

## Прямые и обратные задачи самолетного гиперспектрального зондирования

В.В. Козодеров<sup>1</sup>, Е.В. Дмитриев<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
119899, г. Москва, ГСП-3, Воробьевы горы

<sup>2</sup>Институт вычислительной математики РАН  
117951, г. Москва, ГСП-1, ул. Губкина, 8

Поступила в редакцию 22.03.2016 г.

С целью развития когнитивных технологий распознавания лесной растительности разного породного состава и возраста при обработке гиперспектральных самолетных изображений рассмотрены особенности формирования получаемых изображений с помощью оптических приемных устройств, а также модели описания регистрируемых спектров и восстановления параметров лесного покрова. Показаны характерные условия решения прямых задач в виде зависимости спектрального функционала от оптических свойств лесного полога и обратных задач восстановления объема фитомассы лесной растительности и параметров ее биологической продуктивности в возможных приложениях этих параметров в моделях климата.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование, обработка гиперспектральных изображений, распознавание лесной растительности, восстановление параметров, прямые и обратные задачи; remote sensing, optical imagery processing, pattern recognition of forest vegetation, parameters retrieval, direct and inverse problems.

### Введение

Дистанционное гиперспектральное зондирование (сотни каналов в видимой и ближней инфракрасной областях спектра) открывает новые возможности распознавания природно-техногенных объектов земной поверхности в сравнении с многоспектральным зондированием (6–7 каналов). Решение возникающих прикладных задач основано на алгоритмическом и программном обеспечении прямых задач формирования уходящего излучения, регистрируемого аппаратурой гиперспектрального зондирования, и обратных задач восстановления параметров объектов при обработке получаемых изображений [1].

Первые примеры реализации обратных задач по данным многоспектрального зондирования строились на основе простого перебора влияющих факторов в функционале, описывающем формирование уходящего излучения для прямых задач с регуляризацией получаемых решений [2]. С появлением гиперспектральных систем дистанционного зондирования возникла необходимость обоснования реальной точности распознавания объектов на обрабатываемых изображениях [3]. Когнитивные технологии обработки гиперспектральных изображений способствовали объединению задач распознавания объектов и оценки параметров их состоя-

ния [4, 5]. При этом для лесного покрова разного породного состава и возраста оригинальным является подход, основанный на выделении для данного класса лесных объектов элементов разрешения (пикселей), относящихся к освещенным верхушкам крон деревьев, затененному фоновому пространству и частично освещенным и затененным фитоэлементам лесного полога [6–8]. Знание соответствующих особенностей оптического состояния полога в момент гиперспектральной съемки повышает точность распознавания объектов лесного покрова [9, 10].

Основное внимание в данной статье уделено новому пониманию прямых и обратных задач атмосферной оптики с точки зрения интерпретации данных самолетного гиперспектрального зондирования. До тех пор, пока речь шла об обработке соответствующих изображений невысокого пространственного разрешения, типичным было использование феноменологической теории переноса излучения в сплошной достаточно однородной среде. С помощью этой теории строились модели переноса излучения в атмосфере. Верхнее граничное условие в этих моделях характеризует отсутствие на верхней границе атмосферы диффузно рассеивающего излучения. Нижнее граничное условие описывает зависимость интенсивности уходящего излучения от интенсивности падающего прямого солнечного и диффузно рассеянного излучения, приходящего от всех участков небесной сферы, и радиационных свойств объектов земной поверхности [11]. При высоком пространственном разрешении отдельные классы лесных объектов формируются за счет пикселей, относящихся

\* Владимир Васильевич Козодеров (vkozod@mail.ru);  
Егор Владимирович Дмитриев (yegor@mail.ru).

к освещенным и затененным элементам кроны деревьев, что не описывается с помощью теории переноса [12]. Возникает необходимость в прямой задаче записывать функционал интенсивности уходящего излучения в зависимости от спектральных отражательных характеристик отдельных составных элементов лесного полога (end-members), а далее решать обратную задачу восстановления оптических параметров лесного полога. К числу таких параметров относятся: объем фитомассы листы/хвои и связанной с ней биомассы лесной растительности разного породного состава и возраста; биологическая продуктивность растительности, характеризующая обменные процессы разных фракций лесного полога с атмосферой и подстилающей поверхностью.

