122.
- Сидько А.Ф., Шевырнов А.П.* Изучение сезонной зависимости спектральной яркости посевов сельскохозяйственных культур от содержания хлорофилла и физиологических параметров растений // Исслед. Земли из космоса. 1998. № 3. С. 96–105.
- Султангазин У.М., Муратова Н.Р., Терехов А.Г.* Использование космического мониторинга в планировании и прогнозировании параметров зернового производства // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов / Под ред. Лупяна Е.А., Лавровой О.Ю. М.: Полиграф сервис, 2004. С. 291–297.
- Терехов А.Г.* Методика оценки агротехнического уровня возделывания зерновых культур Северного Казахстана и его изменений в период 2000–2009 по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 233–238.
- Шевырнов А.П., Сухинин А.И., Кашкин В.Б., Сидько А.Ф., Высоцкая Г.С.* Научная программа “Зеленая волна” как средство изучения растительности Красноярского края космическими средствами // Сиб. экол. журн. 1996. № 5. С. 363–372.
- Clevers J.G.P.W.* A simplified approach for yield prediction of sugar beet based on optical remote sensing data // Rem. Sens. Environ. 1997. V. 61. P. 221–228.
- Erol H., Akdeniz F.* A multispectral classification algorithm for classifying parcels in an agricultural region // Int. J. Rem. Sens. 1996. V. 17. P. 357–3371.
- Foody G.M., Cox D.P.* Sub-pixel land cover composition estimation using a linear mixture model and fuzzy membership functions // Int. J. Rem. Sens. 1994. V. 15. P. 619–631.
- Gitelson A.A., Vinã A., Ciganda V., Rundquist D.C., Arkebauer T.J.* Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. № 8. L08403. doi: 10.1029/2005GL022688
- Grignetti A., Salvatori R., Casacchia R., Manes F.* Mediterranean vegetation analysis by multitemporal satellite sensor data // Int. J. Rem. Sens. 1997. V. 18. P. 1307–1318.
- Huete A.R.* Separation of soil-plant spectral mixtures by factor analysis // Rem. Sens. Environ. 1986. V. 19. P. 237–251.
- Irish R.* Landsat 7 automatic cloud cover assessment. Algorithms for multispectral, hyperspectral, and ultraspectral imagery // SPIE. 2000. V. 4049. P. 348–355. [http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/pdfs/ACCA\\_SPIE\\_paper.pdf](http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/pdfs/ACCA_SPIE_paper.pdf)
- McDonald R.B., Hall F.G.* Global crop forecasting // Science. 1980. V. 2087. P. 670–679.
- Pax-Lenney M., Woodcock C.E.* The effect of spatial resolution on the ability to monitor the status of agricultural lands // Rem. Sens. Environ. 1997. V. 61. P. 210–220.
- Roberts D.A., Smith M.O., Adams J.B.* Green vegetation, non-photosynthetic vegetation, and soils in AVIRIS data // Rem. Sens. Environ. 1993. V. 44. P. 255–269.
- Seelan S.K., Laguette S., Casady G.M., Seielstad G.A.* Remote sensing applications for precision agriculture: A learning community approach // Rem. Sens. Environ. 2003. V. 88. P. 157–169.
- Shevyrnogov A.P., Vysotskaya G., Sid'ko A., Dunaev K.* Typification of natural seasonal dynamics of vegetation to reveal impact of land surface change on environment (by satellite data) // Adv. Space Res. 2000. V. 26. № 7. P. 1169–1172.
- Sid'ko A.* Remote Assay for Chlorophyll Photosynthetic Potential of Crops on the Example of Wheat // Biol. Bull. RAS. 2004. V. 31. № 5. P. 450–456.
- Sid'ko A.F., Shevyrnogov A.P.* Seasonal dependence of the spectral brightness of agricultural crops on plant chlorophyll content and physiological parameters // Earth Obs. Rem. Sens. 2000. V. 16. P. 487–500.

## Determination of Chlorophyll Photosynthetic Potential in Vegetation Using Ground-Based and Satellite Methods

I. Yu. Botvich<sup>1</sup>, A. F. Sidko<sup>1</sup>, T. I. Pisman<sup>1,2</sup>, A. P. Shevyrnogov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Biophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk*

<sup>2</sup> *Siberian Federal University, Krasnoyarsk*

Potential productivity of agricultural crops can be evaluated using a new method based on chlorophyll photosynthetic potential (CPSP) derived from satellite information. The CPSP is determined by the amount of light absorbed by the plants in the region of the red band of chlorophyll absorption in a definite growth period. The value of parameter CPSP is determined as the area of the triangle whose vertex coordinates are exoatmospheric reflectance in the green, red, and near-infrared bands and the respective mean wavelengths of bands. CPSPs of the crops have been studied by medium and high spatial resolution satellite data (MODIS/Terra and Landsat 7 ETM+). CPSP and crop productivity have been found to be interrelated. The obtained satellite evaluations are in good agreement with the ground-truth observation data.

**Keywords:** chlorophyll photosynthetic potential; satellite data; agricultural plants

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

### ОЦЕНКА ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ СОСТОЯНИЕМ РАСТИТЕЛЬНОСТИ СУБАРКТИКИ И КЛИМАТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ

© 2012 г. Н. Г. Платонов\*, И. Н. Мордвинцев, И. В. Алпацкий

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем экологии  
и эволюции им. А.Н. Северцова Российской академии наук, Москва

\*E-mail: platonov@sevin.ru

Поступила в редакцию 23.01.2012 г.

Рассмотрены широкомасштабные связи между растительной фенологией и физической средой в умеренных широтах Северного полушария в течение периода 1982–2007 гг. с использованием линейных методов пространственной корреляции, анализа главных компонент и анализа канонических корреляций, примененных к данным нормализованного дифференциального вегетационного индекса, полученных по измерениям AVHRR, концентрации морского льда (многоканальный радиометр SMMR, SSM/I) и температуры воздуха (атлас повторного анализа NCEP/NCAR). Показано, что обратная связь между июньской растительностью тундровых зон и сохранением льда в прибрежных акваториях Северного Ледовитого океана в летний период определяется широкомасштабными атмосферными процессами. Построенная модель с одним предиктором позволила реконструировать пространственное распределение вегетационного индекса на период, предшествующий спутниковым измерениям. В целом региональная изменчивость летней растительности может быть объяснена особенностями весенней атмосферной циркуляции.

**Ключевые слова:** спутниковый мониторинг, фенология растительности, нормализованный дифференциальный вегетационный индекс, концентрация морского льда, температура воздуха, тундровая зона, береговая зона арктических морей.

#### ВВЕДЕНИЕ

Нормализованный дифференциальный вегетационный индекс (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index), оцененный по данным спутникового дистанционного зондирования (ДЗ), является общепринятой метрикой, используемой для мониторинга хронологии вегетационного периода – сезона роста. Ранние даты начала прорастания растений весной затрагивают доступность и количество пищевых ресурсов в местообитаниях животного мира. В то же время от этого зависит состояние организма и способность животных к воспроизводству (Griffith et al., 2002). В северных широтах насыщенные влагой почвы промерзают зимой, поэтому вегетационный рост весной и в начале лета зависит преимущественно от температуры поверхностного слоя воздуха (Cao et al., 2004; Raynolds et al., 2008).

В данной работе мы исследуем в широком масштабе пространственную связь между майской температурой поверхности в северных широтах и вегетационной фенологией в июне за 26-летний период (1982–2007 гг.). Арктическая климатическая система образуется процессами, происходящими как в океане, включая морской лед, так и над сушей. Поэтому связь между разнесенными

во времени ледовыми условиями и вегетационной фенологией также рассмотрена.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходных данных для анализа использованы три базовых источника.

1. Полумесячные усредненные комбинированные значения NDVI в регулярной 8-км сетке, разработанные группой Картографические исследования, и глобальное инвентаризационное моделирование (Global Inventory Modeling and Mapping Studies, GIMMS) Национального управления США по аэронавтике и исследованию космического пространства (National Aeronautic and Space Administration, NASA) (Tucker et al., 2005). Версии 'd', 'p16' и '3v1' используются для 1982–2000, 2001–2002 и 2003–2007 гг. соответственно.

2. Среднемесячные температуры воздуха по уровню 850 мб севернее 30°с.ш. из NCEP/NCAR Reanalysis Atlas (Атлас повторного анализа атмосферных параметров, являющегося объединенным продуктом Национального центра прогнозирования изменений окружающей среды США (National Center for Environmental Prediction, NSEP) и Национального центра атмосферных исследований США (National Center for Atmospheric

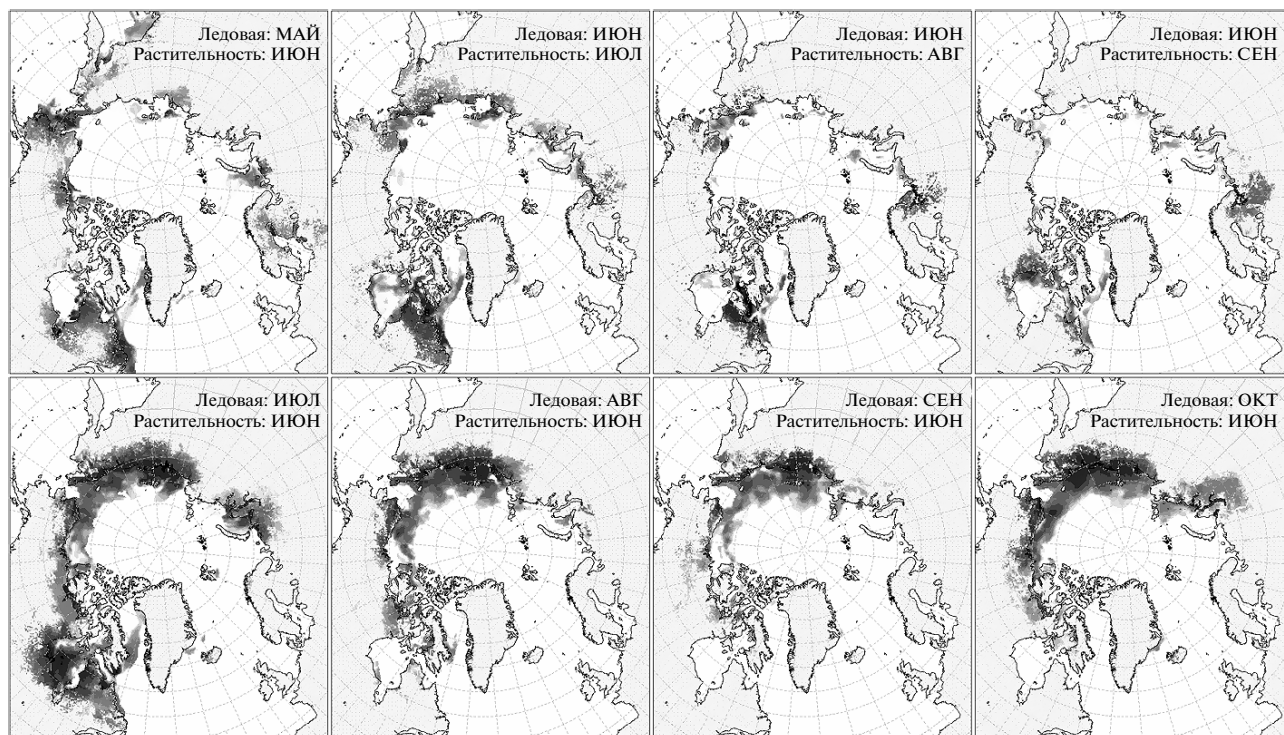


Рис. 1. Участки поверхности, участвующие в пространственной связи между концентрацией морского льда и NDVI.

Research, NCAR) Национального агентства США по изучению океана и атмосферы (National Ocean and Atmospheric Administration, NOAA)).

3. Среднемесячные концентрации морского льда для Северного полушария, разработанные Национальным информационным центром снега и льда США (National Snow and Ice Data Center, NSIDC).

Использованы следующие методы: анализ главных компонент (ГК); анализ канонических корреляций (АКК); анализ пространственных корреляций.

Для проведения анализа ГК и АКК исходная регулярная по широте и долготе сетка в  $2.5^\circ$  NCEP-данных преобразована в регулярную 175-км сетку в полярной равноплощадной проекции NSIDC EASE-Grid North (EPSG:3408) (Brodzik, Knowles, 2002). Выбор размера сетки (175 км) обусловлен стремлением уравновесить избыточность данных в северных широтах и разреженность данных в средних широтах, возникающих в результате перепроецирования. Восьмикометровые данные NDVI в полярной стереографической проекции приводились к среднемесячным значениям в такой же полярной равноплощадной проекции EASE и с таким же размером сетки (175 км), что и атмосферные данные.

Для проведения анализа пространственных корреляций между NDVI и концентрацией морского льда выбрана полярная стереографическая

проекция NSIDC Sea Ice Polar Stereographic North (EPSG:3411) с размером сетки в 25 км. Данные NDVI преобразовались из полумесячных в среднемесячные (временное осреднение) и из 8-км сетки в 25-км сетку (пространственное осреднение). Данные концентрации льда преобразовывались из среднесуточных в среднемесячные. Пространственное преобразование для данных концентрации не проводилось по причине распространения данных в полярной стереографической проекции с размером сетки 25 км.

#### АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ

Для оценки характера связи между наземным NDVI и прибрежной концентрацией морского льда мы рассмотрели пространственные корреляции  $r$  со смещением во времени между этими двумя параметрами. На верхней панели рис. 1 изображены участки поверхности, участвующие в пространственной связи между среднемесячными значениями NDVI и концентрацией морского льда при условии, что оценка морского параметра (концентрация льда) по времени предшествует как минимум на один месяц оценке сухопутного параметра (NDVI). На нижней панели рис. 1 представлена обратная во временном масштабе связь: NDVI оценен как минимум на один месяц раньше концентрации морского льда.

Сама связь в количественной мере выражается коэффициентом корреляции и графически представляет собой отрезок, соединяющий две точки (два пиксела), одна из которых находится на суше, а другая соответствует участку морского льда. Сами отрезки не показаны на рис. 1, но для каждого пиксела интенсивность связи выражена в количестве отрезков, один из концов которых находится в данном пикселе, и представлена качественно в грациях серого: чем темнее область, тем сильнее связь.

Для того чтобы избежать проявления слабых связей и случайных зависимостей при отображении, использовались только те корреляции  $r$  (линии), которые удовлетворяли описанным далее по тексту условиям. И для концентрации льда, и для NDVI использовался период 1982–2007 гг. (26 наблюдений). Для каждого пиксела по маске океана отсеивались те ячейки раstra, для которых среднее квадратическое отклонение по концентрации морского льда не превышало 8%. Для суши происходило изъятие пиксела, если среднее квадратическое отклонение значения NDVI не превышало 0.035. Далее отбирались только те линии, для которых абсолютное значение корреляции превышало 0.50. Статистическая значимость  $|r| = 0.50$  при  $n = 26$  составляет более 99%. Во избежание пространственной случайности связи мы отсекали линии, длина которых составила более 2000 км. И, наконец, мы оставили лишь те линии, для которых выполнялось следующее условие:  $r(50.0 - \sqrt{D}) > 15.0$ .

Темные области над морской поверхностью в подавляющем большинстве связаны с ближайшими темными областями над поверхностью суши, т.е. проявляется региональная связь. Отрицательные значения коэффициента корреляции между среднемесячным ледовым покровом в мае и среднемесячным NDVI в июне (т.е. морской параметр опережает во времени сухопутный) наиболее распространены в регионах около низкоширотной внешней границы арктического пакового льда. Ледовитость в летний и осенний периоды гораздо сильнее коррелирует со значением NDVI, оцененного за предшествующий период (т.е. сухопутный параметр опережает во времени морской). Такая зависимость наиболее явно проявляется для восточной Евразии и северной Аляски.

## АНАЛИЗ ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

В последние десятилетия метеорологи затрачивают значительные усилия на извлечение важных закономерностей из измерений атмосферных параметров. Метод ГК используется как для выделения пространственных мод, несущих наибольшую информативность, так и для сокращения размерности данных.

Для проведения анализа ГК выбран метод сингулярного разложения, позволяющий получить связанные друг с другом в порядке убывания вариации временных рядов и пространственные структуры или моды (эмпирические ортогональные функции, ЭОФ). При разложении использовалась корреляционная матрица переменных и наблюдений. Первая ГК объясняет более трети общей вариации (34.5%). Вторая ГК объясняет 10.4% общей вариации, а первыми двумя компонентами объясняется 45% общей вариации. На третью ГК приходится 6.8% вариации, и суммарно первые три ГК объясняют более чем половину (52%) общей вариации. Четыре первых ГК объясняют 57% общей вариации, на четвертую компоненту приходится 4.9% вариации.

Вращение ЭОФ в данной работе рассматривалось, но не применялось.

На рис. 2 представлены первые четыре ЭОФ. Первая ЭОФ описывает единую пространственную структуру полушария. Последующие ЭОФ отражают региональные шаблоны неоднородности NDVI, пересекающие Европу, Скандинавию и Северную Америку.

На рис. 3 представлен результат линейного многомерного шкалирования для преобразования многомерного ( $k = 1304$ ) множества данных в двухмерное ( $k = 2$ ) с помощью метода принципиальных компонент.

В качестве альтернатив рассмотрены нелинейные шкалирования по методам isoMDS (Cox, Cox, 2001), для которого результат оказался близким к методу ГК, и Sammon (1969), по которому результат оказался более равномерно распределенным, но с сохранением групп, выделяемых по методу ГК. Явно выделяются 1983 и 2005 гг., соответствующие минимальному и максимальному значениям NDVI. По первой ГК явно выделяется группа из пяти непрерывных лет, с 2003 по 2007 гг., отделенная вручную вертикальной линией. При рассмотрении обоих ГК, к этой же группе можно отнести еще 2001 и 2002 гг. (наклонная пунктирная линия с единичным коэффициентом наклона на рис. 3), сохранив при этом непрерывность группы (2001–2007 гг.). Таким образом, можно предположить наличие узловой точки изменения вегетационного режима Северного полушария на рубеже веков.

## АНАЛИЗ КАНОНИЧЕСКИХ КОРРЕЛЯЦИЙ

В нашем исследовании мы применили анализ канонических корреляций (АКК) с использованием подхода, предложенного в работе (Barnett, Preisendorfer, 1987), в основе которого классический АКК проводится для главных компонент. Предсказанные значения будут в виде ГК, и по

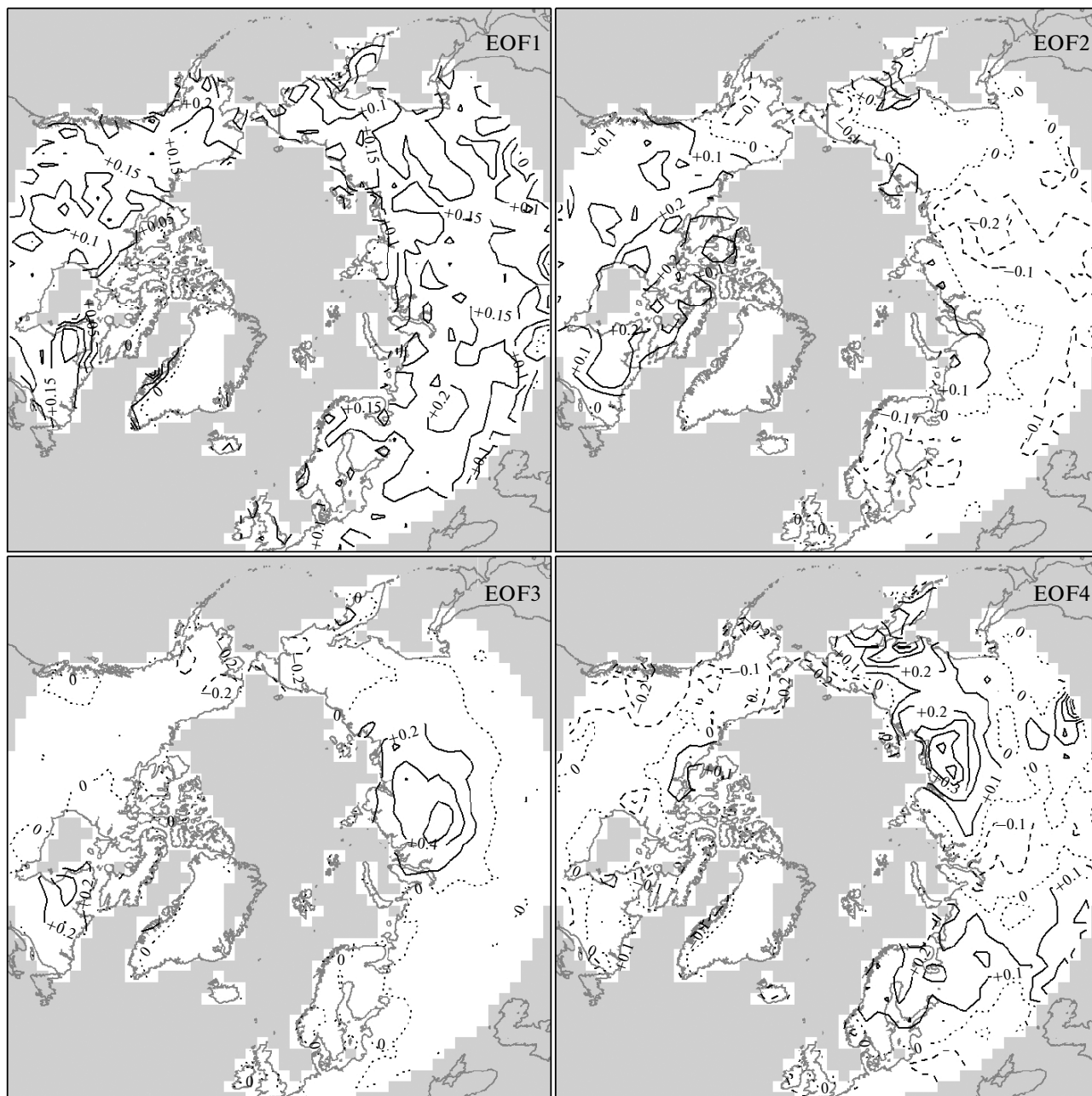


Рис. 2. Первые четыре ЭОФ (EOF1, EOF2, EOF3, EOF4 соответственно) NDVI.

этим ГК в дальнейшем производится восстановление первоначальной размерности.

Выбор предиктора и предсказываемого параметра происходил вручную. В качестве предсказываемого параметра рассматривались среднемесячные значения NDVI в начале лета (май, июнь), а также такой параметр, как изменение NDVI в текущем месяце по сравнению с предыдущим. Геопотенциальные высоты и температура воздуха по уровню 850 мб рассматривались как вероятные предикторы таким образом, чтобы их оценки были не позднее сроков вегетационных параметров.

Число ГК определялось вручную как для предиктора, так и для предсказываемого параметра. В результате была отобрана пара параметров – температуры воздуха в мае (16 ГК) и NDVI в июне (7 ГК).

Для NDVI значение индекса в каждой точке координатной сетки преобразовывалось в значение аномалии по сравнению с усредненным значением за период 1982–2007 гг. Анализ ГК проведен по матрице корреляций для обоих параметров пары. Для предиктора рассмотрены нормализация и анализ ГК для двух периодов: 1982–2007 гг. и 1948–2008 гг., итого получилось четыре вариан-

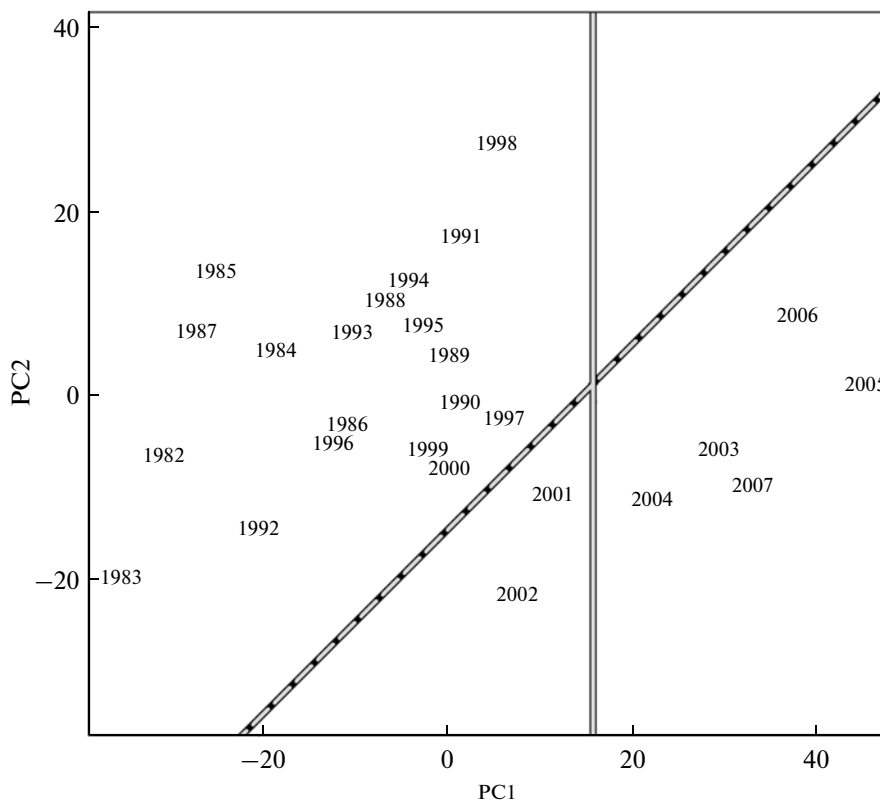


Рис. 3. Диаграмма рассеяния первых двух ГК (PC1 и PC2 соответственно) NDVI в июне.

