

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ОБРАБОТКА ДАННЫХ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

© 2012 г. В. В. Козодеров^{1*}, Т. В. Кондранин², Е. В. Дмитриев³,
О. Ю. Казанцев⁴, И. В. Персев⁴, М. В. Щербаков⁴

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

² Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный

³ Институт вычислительной математики РАН, Москва

⁴ 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° – 3° 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), τ – время накопления, K – коэффициент преобразования, i_x и i_λ – 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 λ – длина волны, соответствующая индексу i_λ , 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 θ_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 (δ_1 , δ_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 (θ'), отражения (θ) излучения $H(\lambda)$ и соответствующих азимутах (ϕ, ϕ') вводит угловые координаты (θ, ϕ) 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 ζ_k учитывают влияние углов визирования ПЗС-матрицы для каждого из спектральных каналов шириной Λ_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 (ρ_1, ρ_2, ρ_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 картах 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 пропускания фитоэлементами 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 многоспектральных 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., Щербаков М.В., Лесуновский А.А.* Аэрокосмическая гиперспектрометрия: летные испытания аппаратуры, программно-алгоритмическое обеспечение обработки данных // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 5. С. 59–68.
- 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. Kozoderov¹, T. V. Kondranin², E. V. Dmitriev³, O. Yu. Kazantsev⁴,
I. V. Persev⁴, M. V. Tscherbakov⁴

¹ *M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow*

² *Moscow Institute for Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Moscow Region*

