

Программно-алгоритмическое обеспечение решения задач распознавания природно-техногенных объектов по гиперспектральным аэрокосмическим изображениям

В.В. Козодеров¹, Е.В. Дмитриев², В.П. Каменцев³, А.С. Каркач²

¹Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова

E-mail: vkozod@mes.msu.ru

²Институт вычислительной математики РАН

³Тверской государственный университет

Описаны основы решения региональных прикладных задач распознавания природно-техногенных объектов и восстановления параметров состояния лесной растительности по данным гиперспектрального аэрозондирования. Технология решения задач включает учет особенностей используемой аппаратуры при мониторинге лесной растительности разного породного состава, плотности полога и плотности крон древостоев. Даны примеры наземной валидации получаемой информационной продукции обработки гиперспектральных изображений в терминах тех же параметров, которые содержатся в предлагаемом модельном описании формирования входящего излучения, регистрируемого аппаратурой гиперспектрального зондирования.

Ключевые слова: гиперспектральные аэрокосмические изображения, природно-техногенные объекты, распознавание, программно-алгоритмическое обеспечение.

Введение

В процессе отработки технологии распознавания природно-техногенных объектов и оценки параметров состояния лесной растительности развиваются приложения данных аппаратуры гиперспектрального аэрозондирования (Козодеров, Дмитриев, 2010). Конечная цель проводимых исследований и научно-технологических разработок – параметризация средообразующей роли лесной растительности в моделях климата (Kozoderov, Dmitriev, 2011).

В рамках совместных исследований по летным испытаниям разных версий гиперспектральной аппаратуры в течение последних лет проводится 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 около 1-2 м при высоте полета 1.5-2 км. Съемка с самолета проводится синхронно с помощью гиперспектральной камеры с ПЗС-матрицами и аэрофотоаппарата, которые устанавливаются на одной платформе вместе с аппаратурой глобального спутникового позиционирования. Результаты измерений записываются на лазерные диски и далее в наземных условиях обрабатываются с помощью компьютерных средств для распознавания природно-техногенных объектов и оценки параметров, характеризующих состояние почвенно-растительного покрова.

В работе (Козодеров и др., 2010) описано современное состояние методов использования данных аэрокосмической гиперспектрометрии для решения региональных прикладных задач. Показаны традиционные подходы к обработке данных гиперспектрального зондирования и новые подходы к решению рассматриваемых задач. Приведены примеры обработки данных гиперспектрального 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 аэрофото- съемки 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.

На основе разрабатываемых подходов формируется облик аппаратно-программной системы обработки гиперспектральных изображений. Такая система включает в себя аппаратуру гиперспектрального зондирования и технологию обработки получаемых данных для распознавания природно-техногенных объектов и оценки параметров, характеризующих состояние элементов разрешения, отнесенных к классу «лесная растительность». При этом исходными являются регистрируемые значения спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ, radiance).

Основы формирования программно-алгоритмического обеспечения обработки данных гиперспектрального зондирования

Рассмотрим следующую модель формирования СПЭЯ для наиболее сложного объекта – лесной растительности:

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

где $E(\lambda) = U(\lambda) + H(\lambda)$ – спектральный поток (освещенность объекта, irradiance) падающего на лесной 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 $\{ \dots \}$ 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 листвы/ 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 $\rho = \rho(\lambda, \theta_0; \theta, \varphi, \theta', \varphi')$ – бинаправленная функция отражения (Bidirectional Reflectance Distribution Function - BRDF) (Deering et al., 1999) при зенитном угле Солнца θ_0 , 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 $\rho(\lambda) = r(\lambda)/\pi$, $r(\lambda)$ – 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 $U(\lambda) + H(\lambda)$ для заданного тестового участка; какие-то сведения об отражательных характеристиках объекта (ρ_1, ρ_2, ρ_3); знать свойства гиперспектральной аппаратуры: $\zeta_k, \tau_o(\lambda), A(\lambda)$.