та. В дальнейшем по тексту (если не оговорено дополнительно), нормализация данных осуществлена за период 1982–2007 гг., и анализ ГК предиктора также привязан к этому периоду.

На рис. 4 представлено пространственное распределение первых четырех в порядке убывания вариации канонических переменных (КП) по результатам АКК. Черный контур соответствует КП индекса NDVI в мае, белый – КП температуры воздуха по уровню 850 мб в июне. Географически прослеживаются совпадения областей с положительными значениями NDVI с положительной аномалией температуры. И, наоборот, над регионами с отрицательным значением КП NDVI, как правило, находятся области низких значений КП температуры воздуха.

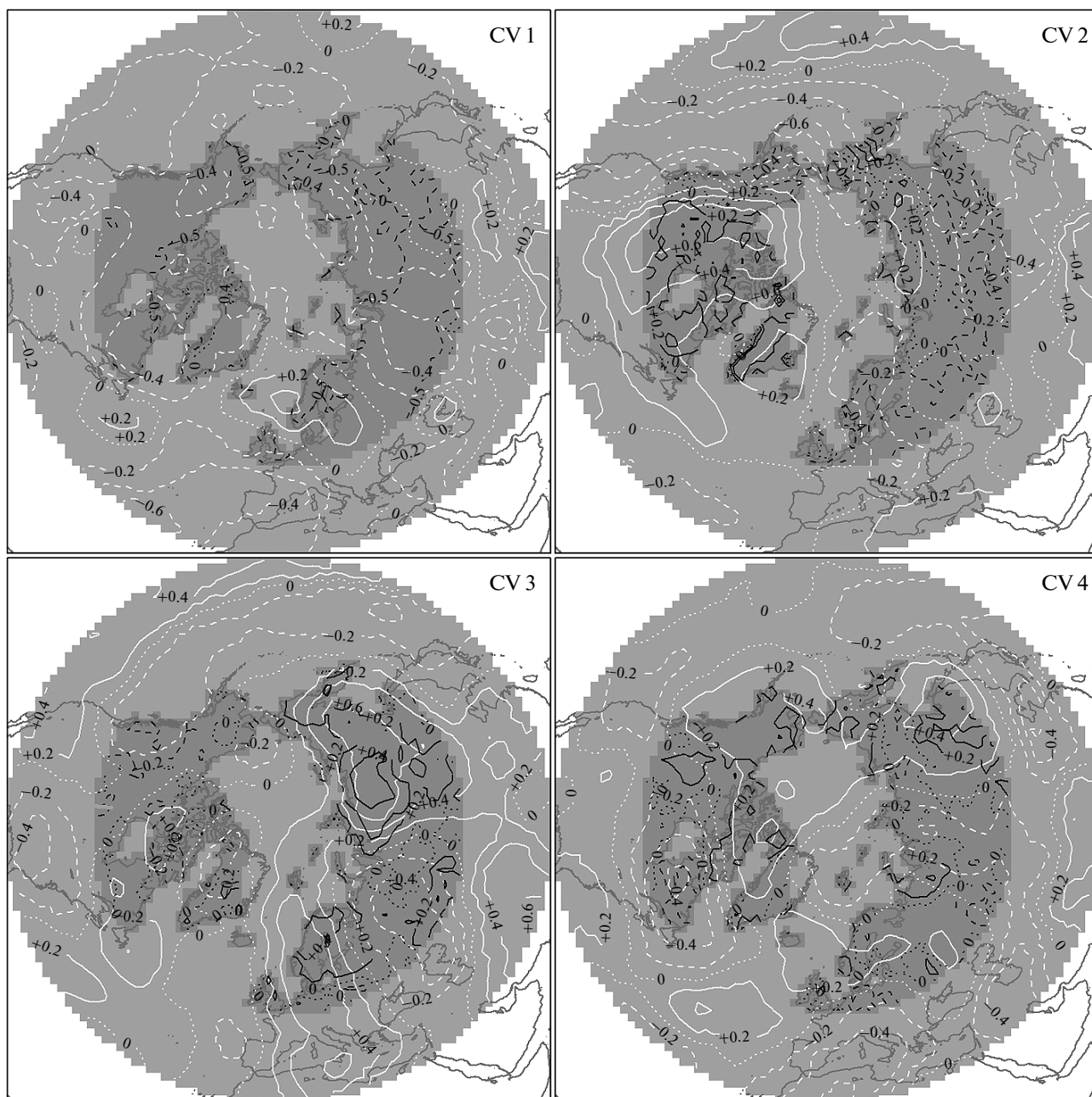
Для проверки модели использовалась серия из трех тестов: самостоятельной проверки АКК, перекрестной проверки АКК и  $\chi^2$  Бартлетта.

При проведении самостоятельного теста осуществлено сравнение каждого из значений параметра с оценкой, предсказанной моделью; при этом модель оставалась неизменной. Перекрестная проверка проведена по методу однократного изъятия. Суть этого метода заключается в том, что для каждого значения параметра производилось изъятие этого наблюдения, затем модель перестраивалась заново, по модели строилось пред-

сказание для изъятых наблюдений, и проводился сравнительный анализ. Тест  $\chi^2$  Бартлетта используется для проверки однородности дисперсии.

Самостоятельная проверка семи КП продемонстрировала близость значений наблюдений и моделей, выражающаяся как в высоком значении коэффициента корреляции ( $r$ ), так и в небольшом значении среднеквадратической ошибки ( $RMS$ ). За исключением пятой КП ( $r = 0.52$ ,  $RMS = 0.84$ ), для остальных переменных  $r \geq 0.88$  и  $RMS \leq 0.46$ . В отличие от самостоятельной проверки в перекрестном тесте появилось смещение (средняя разность между параметром и предсказанной оценкой). Для той же самой пятой КП оно составило 0.35, тогда как для первых четырех переменных по модулю оно не превысило 0.15. Для шестой и седьмой КП смещение почти одинаково и равно  $-0.27$ . Для третьей КП значение коэффициента корреляции  $r = 0.38$ , статистическая значимость которого ( $S$ ) при  $n = 26$  составляет 94.1%. Для пятой КП корреляция отрицательная ( $r = -0.52$ ), но для шестой КП  $r = 0.49$  ( $S = 99\%$ ).

Результаты многомерного регрессионного линейного анализа оказались близки к АКК. При проведении перекрестной проверки для пятой компонента коэффициент корреляции оказался значимым и отрицательным, для остальных шести статистическая значимость оказалась не ниже



**Рис. 4.** Географические структуры четырех КП (CV1, CV2, CV3, CV4). Черный контур соответствует NDVI, белый – температуре воздуха.

97.5%. В этом случае пятая компонента может быть отброшена, а суммарная вариация будет складываться из вариаций 1–4 и 6–7 компонент.

По результатам теста  $\chi^2$  Бартлетта, первые четыре КП имеют  $S > 96.5\%$ , поэтому на основании этого теста и результатов перекрестной проверки принято решение оставить четыре КП. Общая доля дисперсии NDVI, объясненная температурой воздуха через четыре КП, составляет 54%. В случае использования семи КП объясняется 80% дисперсии.

Изменение во времени первых четырех главных компонент NDVI представлено на рис. 5. Пунктирной линией изображено LOESS-сглаживание (Cleveland et al., 1988). Первая ГК и соответствующая ей первая ЭОФ объясняют 35% вариации. Минимальное значение первой ГК приходится на 1983 г., а максимальное – на 2005 г. Такие же экстремумы отслеживаются и на исходных данных NDVI. Не считая значительного возрастания первой ГК в период наблюдения с малой межгодовой изменчивостью (высокое значение

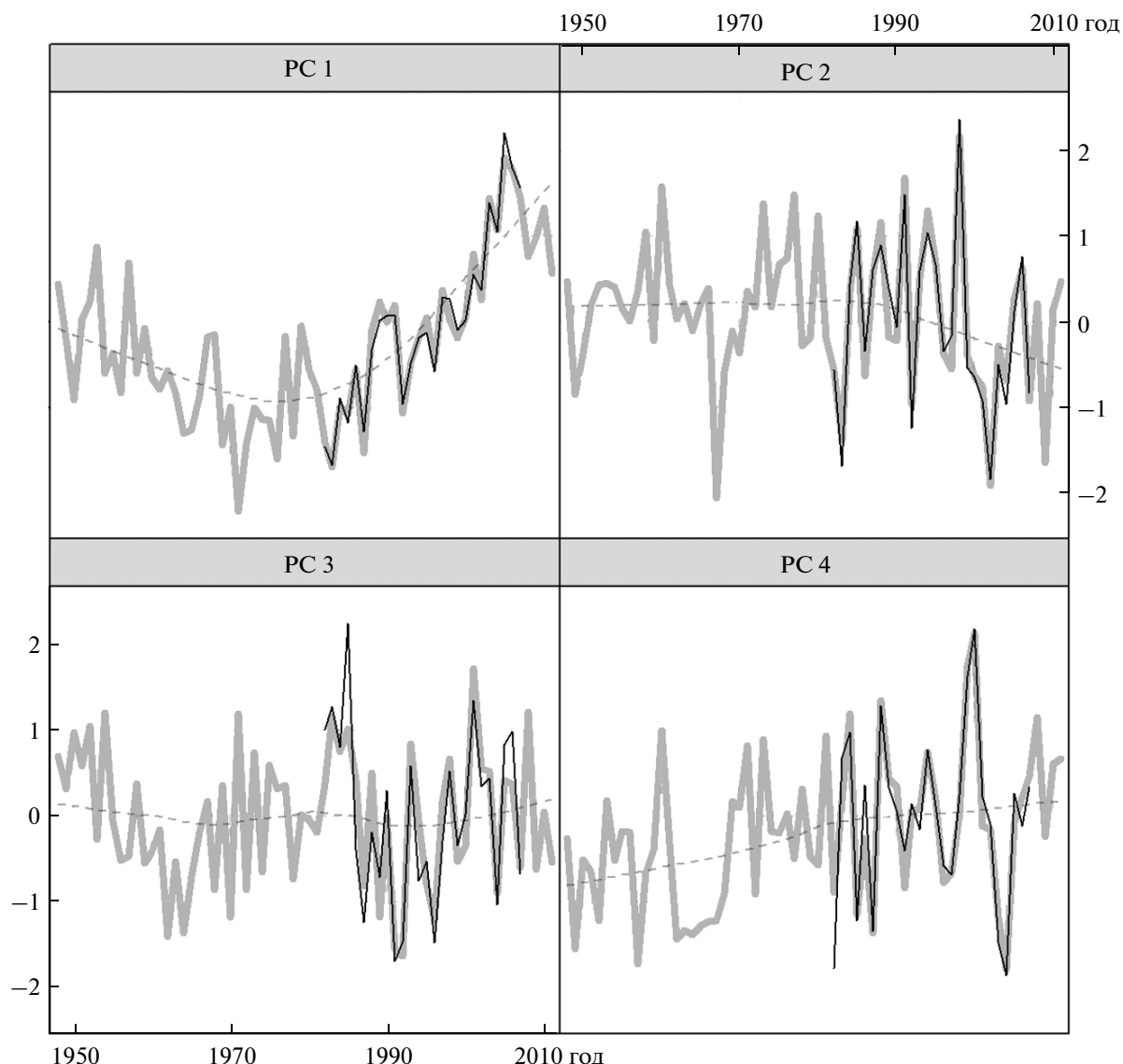


Рис. 5. Наблюдаемые (черная тонкая линия) и предсказанные (серая утолщенная линия) временные ряды первых четырех ГК NDVI (PC1, PC2, PC3, PC4).

автокорреляции), для трех последующих ГК отслеживаются более слабая составляющая линейного тренда и более значительная межгодовая вариабельность, что является следствием ежегодного проявления региональных особенностей.

В 1983 г. область положительной аномалии температуры воздуха возникла лишь над северо-западом России. Однако преобладающие южные ветра могли вынести это тепло в Арктику и далее в Северную Атлантику. Сильная отрицательная аномалия температуры воздуха преобладает над значительной территорией Канады, над Западно-Сибирской равниной и над Охотским морем. Центры областей преобладающего низкого давления близки к центрам негативных температурных аномалий и не позволяют тепловому воздуху из

южных широт распространиться на север. Наибольшая положительная аномалия NDVI наблюдалась к югу от устья Лены, при этом небольшая положительная аномалия температуры (+1°C) наблюдается в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском и тянется от устья Лены в меридианном направлении на юг. Одновременно отмечается большая ледовитость всех арктических морей, за исключением Баренцева моря.

В июне 2005 г. практически в любой точке суши севернее 50°с.ш. растительности было больше, чем в среднем за 26 лет с 1982 по 2007 г. Особенно сильные аномалии наблюдались над Среднесибирским плоскогорьем и Лабрадором. Центры положительных аномалий температуры воздуха также приходились на эти регионы, и

еще над Аляской воздух прогрелся на 4°C сильнее, чем обычно. Судя по скорости и направлению ветра, в центральной Арктике отмечается свойственная для этого сезона атмосферная циркуляция, но в целом атмосферное давление немного выше нормы. В районе периферийных арктических морей практически отсутствуют южные ветра, способные вытеснить теплый воздух с материковой части средних широт. Бофортов вихрь достаточно силен для возникновения циркуляции льда и препятствования выноса его в Атлантику через прол. Фрама. Наиболее сильное ослабление ледовитости обнаруживается в Чукотском, Восточно-Сибирском и Баренцевом морях, а также на востоке моря Бофорта и в западной части Карского моря.

Что касается второй ГК (10% вариабельности), то минимальное значение соответствует 2002 г., а максимальное – 1998 г. Возрастание второй ГК в 1998 г. может быть объяснено ярко выраженным температурным контрастом в Северном полушарии: над Северной Америкой и Северной Атлантикой преобладают поля повышенной температуры, а над центральной Арктикой и Чукоткой – отрицательные. И если в районе Северной Америки сохранилась положительная связь между температурой воздуха в мае и NDVI в июне, то над Юкагирским плоскогорьем индекс растительности оказался на 8% выше, чем обычно, несмотря на недостаточную прогретость воздуха в мае.

Май 2002 г. выдался для Северной Америки немного прохладнее, чем обычно. Это могло послужить причиной позднего начала вегетационного сезона на Лабрадоре, на востоке северо-западных территорий и на западе Канады. Достаточно интенсивно рост растительности наблюдался в Скандинавии и на Среднесибирском плоскогорье. Согласно исторической реконструкции по модели канонических корреляций, для Северной Америки 1967 г., возможно, был годом с низким индексом вегетации. Последнее следует из второй ЭОФ, которая наиболее сильно проявляет себя в этом регионе и по временному ряду предсказанного значения второй ГК.

Третья ЭОФ отвечает главным образом за рост растительности на Среднесибирском плоскогорье и Северо-Сибирской низменности. Вместе с диполем, образованным высоким NDVI на Лабрадоре и низким NDVI на Аляске и Чукотке, это объясняет 7% вариабельности NDVI в июне. Максимальное значение третьей ГК и с большим отрывом от других лет наблюдалось в 1985 г. И действительно этот год характеризовался низким NDVI почти во всем секторе Северного полушария от высоких широт до 50° с.ш. с ярко выраженной аномалией к югу от п-ова Таймыр. Что касается температуры воздуха, то к северу от Таймыра она была на один градус ниже среднего значения

за период 1982–2007 гг., но при этом в этом районе отмечена положительная аномалия давления. Пониженное давление над Среднесибирской возвышенностью вместе с повышенным давлением в этом регионе способствовали образованию барического диполя и возникновению ветров восточных румбов, закручиваемых в сторону материка лишь на Европейской части России. Отсутствие холодного воздуха из Арктики, возможно, способствовало росту растений к югу от Таймыра. На Аляске и Чукотке низкое значение индекса вегетации в 1985 г., возможно, связано с тяжелой ледовитой обстановкой в этом регионе. Низкое давление над о-вом Ньюфаундленд и высокое над Баффиновой Землей могли задержать вынос льда из Гудзонова пролива.

Во временном ряду четвертой ГК (5%) выделяются максимум в 2000 г. и два локальных минимума, близких по значению: в 2004 г. и 1982 г. Четвертая ЭОФ наиболее ярко проявляет себя в устье р. Лены и на Камчатке. В июне 2000 г. почти на всей территории северной части Евразии наблюдалось повышенное значение NDVI, за исключением Северо-Сибирской низменности. Значительная позитивная аномалия наблюдается на северо-западе Западно-Сибирской равнины. Отмечается раннее появление Большой Сибирской полыньи к западу от Новосибирских о-вов, но повышенная ледовитость обнаруживается в Чукотском море и на востоке моря Бофорта. По температуре воздуха Арктика разделилась на две части: положительная аномалия в Российском секторе и отрицательная – в Североамериканском.

Для анализа неопределенностей, возникающих при проведении анализа канонического анализа по методу, предложенному в работе (Barnett, Preisendorfer, 1987), мы рассмотрели комбинацию двух вариантов нормализации исходных данных температуры воздуха (1982–2007 гг. и 1948–2009 гг.) и двух вариантов интервалов для выделения ГК (1982–2007 гг. и 1948–2009 гг.). В итоге получилось четыре варианта. Для второй и четвертой ГК нормализация и период применения анализа главных компонент существенно не изменяются при рассмотрении наблюдаемого периода (1982–2007 гг.). Близки друг к другу для всех первых четырех компонент варианты, когда анализ главных компонент проводится по периоду 1982–2007 гг. Для второй, третьей и четвертой компоненты наибольшие расхождения между возможными периодами нормализации и анализа главных компонент проявляются лишь для трех последовательных реконструируемых лет (1948–1950 гг.), поэтому при рассмотрении исторического прогнозирования при увеличении интервала реконструкции, возможно, необходимо применение некоторого сглаживания. Такое сглаживание имеет определенный смысл, так как позволяет от погоды в краткосроч-

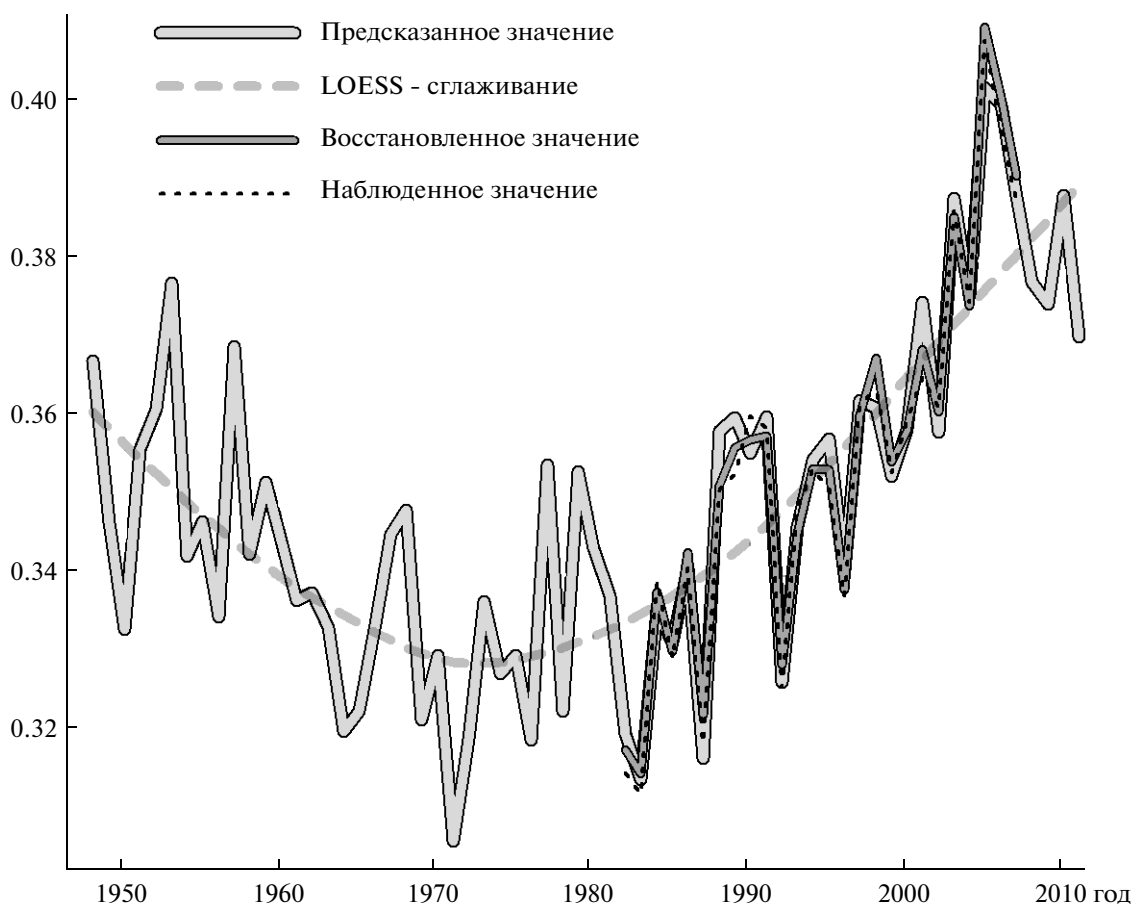


Рис. 6. Усредненный NDVI в июне по наблюдаемым и модельным значениям для территории севернее 50° с.ш.

ном периоде переходить к климату в долгосрочном интервале времени.

В течение спутниковой эры оценки NDVI первая ГК, объясняющая более трети вариации, хорошо согласуется с тенденцией более ранних сроков начала вегетационного сезона в северных широтах, о чем достаточно часто упоминается в научных публикациях, в том числе в работе (Slayback et al., 2003). Восстановленный в результате анализа канонических корреляций ретроспективный прогноз индекса растительности указывает на то, что спутниковая эра совпала с периодом, близким к локальному минимуму. Как было отмечено выше, вторая, третья и четвертая ГК имеют высокую межгодовую вариабельность и статистически незначимый линейный тренд в долгосрочной ретроспективе. Если судить по первой ГК, июнь 1971 г. был одним из самых экстремальных с минимальным индексом растительности за более чем 60 лет модельной ретроспективы.

На рис. 6 представлен временной ряд усредненного по обоим полушариям севернее 50° с.ш. индекса растительности в июне. Наблюдаемые значения охватывают интервал 1982–2007 гг. (короткий черный пунктир). Как в случае первой ГК,

минимальное значение индекса наблюдалось в 1983 г., а максимальное — в 2005 г. Темной серой линией отложено восстановленное по первым четырем ГК значение индекса растительности (1982–2007 гг.). Отмечается очень хорошая согласованность между наблюдаемыми и восстановленными значениями.

