

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ САМОЛЕТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

© 2013 г. В. В. Козодеров^{1*}, В. Д. Егоров²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

²Институт вычислительной математики РАН, Москва

*E-mail: vkozod@mail.ru

Поступила в редакцию 12.05.2013 г.

Предлагается автоматизированная система разделения спектральных плотностей энергетической яркости, регистрируемых аппаратурой гиперспектрального самолетного зондирования, на основе рассмотрения средних спектров и их внутриклассовой изменчивости с разделением пикселей, относящихся к освещенным и затененным элементам кроны деревьев разного породного состава и возраста. В качестве априорных сведений используются картосхемы наземной лесотаксации для выбранной территории самолетного зондирования. Система в автоматизированном режиме на основе выделенных контуров объектов на обрабатываемом изображении формирует базу данных выбранных классов объектов. Демонстрируются возможности различимости этих классов на основе величин смещения спектров при переходе от полосы поглощения хлорофилла к максимуму спектральной отражательной способности растительности.

Ключевые слова: обработка гиперспектральных изображений, распознавание объектов, характерные признаки растительности

DOI: 10.7868/S0205961413060031

ВВЕДЕНИЕ

Основу приложений методов аэрокосмической гиперспектрометрии составляет построение разных типов классификаторов (вычислительных процедур) для распознавания природно-техногенных объектов оценки содержания хлорофилла (основного пигмента листы/хвои) по гиперспектральным изображениям (ГСИ). Качество классификатора зависит как от размера обучающей выборки, так и ценности используемых выборочных данных. Неизбежно возникает задача оптимизации свойств классификатора, т.е. максимизации возможности его применения для обучающего набора данных, который не всегда применим для тестового набора данных, а также его способности к генерализации, т.е. возможным приложениям классификатора для тестовых образов, которые изначально не закладывались на стадии обучения.

Исследования последних лет показали, что данные гиперспектрального аэрокосмического зондирования способствуют улучшению точности распознавания разных типов растительных покровов. От многоканальных приборов, которые позволяют получать изображения земной поверхности на ограниченном числе каналов (обычно не превышающем десяти) в видимой области спектра солнечного излучения и ближнем ИК-диапазоне (БИК), ин-

терес исследовательского сообщества смещается в сторону использования гиперспектральных приборов. Такие системы дистанционного зондирования (ДЗ) содержат до нескольких сот спектральных каналов, ширина которых не превышает нескольких нанометров (в отдельных случаях это может быть 10–20 нм).

Первые приложения данных самолетной гиперспектрометрии носили в значительной степени экологический характер, открывая новые возможности мониторинга загрязнений природной среды от воздействия добычи полезных ископаемых (Collins et al., 1983). Одной из первых специализированных систем дистанционной гиперспектрометрии считается аппаратура Airborne Visible and Infrared Imaging Spectrometer – AVIRIS (самолетный спектрометр, дающий изображения в видимой и ИК-областях) (Vane, Goetz, 1988). Аппаратура обеспечивала получение данных синхронно в сотнях спектральных каналов в области длин волн 0.4–2.5 мкм с шириной каждого канала в 10 нм и выше. При таком разрешении в регистрируемых данных проявляются отдельные линии и полосы поглощения солнечного излучения атмосферными газами и другими соединениями: кислородом, озоном, водяным паром и др. Было показано, что полосы поглощения основных при-

родных минералов в горных породах и почвах расположены в области длин волн более 1 мкм. Коротковолновые спектральные каналы полезны с точки зрения оценки состояния растительности.

Отметим следующие научные и прикладные задачи, решаемые с помощью данных гиперспектрального зондирования: улучшение информационного содержания спектральных данных в процессе обнаружения стрессового состояния растительности (Carter, 1998); идентификация малых различий в проективном покрытии вегетирующей растительности (McGwire et al., 1999); изучение биохимических характеристик, таких как содержание азота в растениях (Cugan et al., 1997); различение разных типов растительного покрова (Janetos, Justice, 2000); вариации влажности посевов (Penuelas et al., 1995); определение концентрации пигментов листьев растений (Blackburn, Steele, 1999); моделирование количественных характеристик урожайности с.-х. культур (Thenkabail, 2002); улучшение обнаружения изменений в разреженной растительности (Lyon et al., 1998).