### **Приборы с зарядовой связью и алгоритмы обработки данных**

Первые попытки интерпретации данных оптического дистанционного зондирования с помощью аэрофотосъемки заключались в визуальном дешифрировании изображений опытным оператором. Следующий этап состоял в автоматизированной обработке цифровых изображений. По мере разработки аэрокосмических систем механического сканирования появилась возможность обрабатывать изображения в реальном времени. Затем были созданы системы, использующие технологию, называемую прибор с зарядовой связью (ПЗС) [13], включающие в себя сенсоры нового типа, позволяющие проводить электронное сканирование вдоль полосы полета и получать спектральные значения регистрируемых яркостей для каждого пикселя изображения.

Успехи в области оптики и фотоники способствовали созданию системы дистанционного зондирования, называемой гиперспектральной визуализацией или изображающей спектроскопией [14], как одного из перспективных направлений дистанционного мониторинга наземных объектов, представляемых в виде цифровых изображений с целью распознавания. Данная прикладная область рассматривается как расширение возможностей обычно используемых цифровых камер и становится новым инструментом для определения параметров земной поверхности по данным дистанционного зондирования.

Технология ПЗС позволила сконструировать соответствующие типы приемной аппаратуры дистанционного зондирования. В процессе съемки с авиационных или космических летательных аппаратов линейки (или матрицы) таких специальным образом настроенных приемников излучения формируют попиксельную гиперспектральную матрицу. Аппаратура, содержащая диспергирующий элемент, производит разложение падающего излучения по длинам волн. Характерной особенностью гиперспектральных систем является их способность увеличить информационное содержание регистрируемых данных по сравнению с мультиспектральными системами. Гиперспектральные системы, сконструированные изначально для улучшенного воспро-

изведения спектрального портрета объектов, могут содержать избыточное число каналов для той или иной сцены вследствие корреляции регистрируемых данных между соседними каналами. Возникает необходимость устранить эту избыточность на основе компьютерной обработки данных дистанционного зондирования [15].

Для получения изображений аэрокосмической спектроскопии используются сенсоры специальных типов, которые фиксируют одновременно пространственную, радиометрическую и спектральную информацию, содержащуюся на рассматриваемой сцене [16]. Таким образом, при формировании изображений имеют место спектральные, пространственные и радиометрические искажения, которые должны быть устранены в процессе обработки данных.

Комбинирование спектрального и пространственного анализа добавляет значительное количество информации, которая может быть использована для усовершенствования интерпретации данных дистанционного зондирования. Прикладное применение изображающей спектроскопии оправдано как для дистанционного зондирования, так и при производственном и лабораторном анализе. Чтобы скомбинировать спектральную информацию с пространственными изображениями, необходимо, чтобы сенсор или камера позволяли получать изображения в определяемых исследователем узких спектральных диапазонах, в отличие от широкодиапазонных изображений, получаемых обычными камерами. Выходная продукция такого рода гиперспектральных сенсоров представляется в виде «спектрального куба изображений» (две пространственные координаты и длина волны) [17].

Матрица ПЗС при использовании в оптическом приборе позволяет формировать линии и строки, содержащие пиксели полосы захвата поперек и вдоль авиационного трека в проекции ПЗС на поверхность Земли при движении прибора на авиационной платформе. Учитываются лабораторная калибровка соответствующего прибора, атмосферное влияние во время полета после установки на гиросtabilизированную платформу (рис. 1). Оптическая система служит для отображения радиометрических свойств зондируемых объектов в виде отдельных пикселей, каждый из которых характеризуется их спектральными распределениями.

Следующий этап рассмотрения проблемы — распознавание объектов на гиперспектральных изображениях по спектральным и текстурным признакам путем построения различных классификаторов (вычислительных процедур) обработки данных. Эта часть исследований с помощью отечественной гиперспектральной аппаратуры разработки НПО «Лептон» (г. Зеленоград) подробно описана в работах [1, 3–10, 15] и здесь не рассматривается.

Исследования по использованию различных классификаторов предназначены для интеллектуализации обработки данных гиперспектрального зондирования. Приложения обучаемых и необучаемых классификаторов позволяют реализовать разные подходы к обработке данных с оптимизацией

соответствующих вычислительных схем. Алгоритмическое и программное обеспечение обработки гиперспектральных изображений основывается на обучающих данных, которые используются для выработки решающего правила, т.е. взаимосвязей между классами на поверхности Земли и данными в многомерном пространстве в векторном представлении. Алгоритмы классификации без обучения позволяют сгруппировать данные дистанционного зондирования в кластеры в указанном признаковом пространстве. Обучаемая классификация представляется более перспективной во многих приложениях, поскольку кластерный анализ далеко не всегда может воспроизвести истинное распределение данных, ассоциированных с выбранными классами в процессе обработки того или иного гиперспектрального изображения. Возможно чисто геометрическое разделение имеющихся классов в пространстве признаков, однако статистические подходы также разработаны на основе функций распределения вероятностей, включая априорные знания об объектах и правдоподобии функций распределения, используемых для этих объектов [18].