Историческая реконструкция NDVI в июне построена для периода 1948–2011 гг. по модели АКК с использованием температуры воздуха в мае в качестве предиктора. Для периода 1982–2007 гг. модельные и наблюдаемые данные высоко коррелированы и не смещены. По модельным данным для периода наблюдения также отмечается минимум в 1983 г. и максимум в 2005 г. Так же, как и для первой ГК NDVI, абсолютный минимум зафиксирован в 1971 г. Серой пунктирной линией отображено LOESS-сглаживание (Cleveland et al., 1988), с размером области для локального приближения, равным 2/3. По этому приближению в начале 1970-х отмечается задержка растительной фенологии: в 1950–1960 гг. наблюдается уменьшение индекса растительности, а с середины 1970-х — рост. За более чем шестидесятилетний срок не удастся обнаружить полного периода ко-

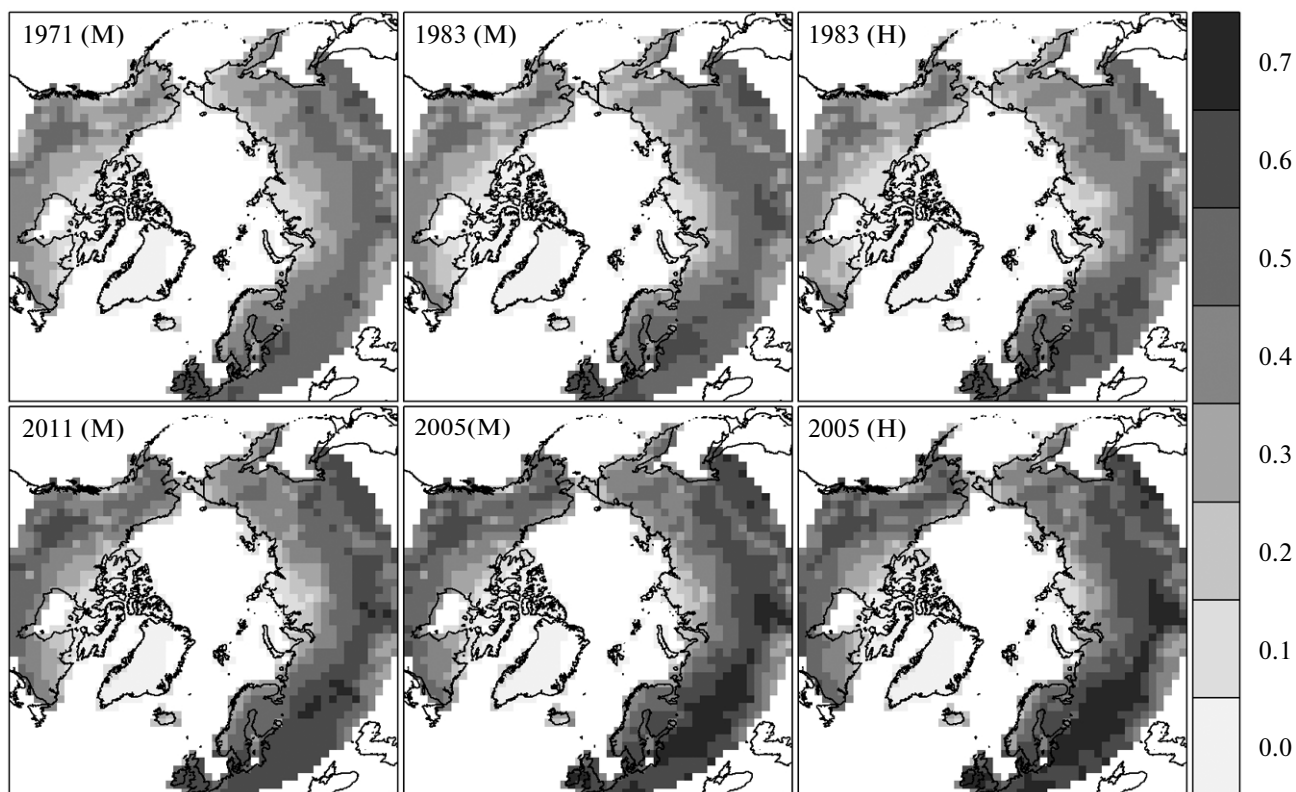


Рис. 7. Пространственное распределение NDVI по модельным значениям в июне 1971, 1983, 2005 и 2011 гг. (метка “М”) и наблюдаемым значениям в 1983 и 2005 гг. (метка “Н”).

лебаний NDVI, отсюда следует, что если растительная фенология изменяется циклично, то периодичность таких изменений оценивается десятилетиями.

Первая ЭОФ объясняет более трети общей вариации, поэтому пространственное распределение реконструированных и предсказанных значений будет отражать пространственный рисунок этой моды. Выборочные карты по модельным и наблюдаемым значениям NDVI приведены на рис. 7. Для 1983 и 2005 гг. доступны как наблюдаемые, так и модельные значения (вторая и третья колонки). Для 2005 г. отмечается ранняя растительная фенология для Европейской части России как по модельным данным, так и по результатам наблюдений. В целом и для 1983 г., и для 2005 г. прослеживается пространственное сходство результатов.

При анализе аномалий в качестве долгосрочного и базового периода использован период 1982–2007 гг. По модельным данным, и в 1971 г., и в 1983 г. на всем участке суши севернее  $50^\circ$  с.ш. в обоих полушариях преобладает отрицательная аномалия NDVI, за исключением одного региона – Северо-Сибирской низменности и северной части Среднесибирского плоскогорья. Для этого же региона в 2005 г. предсказывался повышенный индекс растительности, а в 2011 г. значение индекса оце-

нивалось близким к среднему. Наиболее сильная отрицательная аномалия NDVI в 1971 г. проявилась на Аляске и Чукотке. Высокое значение NDVI в июне 2005 г. проявляется на п-ове Лабрадор.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При рассмотрении влияния ледовой обстановки на развитие вегетационного сезона или влияния вегетационного роста на изменения ледовой обстановки, сильнее прослеживается связь, при которой сроки оценки уровня вегетационного роста предшествуют срокам оценки ледовой обстановки. Сезонность характерна для обоих параметров. При количественной оценке связи наиболее существенны морские регионы на границе арктических паковых льдов в начале лета и сухопутные районы в прибрежной зоне арктического бассейна. Большее значение NDVI в прибрежной зоне обычно предшествует раннему таянию льда в районе арктического шельфа, и наоборот.

В долгосрочной ретроспективе выраженные пространственные структуры июньской вегетационной фенологии в северных широтах отражают задержку растительного роста в начале вегетационного периода в 1950–1960 гг. Дальнейший тренд к изменению сроков начала вегетационно-

го сезона согласуется с периодами более холодной или более теплой температуры в мае.

Вторые и последующие ГК и ЭОФ растительной фенологии в июне регионально неоднородны. Они имеют высокую межгодовую изменчивость с незначительным трендом изменения во времени. Такая неоднородность, вероятно, является проявлением не климатических (из года в год), а погодных (в зависимости от года) изменений в весенний период в интенсивности, позиции и характере изменения доминирующих синоптических центров атмосферного давления, таких, как Исландский минимум, Алеутский минимум, Сибирский максимум, Бофортов максимум. От этого зависит интенсивность зонального перемещения теплых масс в Арктику и холодных — в южные широты, а также изолированность арктической климатической подсистемы от планетарного климата.

При ярко выраженном Алеутском минимуме и ослабленном Бофортовом максимуме происходит усиление переноса тепла в Арктику из южных широт (высокий индекс растительности в тихоокеанском секторе в 2004 г.). Если выражены оба эти атмосферных центра, то возникающий диполь вызывает зональные перемещения воздушных масс (1988, 1993 гг.). Эффект региональных изменений вегетационного роста на Чукотке и Аляске зависит от взаимного расположения центров диполя. Исландский минимум оказывает влияние на северо-западную часть Евразии (позднее начало вегетационного сезона в Европе в 1987 г.).

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований ОБН РАН “Биологические ресурсы России: оценка состояния и фундаментальные основы мониторинга” и Федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” Министерства образования и науки РФ (Госконтракт № 14.740.11.0410).

Мы признательны Дэвиду Дагласу (David C. Douglas, Alaska Science Center, USGS) за предоставленные для анализа данные NDVI, критические замечания и рекомендации при выполнении работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Barnett T.P., Preisendorfer R.* Origins and levels of monthly and seasonal forecast skill for United States surface air temperatures determined by canonical correlation analysis // *Monthly Weather Rev.* 1987. V. 115. № 9. P. 1825–1850.
- Brodzik M.J., Knowles K.W.* EASE-Grid: A versatile set of equal-area projections and grids in Discrete Global Grids / Ed.: Goodchild M. 2002. [http://www.ncgia.ucsb.edu/globalgrids-book/ease\\_grid/](http://www.ncgia.ucsb.edu/globalgrids-book/ease_grid/)
- Cao M., Prince S.D., Small J., Goetz S.J.* Remotely sensed interannual variations and trends in terrestrial net primary productivity 1981–2000 // *Ecosystems.* 2004. V. 7. P. 233–242.
- Cleveland W.S., Devlin S.J.* Locally-Weighted Regression: An Approach to Regression Analysis by Local Fitting // *J. Amer. Stat. Assoc.* 1988. V. 83. № 403. P. 596–610.
- Cox T.F., Cox M.A.A.* Multidimensional Scaling. Chapman & Hall, 2001.
- Griffith B. et al.* Porcupine caribou herd, in Arctic Refuge coastal plain terrestrial wildlife research summaries / Eds.: Douglas D.C. et al. U.S. Geol. Surv., Biol. Resour. Div., Biol. Sci. Rep. 2002-0001. 2002. P. 8–37.
- Raynolds M., Comiso J.C., Walker D.A., Verbyla D.* Relationship between satellite-derived land surface temperatures, arctic vegetation types, and NDVI // *Rem. Sens. Environ.* 2008. V. 112. P. 1884–1894.
- Sammon J.W.* A non-linear mapping for data structure analysis // *IEEE Trans. Comput.* 1969. V. C-18. P. 401–409.
- Slayback D.A., Pinzon J.E., Los S.O., Tucker C.J.* Northern hemisphere photosynthetic trends 1982–99 // *Global Change Biol.* 2003. V. 9. P. 1–15.
- Tucker C.J., Pinzon J.E., Brown M.E., Slayback D.A., Pak E.W., Mahoney R., Vermote E.F., El Saleous N.* An extended AVHRR 8-km NDVI data set compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data // *Int. J. Rem. Sens.* 2005. V. 26. P. 4485–4498.

## Estimation of the Relationship between the Subarctic Vegetations and Climatic Parameters

N. G. Platonov, I. N. Mordvintsev, I. V. Alpatsky

*A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences, Moscow*

In this study we examined relationships between vegetation phenology and the physical environment across the mid-latitudes of the Northern Hemisphere between 1982 and 2007. Spatial correlation, principal component analysis, and canonical correlation analyses — all these linear techniques were applied to monthly time-series of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), derived from AVHRR sensor, sea ice distribution (SSMR-SSM/I), and air temperature (NCEP/NCAR Reanalysis Atlas). Negative correlation between June NDVI of tundra belt and sea ice conservation in coastal zone of Arctic Ocean during summer, possible, is forced by broad-scale atmospheric circulation. We developed a model with single predictor and implemented historical reconstruction NDVI for a long-term period, including pre-satellite era. According this model, the regional patterns of summer vegetation can be explained by peculiarity of atmospheric circulation during spring.

**Keywords:** satellite monitoring, vegetation phenology, Normalized Difference Vegetation Index, sea ice concentration, air temperature, tundra, coastal zone of Arctic Ocean

---

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

---

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОМКНУТОСТИ КРОН РЕДКОСТОЙНЫХ ЛИСТВЕННИЧНИКОВ ТАЙМЫРА ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ РАЗНОГО РАЗРЕШЕНИЯ

© 2012 г. А. Ю. Тюкавина

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

*E-mail: sashaty@gmail.com*

Поступила в редакцию 10.10.2011 г.

По результатам экспедиционных исследований на участке Ары-Мас Таймырского заповедника в рамках международного научного проекта PPS Arctic изучены особенности изображения разреженных лиственничников разной сомкнутости на снимках субметрового и тридцатиметрового пространственного разрешения. По снимкам разного разрешения составлены карты сомкнутости древостоев. Рекомендована методика построения карт сомкнутости древостоев по космическим снимкам с разрешением в десятки метров с использованием детальных полевых схем, снимков субметрового разрешения и зимних снимков.

**Ключевые слова:** лиственничники лесотундры, кроны деревьев, сомкнутость древостоев, Ikonos, Landsat, участок Ары-Мас, Таймыр

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в связи с повышенным вниманием к проблемам изменения климата активно ведется изучение природных экотонных — переходных зон, обладающих большой неустойчивостью и динамичностью (Бобра, 2006). Лесотундровая зона, представляющая собой экотон “тундра—тайга”, занимает обширные территории севера России и активно вовлекается в хозяйственное использование, что вызывает интерес к процессам, происходящим на границе леса и тундры. Изучению северной границы лесов посвящен международный научный проект PPS Arctic, в рамках которого выполнено данное исследование.

Крайние северные леса в силу своего географического положения слабо доступны для непосредственного исследования, поэтому важную роль в их изучении должны играть материалы дистанционного зондирования (ДЗ). Космические снимки (КС) субметрового пространственного разрешения, на которых в редколесьях различимы отдельные деревья, имеют локальный охват, тогда как менее детальные снимки, с разрешением в десятки метров, в силу большего территориального покрытия позволяют изучать обширные территории. В связи с этим актуальной является разработка методики обоснованного перехода от детальных к более обзорным дистанционным данным, с минимальной потерей достоверности,

присущей “наземной правде” и КС сверхвысокого пространственного разрешения.

В последнее время вопросам изучения и картографирования притундровых лесов по данным ДЗ посвящен ряд исследований как на континентальном уровне (Rees et al., 2008), так и на уровне отдельных регионов: Кольского п-ва (Кравцова, Лошкарева, 2010; Михеева, 2010; Тутубалина, Новичихин, 2010), Урала (Шиятов, Мазепа, 2007; Марушак, Елсаков, 2010), Западного Саяна (Харук и др., 2008), гор северо-востока Китая (Zhang et al., 2009). В частности, в работах, посвященных лиственничникам Таймыра, сделаны попытки оценки сомкнутости и полноты древостоев на основе исследования сочетания освещенных и затененных участков кроны деревьев на снимках сверхвысокого разрешения (Новичихин, Тутубалина, 2010), исследована возможность определения границы тундра-тайга с использованием данных ДЗ, полученных сенсорами с пространственным разрешением 25–500 м (Ranson et al., 2004), изучена тридцатилетняя динамика сомкнутости древостоев по снимкам MSS и ETM+ спутника Landsat и материалам лесной таксации (Харук и др., 2006).

### ИССЛЕДУЕМЫЙ РЕГИОН

Участок Ары-Мас Таймырского заповедника находится в южной части Северо-Сибирской низменности, на правом берегу р. Новой (приток р. Хатанга), и представляет собой самый север-

ный в мире лесной остров (72.5° с.ш.), расположенный в окружении тундр, относящихся к южной арктической подзоне. Единственной древесной породой в пределах урочища является лиственница Гмелина, формирующая монодоминантные редкостойные леса и редины (Ары-Мас..., 1978). Сомкнутость редкостойных лиственничных лесов не превышает 0.3–0.4, высота деревьев составляет порядка 4–6 м. Кустарниковый ярус в этих лиственничниках развит слабо: в районе урочища Ары-Мас густой подлесок из кустарниковых форм ольхи, ивы и карликовой березки встречается лишь местами, преимущественно по долинам рек и ручьев. Тундровая растительность, формирующая напочвенный покров лесотундровой зоны, в данном районе носит наномозаичный характер, мозаичность выражена лишь на уровне кочка–межкочечное понижение, отсутствует чередование крупных “пятен” разнотипной тундровой растительности.

Растительность массива Ары-Мас изучена достаточно хорошо, исследования здесь ведутся с конца 1960-х годов (Нурин и др., 1971). В связи с тем, что редкостойные лиственничные леса и редколесья характерны для среднесибирской (котуйско-ленской) и восточносибирской (индигирокольмской) лесотундры в целом, лесной массив Ары-Мас, несмотря на уникальность своего географического положения, может быть взят в качестве эталонной территории для изучения лесотундровой зоны Таймыра.

### ПОЛЕВЫЕ ДАННЫЕ

Использованные в работе полевые данные получены в июле 2010 г. в ходе экспедиционных исследований по проекту PPS Arctic на участке Ары-Мас Таймырского заповедника. Комплексные исследования (геоботанические, почвенные, мерзлотные, дендрохронологические, спектрометрические) выполнялись по профилю, заложенному на правом берегу р. Новой, а также на шести пробных площадках (рис. 1). Пробные площадки для детального изучения различных типов растительного покрова были заложены в редкостойном лиственничном лесу (50 × 50 м), лиственничной редины (50 × 20 м) и в тундре (10 × 10 и 20 × 20 м). На каждой из пробных площадок по квадратам 5 × 5 или 10 × 10 м выполнены детальные геоботанические описания, в М 1 : 100 составлены схемы древесного и кустарникового яруса (рис. 2). Для каждого дерева на схеме отмечено положение ствола и зарисована крона по четырем румбам, указано состояние дерева (здоровое, поврежденное, мертвое), измерены высота и диаметр. Кроме того, на полевых схемах древесного яруса отмечены все

единицы лиственничного подроста с указанием высоты и линейного прироста.

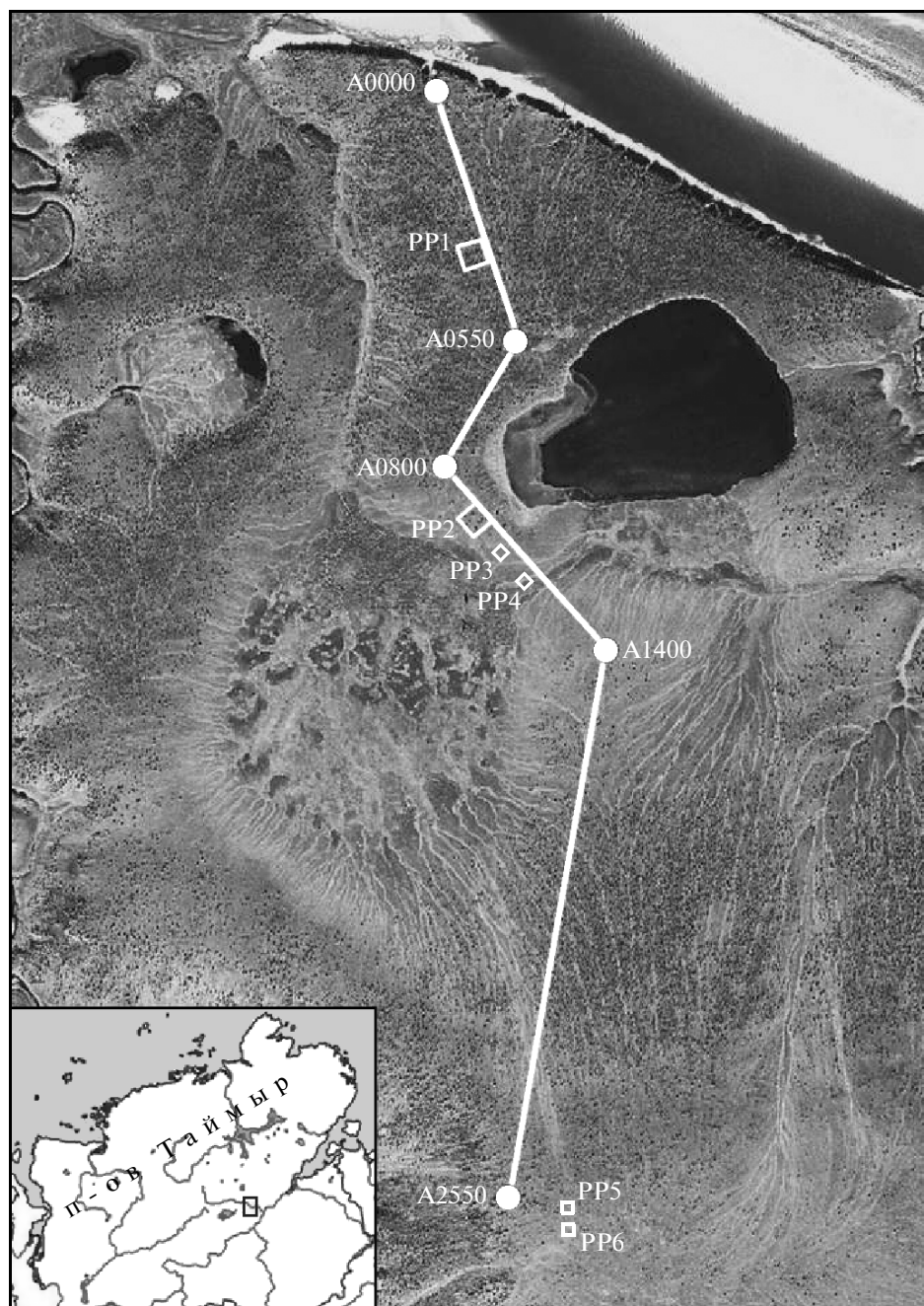
### ДАННЫЕ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Для определения сомкнутости кроны лиственничников в настоящем исследовании использованы КС разного пространственного разрешения: субметрового (Ikonos, разрешение после слияния спектральных каналов с панхроматическим – 0.83 м) и тридцатиметрового (Landsat ETM+). Оба снимка получены в один день, 17.07.2002 г. Дата съемок приходится на вторую половину июля, что гарантирует отсутствие снежного покрова на большей части территории (в это время возможно лишь наличие небольших снежников в тыловых швах склонов северной экспозиции и днищах малых эрозионных форм рельефа) и оптимальную для дешифрирования растительности вегетационную фазу (пик вегетации приходится на конец июля–начало августа). Помимо летних, в работе использован ранневесенний снимок Landsat ETM+ (25.04.2001 г.), наличие снежного покрова на котором дает определенные преимущества при выделении границ распространения лесной растительности.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

#### *Определение сомкнутости древостоев по снимку Ikonos*

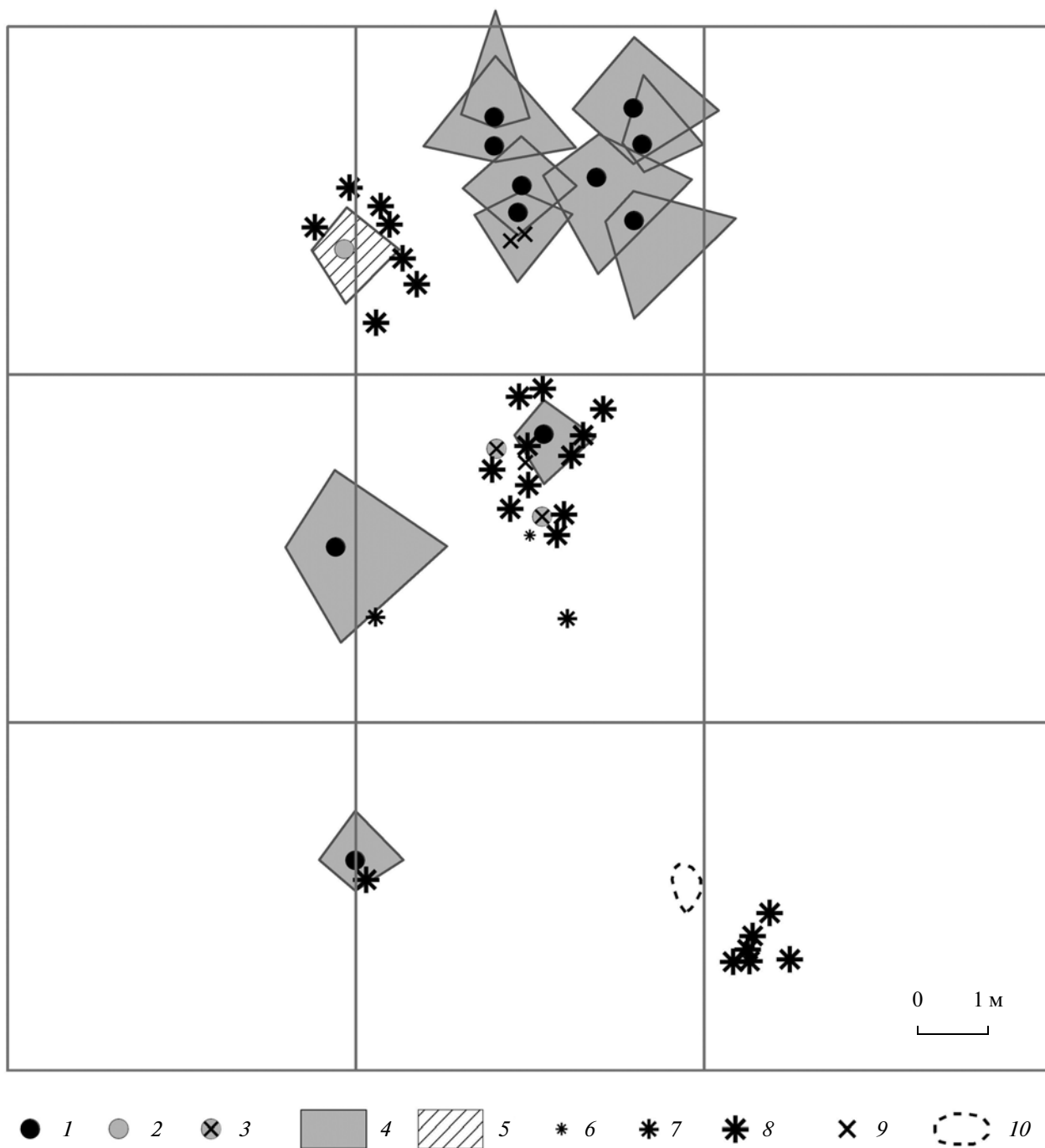
На снимке Ikonos субметрового пространственного разрешения различимы отдельные деревья и их тени. При сравнении изображения деревьев на снимке и полевых схем древесного яруса на территорию пробных площадок отмечено, что одна тень на снимке может соответствовать как отдельно стоящему дереву, так и группе деревьев. Это связано с тем, что большинство деревьев в данном районе произрастают био группами, а не поодиночке. Таким образом, невозможно лишь по снимку, без наземных наблюдений, достоверно установить количество деревьев на определенной площади. Кроны лиственниц маломощны, по снимку визуальное плохо отделяются от ярких пикселей, соответствующих напочвенному покрову или подросту. Поэтому дешифрировать деревья по прямым яркостным признакам с достаточной уверенностью не удастся. В то же время на снимке четко отображаются падающие тени деревьев, вытянутые в противосолнечном направлении и имеющие яркость существенно ниже освещенного напочвенного покрова.