Принципы распознавания объектов по гиперспектральным изображениям строятся исходя из следующих постулатов:

- каждый спектр $x = (x_1, \dots, x_K)$ как вектор отображается точкой в многомерном (здесь $K \sim 200$) 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 u_i нахождения решающей (дискриминантной) 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 гиперспектрального 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 гиперспектрального аэрокосмического зондирования сводится в итоге к следующим вычислительным процедурам:

- создание программ RGB-синтезирования обрабатываемых гиперспектральных 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.

Примеры реализации указанной технологии распознавания природно-техногенных объектов и восстановления параметров состояния лесной растительности разного породного состава, разной плотности полога и плотности крон древостоев по данным гиперспектрального аэрозондирования показаны в работе (Козодеров, Дмитриев, 2012). Возникает проблема валидации получаемой информационной продукции обработки гиперспектральных изображений по данным точечных фотоизображений при ориентации соответствующей аппаратуры вертикально вверх и выделения пикселей, характеризующих плотность полога и ажурность крон. Это те параметры состояния лесной растительности, которые участвуют в модельных описаниях формирования регистрируемых данных гиперспектрального зондирования.



Рис.1. Применение метода k -средних для классификации объектов "небо" и "растительность".
а) – исходное фотоизображение (дубовый древостой), б) результат классификации.

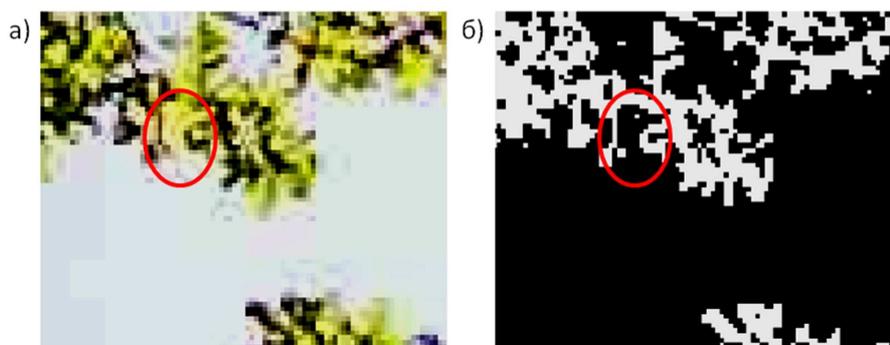


Рис.2. Ошибки метода k -средних при классификации объектов "небо" и "растительность".
а) – исходное фотоизображение (дубовый древостой), б) результат классификации. Пример ошибочной классификации выделен красным.

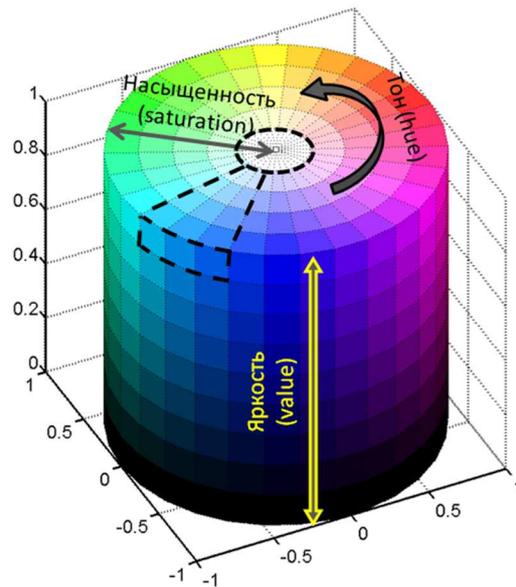


Рис.3. Схема классификации наземных фотоизображений лесного полога в пространстве Тон-Насыщенность-Яркость (HSV). Пунктирной линией обозначена дискриминантная поверхность, отделяющая пиксели неба от остальных пикселей.