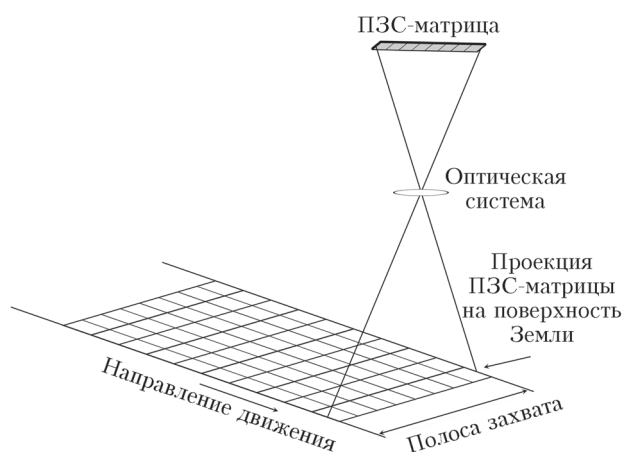


Рис. 1. Схематическое сопоставление наземных пикселей поперек и вдоль траектории полета самолета с элементами ПЗС-матрицы

Как только распознавание классов лесной растительности по гиперспектральным изображениям на основе использования конкретного классификатора произведено, можно попытаться восстановить параметры, характеризующие лесной покров разного породного состава и возраста. Среди этих параметров: объем зеленой фитомассы листвы/хвои и общей биомассы древесины для разных пород и возраста деревьев.

## Восстановление параметров лесного покрова при обработке изображений

С 1970-х гг. создано много моделей переноса излучения [19, 20], которые описывают взаимодействие потоков падающего излучения с растительным пологом, представленным горизонтально однородным бесконечным слоем рассеивающей и по-

глощающей среды без всяких затенений. Позднее появились усовершенствованные модели [21, 22], в которых были предприняты попытки описания геометрических форм (конус, цилиндр и др.) как вносящих затенения. В работе [23] представлена одна из таких гибридных моделей. Еще одна модель [24] основана на расчете распространения фотона в растительном покрове в лучевом приближении.

Перечисленные модели предназначены для приложений теории переноса излучения и вряд ли могут использоваться для практических целей обработки гиперспектральных изображений вследствие того, что они не описывают формирование регистрируемых пикселей за счет составных частей лесного полога [25]. Эти недостатки устранены в наших моделях решения прямой задачи атмосферной оптики и обратной задачи восстановления указанных параметров в новой области приложений. При обработке гиперспектральных изображений высокого пространственного и спектрального разрешения нас интересуют в первую очередь проекционные характеристики лесного полога при близких к надирным углах визирования [7].

В обозначениях работы [11] мы рассматриваем следующее выражение для интенсивности излучения, регистрируемого гиперспектрометром:

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

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 объем фитомассы листвы/хвои  $V$  является функцией только проекционных характеристик, т.е. принимается эмпирическая модель  $V = V(D_{canopy}, D_{crown})$ .

Как видим, в записанном функционале учитывается отражение от фитоэлементов (листья/хвоя, ветви, побеги и т.п.) как падающего прямого солнечного излучения, так и диффузно рассеянного в атмосфере солнечного излучения. Разрабатываемые модели относятся к области аэрокосмической гиперспектрометрии, т.е. дистанционного зондирования высокого спектрального и пространственного разрешения. Соответственно, разрабатываемые приложения применимы для углов визирования вблизи надира и сравнительно больших высот Солнца в момент зависимости этого функционала от угловых координат съемки, далеких от надира. При отражении прямого излучения учитываются три возможных

варианта — отражение от видимой сверху поверхности листьев деревьев, отражение от межкрановой растительности и многократное отражение между листьями деревьев и межкрановой растительностью. Для диффузно рассеянного в атмосфере излучения, очевидно, необходимо учитывать только первые две составляющие. Модель учитывает также соответствующие доли освещенных и затененных фитоэлементов в поле зрения аппаратуры дистанционного зондирования.

Смысл основных параметров плотности полога и крон деревьев заданного типа указан на рис. 2. Принципы построения данной модели могут быть сформулированы следующим образом (рис. 3).