**Рис. 1.** Географическое положение участка исследований: А0000–А2550 – комплексный профиль, РР1–РР6 – пробные площадки.

По хорошо выделяющимся на снимке теням деревьев можно оценить сомкнутость крон разреженных лиственничников. Для этого необходимо знать соотношение между реальной сомкнутостью крон и площадью теней на снимке (рис. 3). Следует отметить, что определение сомкнутости крон по их теням достоверно лишь в том случае, когда длина тени отдельной биогруппы деревьев меньше среднего расстояния между соседними

биогруппами. При оценке сомкнутости древостоев по снимку Ikonos за реальную сомкнутость крон была принята доля площади (в %) четырехугольников, изображающих кроны на полевых схемах древесного яруса, от площади пробной площадки. Изображение крон деревьев, имеющих сложную, неправильную форму в плане, четырехугольниками носит большую долю условности. Чтобы свести к минимуму ошибку, возника-



**Рис. 2.** Фрагмент схемы древесного яруса редколесной пробной площадки РР5. Стволы лиственницы: 1 – здоровой, 2 – поврежденной, 3 – мертвой; кроны лиственницы: 4 – здоровой, 5 – поврежденной; подрост лиственницы, высотой (см): 6 – менее 15, 7 – 15–50, 8 – 50–200; 9 – пни; 10 – лиственничный стланник.

ющую вследствие аппроксимации формы кроны четырехугольником, измерения размаха кроны в пределах каждой пробной площадки выполнялись однообразно, в направлениях, соответствующих ориентировке площадки. Кроме того, в изображении кроны на схемах не учитывается

ажурность кроны, уменьшающая их проективное покрытие. Поэтому можно считать, что сомкнутость лиственничных кроны на схемах древесного яруса немного завышена по сравнению с реальной. Более точные полевые оценки сомкнутости кроны можно было бы получить путем наземного

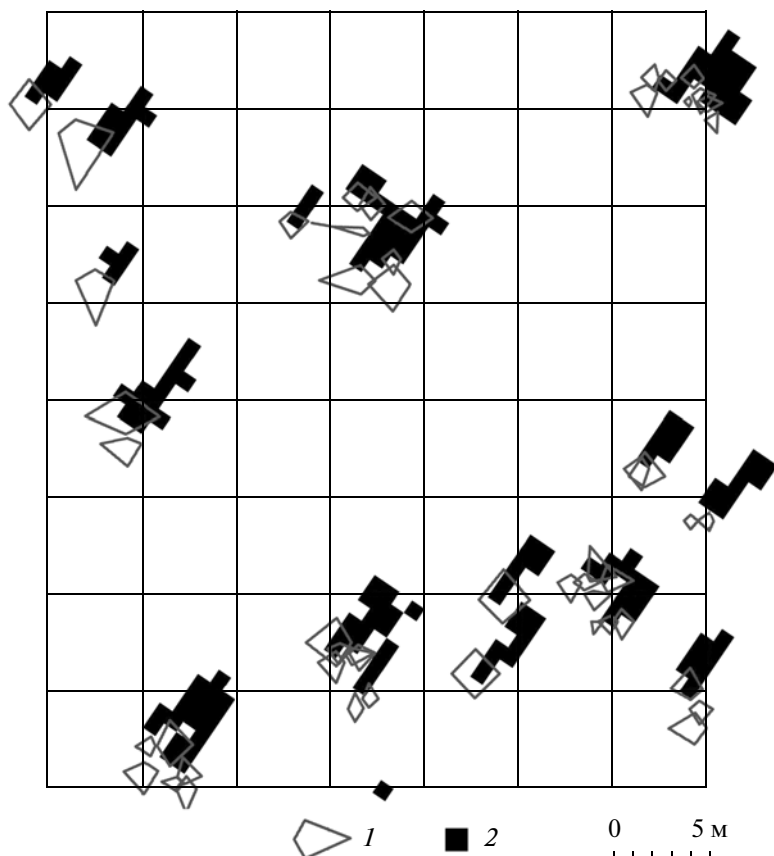


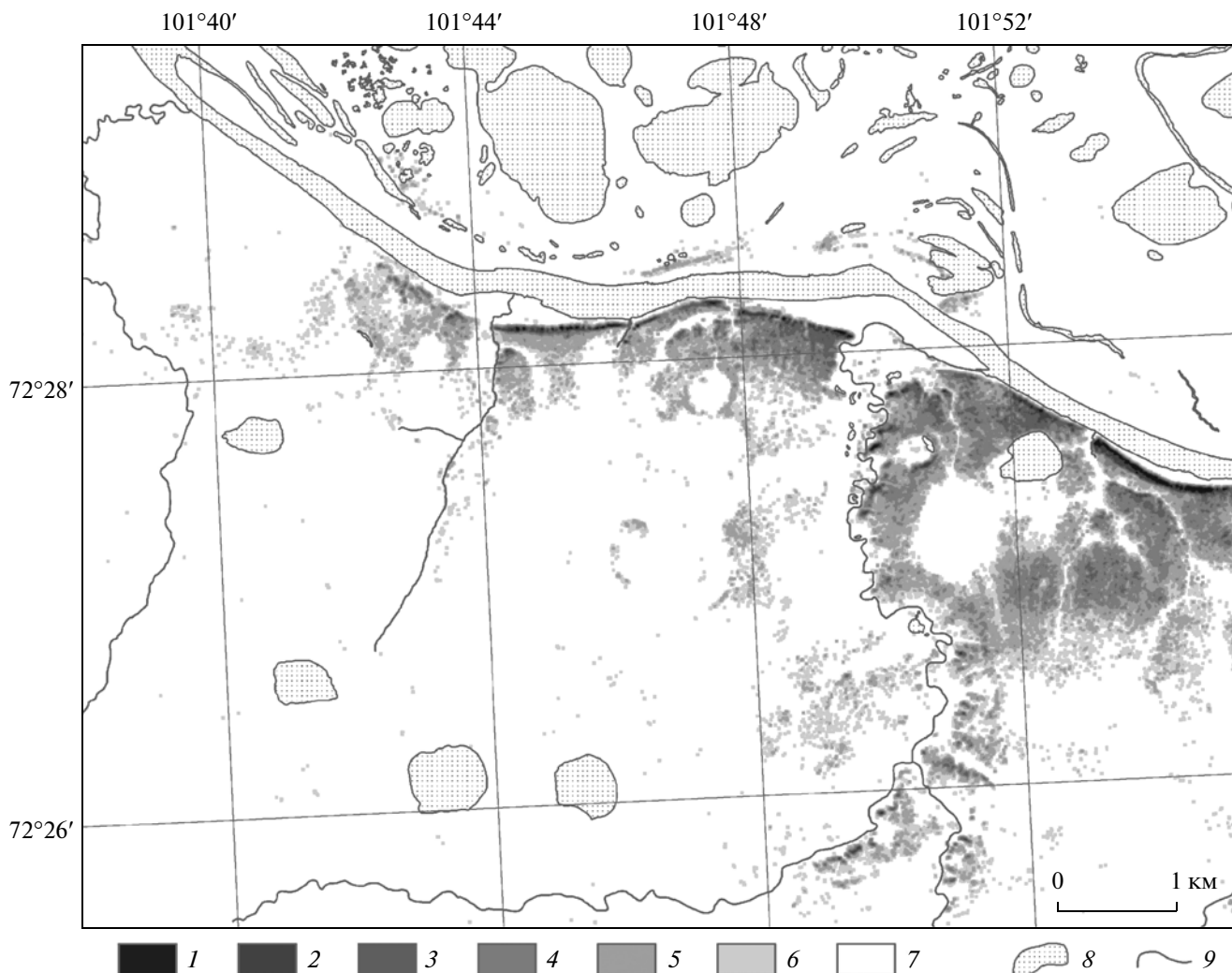
Рис. 3. Кроны лиственниц по данным полевой схемы древесного яруса площадки PP2 и тени деревьев со снимка Ikonos (17.07.2002).

фотографирования вертикально вверх и последующего выделения на фотографиях пикселей, относящихся к кронам деревьев и к участкам неба. Работы по наземному фотографированию крон объективом “рыбий глаз” были выполнены в рамках экспедиции, однако полученные данные находятся на этапе обработки. В связи с этим в данной работе за эталонные значения сомкнутости крон принимались менее точные оценки, выполненные по полевым схемам.

Вычисление соотношения площади теней и сомкнутости крон проводилось на основе схем древесного яруса двух пробных площадок (лесной PP1 и редколесной PP2) и контуров теней, выделенных в результате обработки снимка Ikonos по методике, описанной в работе (Новичихин, Тутубалина, 2010). Всего в расчетах участвовало порядка 150 деревьев. В результате для данных условий съемки (17 июля 2002 г., высота Солнца  $38.3^\circ$ ) было получено соотношение между площадью теней и площадью проекций крон, равное 2.1 : 1. Соотношение не универсально, однако при наличии снимков субметрового разрешения на данную территорию, но на другие даты, позволяет

вывести общую зависимость между сомкнутостью крон (долей проекций крон в единице площади), площадью теней на снимке и высотой солнца в момент съемки (указывается в метаданных снимка).

На основе полученного эмпирического соотношения между площадью теней на снимке и сомкнутостью крон, по классу теней со снимка Ikonos была построена схема сомкнутости древостоев. Каждому пикселу снимка Ikonos присваивалось значение, соответствующее доле теней в пределах окна со сторонами  $30 \times 30$  м (что соответствует размеру пиксела снимка Landsat), центром которого является данный пиксел. Размер окна может быть любым, но не должен быть меньше среднего расстояния между деревьями. В противном случае доля площади теней в пределах окна будет отражать не сомкнутость древостоя, а попадание окна в пределы/за пределы тени. После деления значений доли площади теней для каждого пиксела снимка Ikonos на 2.1 были получены значения сомкнутости крон. Разбив их на интервалы через 5% (0.05), мы получили возможность создать схему сомкнутости древостоев (рис. 4).



**Рис. 4.** Схема сомкнутости древостоев на урочище Ары-Мас по снимку Ikonos (17.07.2002). Сомкнутость кроны лиственничников: 1 – более 0.2; 2 – 0.15–0.2; 3 – 0.1–0.15; 4 – 0.05–0.1; 5 – 0.01–0.05; 6 – менее 0.01; 7 – 0 (безлесные территории). 8 – Озера и крупные реки; 9 – реки.

Преимущество составленной схемы в том, что она отражает положение границы распространения отдельных деревьев. Это обусловлено характером методики ее построения: если в пределы скользящего окна  $30 \times 30$  м при обработке попала тень хотя бы одного дерева, весь участок  $30 \times 30$  м будет отнесен к классу редколесий с минимальной сомкнутостью. Таким образом, не происходит потери отдельных деревьев, не учитывающихся при иных способах оценки сомкнутости кроны. Однако в автоматическом определении сомкнутости кроны по площади теней есть и существенные погрешности. Так, помехами, приводящими к ошибкам в определении сомкнутости кроны, являются тени иного происхождения (не тени деревьев), присутствующие на маске теней, полученной по снимку Ikonos. Это тени крупных бугров пучения на болотах, тени от уступов по бере-

гам рек и озер, тени изрезанных фасеточных склонов. Эти тени требуют ручной фильтрации, предшествующей процессу обработки маски теней скользящим окном.

#### *Определение сомкнутости древостоев по снимкам Landsat ETM+*

В отличие от снимка Ikonos с субметровым пространственным разрешением, на котором различимы кроны отдельных деревьев, их тени и различные типы напочвенного покрова, каждый из тридцатиметровых пикселей снимка Landsat ETM+ содержит в себе интегральный спектральный образ объектов, попадающих на площадку  $30 \times 30$  м. Невозможность различить отдельные деревья на снимках с тридцатиметровым разрешением затрудняет определение положения границы лесов и делает

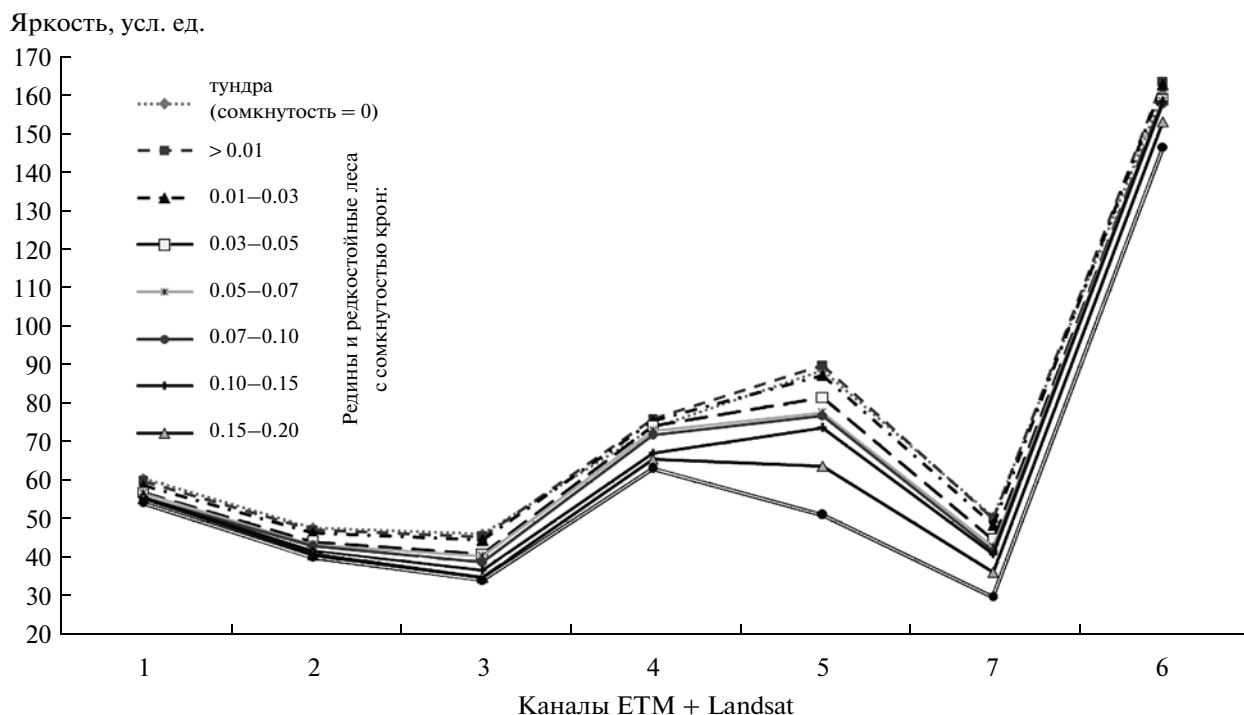


Рис. 5. Кривые спектральной яркости для тундры, редины и разреженных лиственных лесов, полученные по снимку Landsat ETM+, 17.07.2002.

невозможным определением границы произрастания отдельных деревьев. В данном районе на границе произрастания отдельных деревьев высота лиственных не превышает 3 м, а размах крон – 1.5 м. Одна-две таких лиственницы, попавшие в пределы пиксела на снимке Landsat, могут не внести достаточного вклада в спектральный образ пиксела, чтобы отличить его от пиксела тундры. В связи с этим при оценке сомкнутости крон по снимкам с разрешением в десятки метров, таким, как Landsat ETM+, не может быть применен подход, использованный для снимка сверхвысокого разрешения и основанный на непосредственном подсчете площади, занимаемой тенями деревьев на снимке.

Для количественной оценки сомкнутости древостоев в районе урочища Ары-Мас по снимкам Landsat ETM+ необходимо в первую очередь определить порог сомкнутости крон, при котором редины начинают отличаться от тундр на снимке Landsat. На основе рассчитанных по снимку Ikonos значений сомкнутости древостоев на снимке Landsat ETM+ (в области перекрытия снимков Ikonos и Landsat) выбирались по три пиксела, соответствующие редины и редкостойным с сомкнутостью крон менее 0.01; 0.01–0.03; 0.03–0.05; 0.05–0.07; 0.07–0.1; 0.1–0.15; 0.15–0.2; 0.2–0.25. Таким образом, было отобрано 24 пиксела снимка Landsat, представляющих разные ти-

пы редины и разреженных лиственных лесов по сомкнутости крон. Для тундры также отобрано три эталона в разных частях снимка Landsat, но каждая из эталонных выборок включала по 100 пикселей. Эталоны выбирались на ровных участках тундры, за пределами переувлажненных ложбин, заросших осокой, карликовой березкой и ивой, и хорошо отделяющихся на снимке от лесов и редины (при варианте синтеза 4–3–2 имеют ярко-розовый цвет). Для каждой из выборок по девяти классам (тундра и восемь типов редины и редкостойных лесов) по снимку Landsat ETM+ были получены средние значения яркости в каждом из семи спектральных каналов (исключая восьмой, панхроматический). Полученные кривые спектральной яркости приведены на рис. 5. Анализ кривых показывает, что во всех каналах видимого диапазона (канал 1 – голубой, канал 2 – зеленый, канал 3 – красный), а также в среднем ИК-диапазоне (канал 5: 1.55–1.75 мкм; канал 7: 2.08–2.35 мкм) редины с сомкнутостью крон менее 0.01 и 0.01–0.03 не отделяются от тундр; заметно начинают отделяться от тундр лишь редины с сомкнутостью крон более 0.03. В ближнем ИК-диапазоне (канал 4: 0.76–0.90 мкм) практически неразличимы тундры и редины с сомкнутостью менее 0.1. Тепловой канал 6 мало информативен для отделения лесной растительности от тундр и разделения ее на классы сомкнутости. Таким образом, редины с

сомкнутостью кроны менее 0.03 не отделяются значительно ни в одном из спектральных каналов от тундры, их разделение по снимкам Landsat ETM+ невозможно.

Средний ИК-канал 5, в котором различия в яркости между лесами различной сомкнутости максимальны, наиболее подходит для разделения древесной растительности по классам сомкнутости. В связи с этим для дешифрирования древесной растительности экотона тундра-тайга в окрестностях Ары-Маса наиболее целесообразно использовать варианты синтеза с участием пятого, среднего ИК-канала снимка Landsat, и каналов видимого диапазона (например, 5–3–2, 2–5–3, 3–2–5) вместо традиционно используемого варианта 4–3–2 с участием ближнего ИК-канала.

На основании кривых спектральной яркости, приведенных на рис. 5, а также привлечения дополнительных эталонов для каждого из классов сомкнутости древостоев разработана шкала соответствия яркости в канале 5 снимка Landsat (17.07.2002) и сомкнутости редколесий и разреженных лиственничных лесов (таблица).

#### *Маскирование нелесных территорий на снимке Landsat ETM+*

Для того чтобы составить схему сомкнутости древостоев, аналогичную созданной ранее по снимку Ikonos, но охватывающую большую территорию, необходимо выделить на снимке Landsat леса и редины с сомкнутостью более 0.03, отделив их от нелесных территорий (тундра, болот, водных объектов, участков открытого грунта и пр.). Однако при попытке классификации летнего снимка Landsat (17.07.2007) в класс лесов попадают и заболоченные полигональные тундры.

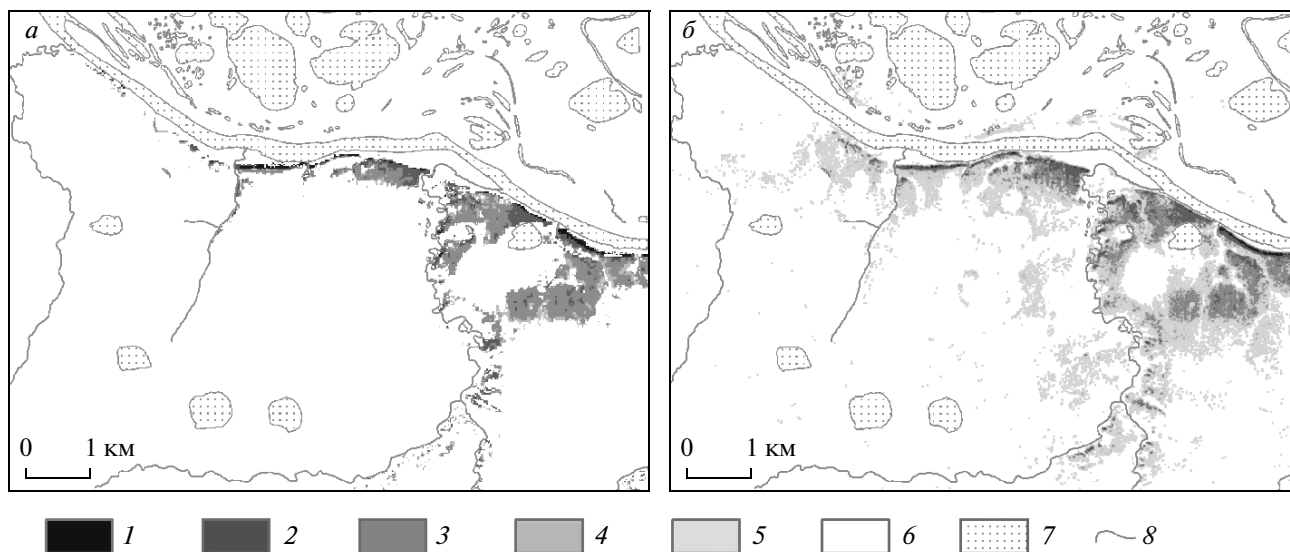
Известно, что для выделения границ лесной растительности и разделения различных типов лесов в ряде случаев целесообразно использование зимних КС (Кравцова, Салахетдинова, 1988; Такао, 2002). В нашей работе для разделения лесных и нелесных территорий привлечен зимний, а точнее, поздневесенний снимок Landsat ETM+, полученный 25 апреля 2001 г. Большая часть территории на снимке покрыта снегом, за исключением небольших озер, уже свободных ото льда, и полыней на реках (в том числе р. Новая и Хатанга). Полигональные заболоченные тундры, спектральный образ которых из-за чередования пониженных, переувлажненных участков, небольших озерков и бугров на летнем снимке близок к спектральному образу лиственничных редины и редколесий, в апреле еще покрыты снегом, маскирующим их полигональный характер. Поэтому на апрельском снимке полигональные тундры изображаются

Соответствие между яркостью в канале 5 Landsat ETM+ и сомкнутостью разреженных лиственничников

Яркость, условные единицы (канал 5, Landsat ETM+, 17.07.2002)	Сомкнутость древостоев
>60	>0.2
60–75	0.1–0.2
75–80	0.05–0.1
>80	<0.05

так же, как и тундры с ровной поверхностью. Сравнительный визуальный анализ летнего и зимнего снимков показал, что древесная растительность различима на зимнем снимке при такой же сомкнутости кроны, что и на летнем (порядка 0.03), но контуры лесов отчетливее, контрастнее выделяются на фоне однородного изображения покрытых снегом влажных полигональных и сухих тундр.