³ *Institute of Numerical Mathematics of Russian Academy of Sciences, Moscow*

⁴ *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

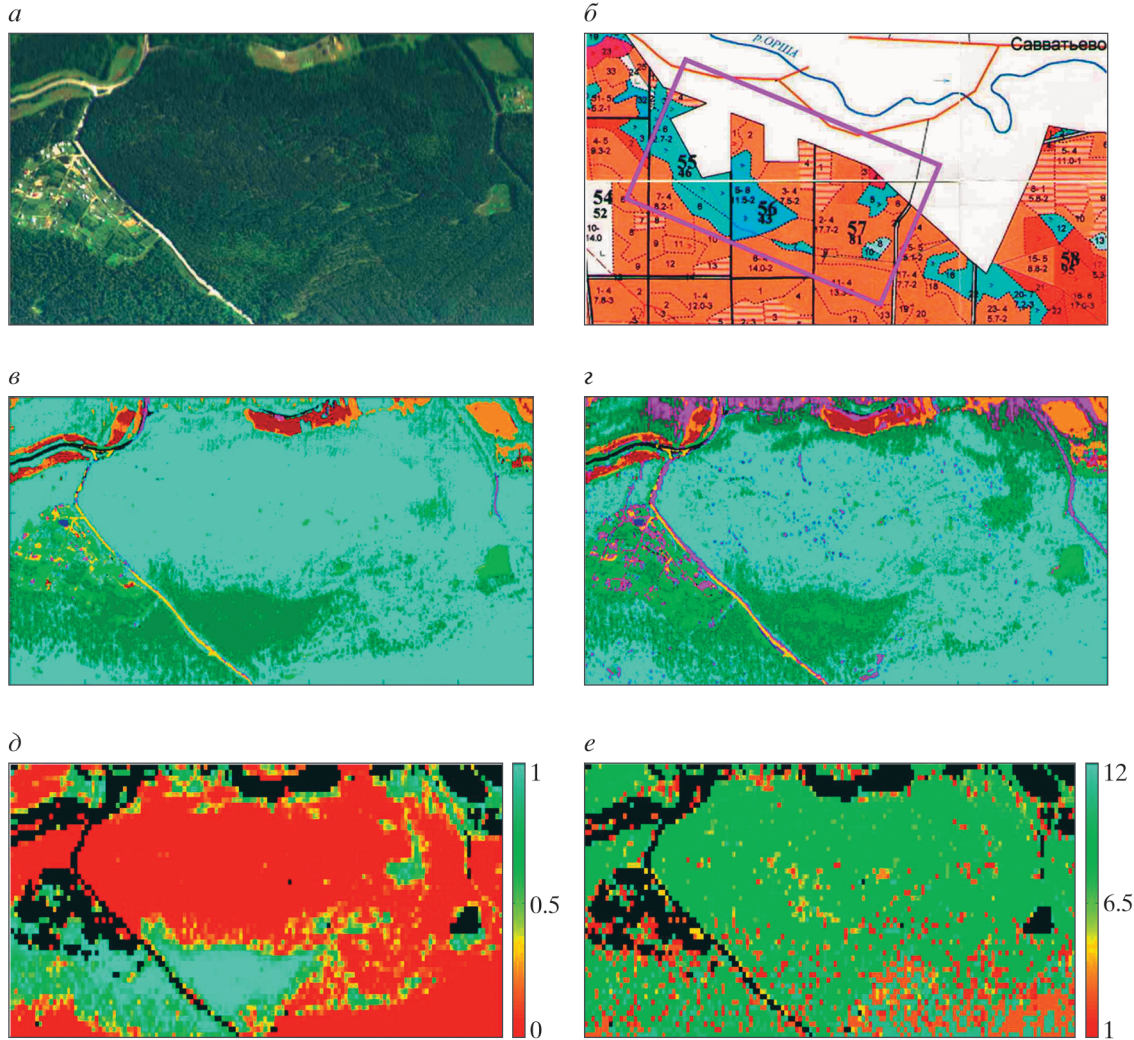


Рис. 1. Классификация ГС-изображения: *a* – синтезированное RGB-изображение выбранной территории; *б* – расположение рассматриваемой сцены на лесотаксационной карте (выделено фиолетовой рамкой); *в* и *г* – результаты распознавания классов наземных объектов на основе характерных спектров отраженного 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.



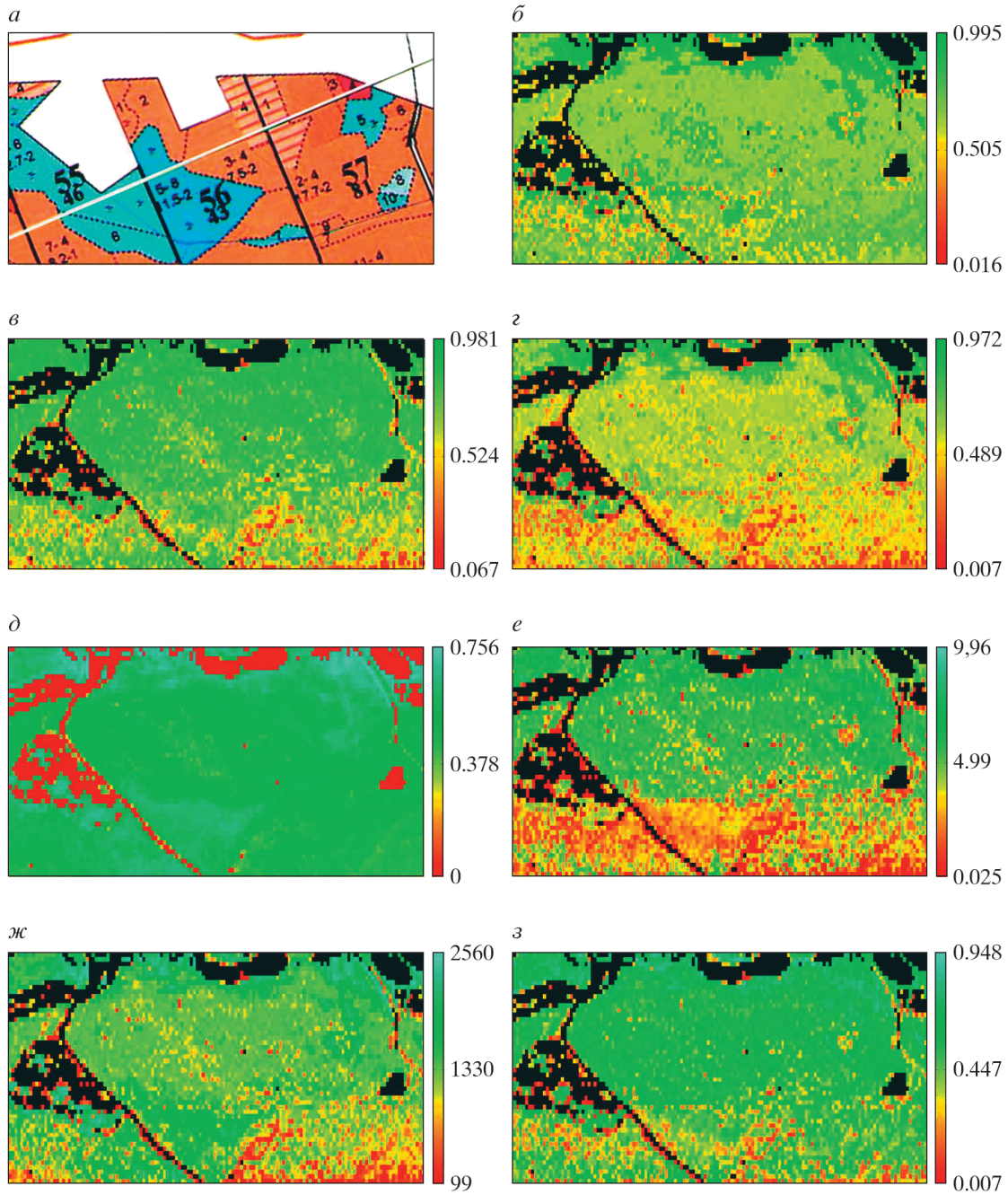


Рис. 2. Восстановленные характеристики лесной растительности на основе предлагаемого метода обращения расчетной модели интенсивности излучения, регистрируемого аппаратурой ГС-зондирования: *а* – карта наземной лесотаксации выбранной территории; *б* – попиксельные значения плотности лесного полога; *в* – 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.