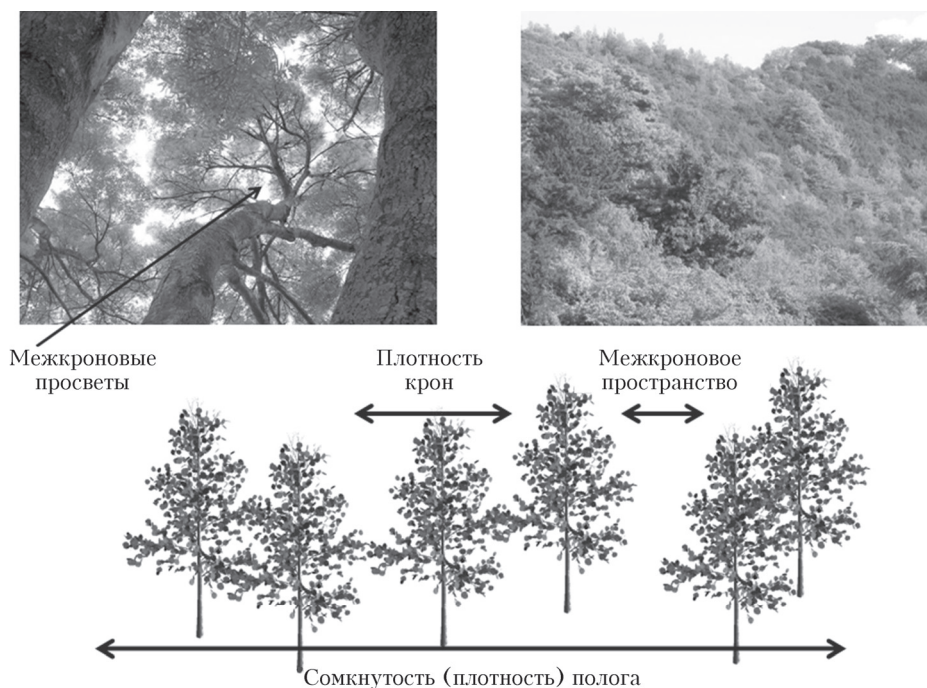


Рис. 2. Схема представления лесного полога: верхние рисунки — фотоизображение лесного полога снизу с указанием межкранового пространства (слева), изображение лесного полога сверху (справа); на нижнем рисунке иллюстрируются понятия плотности крон и сомкнутости полога

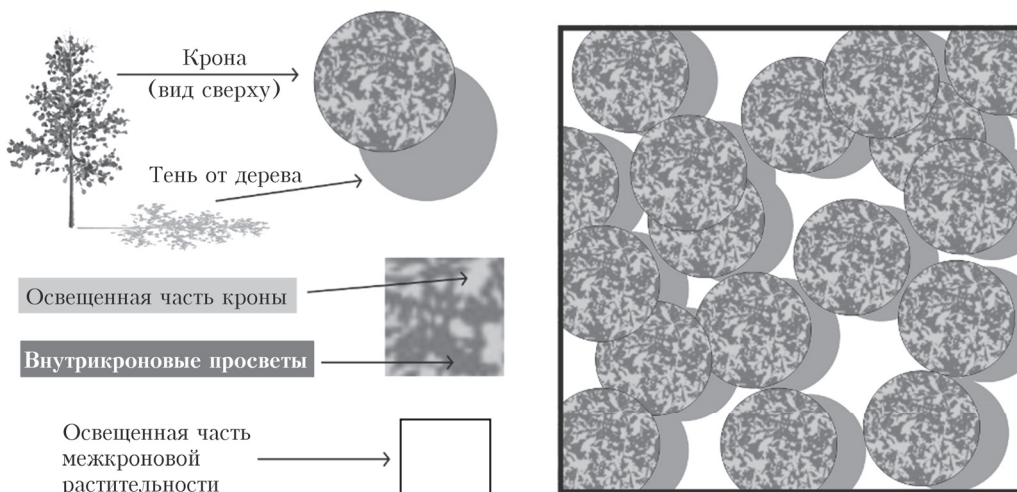


Рис. 3. Модельное представление отражательной способности лесного полога

Пусть пиксель измерительного прибора охватывает часть лесного массива, который включает в себя достаточно большое число деревьев определенного породного состава и возраста. Можно предложить упрощенную модель отражения солнечного излучения, в которой лес состоит из двух слоев – кроны и поверхности земли, т.е. трехмерная структура деревьев и ярусность лесного полога в такой модели не учитываются. Здесь следует отметить необходимость совместного использования данных гиперспектрометра и лидара (типичным является использование терагерцового диапазона), установленных на одной и той же гиростабилизированной платформе для оценки вертикальной структуры лесного полога.