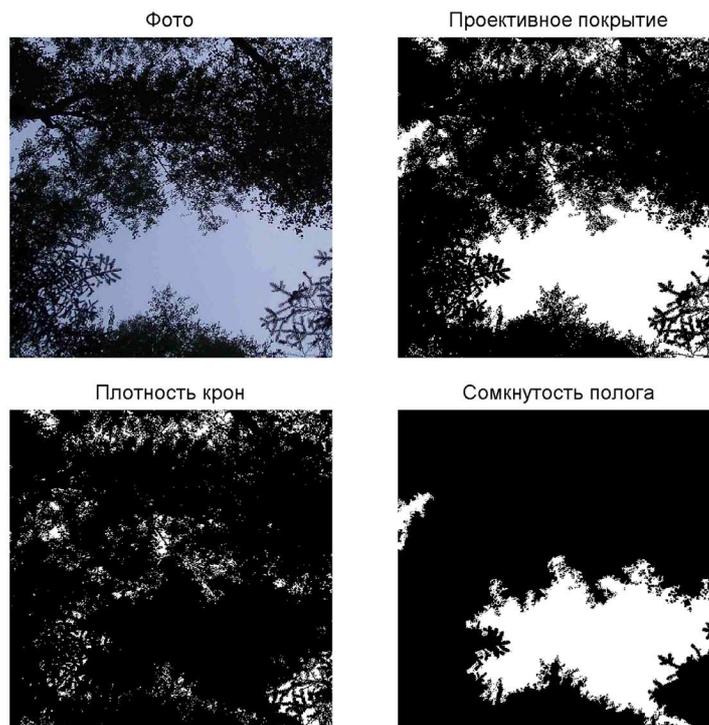


Рис.4. Древостой с преобладанием сосны. Одно из наиболее сложных для обработки изображений. Съемка произведена в вечернее время, поэтому во внутрикрановом пространстве довольно много ярко белых пикселей при достаточно темном общем цвете неба.

Наземная валидация данных гиперспектрального аэрозондирования

Цифровые фотографии, получаемые стандартным цифровым фотоаппаратом, сохраняются в виде сжатых изображений в формате JPEG (Joint Photographic Experts Group). Сжатие (с потерями) формата JPEG очень эффективно и в наибольшей степени пригодно для фотографий, содержащих сцены с плавными переходами яркости и цвета. Для проведения

обработки в системе Matlab имеющиеся изображения преобразовывались в трехмерные массивы, представляющие собой изображение в RGB-каналах.

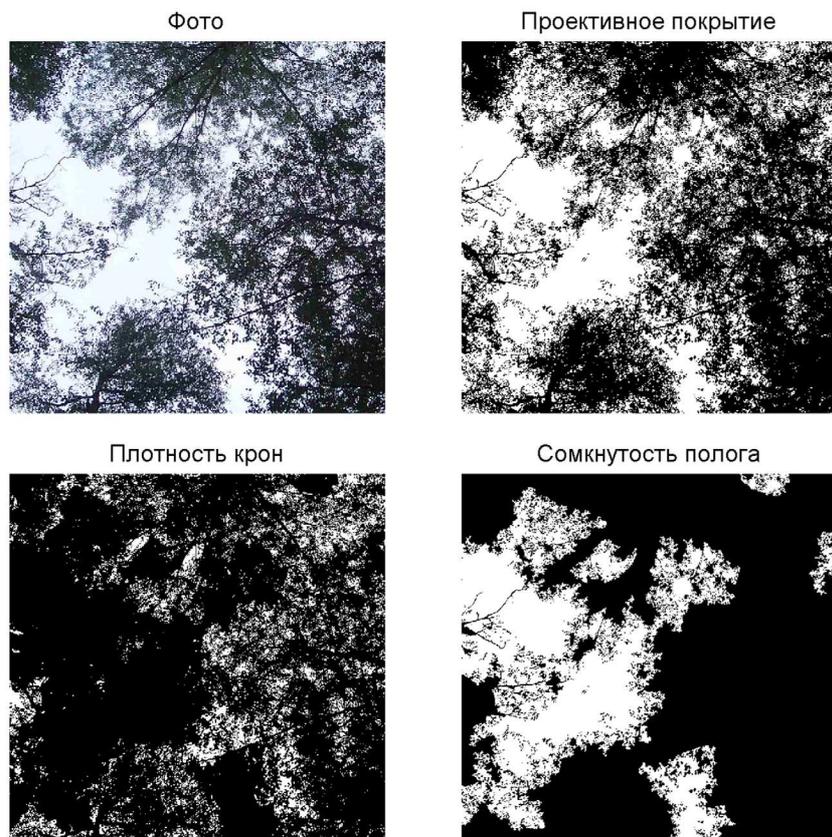


Рис.5. Древостой с преобладанием березы. Увеличенное время выдержки.