Основная проблема развития возникающих приложений – отсутствие реальных обоснований того, какие объекты можно распознать по данным аэрофотосъемки и по данным многоспектрального и гиперспектрального зондирования в сравнении с теми возможностями, которые реализуются с помощью опытного специалиста-дешифровщика. Роль такого специалиста резко уменьшается при использовании всей совокупности данных сотен каналов гиперспектрального зондирования. Преимущества данных гиперспектрального зондирования над двумя другими упомянутыми типами аэро- и космической съемки – в доказательстве повышения точности распознавания объектов. Кроме того, в прежних приложениях данных ДЗ далеко не всегда требовалась обработка данных в реальном масштабе времени. В новых приложениях возрастает роль автоматизированных систем распознавания объектов по данным гиперспектрального зондирования. В работе (Chang et al., 2001) демонстрируется начальный этап использования параллельных вычислительных алгоритмов распознавания объектов для повышения эффективности обработки ГСИ. Использовались данные аппаратуры AVIRIS и 210-канальной аппаратуры, названной “Экспериментальная аппаратура по сбору цифровых гиперспектральных изображений” (Hyperspectral Digital Imagery Collection Experiment – HYDICE), разработки Военно-морской исследовательской лаборатории (Naval Research Laboratory – NRL) США.

Значительная часть исследований разных видов растительности по данным самолетной гиперспектрометрии традиционно сосредоточена в спектральной области 400–1000 нм. Активно участвуют в создании таких приборов и отече-

ственные разработчики. На протяжении последних лет к опытной эксплуатации гиперспектральной аппаратуры производства НПО “Лептон”, г. Зеленоград, причастны авторы данной статьи. Это гиперспектральные камеры (ГСК), позволяющие получать цифровые попиксельные изображения при установке на самолетные платформы с разрешением не хуже, чем 2–3 м на пиксел изображения с высоты полета самолета в 1–2 км над поверхностью.

В работе (Козодеров, Егоров, 2011) предлагается создание базы данных самолетного гиперспектрального зондирования на основе группирования спектров по величине смещения по длине волны области перехода от основной полосы поглощения солнечного излучения хлорофиллом к максимуму спектральной отражательной способности растительности. В работе (Козодеров и др., 2012) показаны особенности приложений данных гиперспектрального самолетного зондирования для решения задач распознавания природно-техногенных объектов и оценки параметров, характеризующих состояние лесной растительности.

Настоящая публикация посвящена демонстрации результатов автоматизации обработки данных гиперспектральной аппаратуры, содержащей около 290 спектральных каналов, которая устанавливалась на самолетную гиостабилизированную платформу во время летной кампании 2011 г. и позволяла получать изображения зондируемой поверхности. Изображения представляют собой матрицы размером примерно 500 × 10000 пикселей, где 500 – это ширина трека, а 10000 – длина трека, которая определяется включением и выключением гиперспектральной камеры на борту самолета. Параллельно включенный GPS-навигатор дает информацию о начале и конце записи трека с привязкой по широте и долготе местности с точностью до секунды. Около двух десятков таких записанных треков (это несколько десятков гигабайт упакованной информации) используются для предлагаемой автоматизации обработки получаемых ГСИ.

Иллюстрируемые примеры относятся к тестовой территории Тверской обл. С точки зрения географической привязки данных гиперспектральной дистанционной съемки, район интересен тем, что для него существуют достаточно детальные лесотаксационные карты местности, на которых отображен породный состав лесной растительности. Карты эти были построены по данным наземных обследований в форме отдельных кварталов и выделов внутри этих кварталов.

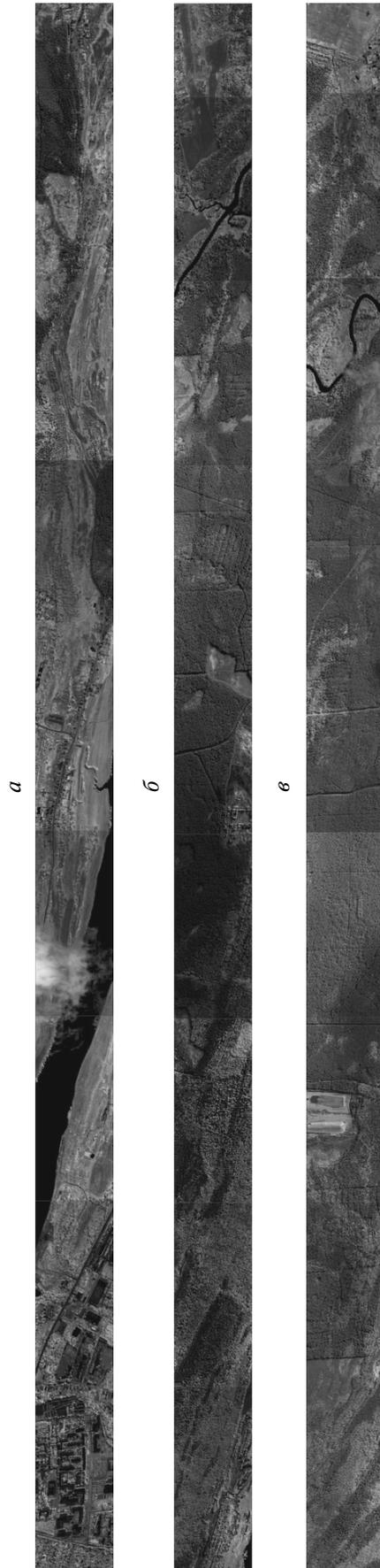


Рис. 1. Изображение трех самолетных треков на канале 278 (длина волны 908.5 нм), полученных 12 августа 2011 г. в три разных момента времени: *а* — 11 ч 04 мин 17 с; *б* — 11 ч 46 мин 25 с; *в* — 11 ч 59 мин 25 с.