Для создания маски нелесных территорий по апрельскому снимку с помощью контролируемой классификации методом максимального правдоподобия выделены два класса: лесная растительность и безлесные территории. Эталоны для классификации выбирались с таким расчетом, чтобы наряду с основным массивом лесов в долине р. Хатанга в класс “леса” попали участки древесной растительности даже с невысокой (0.03–0.05) сомкнутостью, играющие ключевую роль в изучении границы лесной растительности. Особое внимание уделялось “острову леса” в районе урочища Ары-Мас, обеспеченному снимками сверхвысокого разрешения и полевыми данными. В результате классификации к классу лесной растительности оказались ошибочно отнесены участки полыней на реках. Для того чтобы исключить реки из класса лесов, проведена неконтролируемая классификация летнего, июльского снимка Landsat, с выделением 20 классов, один из которых включал водные объекты. Затем выполнено вычитание класса водных объектов, выделенного по летнему снимку, из класса лесов, выделенных по апрельскому снимку. Таким образом, получена маска нелесных территорий, на которой каждому пикселу соответствует значение 1 (лес) или 0 (безлесная территория). Полученная маска нелесных территорий наложена на исходный снимок Landsat ETM+ 17.07.2002 в Erdas Imagine Model Maker: значения яркости пикселов, относящихся к классу нелесных территорий, заменены на 0. Это позволило при построении карты сомкнутости древостоев анализировать снимок Landsat лишь в пределах класса “лесная растительность”.



**Рис. 6.** Сомкнутость древостоев массива Ары-Мас, рассчитанная по снимкам: *a* – Landsat ETM+ (17.07.2002); *б* – Ikonos (17.07.2002). Редины и редкостойные леса с сомкнутостью крон: 1 – более 0.2; 2 – 0.1–0.2; 3 – 0.05–0.1; 4 – 0.03–0.05; 5 – менее 0.03; 6 – 0 (безлесные территории). 7 – Водные объекты; 8 – реки.

#### *Карта сомкнутости древостоев по снимку Landsat ETM+*

На основе выявленной зависимости между яркостью в среднем ИК-диапазоне и сомкнутостью разреженных лиственничников (таблица) по снимку Landsat ETM+ составлена карта сомкнутости древостоев на район р. Хатанга. Ценность построенной карты сомкнутости древостоев на территорию бассейна р. Хатанга заключается в том, что количественная оценка сомкнутости по снимку Landsat основана не на разрозненных геоботанических описаниях, не имеющих строгой пространственной привязки, а на последовательном переходе от данных крупномасштабного полевого картографирования к снимкам сверхвысокого, а затем и относительно высокого разрешения.

В соответствии с составленной картой, наиболее сомкнутые древостои ( $>0.2$ ) распространены по поймам рек, что может быть обусловлено наличием густых зарослей кустарниковых форм ольхи и ивы в подлеске. В центральных частях лесных массивов в основном преобладают древостои с сомкнутостью 0.1–0.2, что несколько ниже традиционных оценок сомкнутости крон для данной территории (0.2–0.4), приведенных в (Тюлина, 1996). Возможно, это обусловлено тем, что большая часть геоботанических описаний в ходе экспедиций выполняется вблизи рек, где сомкнутость древостоев максимальна, а также склонностью человека к завышению сомкнутости крон при полевых геоботанических описаниях. В крайних частях массивов леса, на границе с тундрами,

сомкнутость крон закономерно снижается, значительная часть древостоев с сомкнутостью менее 0.05 приурочена именно к переходной зоне между разреженными лесами и тундрой.

Для массива Ары-Мас, который служил эталоном при построении данной карты, общая картина распределения древостоев различной сомкнутости совпадает с полученной ранее по снимку Ikonos (рис. 6б), что является показателем достоверности предлагаемой методики построения карты сомкнутости древостоев по снимкам тридцатиметрового разрешения. Различия между двумя изображениями вызваны разницей в пространственном разрешении исходных материалов (30 и 0.83 м), а также тем, что при построении карты сомкнутости древостоев по снимку Landsat (рис. 6а) в класс лесов не вошли лиственничные редины с сомкнутостью менее 0.03.

В общем виде методика построения карты сомкнутости древостоев по снимкам с пространственным разрешением в десятки метров может быть представлена в виде поэтапной схемы (рис. 7).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанная выше методика может быть применена и для других районов лесотундровой зоны, где лесотундровую растительность формируют разреженные лиственничники. В качестве исходных данных может использоваться сочетание любых многозональных КС субметрового разрешения и КС с разрешением в десятки метров.

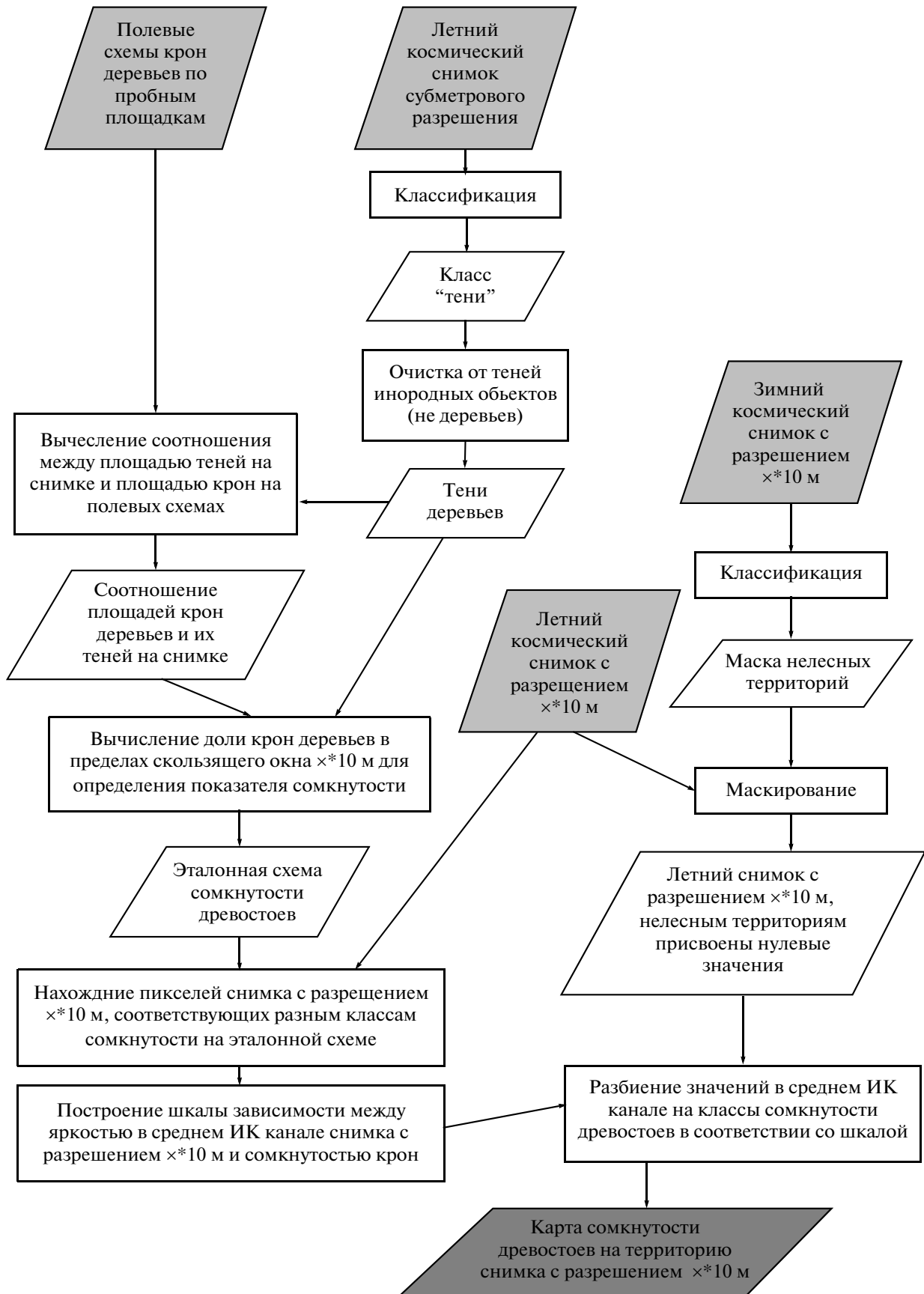


Рис. 7. Поэтапная схема создания карты сомкнутости древостоев по КС пространственного разрешения в десятки метров.

Оригинальность предложенных в настоящей работе методических разработок обусловлена совместным использованием крупномасштабных полевых схем древесного и кустарникового ярусов и КС субметрового разрешения. Возможность количественной оценки сомкнутости крон древостоев обеспечена непосредственным подсчетом площади, занимаемой тенями деревьев на снимке, вместо использования традиционных классификаций изображения по спектральным признакам.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ары-Мас. Природные условия, флора и растительность самого северного в мире лесного массива. Л.: Наука, 1978. 192 с.
- Бобра Т.В. К вопросу о понятиях “Граница”—“Экотон”—“Геозотон” в географии // Культура народов Причерноморья. 2006. № 79. С. 7–12.
- Кравцова В.И., Лошкарева А.Р. Оценка дешифрируемости растительности на космических снимках 30-метрового разрешения на основе детальных космических снимков // Геодезия и картография. 2010. № 8. С. 33–41.
- Кравцова В.И., Салахетдинова Е.Р. Изучение и картографирование лесов по материалам зимней сканерной съемки из космоса // Исслед. Земли из космоса. 1988. № 1. С. 56–65.
- Маруцак И., Елсаков В. Материалы спутникового мониторинга в анализе сомкнутости лесных фитоценозов Приполярного Урала // Вестн. Института биологии Коми НЦ УрО РАН. 2010. Т. 6. № 152. С. 18–22.
- Михеева А.И. Пространственная изменчивость положения верхней границы леса в Хибинах по материалам дистанционного зондирования // Вестн. МГУ. Сер. География. 2010. № 4. С. 18–22.
- Новичихин А.Е., Тутубалина О.В. Дешифрирование древостоев по детальным космическим снимкам: методика выделения объектов, карты пространственной структуры. Lambert Academic Publishing, 2010. 129 с.
- Тутубалина О.В., Новичихин А.Е. Интеграция алгоритмов обработки космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения для автоматизированного дешифрирования лесной растительности // Земля из космоса — наиболее эффективные решения. 2010. № 3. С. 40–42.
- Тюлина Л.Н. Лесная растительность Хатангского района у ее северного предела. СПб.: НПО Мир и семья-95, 1996. 144 с.
- Харук В.И., Двинская М.Л., Им С.Т., Рэнсон К.Дж. Древесная растительность экотона лесотундры Западного Саяна и климатические тренды // Экология. 2008. № 1. С. 10–15.
- Харук В.И., Рэнсон К.Дж., Им С.Т., Наурзбаев М.М. Лиственничники лесотундры и климатические тренды // Экология. 2006. № 5. С. 323–331.
- Шиятов С.Г., Мазена В.С. Климатогенная динамика лесотундровой растительности на Полярном Урале // Лесоведение. 2007. № 6. С. 11–22.
- Ranson K.J., Sun G., Kharuk V.I., Kovacs K. Assessing tundra—taiga boundary with multi-sensor satellite data // Rem. Sens. Environ. 2004. № 93. P. 283–295.
- Rees G., Tutubalina O., Tømmervik H., Zimin M., Mikheeva A., Golubeva E., Dolan K., Hofgaard A. Mapping of the Eurasian forest—tundra transition zone by remote sensing // Proc. CB-VM Meeting. 3–6 November 2008. Helsinki, Finland. 2008. P. 303–310.
- Takao G. Forest disturbances in Far East Russia detected by winter satellite images // Proc. Japanese Conf. Rem. Sens. 2002. V. 33. P. 253–254.
- Zhang Y., Xu M., Adams J., Wang X. Can Landsat imagery detect tree line dynamics? // Int. J. Rem. Sens. 2009. № 5–6. P. 1327–1340.

## Estimation of Tree Crown Density in Sparse Larch Forests of Taimyr Peninsula with Multiresolution Satellite Images

A. Yu. Tyukavina

M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow

Using the results of field research in Ary-Mas site of State Nature Biosphere Reserve “Taimyrsky” within international scientific project PPS Arctic we studied the representation of sparse larch forests of different density on satellite images with spatial resolution of 1 m and 30 m. Maps of tree crown density were compiled on the basis of multiresolution images. We proposed the methods of tree crown density mapping, including satellite images with resolution of tens of meters, very high resolution images (less than 1 m), field tree crown schemes and winter satellite images.

**Keywords:** forest-tundra larch forests, tree crowns and shadows, tree crown density, satellite images, Ikonos, Landsat, Ary-Mas site, Taimyr

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЛЬДИСТОСТИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ВИДИМОМ И ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ

© 2012 г. С. Г. Корниенко

*Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, Москва*

*E-mail: spaceakm2@ogri.ru*

Поступила в редакцию 30.01.2012 г.

Оценка льдистости мерзлых грунтов в районах сплошного распространения многолетнемерзлых пород проведена на основе разновременных данных видимого и инфракрасного (ИК) теплового диапазона длин волн в летнее время съемок. Методика основана на выявлении различий в темпах роста сезонной радиационной температуры земной поверхности участков с различной льдистостью. Расчет сезонной радиационной температуры поверхности, соответствующей моментам суточной инверсии, проводился с учетом параметра, характеризующего тепловую инерцию приповерхностного слоя суточных колебаний температуры на основе пар дневных и ночных измерений со спутника NOAA. На примере территории Харасавэйского и Крузенштерновского газоконденсатных месторождений Западного Ямала показано, что различия грунтов по льдистости более достоверно могут быть оценены в границах однотипных природных комплексов. Аномально низкие значения разности сезонных радиационных температур поверхности, рассчитанных по данным съемки в августе и июне в пределах морских террас, предположительно, связаны с залегающими близко к поверхности пластовыми льдами. Разделение участков высокой льдистости мерзлых грунтов и участков высокой влажности талого слоя, характеризующихся одинаковыми разностями сезонных радиационных температур поверхности, предлагается проводить с учетом параметра, характеризующего тепловую инерцию слоя суточных колебаний температуры.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, радиационная температура, температура земной поверхности, тепловая инерция, льдистость грунтов, многолетнемерзлые породы

### ВВЕДЕНИЕ

Освоение территорий Арктики и Субарктики неразрывно связано с обеспечением безопасности технических объектов и минимизацией геоэкологических и геокриологических рисков: развития термокарстовых и термоэрозионных процессов, таликов, морозного растрескивания и пучения грунтов. В этой связи актуальна разработка новых альтернативных методов и технологий, в том числе с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), позволяющих характеризовать и контролировать состояние многолетнемерзлых пород (ММП) в местах строительства и функционирования промышленных и хозяйственных объектов. Кроме того, научный и практический интерес представляют получаемые новыми методами данные о неоднородностях характеристик ММП малоизученных территорий, а также детализация и уточнение создаваемых инженерно-геологических карт. К числу основных информативных параметров, характеризующих неоднородности мерзлоты, относят температуру ММП на глубине проникновения годовых коле-

баний, льдистость грунтов, наличие пластовых льдов, мощность ММП, глубину сезонно-талого слоя (СТС).

Известно, что температура земной поверхности определяется радиационным и тепловым балансами и особенностями геологического строения. Неоднородности геокриологического строения обусловлены в первую очередь геологическими и ландшафтными особенностями, а также различиями условий теплообмена грунтов с атмосферой (Вечная мерзлота ..., 2002). Возможность применения дистанционной ИК-тепловой съемки для характеристики льдистости мерзлых грунтов была рассмотрена еще в 70-х годах прошлого столетия (Leschack et al., 1973; Горный, Шилин, 1978). Метод основан на выявлении различий в темпах роста температуры поверхности (ТП) на участках с различными теплофизическими свойствами грунта (Вербицкий, Коломыцев, 1987; Горный и др., 1993; Вавилов и др., 1991). В зарубежных публикациях последних лет рассматривается возможность картирования границы ММП на основе серии

годовых наблюдений за вариациями ТП (Nachem et al., 2009), а также моделирования неоднородностей мерзлоты и СТС по данным сканера MODIS и данным метеонаблюдений на ключевых участках (Marchenko et al., 2009). Основанием для разработки методов послужили исследования, описывающие связь среднегодовой ТП грунта и температуры ММП (Sazonova, Romanovsky, 2003). В то же время авторы метода указывают на погрешности, связанные с влиянием неоднородного снежного и растительного покрова (Nachem et al., 2009).

Возможность оценки льдистости мерзлых грунтов по данным ИК-тепловой съемки в бесснежный летне-осенний период рассмотрена в работах (Leschack et al., 1973; Горный, Шилин, 1978). Однако метод не получил развития, и одна из главных причин заключается в маскирующем влиянии неоднородного по теплофизическим свойствам почвенно-растительного слоя (ПРС). Контрасты ТП, связанные с этим фактором, могут в несколько раз превышать контрасты, обусловленные различиями льдистости грунтов. К числу значимых в этом отношении характеристик ПРС следует отнести альбедо поверхности, литологический состав грунта, тип и толщину растительного покрова, а также их влажность (Павлов, 1975). В то же время известно, что физические и теплофизические свойства ПРС, характеризующие условия теплообмена грунтов с атмосферой, могут быть установлены по данным ДЗЗ в видимом и ИК-тепловом диапазоне (Kahle, Alley, 1985; Горный и др., 1993). Следовательно, имеются предпосылки для разработки методики оценки льдистости мерзлых грунтов с использованием данных ИК-тепловой съемки в бесснежный летне-осенний период.

#### МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЛЬДИСТОСТИ ГРУНТОВ ПО ДАННЫМ ВИДИМОГО И ИК-ТЕПЛООВОГО ДИАПАЗОНОВ

Известно, что температурное поле земной поверхности имеет суточную и годовую периодичность и при отсутствии снежного покрова и процессов кристаллизации почвенной влаги приближенно может быть описано выражением (Павлов, 1975)

$$T_s(0, \tau) = T_0 + \sum_{i=1}^N a_i \cos\left(\frac{2\pi}{t_i} \tau + \varphi_i\right),$$

где  $T_0$  — среднегодовая ТП;  $a_i$  — амплитуда колебаний температуры отдельной гармоники на поверхности;  $t_i$  — период колебаний;  $\tau$  — время;  $\varphi_i$  — начальная фаза колебаний;  $N$  — число гармоник,  $i$  — номер гармоники.

Амплитуды суточных колебаний температуры (СКТ) и годовых колебаний температуры (ГКТ) земной поверхности зависят от теплофизических свойств верхнего слоя до глубины проникновения этих колебаний. Для характеристики льдистости грунтов и выявления пластовых льдов наиболее информативны различия амплитуд ГКТ. Максимальные контрасты ТП, связанные с неоднородностью грунтов по льдистости и пластовыми льдами, проявляются в период максимального прогрева — в конце августа, начале сентября и могут достигать 1–2°C (Leschack et al., 1973; Корниенко, Разумов, 2009). Очевидно, что для однотипных грунтов контрасты ТП будут зависеть также от влажности СТС. Это следует учитывать при дешифрировании и интерпретации аномалий теплового поля поверхности.

В бесснежный период различия теплофизических свойств и льдистости грунтов могут быть охарактеризованы по разности среднесуточных значений ТП, полученных в летний сезон после схода снега и в период максимального прогрева земной поверхности. Для территорий Западного Ямала это соответственно конец июня и конец августа. За этот период летних колебаний температуры (ЛКТ) наблюдается резкий рост ТП (Васильев и др., 2011). Мощность исследуемого слоя определяется глубиной проникновения ЛКТ (рис. 1), которая приблизительно оценена по известному экспоненциальному закону (Павлов, 1975). В супесчано-суглинистых грунтах (ССГ) и торфах она будет достигать 6–8 и 1–3 м соответственно, если считать, что амплитуда колебаний температуры на нижней границе в грунтах убывает в 100 раз по сравнению с амплитудой колебаний ТП. Приведенные значения глубины проникновения ЛКТ для данного региона подтверждаются результатами измерений в скважинах (Антропогенные изменения, 2006; Дубровин, Крицук, 2011; Баулин и др., 2003). Глубина слоя ГКТ на западном побережье п-ова Ямал составляет 12–18 м в зависимости от типа ландшафта (Баулин и др. 2003). Глубина СТС в районах Западного Ямала не превышает 1.5 м, а глубина проникновения СКТ составляет не более 0.3–0.4 м вместе с растительным покровом.

Среднесуточные значения ТП могут быть определены по данным космической съемки разного времени суток и метеоданным на основе регрессионных зависимостей между температурой воздуха и ТП, рассчитанной по космическим данным в районе метеостанции (Nachem et al., 2009). Альтернативный подход заключается в использовании распределений радиационной ТП в моменты суточной инверсии ТП, когда различия теплофизических свойств грунтов в слое СКТ имеют

минимальный вклад в распределение ТП (Leschack et al., 1973; Горный и др., 1993; Вербицкий, Коломыцев, 1987). В случаях несовпадений времени проведения космической или воздушной тепловой съемки с моментами суточных инверсий ТП проводятся преобразования исходных значений радиационной ТП с учетом различия условий теплообмена грунтов с атмосферой (Аэрокосмические методы ..., 1992). Для этого территория делится на однородные по типам поверхности участки, с близкими в границах каждого типа физическими (спектральными) и теплофизическими характеристиками. Далее выбирается один тип участков, относительно которого корректируются значения радиационной ТП, относящиеся к остальным типам, что, как предполагается, равносильно приведению участков всех типов к одним условиям теплообмена. Для районирования территории используются ландшафтные, геоботанические, почвенные карты, а также результаты классификации типов поверхности по данным ДЗЗ. Ландшафтно-индикационный метод в настоящее время является основным в практике геокриологического районирования (Баулин и др., 2003; Крицук, 2010). Недостатком данного подхода для районов северной тундры является то, что даже однотипные по растительному покрову и литологическому составу участки могут существенно отличаться по влажности, которая сильно влияет на условия теплообмена. Требуется параметр, учитывающий пространственные вариации влажности ПРС в день съемки и более адекватно характеризующий территорию по условиям теплообмена.

Термодинамическая температура ( $T_r$ ), радиационная температура ( $T_r$ ) и коэффициент излучения поверхности ( $\epsilon$ ) связаны соотношением

$$T_r = T_s \sqrt[4]{\epsilon}$$

Тепловая инерция  $P$  зависит от теплопроводности ( $\lambda$ ), удельной теплоемкости ( $C$ ) и плотности ( $\rho$ ) материала

$$P = \sqrt{\lambda C \rho}$$

По разности радиационной ТП дневных и ночных измерений в течение суток и даже недели может быть определена “кажущаяся тепловая инерция” ( $E$ ) в слое СКТ, связанная с тепловой инерцией соотношением (Kahle, Alley 1985; Горный и др., 1993)

$$E = (1 - A) / \Delta T_r = KP,$$

где  $A$  – альbedo;  $\Delta T_r$  – разность дневных и ночных измерений  $T_r$ ;  $K$  – коэффициент, зависящий от

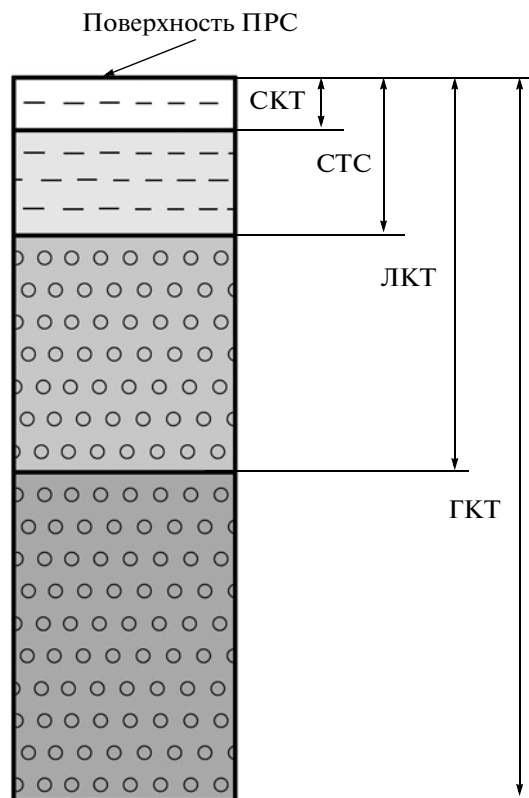


Рис. 1. Схема верхней исследуемой части нестационарных процессов в ММП.