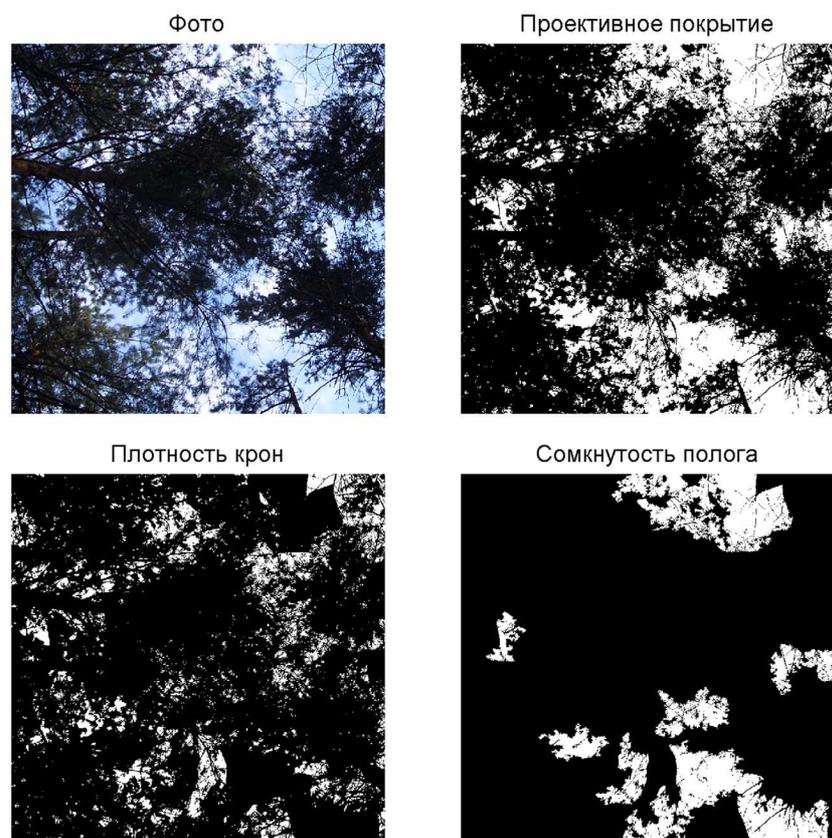


Рис.6. Однородный сосновый древостой. Переменная облачность.

Первый шаг в обработке наземных фотоизображений лесного полога состоит в классификации пикселей неба и растительного покрова. Поскольку, очевидно, эти два класса должны существенно различаться как минимум по яркости, то для проведения классификации разумно попытаться использовать кластерный анализ. Подход, основанный на иерархической классификации оказался неприменим из-за слишком больших затрат на выделение оперативной памяти (либо временных затрат, в случае альтернативной реализации). Поскольку в данном случае число классов заранее известно (2 класса), то разумно применить метод *k*-средних.

На рис.1 приведен пример кластеризации наземной фотографии дубового древостоя. Поскольку края исходных фотографий соответствуют достаточно большим углам визирования, для кластеризации была выбрана центральная часть изображения (между процентилями 25 и 75 %) с тем расчетом, чтобы в результате изображение все же содержало несколько деревьев, и, таким образом, обеспечивалась возможность расчета параметра сомкнутости полога.

На первый взгляд применение данного подхода приводит к положительному результату, структура крон вырисовывается достаточно четко. Однако, при ближайшем рассмотрении (рис.2) можно заметить, что листва в верхней части освещенной кроны идентифицируется как небо. Это происходит из-за того, что соответствующие пиксели имеют достаточно высокую яркость. Данную проблему не удается решить ни одним из способов настройки метода *k*-средних: ни выбором методики инициализации начальных центроидов, ни выбором метрики (расстояния), ни изменением размерности признакового пространства. Вклад неправильно классифицированных пикселей в погрешность оценки проективного покрытия представляется достаточно существенным.