В существующей версии модели базовые спектральные коэффициенты отражения  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$  имеют грубое спектральное разрешение, рассчитанное на обработку данных мультиспектральных спутниковых приборов. Для полноценного перехода к гиперспектральному разрешению необходимо получить соответствующие данные измерений этих коэффициентов с помощью используемого нами гиперспектрометра, т.е. в наземных условиях.

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  $\rho = \rho(\lambda, \theta_0; \theta, \varphi, \theta', \varphi')$  – так называемая функция бинаправленного отражения (Bidirectional Reflectance Function) при зенитном угле Солнца  $\theta_0$ , зенитных углах падения ( $\theta'$ ), отражения ( $\theta$ ) излучения  $H(\lambda)$  и соответствующих азимутах ( $\varphi, \varphi'$ ) вводит угловые координаты ( $\theta, \varphi$ ) визирования объектов в значения регистрируемых коэффициентов спектральной плотности энергетической яркости. При ортотропном отражении (равновероятном распределении по углам уходящего излучения)  $\rho(\lambda) = r(\lambda)/\pi, r(\lambda)$  – коэффициенты спектральной яркости как отношения яркости в данном направлении к яркости идеального отражающего экрана, находящегося при тех условиях освещения объектов Солнцем, которые характерны в заданный момент съемки. Записанные ограничения справедливы в том приближении, что для высокого пространственного разрешения нас интересуют только близкие к надирным углы визирования ПЗС-матриц гиперспектрального зондирования при неортотропном отражении.

На основе значений

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

где  $\tau_o(\lambda)$  – пропускание оптической системы прибора, включая ПЗС-систему приемной матрицы, 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 для каждого из спектральных каналов шириной  $\Lambda_k$  и аппаратной функцией

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

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

Таким образом, для интерпретации регистрируемых спектров  $x_k$  надо иметь наземные спектрофотометрические значения потоков  $U(\lambda) + H(\lambda)$  для заданного тестового участка наземных измерений, сведения об отражательных характеристиках лесного объекта ( $\rho_1, \rho_2, \rho_3$ ); знать свойства гиперспектральной аппаратуры:  $\zeta_k, \tau_o(\lambda), A(\lambda)$ . В общем случае требуется также знать боковой подсвет от возможных фоновых объектов. Он определяется путем решения уравнения переноса излучения в атмосфере. Для этих целей при необходимости может быть использован комплекс программ восстановления отражательных свойств земной поверхности в видимом и ультрафиолетовом диапазонах [26].

Любое решение прямой задачи атмосферной оптики подразумевает расчет соответствующего модельного приближения в многомерном пространстве рассматриваемых множеств параметров. Решение обратной задачи требует регуляризации для нахождения соответствия между входными данными измерений и выходными данными модельных расчетов. Для лесной растительности часто используются два соответствующих приближения по нахождению соответствия между входными и выходными данными [27] аналогичных тем, которые используются в моделях искусственных нейронных сетей.

Осуществлять поиск в таком внушительном объеме данных представляется весьма затруднительным, как, собственно, и хранить его. Кроме того, если не провести оптимизацию общей методологии системы решения обратной задачи, то дальнейшее расширение возможностей программы в части нахождения соответствия между входной и выходной информационной продукцией будет невозможно. Для решения данной проблемы предложена принципиально новая компоновка программы, которая выражается следующей схемой (рис. 4).

На первом этапе проводится редукция пространственного разрешения. Это совершенно необходимо, поскольку разрешение входных данных должно соответствовать предположениям, использованным при построении прямой модели. Действительно, при существующей схеме измерений (самолетная съемка с высоты порядка 2 км) пространственное разрешение гиперспектрального изображения составляет величину около 1 м. Таким образом, на каждое дерево может попадать даже несколько пикселей. В этом случае параметр сомкнутости полога не может быть определен для каждого отдельного пикселя. Характерные масштабы, на которых можно использовать данные рассматриваемой здесь прямой модели, начинаются с 10 м.