условий инсоляции и метеоусловий. Вариации тепловой инерции однотипных грунтов слоя СКТ в основном связаны с различиями их влажности (Pratt, Ellyett, 1979). В северной тундре параметр  $E$  характеризует эффективную тепловую инерцию приповерхностного слоя СКТ, включающего грунт, кустарничковый и мохово-лишайниковый растительный покров.

Условия теплообмена мерзлых грунтов с атмосферой в основном определяются теплопроводностью верхнего слоя, которую для однотипных пористых материалов с различным содержанием влаги можно характеризовать по тепловой инерции (Вавилов и др., 1991). Поэтому районирование территории по условиям теплообмена в суточном цикле предлагается проводить по параметру  $E$ , поскольку он связан с альbedo поверхности, тепловой инерцией грунтов в слое СКТ и может быть рассчитан по данным ночной и дневной съемки. При аномально контрастной латеральной неоднородности теплофизических свойств пород, например, суглинков и торфа, более эффективно предварительное сегментирование территории по этим типам отложений и определение параметра  $E$  для каждого типа пород отдельно.

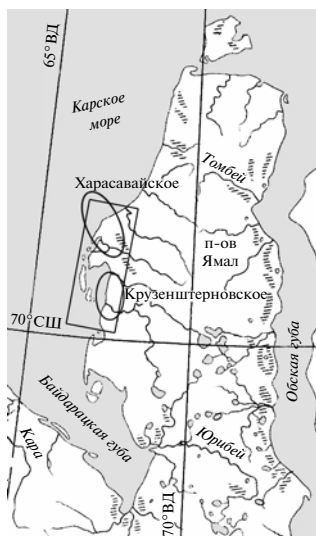


Рис. 2. Расположение района исследований (прямоугольник), Харасавэйского и Крузенштерновского ГКМ (эллипсы) на западном побережье п-ова Ямал.

На основе данного подхода была разработана методика, позволяющая получить новый информативный параметр – сезонную радиационную ТП (СРТП), соответствующую радиационной ТП в моменты суточной инверсии. Суть методики заключается в коррекции исходного распределения  $T_r$  на основе параметра  $E$ . Основные шаги алгоритма коррекции следующие:

- определение параметра  $E$ ;
- квантование распределения  $E$  на  $n$  распределений  $E_i$ ,  $i$  – от 1 до  $n$  (при установленном доверительном интервале) с шагом  $\Delta E_i$ ;
- замена распределений  $E_i$  на значения  $E_i^*$ , соответствующие средним значениям в распределениях  $E_i$ . Формирование участков территории с одинаковыми значениями  $E_i^*$ ;
- определение из числа величин  $E_i^*$  эталонной величины  $E_s^*$  (одной из интервала от 1 до  $n$ ), которой соответствует максимальное число значений  $T_{rs}$  из общего распределения  $T_r$ ;
- определение постоянных составляющих  $T_{mi}$  в распределениях  $T_{ri}$  участков с одинаковыми значениями  $E_i^*$ . В качестве постоянных составляющих  $T_{mi}$  берутся средние или медианные значения исходных распределений  $T_{ri}$ ;
- расчет поправок:  $\Delta T_{mi} = T_{ms} - T_{mi}$  ( $T_{ms}$  – среднее или медианное значение распределения  $T_r$ , относящееся к участкам с эталонной величиной  $E_s^*$ );

– суммирование поправок  $\Delta T_{mi}$  и величин  $T_{ri}$ , формирование распределения СРТП;

– низкочастотная фильтрация полученного распределения СРТП для исключения локальных высоких градиентов СРТП на границах участков со значениями  $E_i^*$ .

Предполагается, что в границах участков с одинаковой тепловой инерцией или  $E_i^*$  слоя СКТ разброс значений распределения  $T_{ri}$  связан только с СРТП и может нести информацию о контрастах среднегодовой ТП и контрастах теплофизических свойств грунтов до глубины проникновения ЛКТ или ГКТ. Для получения картины аномалий СРТП всей территории проводится операция коррекции распределений  $T_{ri}$ , т.е. приведение их к теплофизическим характеристикам эталонных участков  $E_s^*$  так, как это описано в работе (Аэрокосмические методы..., 1992). Как правило, итоговое распределение СРТП представляется в относительных значениях температуры, по сути, соответствующих контрастам температуры. Число  $n$  определяется исходя из возможных различий тепловой инерции (параметра  $E$ ) и, по максимуму, может соответствовать числу значений параметра  $E$ .

В упомянутой операции коррекции могут быть использованы исходные данные  $T_r$  как ночной, так и дневной съемки, а также рассчитанная ТП, например, по методу “расщепленного окна” (Becker, Li, 1990; Chajikowski, 1998). Проведенные исследования показывают, что итоговые распределения СРТП, рассчитанные по данным дневной и ночной съемки, практически идентичны. На заключительном этапе, когда оценивается льдистость грунтов, и могут быть выявлены залежи пластовых льдов, интерпретируется разность распределений СРТП, полученных по данным съемки в начале и в конце летнего периода, что позволяет исключить влияние различий среднегодовой ТП.

#### ОЦЕНКА ЛЬДИСТОСТИ ГРУНТОВ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА NOAA В РАЙОНЕ ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ЯМАЛА

Для апробации методики была выбрана территория центральной части п-ова Ямал ( $70^\circ$ – $72^\circ$  с.ш.) с детализацией на участке его западного побережья в р-не Харасавэйского и Крузенштерновского газоконденсатных месторождений (ГКМ) с площадью суши около  $3100 \text{ км}^2$  (рис. 2). Территория расположена на границе северных и средних тундр со сплошным распространением ММП, ландшафтами различного возраста, с морскими террасами,

поймами и лайдами (Вечная мерзлота ..., 2002). Криолитологические особенности этой территории характеризуется наличием в разрезе песчано-пылеватых многолетнемерзлых отложений повторно-жильных льдов мощностью до 10 м и залежей пластовых льдов мощностью до 10–15 м.

В исследуемом районе распространены ландшафты III, II и I морских террас, представленные песчано-суглинистыми отложениями с кустарничковой, травяной, моховой и лишайниковой растительностью с преобладанием тех или иных видов в зависимости от степени дренированности грунтов (Баулин и др., 2003). Пойменные ландшафты менее распространены, сложены преимущественно суглинистыми грунтами и сильно заболочены. Лайдовые ландшафты с отложениями иловатых песков и супесей заозерены и также сильно заболочены. На плоских поверхностях практически всех ландшафтов торфяники встречаются локально. Сплошное распространение ММП нарушается только под теми руслами рек и озерами, размеры, глубины и продолжительность существования которых достаточны для формирования сквозных талых зон. Неоднородность по льдистости отложений верхнего горизонта связана с распределением текстурообразующих льдов до глубин 2–5 м и повторно-жильных льдов (макрольдистости). Пластовые льды, залегающие близко к поверхности, прослеживаются, в основном, в отложениях III, II и I морских террас (Баулин и др., 2003; Крицук, 2010). Кровля льдов залегает на глубинах от 3–4 до 10–15 м. Температура ММП в данном районе колеблется от  $-3$  до  $-8^{\circ}\text{C}$ . Максимальная среднемесячная температура воздуха наблюдается в июле–августе и составляет  $6-7^{\circ}\text{C}$ . Вместе с тем в конце августа в безоблачные дни суточный перепад температуры воздуха и ТП может достигать  $20^{\circ}\text{C}$ . Рельеф выражен слабо, представлен в основном плоскими поверхностями в границах ландшафтных зон, наибольшие уклоны отмечены на переходах между различными типами природных комплексов.

В работе использовались три пары дневных и ночных снимков спутника NOAA (радиометр AVHRR), полученных в июне, июле 2000 г. и в конце августа 1998 г. Радиометр AVHRR имеет пять спектральных каналов, два из которых (каналы 4 и 5) регистрируют излучение в дальней ИК-тепловой области. Пространственное разрешение радиометра 1.1 км, чувствительность по  $T_r$  составляет 0.1 К. Обработка космических снимков и их анализ выполнялись в программном комплексе ENVI 4.8. Рабочий масштаб карт – 1 : 1000000. Предварительный этап обработки данных включал калибровку изображений их геометрическую и атмосферную коррекцию, маскирование крупных во-

доемов. Для вычисления параметра  $E$  по данным канала 4 определялась разность  $\Delta T_r$ , альbedo рассчитывалось по формуле:  $A = 0.526 Ch1 + 0.47 Ch2$ , где  $Ch1$  и  $Ch2$  – коэффициенты спектральной яркости в каналах 1 и 2 радиометра AVHRR. Деление снимков на “дневные” и “ночные” условно, поскольку в летнее время на данных широтах наблюдается полярный день.

Из опыта геотермических исследований на равнинных территориях известно, что распределение радиационной ТП будет зависеть от вариаций коэффициента излучения ( $\epsilon$ ), а также условий инсоляции, облачности и скорости ветра (Аэрокосмические методы..., 1992). В данном случае условия инсоляции и скорость ветра принимались одинаковыми на всей территории исследуемого района, учитывая относительно небольшую его площадь и незначительную расчлененность рельефа. Оценка влияния неоднородности  $\epsilon$  на аномалии радиационной температуры определялась по методике, описанной в работе (Leschack et al., 1973), а именно по корреляции отношения значений  $T_r$ , измеренных в разных спектральных каналах ИК-тепловой области, и распределения  $T_r$  одного из спектральных каналов. В данном случае используемые распределения  $T_{r4}/T_{r5}$  и  $T_{r4}$  дневной и ночной съемки, полученные по данным спектральных каналов 4 и 5 радиометра AVHRR, не имели значимых корреляций, что свидетельствует о незначительности влияния вариаций  $\epsilon$  на распределение  $T_r$ . Аналогичный вывод был сделан в работе (Leschack et al., 1973) для районов Аляски.

На рис. 3 приведены зависимости медианных значений исходных распределений радиационной температуры  $T_{mi}$  (дневных и ночных) от параметра  $E_i^*$ , рассчитанного на основе этих же распределений. Отмечены даты и местное время съемки. Весь диапазон значений параметра  $E$  с доверительным интервалом 92% был разделен на  $n = 16$  величин  $E_i^*$ . Участки со значением  $E_1^*$ , максимально сухие и дренированные, характеризуются минимальной тепловой инерцией. Наиболее увлажненные участки со значением  $E_{16}^*$  характеризуются максимальной высокой тепловой инерцией. Значения  $T_{mi}$  дневных съемок (пунктирные линии) понижаются, а ночных (сплошные линии) повышаются с увеличением параметра  $E$ . Эту зависимость можно использовать для оценки приближения времени съемки к моменту суточной инверсии ТП, поскольку при полной суточной инверсии тренд  $T_{mi}$  должен быть строго параллелен оси абсцисс. Ночная съемка 29.06.2000 г. наиболее близка к моменту утренней

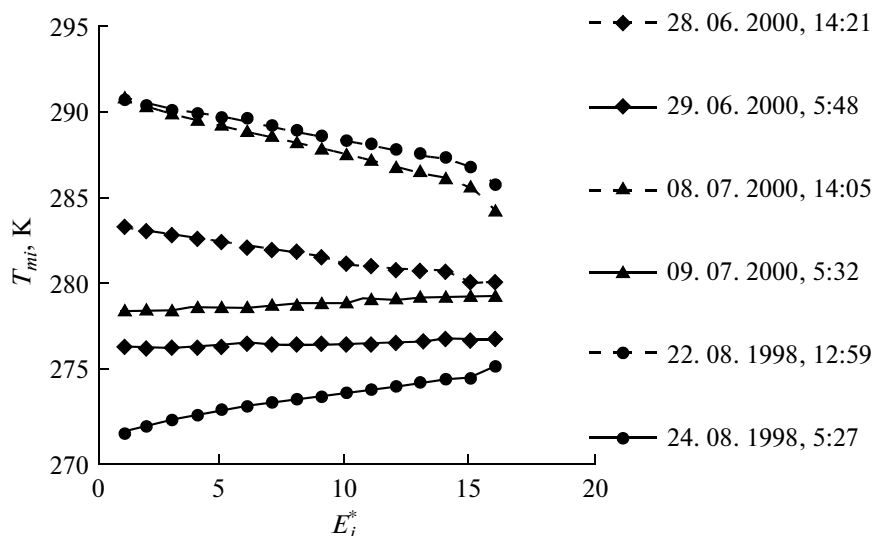


Рис. 3. Зависимости медианных значений радиационной ТП ( $T_{mi}$ ) от “кажущейся тепловой инерции” ( $E_i^*$ ).

инверсии, так как максимальный перепад значений  $T_{mi}$  здесь составляет всего около 0.5 К. Тем не менее, все исходные распределения  $T_{ri}$  преобразовывались в соответствии с приведенным выше алгоритмом.

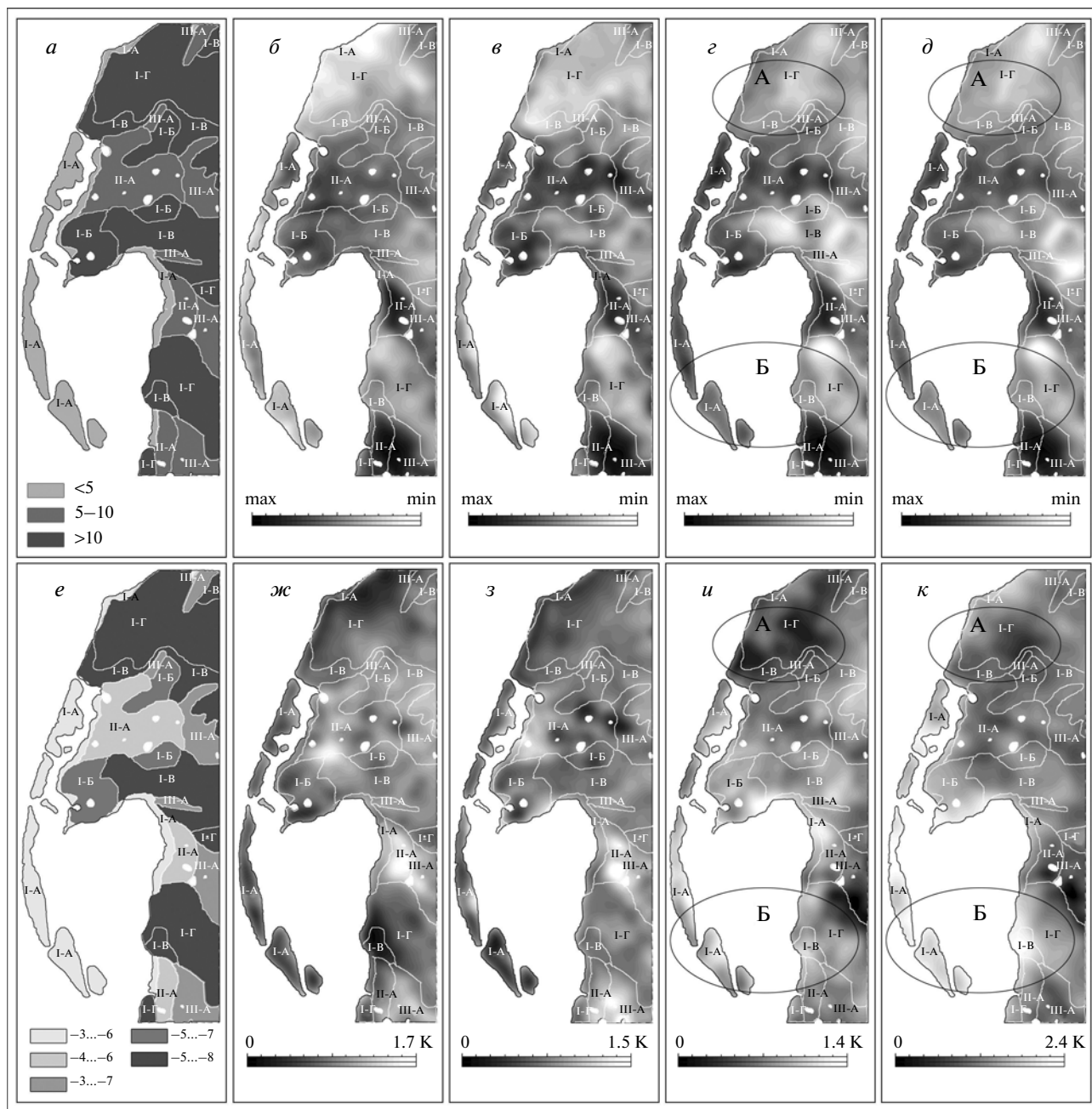
Основная проблема валидации результатов космической ИК-тепловой съемки заключается в невозможности их прямого сопоставления с данными наземной или скважинной термометрии. Существенный разброс ТП, температуры СТС и температуры ММП в пределах пиксела ( $1 \times 1$  км) изображении связан с локальными неоднородностями по литологии, растительности, льдистости и влажности грунтов. В этой связи полученные результаты сравнивались с близкими по масштабу картами, характеризующими неоднородность ММП, составленными на основе ландшафтно-индикационного районирования.

Результаты исследований с применением предлагаемой методики приведены на рис. 4. Распределения параметра  $E$  (рис. 4б, в, г) и СРТП (рис. 4ж, з, и) для разных дат космической съемки сопоставляются с картами макрольдистости грунтов (рис. 4а) и температуры ММП (рис. 4е) (Баулин и др., 2003). Показано распределение средней величины параметра  $E$  (рис. 4д), рассчитанной по данным съемки июня и августа, и распределение разности СРТП (рис. 4к) в августе и июне. Диапазоны значений всех полученных распределений взяты с доверительным интервалом 92%. На всех изображениях даны границы и обозначения основных природных комплексов.

Распределения параметра  $E$  разных съемок (рис. 4б, в, г) мало различаются и, в основном, ха-

рактеризуют условия теплообмена в слоя СКТ. Участки минимальных значений  $E$  с высокой теплоизоляцией поверхностного слоя приурочены к морским террасам (I-Б, I-В, I-Г). Эти террасы характеризуются более высокой макрольдистостью грунтов и более низкими температурами ММП по сравнению с низовьями рек (II-А) и поймами (III-А), в границах которых параметр  $E$  очень высок. Незначительные сезонные вариации параметра  $E$  могут быть связаны с изменениями влажности слоя СКТ или состояния растительного покрова.

Вариации во времени распределений СРТП более существенны (рис. 4ж, з, и). По данным съемки, в конце июня и начале июля (рис. 4ж, з) на распределения СРТП береговой зоны заметное охлаждающее влияние оказывает акватория Карского моря, поскольку в это время еще не полностью растаял припайный лед. Однако в это время картина аномалий СРТП в целом близка к распределениям температуры ММП (рис. 4е) и макрольдистости грунтов (рис. 4а), которые в рассматриваемом случае тесно связаны между собой. Участки низких значений температуры ММП и высокой макрольдистости на морских террасах характеризуются, в основном, более низкими значениями СРТП по сравнению с поймами и низовьями рек. В конце августа, ввиду ослабления охлаждающего влияния моря, характер распределения СРТП (рис. 4и) по всему району заметно меняется: поймы и низовья рек уже имеют фоновые и аномально низкие значения СРТП. Более отчетливо эта тенденция проявляется в южной части района. Предположительно такая динамика связана с тем, что в начале лета,



**Рис. 4.** Фрагменты карт: *a* – макрольдистости грунтов, %; *e* – температуры ММП, °С; *б, в, г, д* – распределения параметров *E*; *ж, з, и* – контрастов СРТП; *к* – разности контрастов СРТП в районе Харасавэйского и Крузенштерновского ГКМ. Параметры *E* и контрасты СРТП получены по данным съемки со спутника NOAA: 28 и 29 июня 2000 г. (*б, ж*); 8 и 9 июля 2000 г. (*в, з*); 22 и 24 августа 1998 г. (*г, и*). Природные комплексы: (I-A) – лайда; (I-B) – I морская терраса; (I-Г) – III морская терраса; (II-A) – низовья крупных рек; (III-A) – пойма.

ближе к периоду инверсии ГКТ, распределение СРТП в большей степени отражает контрасты среднегодовой ТП и соответственно температуры ММП, и в меньшей степени – различия в тепловой инерции пород слоя ЛКТ. К концу лета эти различия приводят к формированию противоположных по знаку контрастов ТП, уменьшающих

влияние среднегодовых значений ТП и температуры ММП на формирование контрастов СРТП.

Распределение разности СРТП августа и июня (рис. 4к) исключает влияние температуры ММП и связано только с тепловой инерцией (теплопроводностью) грунтов в слое ЛКТ, характеризующей условия теплообмена этого слоя с атмосферой. На

всех поймах и в низовьях рек отмечаются весьма низкие значения разности СРТП, что связано, в первую очередь, с большим числом мелких немаскируемых водоемов, заболоченностью и высокой влажностью СТС. В то же время на севере исследуемого района, в пределах II и III морских террас (зона А) имеет место крупная аномалия низких значений разности СРТП (рис. 4к). Ее происхождение не может быть связано с этими факторами, так как здесь распространены сухие, дренированные участки с низкими значениями параметра  $E$  (рис. 4б–д). Для оценки достоверности полученных результатов в используемом масштабе нет данных, характеризующих изменения льдистости грунтов в пределах морских террас. В то же время достаточно высокий разброс значений разности СРТП в их границах, до 2.4 К, обусловлен, предположительно, неоднородностью грунтов по льдистости в слое ЛКТ. Выявленная на севере района аномалия низких значений разности СРТП (рис. 4к), вероятнее всего, связана с обнаруженными здесь ранее пластовыми льдами, залегающими близко к поверхности (Крицук, 2010).

Интересны участки, контрастно отличающиеся по геоморфологии, но близкие по значениям разности СРТП. В частности, участки II и III морских террас в зоне Б (рис. 4к) и участки, относящиеся к лайдам (песчаная коса), отличаются по макрольдистости грунтов (рис. 4а), однако схожи по значениям разности СРТП. Наиболее вероятно, что это связано с пространственными изменениями влажности грунтов в СТС, компенсирующими неоднородное распределение макрольдистости грунтов. Подтверждением могут служить значения параметра  $E$  на этих участках (рис. 4д), показывающие, что на лайдах при отсутствии мелких водоемов слой СКТ имеет более высокую тепловую инерцию (высокую влажность) по сравнению с морскими террасами, поскольку анализируемый слой ЛКТ включает в себя не только мерзлые грунты, но и слой СКТ и СТС (см. рис. 1). Таким образом, для более достоверной оценки льдистости грунтов в слое ЛКТ по распределениям разности СРТП необходимо сравнивать участки, относящиеся к однотипным природным комплексам и с равными значениями тепловой инерции слоя СКТ. Для подтверждения сделанных выводов предполагается дальнейшее проведение аналогичных исследований с использованием новых данных космической съемки летне-осеннего периода.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика, в отличие от традиционных ландшафтно-индикационных методов,

позволяет характеризовать условия теплообмена в верхнем слое грунтов и их льдистость с учетом неоднородности СТС по влажности. Результаты исследований показывают, что распределения СРТП, полученные по данной методике, не случайны и на качественном уровне характеризуют неоднородности ММП по льдистости. Количественная оценка льдистости грунтов по данным ИК-тепловой съемки, связана в первую очередь с проблемой выбора эталонных участков с известной льдистостью. По размерам эти участки должны в несколько раз превышать пространственное разрешение используемых ИК-тепловых изображений.

Сравнение полученных результатов с геоэкологическими условиями в районе Харасавэйского и Крузенштерновского ГКМ показывает, что распределения контрастов СРТП в любой момент времени сезона оттаивания отражают пространственные изменения температуры ММП, льдистости отложений верхнего горизонта, влажности СТС, а также наличие пластовых льдов, залегающих на разной глубине. Распределение СРТП в начале сезона оттаивания (июнь, начало июля) наиболее близко к распределению температуры ММП, тогда как неоднородность теплофизических свойств грунтов слоя ЛКТ более отчетливо проявляется в распределении СРТП к концу августа. В пределах морских террас выявлены участки аномально низких значений разности между распределениями СРТП августа и июня, которые, предположительно, связаны с залегающими близко к поверхности пластовыми льдами.