Для решения этой проблемы была предложена достаточно простая и эффективная схема (рис.3). Исходные яркости, изначально представленные в пространстве RGB, были преобразованы в пространство Тон-Насыщенность-Яркость (HSV). Оказалось, что всё имеющееся разнообразие оттенков неба (различное время суток, наличие разнообразного вида облачности, неправильно выбранная выдержка и т.п.) в пространстве HSV может быть легко отделено от остальных цветов достаточно простой дискриминантной поверхностью, состоящей из сектора и цилиндра (см. рис.3). Приведем параметры элементов, составляющих дискриминантную поверхность (приведенные к единице). Центральный цилиндр: Тон – от 0 до 1 (все цвета), Насыщенность – от 0 до 0.2, Яркость – от 0.85 до 1. Сектор цилиндра: Тон – от 190/360 до 240/360 (центральный цвет - голубой), Насыщенность – от 0 до 1 (можно от 0.2 при наличии цилиндра с указанными параметрами), Яркость – от 0.7 до 1.

Для повышения диапазона правильно обрабатываемых изображений после перехода в пространство HSV производилась нормировка яркостей на соответствующий процентиль 99.9%. Теоретически (в идеальном случае) более правильно было бы нормировать просто на максимальную яркость. Однако, необходимо учитывать что искажения, которые дает сжатие *jpeg*, даже для достаточно темного неба (в общем плане) могут давать некоторое количество ложных ярко белых пикселей (максимальная яркость). Как правило, это происходит для пикселей, соответствующих очень малым (точечным) внутрикрупным просветам. Выбранное значение было подобрано из чисто эмпирических соображений на основе имеющихся данных.

Приведем формулы для расчета проекционных характеристик. Пусть S – площадь всех пикселей фотоизображения, $S_{foliage}$ – площадь пикселей, соответствующих листве, S_{sky} – площадь пикселей, соответствующих небу. Если прочие элементы отсутствуют на изображении, то $S = S_{foliage} + S_{sky}$. В нашем случае присутствуют ветви и стволы. При существующем фотоматериале, возможности осуществления автоматического распознавания различного типа древесной коры нет. Соответствующие площади будут причислены к площади листвы. Этот пункт в дальнейшем следует исправить за счет усовершенствования схемы измерений.

Площадь проективного покрытия вычисляется по формуле

$$S_{ProjCov} = \frac{S_{foliage}}{S}.$$

Пиксели неба разделяются на межкрупные S_{big} и внутрикрупные S_{little} просветы – $S_{sky} = S_{big} + S_{little}$. Площадью кроны будем называть сумму пикселей листьев и пикселей внутрикрупных просветов $S_{crown} = S - S_{big}$. Сомкнутость полога, это отношение площади, занимаемой кронами к площади всех пикселей

$$D_{canopy} = \frac{S_{crown}}{S} = 1 - \frac{S_{big}}{S}.$$

Плотность кроны это отношение площади листьев к площади кроны

$$D_{crown} = \frac{S_{foliage}}{S_{crown}} = \frac{S_{foliage}}{S - S_{big}}.$$

Очевидно, что $S_{ProjCov} = D_{canopy} \cdot D_{crown}$. Именно характеристики плотности полога и плотности крон являются основными в моделях восстановления значений фитомассы и других параметров лесной растительности по данным гиперспектрального зондирования. Таким образом, для вычисления всех проекционных параметров нам необходимо определить площади $S_{foliage}$ и S_{big} .