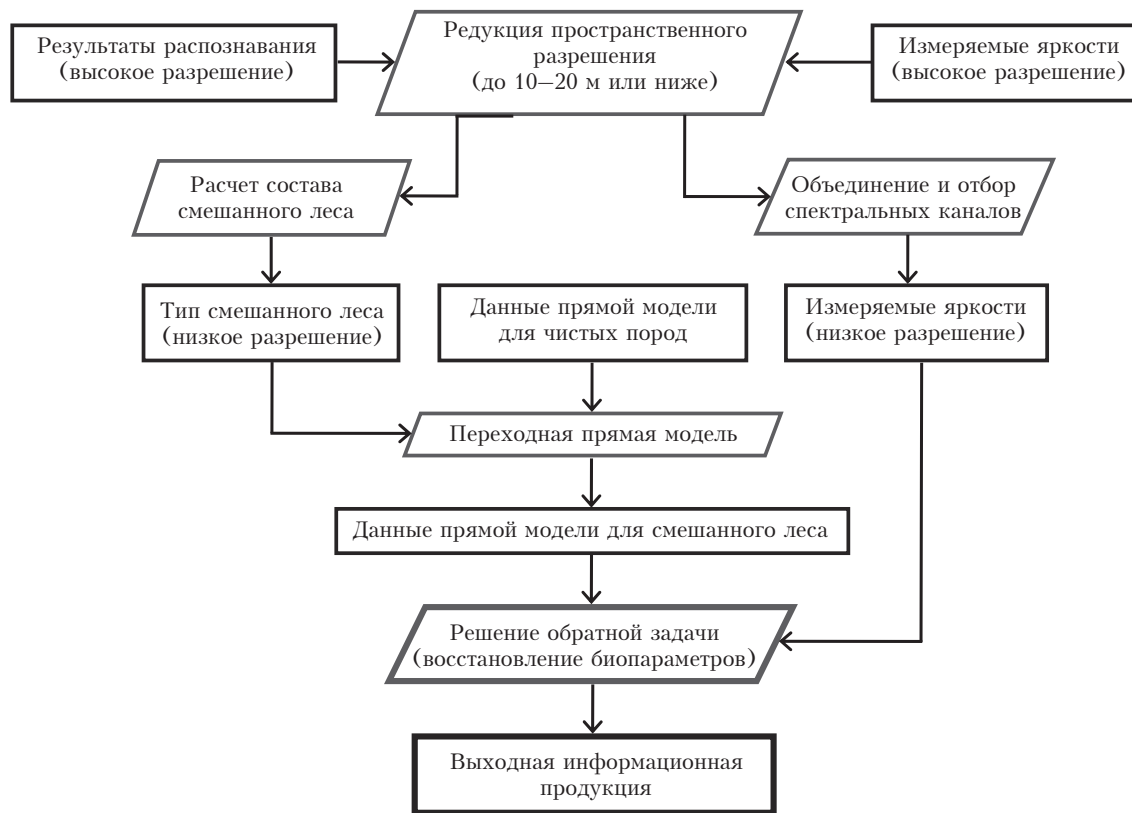


Рис. 4. Блок-схема модуля решения обратной задачи

В то же время характерная ширина кадра гиперспектральной аппаратуры составляет примерно 500 м. Таким образом, если ставится задача обработки отдельного трека, то рекомендуемое разрешение составляет 10–20 м.

Редукция пространственного разрешения проводится как для исходных гиперспектральных данных, так и для результатов распознавания объектов на обрабатываемых изображениях. По этим последним результатам легко получить вспомогательную бинарную классификацию: лес — остальные объекты. Редукция результатов распознавания устроена более сложным образом. Вначале производится расчет состава смешанного леса — определяется вклад каждой чистой породы (тип смешанного леса) и прочих объектов. Данные по всем чистым породам, входящим в найденный тип смешанного леса, передаются в переходную прямую модель, с помощью которой рассчитываются данные прямой модели для смешанного леса, в которых уже отсутствуют градации по типу леса.

Обратная задача восстановления параметров растительности решается для каждого из элементов разрешения, классифицированных на этапе распознавания как «растительность» (для мультиспектральных данных) или как «лес» (для гиперспектральных данных). Один из подходов состоит в том, что рассматриваются все инициализации прямой задачи как возможные частные решения обратной задачи. Число вариантов определяется следующими параметрами: высотой Солнца в разные

сезоны; условиями затенения фитоэлементов; дискретными значениями отражательной способности межкрасной растительности, кроновой области и многократного рассеяния внутрикрасных просветов; породным составом леса; типом межкрасной растительности; числом спектральных каналов и углами визирования. Для гиперспектральных изображений породный состав леса определяется на этапе распознавания. Основными восстанавливаемыми параметрами являются плотность полога и плотность (ажурность) кроны деревьев. Далее с использованием параметризаций восстанавливаются связанные параметры, такие как объем фитомассы листьев, доля поглощенной фотосинтетически активной радиации и чистая первичная продукция углерода.

Частные решения обратной задачи находятся в процессе поиска соответствия измеренных спектров в координатах «плотность лесного полога — плотность кроны деревьев» наиболее близким численным значениям модельных яркостей прямой задачи. В дополнение к определению объема фитомассы по данным дистанционного зондирования используются различные параметризации для восстановления других параметров, таких как «поглощенная фотосинтетически активная радиация» (Absorbed Photosynthetically Active Radiation — APAR). Значения APAR соответствуют переменной проходящей солнечной радиации для длин волн 400–700 нм во время роста растительности, что идет на фотосинтез и запасание углерода.