На основе комплексного дешифрирования распределений СРТП и параметра, характеризующего тепловую инерцию слоя СКТ, проведено подразделение исследуемой территории на участки с высокой льдистостью мерзлых грунтов и участки с большим числом немаскируемых мелких водоемов, болот и высокой влажностью талых грунтов. Для более достоверной оценки льдистости грунтов аномалии распределений СРТП следует интерпретировать в пределах однотипных ландшафтных зон с одинаковыми значениями параметра  $E$ .

Изменчивость метеоусловий может существенно влиять на теплообмен грунтов с атмосферой и соответственно на температуру земной поверхности. Влияние этого фактора можно оценить и устранить с использованием данных повторных съемок и, в том числе, съемок разных лет. Следует отметить принципиальную возможность 3D-моделирования неоднородности теплофизических свойств грунтов, в том числе льдистости, до глубины проникновения ЛКТ при наличии нескольких пар дневных и ночных снимков, полу-

ченых с некоторыми временными интервалами между этими парами в сезон оттаивания.

На основе предлагаемой методики, по данным детальной воздушной ИК-тепловой съемки можно проводить крупномасштабное картографирование и мониторинг состояния мерзлых грунтов на участках строительства и размещения технических объектов. Кроме того, методика применима для определения глубины залегания водоносных горизонтов в степных, пустынных и полупустынных районах, для оценки плодородности и деградации земель, для картирования зон разрывных нарушений и геологических неоднородностей, контрастно проявляющихся по теплофизическим свойствам грунтов верхней части разреза. На средних широтах в аридных зонах теплофизические неоднородности грунтов, в том числе связанные с изменением литологического состава пород, их плотностью и влажностью, можно оценивать до глубин 15–20 м от поверхности, поскольку амплитуда летних колебаний температуры воздуха здесь существенно превышает такую в Арктике и Субарктике. Предлагаемый способ коррекции радиационной температуры поверхности, учитывающий характер ее суточных изменений, вполне реализуем в отношении ее годовых или сезонных колебаний, что позволит выявлять неоднородности температурного поля в грунтах ниже слоя годовых или сезонных колебаний температуры.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антропогенные изменения экосистем Западно-Сибирской газоносной провинции / Под ред. Москаленко Н.Г. Тюмень: Институт криосферы Земли СО РАН, 2006. 357 с.
- Аэрокосмические методы в геоэкологии / Под ред. Лялько В.И. Киев: Наук. думка, 1992. 205 с.
- Баулин В.В., Дубиков Г.И., Аксенов В.И. и др. Геокриологические условия Харасавэйского и Крузенштерновского газоконденсатных месторождений (полуостров Ямал). М.: ГЕОС, 2003. 180 с.
- Вечная мерзлота и освоение нефтегазоносных районов / Под ред. Мельникова Е.С. (ч. I, III), Гречищева С.Е. (ч. II, III, IV). М.: ГЕОС, 2002. 402 с.
- Вавилов В.П., Бизон П., Брессан К., Гринцато Э., Иванов А.И., Ковалева О., Маринетти С., Недавний О.И. Активный тепловой контроль влажности пористых материалов // Дефектоскопия. 1991. № 5. С. 80–88.
- Васильев А.А., Стрелецкая И.Д., Широков Р.С., Облогов Г.Е. Эволюция криолитозоны прибрежно-морской области Западного Ямала при изменении климата // Криосфера Земли. 2011. Т. XV. № 2. С. 56–64.
- Вербицкий В.А., Коломыцев Б.М. Оптимизация времени тепловых измерений. Л.: ВИНТИ, 1987. 7 с.
- Горный В.И., Шилин Б.В. Применение тепловой аэро-съемки для целей инженерно-геологических исследований в районах развития многолетней мерзлоты // Методика инженерно-геологических исследований и картирования области вечной мерзлоты. Якутск, 1978. С. 85–96.
- Горный В.И., Шилин Б.В., Ясинский Г.И. Тепловая аэрокосмическая съемка. М.: Недра, 1993. 128 с.
- Дубровин В.А., Крицук Л.Н. Оценка динамики температурного режима мерзлых пород района Марре-Сале по данным мониторинговым наблюдений // Мат. 4-й конф. геокриологов России. 7–9 июня 2011 г. МГУ. Т. 2. Ч. 5. Региональная и историческая геокриология. Ч. 6. Динамическая геокриология. М.: Университетская книга, 2011. С. 236–243.
- Корниенко С.Г., Разумов С.О. Моделирование контрастов температуры на поверхности неоднородных по льдистости грунтов // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII. № 2. С. 55–61.
- Крицук Л.Н. Подземные льды Западной Сибири. М.: Научный мир, 2010. 352 с.
- Павлов А.В. Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР. Якутск: Якутское книжное издательство, 1975. 304 с.
- Becker F., Li Z.-L. Towards a local split window method over land surfaces // Int. J. Rem. Sens. 1990. V. 11. № 3. P. 369–393.
- Chajikowski K.P. Impact of AVHRR filter functions on surface temperature estimation from the split window approach // Int. J. Rem. Sens. 1998. V. 19. P. 2007–2012.
- Hachem S., Allard M., Duguay C. Using the MODIS Land Surface Temperature Product for mapping permafrost: An application to Northern Québec and Labrador, Canada // Permafrost and Periglacial Processes. 2009. V. 20. P. 407–416.
- Kahle A.B., Alley R.E. Calculation of thermal inertia from day-night measurement separated by days or weeks // Photogram. Eng. Rem. Sens. 1985. V. 51. № 1. P. 72–75.
- Leschack L.A., Morse F.H., Brinley Wm.R., Ryan N.G., Ryan R.B. Potential use of airborne dual-channel infrared scanning to detect massive ice in permafrost // 2<sup>nd</sup> Int. Conf. North American Contribution Permafrost. Washington D.C., 1973. P. 542–549.
- Marchenko S., Hachem S., Romanovsky V. Duguay C.R. Permafrost and active layer modelling in the Northern Eurasia using MODIS Land Surface Temperature as an input data // Proc. European Geosciences Union General Assembly. Topfer, Vienna, Austria: Copernicus Publication, 2009. V. 11. EGU2009–11077.
- Pratt A., Ellyett C.D. The thermal inertia approach to mapping of soil moisture and geology // Rem. Sens. Env. 1979. V. 8. P. 151–168.
- Sazonova T.S., Romanovsky V.E. A model for regional estimation of temporal and spatial variability of active layer thickness and mean annual ground temperatures // Permafrost and Periglacial Processes. 2009. V. 14. P. 125–139.

## Evaluation Method of the Permafrost Soils Ice Content by Use of the Remote Sensing Data in the Visible and Infrared Range

S. G. Kornienko

*Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow*

Assessment of the soils ice content in areas of continuous distribution permafrost can be made based on multitemporal data in visible and infrared wavelength range in the summer. The technique is based on detecting differences in growth rates of seasonal radiative temperature of the ground surface at the sites with varying of the soil ice content. The calculation of the seasonal radiative surface temperature corresponding to the moments of daily inversion was performed taking into account the parameter characterizing the thermal inertia of the near-surface layer of daily fluctuations of temperature on the basis of pairs of daytime and nighttime measurements from the satellite NOAA. On the example of the territory Kharasaveyskoye and Kruzenshternovskoye gas condensate fields Western Yamal are shown that by use of the proposed method differences of the soil ice content is more reliably can be identified within the same type of natural systems. Anomalously low difference in seasonal radiative temperature of the surface, calculated from data taken in August and June, within the marine terraces, presumably, is associated with the ice seams that are lie close to the surface. Separation of areas high ice content of frozen soils and areas of high humidity thawed layer that are equally manifested in the difference of the seasonal radiative surface temperature, it is proposed to hold in view of the parameter characterizing the thermal inertia of the layer diurnal temperature fluctuations.

**Keywords:** remote sensing; radiative temperature, the temperature the earth's surface, thermal inertia, soil ice content, permafrost

## УЧЕТ ФАКТОРА СОПРЯЖЕННОСТИ ТРЕБОВАНИЙ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ И ВОЗМОЖНОСТЕЙ КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПРИ ОЦЕНКЕ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ

© 2012 г. В. В. Зуева

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего-профессионального образования “Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)” (“МАИ”, Инженерно-экономический институт, кафедра “Маркетинг и коммерциализация в аэрокосмической промышленности”), Москва*

*E-mail: zuevavv@inbox.ru*

Поступила в редакцию 23.11.2011 г.

Предложенный в статье алгоритм оценки сопряженности требований потребителей и возможностей космических комплексов, используемый в процедуре маркетинговых исследований на предпроектных стадиях, способствует повышению конкурентоспособности космических комплексов и повышению эффективности их функционирования путем максимально возможного учета требований различных групп потребителей. Апробация проведена на примере отечественных пользователей информации, получаемой с помощью космических систем дистанционного зондирования Земли.

**Ключевые слова:** космические услуги, сопряженность требований потребителей и возможностей космических комплексов, разрешающая способность, число спектральных диапазонов, стоимость снимка, периодичность наблюдений, время доставки информации, классификатор, эффективность

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие наблюдаются значительные изменения на мировом рынке космических услуг (КУ). Речь идет не только о количественных изменениях (несмотря на различные кризисы, в целом наблюдается стойкая положительная динамика на рынке КУ), но и об изменениях качественных. Все специалисты отмечают обострение конкурентной борьбы во всех сегментах рынка. На рынке пусковых услуг РФ пока занимает первое место по количеству пусков ракет-носителей (РН). Однако уже в ближайшем будущем следует ожидать усиления конкуренции не только со стороны Китая, но и Европы, которая, несмотря на мировой кризис, космические программы не сворачивает. В ближайшие десять лет США могут вернуться на рынок космических транспортных услуг, если американская программа по созданию нового РН будет идти по плану. Да и успешный пуск РН “Союз”, состоявшийся в октябре 2011 г. с космодрома Куру, можно рассматривать как отправную точку начала конкуренции отечественных РН, базирующихся на различных космодромах.

В области оказания КУ также наблюдается положительная динамика в развитии рынка, сопровождающаяся усилением конкуренции. В области навигации следует ожидать усиления конку-

ренции с российским ГЛОНАСС со стороны не только активно используемой GPS, но и европейской GALILEO. В области дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) большим спросом пользуются услуги, предоставляемые европейскими, индийскими и американскими космическими аппаратами ДЗЗ (КА ДЗЗ). Причем, если в конце прошлого века основным потребителем услуг и результатов, производимых системами ДЗЗ, были государственные заказчики, то сейчас спектр их обширен и разнообразен. Кроме того, потребитель стал достаточно грамотным, разборчивым, требования его многовариантны и достаточно четко определены. Да и приоритеты государственного заказчика изменились. Сейчас потребитель, будь он государственная структура или коммерческая, в первую очередь обращает внимание на качество и стоимость предоставляемой ему продукции, а не на ее принадлежность к отечественной космонавтике. Старт этой тенденции был дан еще в Федеральной Космической Программе РФ на 2006–2015 гг.: “Если государственные потребности в космических средствах и услугах не будут обеспечены путем создания и развития российских космических средств, они будут удовлетворяться приобретением услуг на мировом рынке, что потребует больших экономических затрат, значительно уменьшит возможности для инновационного пути развития отечествен-

ной экономики, увеличит разрыв между Российской Федерацией и наиболее развитыми странами мира в постиндустриальном обществе” (ФКП РФ..., 2005).

С одной стороны, расширение конкуренции и снятие ограничений на реализацию продукции иностранных компаний способствует наиболее полному удовлетворению требований потребителей, но, с другой стороны, слабеющие позиции отечественных космических систем (КС) могут привести к постепенному вытеснению их с мирового космического рынка и утрате потенциала отрасли, а, следовательно, к глобальным потерям для всей страны в целом.

В этой непростой ситуации все чаще идет речь о необходимости принятия различных мер, способствующих повышению эффективности создания, модернизации и функционирования КС. Меры эти должны быть разработаны и применены комплексно, по довольно широкому перечню направлений, не ограничиваясь только финансовыми вливаниями. В числе таких мер немаловажной является и необходимость использования прогрессивных маркетинговых процедур и технологий, без которой самый замечательный, с технической точки зрения, продукт не найдет своего потребителя. Именно стремление и возможность предприятия и отрасли в целом развиваться не только в техническом плане, но развиваться именно в интересах потребителя, в целях доведения своей услуги или продукции до потребителя, умения представить свой продукт таким образом, чтобы он отвечал предпочтениям покупателя услуги, позволит выйти на инновационные пути развития и не только удержат занимаемые позиции на мировом космическом рынке, но и улучшить их.

На различных этапах жизненного цикла КС применяются процедуры и методы маркетинговых исследований (МИ), без проведения технико-экономической оценки не осуществляется ни один проект. Однако перечисленные выше особенности современного состояния рынка КУ требуют совершенствования МИ. Используемые в настоящий момент времени методы и процедуры не в достаточной степени ориентированы на потребности потенциального покупателя КУ. Обоснование объекта идет с позиции разработчика, его замечательных технических идей и параметров новой системы, сравнения ее с аналогами, действующими конкурентами, тогда как в современных условиях необходимо идти от потребителя и оценивать разрабатываемую или модернизируемую систему с точки зрения соответствия требованиям потенциальных потребителей услуги этой КС.

Покупатель КУ, как правило, – коллегиальная структура, обладающая высокой компетенцией и

четкой мотивацией. Решение о покупке услуги или продукции в этой области принимается с высокой степенью обоснованности и формализации, в соответствии с критериями и приоритетами, которые в значительной мере разнятся для различных потребителей. Задачей проводимого исследования является создание процедуры, позволяющей при разработке или модернизации КС в наибольшей степени учесть соответствие возможностей этой КС требованиям потенциальных потребителей ее услуг. Объектом данного исследования являются КС ДЗЗ.

## ПОНЯТИЕ СОПРЯЖЕННОСТИ

Для решения поставленной задачи вводится понятие сопряженности возможностей космических систем и требований потребителей их услуг. Сопряженность отражает степень идентичности функциональных, конструктивных, технологических и других параметров космического комплекса (КК) или КС требованиям и интересам потребителя услуги данного КК (КС). Задача достижения наибольшей сопряженности возможностей КС и требований потребителей ее услуг имеет важное значение при предпроектной оценке инвестиционных проектов. Целью создания и использования любой КС является наиболее полное удовлетворение потребностей заказчика-потребителя. Для орбитальных систем – предоставление услуг в процессе функционирования (ДЗЗ, связь, исследования и т.д.). Фактически решение задачи достижения наибольшей сопряженности является средством наиболее полного удовлетворения требований потребителя, что является необходимостью для любой КС в рыночных условиях хозяйствования.

Для оценки сопряженности возможностей различных КК и требований их потребителей может быть использована единая методическая основа, позволяющая использовать алгоритм определения основных параметров и степень их соответствия требованиям потребителя. Однако для каждого типа КС оценка сопряженности будет иметь свои особенности. Для КС ДЗЗ все параметры, а также требования, предъявляемые потребителями к предоставляемым ими услугам, можно условно разбить на четыре группы: техническая; эксплуатационно-технологическая; организационно-экономическая; информационная.

К технической группе в первую очередь относятся функциональные параметры, характеризующие назначение объекта и его элементов, надежность и срок полезного использования КС, а также конструктивные параметры, отражающие строение системы и находящиеся в тесной взаимосвязи с требованиями потребителя КС. Кроме того, многие из этих параметров являются взаи-

мозависимыми, что также необходимо учитывать при анализе возможностей КС.

Эксплуатационно-технологическая сопряженность определяется параметрами производственной и эксплуатационно-ремонтной технологичности элементов объектов.

Технологичность элементов системы в процессе производства определяется в значительной степени их конструктивной преемственностью, которая во многом зависит от уровня унификации, стандартизации и нормализации конструкций. Эти факторы также в большой степени определяют и эксплуатационно-ремонтную технологичность элементов систем. Параметры технологичности существенно влияют на экономические параметры элементов систем.

Эксплуатационная составляющая сопряженности характеризуется уровнем энергопотребления, ремонтпригодности, эксплуатационной технологичностью, сроком ввода в эксплуатацию, ресурсом. Для КС, представляющих на рынок не конечную услугу, а продукт для последующего использования потребителем (т.е. ДЗЗ), особое значение имеет технологичность самого продукта КС – возможность его использования потребителем без дальнейшей доработки, удобство получения и использования информации с учетом возможности стыковки технологий.

Организационно-экономические параметры сопряженности делятся на комплексные и частные, причем первые определяют интегральную величину потребных материальных, трудовых и финансовых ресурсов и результатов. Вторые относятся к отдельным этапам жизненного цикла системы – НИР, ОКР, производство, эксплуатация.

К числу организационно-экономических параметров также относятся такие трудноформализуемые, как: опыт рыночной работы предприятия, осуществляющего проект; наличие или отсутствие торговых марок, брендов, знаков и других нематериальных активов у предприятия; патентно-лицензионное обеспечение; охрана интеллектуальной собственности, наличие сертификации; система налогообложения, льготы, тарифы, скидки и преференции; формы собственности на активы; гарантии безопасности и страхование различных видов рисков, длительность предпроектного согласования и доработки систем, влияющие на сроки выполнения требований потребителя.

Безусловно, одним из основных экономических параметров, характеризующих инвестиционный проект, является стоимость единицы продукции КС. Для КС ДЗЗ используется показатель стоимости снимка, полученного с помощью КС. В этом случае очень важно при сопоставлении экономических результатов различных КС ДЗЗ провести правильную оценку и сравнение стоимости снимков, так как большое количество ка-

чественных характеристик, присущих снимку, могут в значительной степени менять его стоимость, а, следовательно, и цену.

Информационная сопряженность связана с широким использованием в КС информационных технологий и информационных продуктов. В большой степени этот вид сопряженности имеет значение для орбитальных систем.

К числу параметров этого вида могут быть отнесены: язык программирования, носители информации, периодичность получения и обновления информации, характеристика информации (разрешающая способность, спектральные характеристики информации, емкость, частоты и диапазоны, длины волн, степень кодирования и декодирования информации, оперативность, загрузка каналов связи, наземных пунктов, информационных сетей, математическое обеспечение), оперативность доставки информации, степень ее обработки и доступность к использованию – “сырые” снимки либо снимки “с добавленной стоимостью”.

В условиях ограниченного рынка космических услуг и достаточно жесткой конкуренции необходимо бороться не только за потребителя, но и за потенциального потребителя высокотехнологичной продукции КС, которому необходимо помочь пройти этот путь, помочь осознать потребность в продукции и услугах КС, помочь принять решение на взаимовыгодных условиях. Для этого необходимо с особенной тщательностью сопоставлять требования потребителя к продукту или услуге с возможностями, т.е. характеристиками КС. Получение такой оценки позволит получить обоснованный вывод о степени соответствия того или иного требуемого или модернизируемого комплекса требованиям конкретных потребителей.

Для оценки сопряженности используем следующий укрупненный алгоритм, представленный на рис. 1.

Данный алгоритм отражает последовательность решения задач и выполнения мероприятий в рамках предлагаемой методики по учету сопряженности возможностей КС и требований потребителя услуг этой КС. Алгоритм, позволяющий рассчитать критерий оценки сопряженности возможностей КС ДЗЗ и требований потребителей услуг этих систем, может использоваться в процессе предпроектной оценки направлений модернизации и совершенствования КС с последующей интеграцией в методики оценки эффективности инвестиционных проектов.

Возможности, предлагаемые КС, достаточно широки, а требования, предъявляемые потребителями, в значительной степени специфичны и зависят от их предпочтений и направлений использования космической информации. В связи с этим для практической реализации алгоритма и



**Рис. 1.** Укрупненный алгоритм проведения оценки сопряженности возможностей КС и требований потребителя ее услуг.

получения достоверных результатов, которые могут быть в дальнейшем использованы при оценке экономической эффективности инвестиционных проектов вариантов развития систем, необходимы сбор большого количества информации, ее своевременная и качественная обработка специа-

листами, обладающими высокой квалификацией в данной области.

Рассмотрим этапы данного алгоритма. На первом этапе осуществляется постановка задачи, выбор направления исследования. В данном случае

направлением исследования является оценка влияния сопряженности возможностей КК ДЗЗ и требований потребителей его услуг на оценку экономической эффективности КК.

На втором этапе необходимо провести сбор и анализ данных о системе КС ДЗЗ и потенциальных пользователей производимой ею услуги для того, чтобы сформировать перечень основных параметров, от которых зависят предпочтения потребителя. На этом этапе возможно тесное взаимодействие всех заинтересованных лиц: разработчиков, производителей КС, операторов, потребителей информации КС. Тем более что в настоящий момент времени уже определены основные государственные потребители информации ДЗЗ и функции, выполняемые на ее основе. Большинство коммерческих потребителей также могут быть отнесены к одной из этих групп по целевому признаку. Потребители и выполняемые ими функции представлены в табл. 1.

На данный момент различают три группы космических услуг в области ДЗЗ. К первой группе услуг (изучение и картографирование окружающей среды и экологической ситуации) относятся услуги, ориентированные на изучение природных условий и ресурсов, хозяйственной инфраструктуры и экологической обстановки в их конкретном состоянии на момент съемки.

Вторая группа услуг (мониторинг окружающей среды и экологического состояния) включает в себя услуги, ориентированные на изучение динамики развития тех или иных природных и антропогенных объектов и явлений, а также изучение их взаимовлияния (например, в экологических ситуациях), позволяя в целом проводить оценку динамики развития объектов и строить на ее основе прогнозные модели. Реализация этой группы услуг направлена на проведение систематического оперативного контроля оперативного контроля хозяйственной деятельности и состояния природных ресурсов, что обеспечивает постоянную обратную связь, необходимую как для корректировки принимаемых решений, так и для своевременного предупреждения отрицательных экологических последствий нерационального природопользования. Возможным конечным результатом предоставления услуг этой группы могут стать оперативные и прогнозные экологические карты, карты динамики различных элементов окружающей среды и соответствующим образом обработанные изображения. В перспективе на основе этой информации могут быть созданы специализированные геоинформационные системы экологического контроля.

Третья группа услуг (контроль стихийных бедствий, чрезвычайных ситуаций) объединяет услуги, связанные с наблюдением районов, в которых произошли стихийные бедствия или чрезвычай-

ные ситуации, а также услуги, предполагающие наблюдение за территориями, предрасположенными к проявлению таких событий. В данную группу входят как услуги, связанные с непосредственным наблюдением за стихийными бедствиями, чрезвычайными ситуациями и техногенными катастрофами, так и услуги, ориентированные на оперативную оценку их последствий с учетом сопутствующих процессов и явлений.

По совокупности требований к решению всех трех классов задач информация должна удовлетворять следующим основным требованиям, которые представлены в табл. 2.

Требования потребителей к оперативности доставки космической информации колеблются в широких пределах: от часов до нескольких месяцев. Для решения задач первого класса оперативность не играет большой роли (70% задач удовлетворяются доставкой в сроки от шести и более месяцев).

Задачи второй группы предъявляют более жесткие требования. Наиболее жесткие требования по оперативности предъявляются при решении задач третьей группы – дни и часы.

Требования к периодичности съемок охватывают диапазон от нескольких часов (задачи третьей группы) до нескольких лет (задачи первой группы). Таким образом, требования различных потребителей к информации ДЗЗ достаточно разнообразны, но вполне подлежат группировке по целевому признаку. В силу ограниченности объема статьи рассмотрим дальнейшие этапы алгоритма на примере одной из групп пользователей.

Выбор определяющих параметров требует квалифицированного анализа данных, так как недостаточное количество выбранных параметров снизит достоверность получаемого результата, а слишком большое – затруднит получение оценок, в том числе экспертных, а также усложнит расчеты. Необходимо отметить, что количество определяющих параметров может быть различно в зависимости от необходимой детализации решения поставленной задачи, а также объема собранной информации. В данной работе предлагается ограничиться пятью определяющими параметрами, выбранными на основании предпочтений потребителя.