По описанной методике были обработаны все фотографии лесного полога, для которых имеются геоботанические описания. Были обработаны десятки изображений для разных значений плотности лесного полога и плотности крон разного породного состава. Для обработки использовалась только центральная квадратная область, соответствующая интерквартильному интервалу по меньшей размерности. Наиболее интересные примеры, соответствующие конкретным выделам с преобладанием сосняков большого возраста, березняков и более молодых сосновых насаждений, приведены на рис.4-6, соответственно. Можно видеть особенности исходных фотоизображений, сомкнутости полога, плотности крон и проективного покрытия. Эти же параметры входят в рассматриваемые модели формирования уходящего излучения, регистрируемого аппаратурой гиперспектрального зондирования.

Можно отметить перспективность предлагаемого подхода к валидации результатов обработки гиперспектральных изображений. Перспективы связаны с тем, что результаты наземных обследований тестовых участков способствуют фото-отображению лесной растительности в терминах тех параметров, которые участвуют в моделях восстановления объема фитомассы и других параметров соответствующих древостоев.

Заключение

Перспективы разрабатываемого программно-алгоритмического обеспечения видятся в его адаптации на борту аэроносителя с обоснованием оптимального набора каналов гиперспектрального зондирования под конкретные ландшафты для уменьшения избыточности получаемых потоков данных. Применение многопроцессорных суперкомпьютеров для тематической обработки данных позволяет решать задачи распознавания природно-техногенных объектов и оценки параметров их состояния (например, для лесной растительности определение породного состава, объема фитомассы и общей биомассы древесины, высоты и возраста древостоев, а также их бонитета). Автоматизация процесса передачи конечной информационной продукции обработки данных в региональные комитеты по экологии и природопользованию в виде тех параметров, которые используются для управления регио-

нальным развитием, а не виде «полуфабрикатов» (например, вегетационных индексов, как это обычно делается) будет способствовать решению рассматриваемых прикладных задач с обоснованной точностью.

Исследования выполняются при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, № 14.740.11.1091, проекта РФФИ № 11-07-12006-офи_м.

Литература

1. 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 // Исследование Земли из космоса, 2009. №2. С.36-54.
2. Козодеров В.В., Дмитриев Е.В. Аэрокосмическое зондирование почвенно-растительного покрова: модели, алгоритмическое и программное обеспечение, наземная валидация // Исследование Земли из космоса, 2010. №1. С.69-86.
3. 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 // Исследование Земли из космоса, 2010. №5. С.59-68.
4. Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Дмитриев Е.В., Каменцев В.П. Исследование лесных и торфяных пожаров по данным гиперспектрального аэрозондирования // Исследование Земли из космоса, 2011. №5. С.70-79.
5. Козодеров В.В., Дмитриев Е.В. Дистанционное зондирование лесного покрова: инновационный подход // Вестник Московского государственного университета леса, 2012. №1 (в печати).
6. Deering D.W., Eck T.F., Banerjee B. Characterization of the reflectance anisotropy of three boreal forest canopies in spring-summer // Remote Sensing of Environment, 1999. V.67. P.205-229.
7. Kozoderov V.V., Dmitriev E.V. Remote sensing of soils and vegetation: pattern recognition and forest stand structure assessment // International Journal of Remote Sensing, 2011. V32. P.5699-5717.

Programmatic and algorithmic tools to solve problems of natural and anthropogenic objects recognition using hyperspectral airspace imagery

V.V.Kozoderov¹, E.V.Dmitriev², V.P.Kamentsev³, A.S.Karkach²

¹M.V.Lomonosov Moscow State University

E-mail: vkozod@mes.msu.ru

²Institute of Numerical Mathematics of Russian Academy of Sciences

³Tver State University

Basic postulates are described of solution of regional applied problems to recognize natural and anthropogenic objects and to retrieve the forest state parameters using hyperspectral airborne remote sensing data. The technology to solve the problem includes characteristic features of the instruments used while forest monitoring of various species, canopy density and crowns density of the relevant stands. Examples are given of the ground-based validation of the obtained information products of hyperspectral imagery processing in terms of the same parameters which are incorporated into the proposed modeling description of outgoing radiation registered by the hyperspectral remote sensing instruments.

Keywords: hyperspectral airspace imagery, natural and anthropogenic objects, recognition, programmatic and algorithmic tools..