Обычными являются приложения, касающиеся получения оценок биологической продуктивности по данным дистанционного зондирования лесов. Чистая первичная продукция (Net Primary Productivity – NPP) характеризует приход углерода за определенный сезон как часть фракции APAR (fAPAR), идущей на рост лесной растительности [28]. Значения NPP измеряются в единицах граммов углерода на единицу площади в год. Модели формирования значений NPP рассчитываются из моделей энерго- и массообмена между лесным пологом и атмосферой с учетом скоростей эвапотранспирации (совместного эффекта испарения воды и дыхания живых растений). Некоторые примеры такой параметризации средообразующей роли лесов по данным гиперспектрального самолетного зондирования приведены в работе [5].

Таким образом, решая прямые и обратные задачи атмосферной оптики в процессе гиперспектрального аэрокосмического зондирования, можно расширить круг прикладных задач, включив в их число не только распознавание объектов по их спектральным и текстурным признакам, но и параметризацию лесных экосистем в моделях климата.

### Заключение

В проблеме гиперспектрального самолетного зондирования рассмотрены основные этапы обработки данных: формирование изображений, построение моделей прямой задачи расчета функционала регистрируемых спектральных плотностей энергетической яркости, обратной задачи восстановления параметров состояния лесной растительности. Показаны основные принципы реализации моделей обработки данных высокого пространственного разрешения (порядка 1 м с высоты около 2 км) с редукцией результатов распознавания объектов. В итоге разрешение отдельного самолетного трека уменьшается до 10–20 м. Доказывается, что такая редукция необходима, чтобы на каждое дерево соответствующего породного состава и возраста попадало несколько пикселей. Восстановление таких параметров лесной растительности, как объем фитомассы листвы/хвои, общей биомассы древесины и чистой первичной продукции лесного полога разного породного состава и возраста способствует новым приложениям данных гиперспектрального аэрокосмического зондирования в моделях климата.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-11-00007), Федеральной целевой программы «Исследование и разработки приоритетных направлений научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.» (соглашение 14.575.21.0028, уникальный идентификационный номер RFMEFI57514X0028), грантов Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 14-05-00598, 14-07-00141, 16-01-00107).

1. Kozoderov V.V., Dmitriev E.V., Sokolov A.A. Improved technique for retrieval of forest parameters from

hyperspectral remote sensing data // Opt. Express. 2015. V. 23, N 24. P. A1342–A1353.

2. Козодеров В.В., Косолапов В.С. Обратные задачи атмосферной оптики: приложения к оценке параметров // Оптика атмосф. и океана. 1993. Т. 6, № 5. С. 529–538.

3. Kozoderov V.V., Kondranin T.V., Dmitriev E.V., Kamentsev V.P. Bayesian classifier applications of airborne hyperspectral imagery processing for forested areas // Adv. Space Res. 2015. V. 55, N 11. P. 2657–2667.

4. Козодеров В.В., Дмитриев Е.В., Каменцев В.П. Когнитивные технологии обработки оптических изображений высокого пространственного и спектрального разрешения // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27. № 7. С. 593–600; Kozoderov V.V., Dmitriev E.V., Kamentsev V.P. Cognitive technologies for processing optical images of high spatial and spectral resolution // Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 27, N 6. P. 558–565.

5. Kozoderov V.V., Dmitriev E.V., Sokolov A.A. Cognitive technologies in optical remote sensing data processing // Climate & Nature. 2015. N 1(2). P. 5–45.

6. Козодеров В.В., Дмитриев Е.В. Дистанционное зондирование лесного покрова: инновационный подход // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной Вестник. 2012. № 1(84). С. 19–33.

7. Козодеров В.В., Дмитриев Е.В., Каменцев В.П. Система обработки данных самолетного зондирования высокого спектрального и пространственного разрешения // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 6. С. 57–64.

8. Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Дмитриев Е.В. Методы обработки многоспектральных и гиперспектральных аэрокосмических изображений. Учебное пособие. М.: МФТИ, 2013. 224 с.

9. Kozoderov V.V., Kondranin T.V., Dmitriev E.V., Sokolov A.A. Retrieval of forest attributes using optical airborne remote sensing data // Opt. Express. 2014. V. 22, N 13. P. 15410–15423.