На основе собранных данных, по результатам анализа классификаторов услуг ДЗЗ для различных отраслей национального хозяйства (Классификатор тематических задач..., 2008), изучения форм заявок на получение информации от КС ДЗЗ, размещенных на сайтах организаций-операторов ([www.ntsomz.ru](http://www.ntsomz.ru), [sovzond.ru](http://sovzond.ru)), для КС ДЗЗ составлен перечень основных требований потребителя, предъявляемых к получаемой космической информации, т.е. перечень определяющих параметров: разрешающая способность (простран-

**Таблица 1.** Функции, выполняемые на основе использования продукции и услуг ДЗЗ

Потребитель	Выполняемые функции
Министерство промышленности и энергетики РФ	экологический мониторинг зон расположения крупных энергетических комплексов (ТЭЦ, гидроэлектростанция), месторождений нефти и газа
	контроль за состоянием магистральных трубопроводов
	ведение различных тематических и интегрированных информационных систем
	планирование градостроительства и развития территорий
	экологический мониторинг зон расположения атомных электростанций
	планирование и оценка зон строительства новых АЭС
	детализация и уточнение земельного кадастра РФ по территориям и регионам
	мониторинг состояния земель
	оперативный мониторинг состояния ядерной и радиационной безопасности в зонах действующих АЭС, районах чрезвычайных бедствий и катастроф
	развитие геодезической сети на территории РФ
	мониторинг зон эксплуатируемых месторождений полезных ископаемых, нефти и газа
Министерство обороны РФ	специальные функции, связанные с обеспечением обороноспособности страны
Министерство образования и науки РФ	создание фундаментального задела в области естественных наук
Министерство природных ресурсов РФ	контроль изменения природной среды и антропогенных воздействий на нее
	контроль состояния и возобновления водных ресурсов
	контроль состояния лесного хозяйства
	создание картографических материалов различного масштаба и тематической направленности по территориям, регионам, областям РФ
	развитие геодезической сети на территории РФ
	поиск и оценка месторождений полезных ископаемых, нефти и газа
	геологическое картографирование
	мониторинг зон эксплуатации месторождений
	оперативный мониторинг метеорологической обстановки
	оценка воздействия неблагоприятных метеорологических ситуаций на природную среду
Министерство сельского хозяйства РФ	оценка состояния территорий пастбищ, угодий и сельскохозяйственного производства
	инвентаризация сельскохозяйственных территорий
	почвенная и геоботаническая съемка
	изучение продуктивности и гидрологических характеристик прибрежных зон
	перспективная разведка объектов промысла
	контроль за безопасностью судоходства и морского промысла
Министерство транспорта РФ	картографирование для нужд развития транспортной сети
	контроль транспортных сетей
МЧС	оперативный контроль ЧС и ликвидации последствий стихийных бедствий
	оценка последствий стихийных бедствий, контроль

**Таблица 2.** Требования, предъявляемые к характеристикам получаемой информации

Характеристика информации	Предъявляемые требования
Разрешение, м	от 1 до 600
Полоса захвата, км	от 20 до 1000
Количество спектральных диапазонов:	
– в видимом спектре	от 1 до 5
– в ближнем ИК-спектре	от 1 до 2
Оперативность получения информации	от реального масштаба времени до 6 мес.
Периодичность наблюдения	от 1 ч до 12 мес.

ственное разрешение) ( $R$ ); число спектральных диапазонов ( $D$ ); периодичность наблюдений ( $N$ ); время доставки информации ( $T$ ); стоимость снимка ( $C$ ).

Многие из этих требований задаются в виде диапазонов, и сопряженность потребностей и возможностей целесообразно в этом случае оценивать экспертно через попадание либо нет в потребный диапазон. Например, уровень пространственного разрешения: до 1 м; 2–15 м и т.п., – как представлено в табл. 2. Требования к пространственному разрешению получаемой космической информации (КИ) зависят главным образом от типа разрабатываемых карт и их масштаба, от цели проводимых исследований.

Требования по периодичности наблюдения районов и оперативности доставки информации могут быть рассмотрены в виде фиксированных значений, соответствующих середине заданного диапазона.

Требования к КИ по значениям спектральных диапазонов наблюдения заданы в виде совокупности основных и вспомогательных спектральных диапазонов, в зависимости от требований потребителя и возможностей установленной на КС аппаратуры.

К числу определяющих параметров КС ДЗЗ также отнесен такой экономический параметр, как стоимость снимка для потребителя. Цена на любой товар находится в некоей зоне, удовлетворяющей и продавца, и покупателя, в противном случае товар не находит сбыта.

Если организация-владелец КС стремится к завоеванию нового, расширению или удержанию своего сегмента рынка продукции и услуг космической деятельности, она будет вести соответствующую поставленной цели ценовую политику, опираясь при этом на анализ собственных издержек на создание и эксплуатацию системы и необходимую норму прибыли. Для дорогостоящей научно-технической продукции, которой, несомненно, является продукция КС, верхний уровень цены ограничивает рынок, в первую оче-

редь платежеспособный спрос потребителей и качество научно-технической продукции.

Для каждого из определяющих параметров, участвующих в оценке сопряженности, разрабатываются шкалы соответствия, по которым наилучшему значению параметра присваивается максимальная оценка, а наихудшему – минимальная целая, отличная от нуля. Представляется наиболее удобным использовать стобалльные шкалы оценки. Значение 0 (ноль) в такой шкале тоже присутствует. Оно соответствует оценке ситуации, когда рассматриваемый параметр находится за границами возможности КС, т.е. когда присутствует явная несопряженность объектов. Проведенный анализ “Классификатора тематических задач оценки природных ресурсов и окружающей среды, решаемых с использованием материалов ДЗЗ” (Классификатор тематических задач..., 2008), позволил сформировать сегменты со схожими требованиями по характеристикам предоставляемой с помощью КС ДЗЗ информации.

Апробация предлагаемого алгоритма оценки сопряженности была проведена на одной из групп, включающей в себя следующие разделы “Классификатора”:

- изучение локальных тектонических дислокаций разрывов, сбросов, грабен, литологических горизонтов;
- изучение эрозии и аккумуляции речных русел, развитие пойм крупных рек;
- оценка мерзлотных процессов и морозного выветривания на тектонику локального класса;
- изучение геологического строения мелководных частей шельфа и материковых отмелей.

Анализ требований, предъявляемых этой группой “Геология” к информации, получаемой от КС ДЗЗ, позволил оценить численные значения определяющих сопряженность параметров, представленные в табл. 3. Значения параметров в данной таблице были получены на основе данных упомянутого выше “Классификатора”, который содержит не только перечень тематических задач, но и основные требования к их выполнению.

**Таблица 3.** Оценка требований потребителей услуг ДЗЗ в области “Геология”

Характеристика	Минимальное значение характеристики, количественное/балльное	Максимальное значение характеристики, количественное/балльное
Разрешающая способность, м	30/1	1/100
Число спектральных диапазонов	2/1	4/100
Периодичность наблюдений, сут	720/1	180/100
Время доставки информации, сут	120/1	45/100
Стоимость снимка руб. за 100 км <sup>2</sup>	75000/1	18000/100

Данное исследование направлено на повышение эффективности отечественных КС ДЗЗ, с помощью совершенствования применяемых маркетинговых процедур на стадиях технико-экономического исследования объекта. В связи с этим, в качестве объектов КС ДЗЗ была выбрана КС на базе КА “Ресурс”, представленная двумя модификациями, оценки значений определяющих параметров которых приведены в табл. 4 и 5. Данные о параметрах КС в этих таблицах сформированы на основании той информации, которую предоставляют разработчики и эксплуатанты “Ресурса”. При разработке данных моделей также применялась процедура экспертного опроса, на которой, из-за ограниченности размера публикации, нет возможности останавливать внимание в данной статье.

Табличная форма представления результата не дает возможности в целом оценить сопряженность КС и предъявляемых к ней требований потребителя. Для наглядности предлагается графическая модель, представляющая собой многоугольник с радиусом, соответствующим величине максимальной оценки шкалы соответствия. В предлагаемом варианте это значение соответствует 100. Многоугольник имеет столько осей, проходящих через ее центр, сколько определяющих параметров было выбрано для оценки сопряженности. На каждой из осей отмечается значение, соответствующее тому или иному рассматриваемому объекту. Количество точек на каждой из осей строго соответствует количеству рассматри-

ваемых объектов. После нанесения всех значений точки, принадлежащие к характеристике одного объекта, соединяются прямой линией. Образуются некие многоугольники, число вершин в которых соответствует числу определяющих сопряженность параметров, а число многоугольников – числу рассматриваемых объектов. На рис. 2 представлено графическое изображение сопряженности требований потребителей и возможностей КС ДЗЗ “Ресурс-ДК1” в области “Геология”.

Графическая модель позволяет наглядно продемонстрировать, по каким параметрам и в какой степени присутствует несопряженность требований потребителей и возможностей КС ДЗЗ.

Как видно из рис. 2, рассматриваемый комплекс ДЗЗ “Ресурс-ДК1” имеет несопряженность по трем параметрам, а именно: по разрешающей способности, числу спектральных диапазонов и по стоимости снимка.

Графическое представление способствует успешному выполнению следующего этапа исследования, – такого, как определение направлений и мер по устранению несопряженности исследуемых объектов. На этом этапе предполагается выработка мер и направлений совершенствования и модернизации КС для устранения несопряженности между возможностями этой КС и требованиями к ней потенциальных потребителей. Данный пример не совсем корректен, так как КС на базе “Ресурс-ДК1” уже функционирует, и устранить имеющуюся несопряженность по параметру “Число спектральных диапазонов” или “Разрешающая способность” не представляется возможным. Однако те параметры, которые не являются жестко привязанными к техническим параметрам КС, могут быть скорректированы. Так, аналогичное исследование, проводимое по использованию КС ДЗЗ для целей МЧС, показало, что наибольшая несопряженность между возможностями КС ДЗЗ “Ресурс” и требованиями МЧС существует по параметру “Время доставки информации”, который может быть при определенных условиях улучшен. Основное же направление возможного использования данного алгоритма – системы модернизируемые или проектируемые.

**Таблица 4.** Оценка возможностей КС “Ресурс-ДК1” в области “Геология”

Характеристика	Минимальное значение характеристики, количественное/балльное
Разрешающая способность, м	2/90
Число спектральных диапазонов	3/50
Периодичность наблюдений, сут	6/100
Время доставки информации, сут	45/100
Стоимость снимка, руб. за 100 км <sup>2</sup>	24000/70

Поэтому больший интерес представляет оценка потенциальных возможностей КС на базе КА “Ресурс-П1” для того же пользователя.

Сравнив значения табл. 4 и 5, можно сделать вывод о том, что КА “Ресурс-П1” обладает большей сопряженностью с требованиями потребителей в области геологии. На рис. 3 совмещены графические изображения основных параметров и “Ресурс-ДК”, и “Ресурс-П1”, что позволяет наглядно сравнить сопряженность определяющих параметров обеих этих КС с требованиями конкретной группы потребителей. Так, видно, что КА “Ресурс-П1” будет в большей степени удовлетворять потребителей, во-первых, благодаря увеличению спектральных диапазонов установленной на борту аппаратуры, во-вторых, за счет повышения разрешающей способности и, в-третьих, за счет снижения стоимости снимков. При проведении дополнительных исследований возможно многовариантное построение таких графических выражений сопряженности для различных КС либо для различных групп потребителей их услуг, что позволит более точно и наглядно определиться с предполагаемым сегментом рынка услуг, а также с направлениями совершенствования КС.

На практике не всегда удобно использование графического выражения группы показателей в качестве итоговой оценки. Кроме того, при анализе требований потребителя специалисты часто сталкиваются с проблемой неравноценности определяющих параметров, проистекающей из существования предпочтений потребителя.

Для решения данной задачи необходимы оценка важности критериев и получение взвешенной

**Таблица 5.** Оценка возможностей КС “Ресурс-П1” в области “Геология”

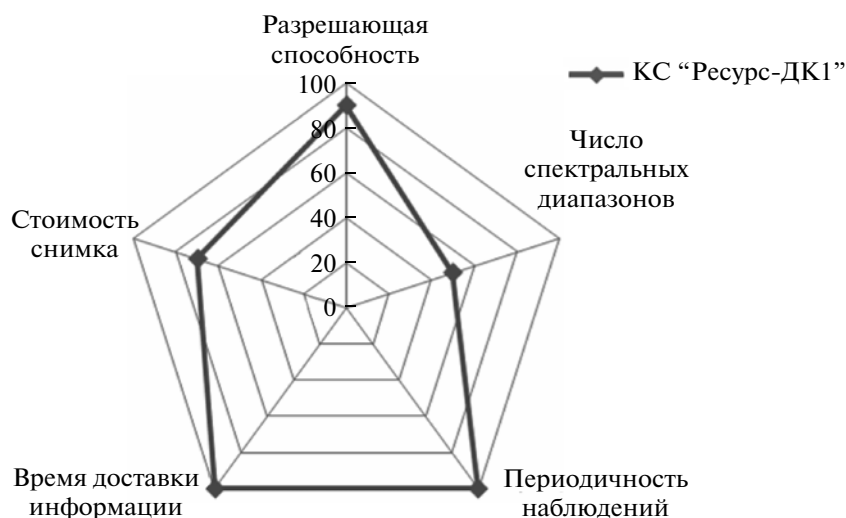
Характеристика	Минимальное значение характеристики, количественное/балльное
Разрешающая способность, м	1.5/95
Число спектральных диапазонов	5/100
Периодичность наблюдений, сут	6/100
Время доставки информации, сут	30/100
Стоимость снимка, руб. за 100 км <sup>2</sup>	19500/90

оценки вклада каждого из определяющих параметров в итоговую оценку исследования. Относительно задачи определения сопряженности возможностей КС и требований потребителей услуг этих КС, в качестве критерия используется интегральный показатель сопряженности (ИПС).

#### РАСЧЕТ ИПС ВОЗМОЖНОСТЕЙ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ТРЕБОВАНИЯМИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ИХ УСЛУГ

При оценке эффективности КС использование графических моделей практически невозможно. Используемые методы и процедуры достаточно формализованы, а используемые показатели имеют математическую форму выражения. Поэтому полученные результаты по оценке сопряженности нуждаются в ином выражении.

Сопряженность требований потребителей и возможностей КС  
“Ресурс-ДК1” в области “Геология”



**Рис. 2.** Графическое изображение сопряженности требований потребителей и возможностей КС “Ресурс-ДК1” в области “Геология”.

Сопряженность требований потребителей и возможностей КС ДЗЗ  
 “Ресурс-ДК1” и “Ресурс-П1” в области “Геология”

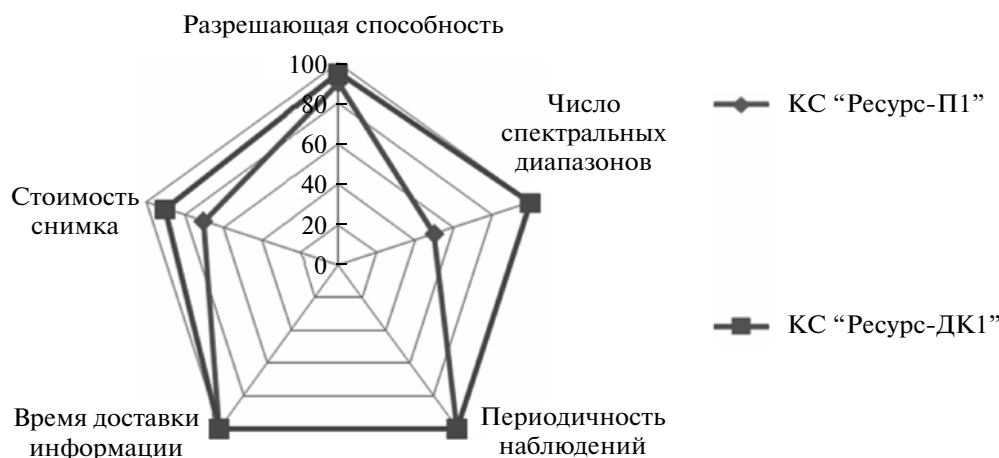


Рис. 3. Графическое изображение сопряженности требований потребителей и возможностей КС “Ресурс-ДК1” и КС “Ресурс-П1” в области “Геология”.

Для дальнейшего использования результатов исследования сопряженности предлагается использование ИПС, который может быть представлен в следующем виде:

$$\text{ИПС} = J_{\text{КС}} / J_{\text{потр}}, \quad (1)$$

где  $J_{\text{КС}}$  – индекс возможностей КС;  $J_{\text{потр}}$  – индекс требований потребителя к КС.

Индексы возможностей КС и требований потребителя к КС соответственно представляют собой кумулятивную или мультипликативную форму учета основных определяющих параметров системы, подлежащей оценке. В связи с особенностями КС предлагается использование именно мультипликативной формы. Это связано с тем, что некоторые параметры КС могут носить как бы нормативный характер – достижение этих параметров либо возможно, либо нет. Применение кумулятивной формы привело бы к ошибке. В таком случае индексы примут вид

$$J_{\text{КС}} = \prod_{n=1}^N J_n, \quad (2)$$

$$J_{\text{потр}} = \prod_{m=1}^M J_m, \quad (3)$$

где  $J_n, J_m$  – соответственно значения определяющих параметров возможностей КС и требований потребителя к данной КС.

Данные индексы имеют различные обозначения, так как значения этих показателей только в идеале, при полной сопряженности, могут совпадать. В реальности же значения параметров КС и потребителя не совпадают. При этом важно, что

оцениваемые параметры должны быть одни и те же, соответственно и количество их ( $N$ ) будет одинаково.

Использование такой формы было бы возможно, если бы все определяющие параметры были одинаково важны для потребителя и оказывали равное влияние на формирование интегрального показателя сопряженности. В принципе такая ситуация возможна, и при соответствующей постановке задачи важность параметров будет одинаковой, а в критерии могут быть использованы индексы вида (2) и (3).

Однако наиболее часто встречаются ситуации, когда для заказчика исследования определяющие параметры имеют различную значимость. Какие-то параметры должны быть соблюдены точно, в каких-то возможны отклонения, а какими-то можно практически пренебречь. Для учета такой ситуации предлагается в критерий сопряженности ввести оценку значимости используемых параметров. Эта оценка определяется с помощью проведения экспертного опроса представителей потребителя, обладающих необходимой информацией и квалификацией.

В таком случае формулы индексов (2) и (3) приобретут иной вид:

$$J_{\text{КС}} = \prod_{n=1}^N J_n q_n, \quad (4)$$

$$J_{\text{потр}} = \prod_{m=1}^M J_m q_m, \quad (5)$$

где  $q_n$  – оценка важности определяющего параметра, полученная экспертным путем.

Необходимо напомнить, что при оценке должно использоваться ограничение, по которому сумма оценок значимости всех параметров должна быть равна единице.

Использование мультипликативной формы имеет ряд недостатков, основным из которых является необходимость вычислений большого количества цифр, что, однако, возможно устранить при решении данной задачи с помощью компьютерной техники, так как данный алгоритм достаточно легко формализовать и использовать даже стандартные программные средства как инструмент решения задачи оценки сопряженности.

В идеальной ситуации полной сопряженности возможностей КС и требований потребителей услуг этой КС, ИПС будет равен единице. В случае если значение ИПС больше единицы, система превосходит предъявляемые к ней требования. Чем значение ИПС дальше от единицы, тем больше степень несопряженности рассматриваемых требований и возможностей КС.

В этом случае можно провести дополнительное исследование по оценке сопряженности требований с возможностями другой КС либо иного потенциального потребителя, либо иного инвестиционного проекта развития КС, так как только сравнительные характеристики дают наиболее точную оценку критерия.

Такая сравнительная оценка позволит наиболее точно ответить на вопрос о степени соответствия возможностей КС требованиям потребителя услуг этой КС, а также укажет направления совершенствования и модернизации КС либо критические точки в требованиях потребителя, относительно которых он должен пересмотреть свои оценки.

Для апробации алгоритма были рассчитаны ИПС для КС на базе КА “Ресурс” для потребителя группы “Геология”. После обращения к экспертам данной группы были получены и обработаны данные, позволившие сформировать табл. 6, в которой приведены оценки значимости параметров услуги КС ДЗЗ.

Данные значения характерны для конкретной группы потребителей. Менее значимы параметры “Время доставки информации” и “Периодичность наблюдений” в связи с тем, что структурные изменения Земли происходят очень медленно и, следовательно, для их изучения не требуется частое наблюдение. Наиболее важными параметрами были определены “Стоимость снимка” и “Разрешающая способность”. С учетом таких предпочтений потребителя были рассчитаны ИПС для КС на базе КА “Ресурс”, которые составили соответственно 0.315 для КС “Ресурс-ДК1” и 0.855 для КС “Ресурс-П1”. ИПС для КС “Ресурс-П1” ближе к единице, следовательно, можно обоснованно говорить о том, что данная КС в

**Таблица 6.** Экспертная оценка важности определяющего параметра

Параметр	Средняя оценка
Стоимость снимка	0.30
Разрешающая способность	0.25
Число спектральных диапазонов	0.22
Время доставки информации	0.13
Периодичность наблюдений	0.10

большей степени сможет удовлетворить требования потребителей конкретной группы. Кроме того, такая форма показателя сопряженности может быть использована при расчете экономической эффективности исследуемых систем.

Использование программных средств дает возможность формирования значительных массивов данных, их обработки и получения ИПС для большого количества КС и групп пользователей услуг этих систем, что позволит в зависимости от постановки задачи группировать их по различным основаниям и находить направления и пути совершенствования КС в целях устранения несопряженности с требованиями потребителя, а, следовательно, в целях наиболее полного удовлетворения его потребностей, что является одним из основных инструментов повышения эффективности функционирования систем.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные условия разработки и функционирования отечественных КС характеризуются усилением конкуренции со стороны зарубежных производителей и операторов КС ДЗЗ.

Современные пользователи информации КС ДЗЗ (в том числе госзаказчики) “избалованы”, имеют широкий выбор, хорошо осведомлены о возможностях различных систем, не ограничены практически никакими рамками, кроме финансовых.

Для того чтобы занять какую-либо нишу на рынке информации ДЗЗ, разработчикам, производителям и операторам отечественных КС ДЗЗ необходимо при оценке эффективности системы в большей степени сравнивать возможности этой системы не столько с аналогами или действующими конкурентами, сколько с требованиями потенциальных потребителей.

В стране сложился рынок потребителей информации, получаемой с использованием КС ДЗЗ. Ведутся работы по формированию классификаторов, каталогизации услуг для различных отраслей, использующих информацию ДЗЗ. Имеющиеся требования потребителей могут быть сгруппированы по различным основаниям, проанализированы и ран-

жированы в зависимости от предпочтений конкретных групп потребителей.

Проводимая оценка сопряженности требований потребителей и возможностей космических комплексов позволит наглядно продемонстрировать “слабые стороны” КС, не отвечающие предпочтениям потребителей, наметить пути их возможного устранения, оценить степень соответствия параметров КС требованиям потребителей, использовать эту оценку при оценке эффективности разрабатываемых и модернизируемых систем. Предлагаемые процедуры не должны заменять существующие в отрасли МИ, а призваны расширить и усовершенствовать их.

Проводимый комплекс мероприятий по оценке сопряженности и устранению несопряженности требований потребителей и возможностей КС

будет способствовать повышению конкурентоспособности отечественных систем, повышению эффективности их функционирования, а также повышению эффективности функционирования потребителей, которые смогут получать более качественный, адресный продукт с использованием современных космических технологий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Классификатор тематических задач оценки природных ресурсов и окружающей среды, решаемых с использованием материалов ДЗЗ. Ред. 7. Иркутск: Байкальский центр, 2008. 9 с.

Федеральная космическая программа России на 2006–2015 гг. <http://www.federalspace.ru/main.php?id=24>.

<http://www.ntsomz.ru/>

<http://www.sovzond.ru/satellites/351/433.html>

## The Control of the Associativity Factor Between Consumer Requirements and Space Complexes Possibilities at the Estimation of Space Complexes Efficiency

V. V. Zueva

*Moscow Aviation Institute (State University of Aerospace Technologies), Moscow*

The offered in paper algorithm of an estimation of an associativity of consumers requirements and possibilities of the space complexes (SC), used in the marketing researches procedure at predesign stages, promotes SC competitiveness increase and increase of their functioning efficiency by the maximum possible account of various consumer groups requirements. The approbation is spent on example base domestic information users received by means of remote sensing SC.

**Keywords:** space-based services, remote sensing of the Earth, space complexes customizability spatial resolution, number of spectral ranges, cost of image, frequency of observations, time of data delivery, classifier, efficiency