10. Kozoderov V.V., Kondranin T.V., Dmitriev E.V., Kamentsev V.P. A system for processing hyperspectral imagery: Application to detecting forest species // Int. J. Remote Sens. 2014. V. 35, N 15. P. 5926–5945.

11. Kozoderov V.V., Dmitriev E.V. Remote sensing of soils and vegetation: Pattern recognition and forest stand structure assessment // Int. J. Remote Sens. 2011. V. 32, N 20. P. 5699–5717.

12. Козодеров В.В. Особенности реализации моделей оценки фитомассы растительности по наблюдениям из космоса // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 2. С. 79–88.

13. Tompsett M.F., Amelio G.F., Bertram W.J. Jr., Buckley R.R., McNamara W.J., Mikkelsen J.C. Jr., Sealer D.A. Charge-coupled imaging devices: Experimental results // IEEE Trans. Electron. Devices. 1971. V. 18, N 11. P. 992–996.

14. Goetz A.F.H., Vane G., Solomon J.E., Rock B.N. Imaging spectrometry for Earth remote sensing // Science. 1985. V. 228, iss. 4704. P. 1147–1153.

15. Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Дмитриев Е.В., Казанцев О.Ю., Персев И.В., Щербаков М.В. Обработка данных гиперспектрального аэрокосмического зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 5. С. 3–11.

16. Vane G., Goetz A.F.H. Terrestrial imaging spectroscopy // Remote Sens. Environ. 1988. V. 24. P. 1–29.

17. Thenkabail P.S., Enclonab E.A., Ashton M.S., Van Der Meerd B. Accuracy assessments of hyperspectral waveband performance for vegetation analysis applications // Remote Sens. Environ. 2004. V. 91. P. 354–376.

18. *Bunting P., Lucas R.* The delineation of tree crowns in Australian mixed species forests using hyperspectral Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI) data // *Remote Sens. Environ.* 2006. V. 101. P. 230–248.
19. *Suits G.H.* The calculation of directional reflectance of a vegetation canopy // *Remote Sens. Environ.* 1972. V. 2. P. 117–125.
20. *Verhoef W.* Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model // *Remote Sens. Environ.* 1984. V. 16. P. 125–141.
21. *Goel N.S.* Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data // *Remote Sens. Rev.* 1988. V. 4. P. 1–212.
22. *Roberts G.* A review of the application of BRDF models to infer land cover parameters at regional and global scales // *Progress Phys. Geog.* 2001. V. 25, N 4. P. 483–511.
23. *Rosema A., Verhoef W., Noorbergen H., Borge-sius J.J.* A new forest light interaction model in support of forest monitoring // *Remote Sens. Environ.* 1992. V. 42. P. 23–41.
24. *Gastellu-Etchegorry J.P., Demarez V., Pinel V., Zagolski F.* Modelling radiative transfer in heteroge-nous 3-D vegetation canopies // *Remote Sens. Environ.* 1996. V. 58. P. 131–156.
25. *Kozoderov V.V., Kosolapov V.S.* Modelling the fields of outgoing solar radiation from a forest vegetation canopy // *Earth Observ. Remote Sens.* 1997. V. 14, N 6. P. 959–971
26. *Тарасенков М.В., Белов В.В.* Комплекс программ восстановления отражательных свойств земной поверхности в видимом и УФ-диапазонах // *Оптика атмосф. и океана.* 2014. Т. 27, № 7. С. 622–627; *Ta-rasenkov M.V., Belov V.V.* Software packade for re-constructing reflective properties of the Earth's surface in the visible and UV ranges // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 1. P. 89–94.
27. *Zarco-Tejada P.J., Miller J.R., Harron J., Hu B., Noland T.L., Goel N., Mohammed G.H., Sampson P.* Needle chlorophyll content estimation through model inversion using hyperspectral data from boreal conifer forest canopies // *Remote Sens. Environ.* 2004. V. 89. P. 189–199.
28. *North P.* Estimation of fAPAR, LAI and vegetation fractional cover from ATSR-2 imagery // *Remote Sens. Environ.* 2002. V. 80. P. 114–121.

*V.V. Kozoderov, E.V. Dmitriev.* **Direct and inverse problems of hyperspectral remote airborne sensing.**

Evolving cognitive technologies of forest cover pattern recognition of different species and ages while hyperspectral airborne imagery processing, characteristic features of the images formation obtained by optical receiving devices are considered together with models of the registered spectra description and forest cover parameters retrieval. Specific conditions are shown of direct problems solution in the form of dependence of the spectral functional on optical properties of the forest canopy and inverse problems of the forest vegetation phy-tomass volume retrieval as well as its biological productivity parameters in their possible applications in climate models.