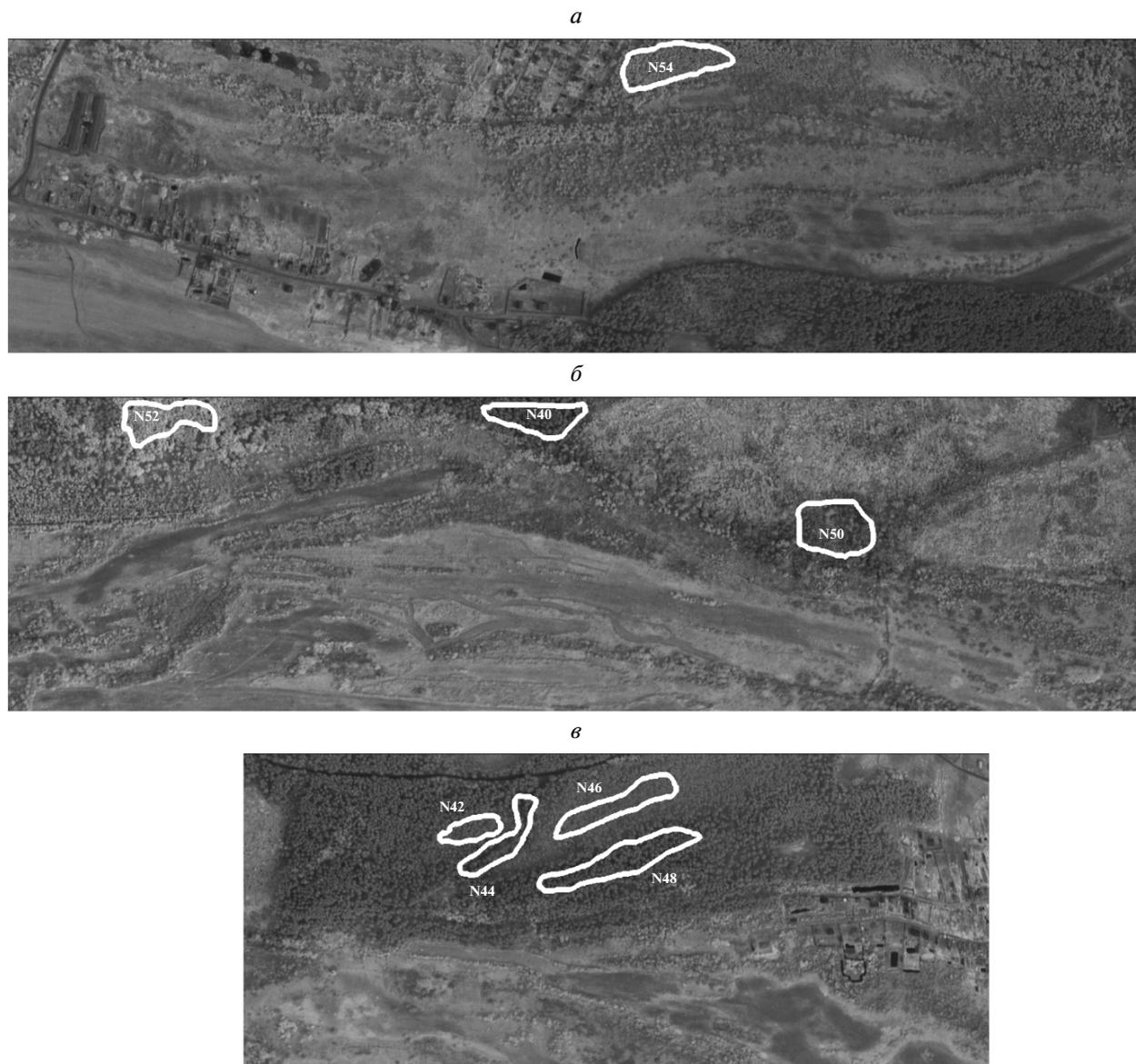


Рис. 2. Фрагменты правой части рис. 1а и контуры участков, выделенных по данным наземной лесотаксации: а – участок № 54, соответствует преобладающим березнякам; б – участки № 52, 40, 50 – соответствуют преобладающим березнякам, соснякам, ельникам; в – участки № 42, 44, 46, 48 – соответствуют преобладающим соснякам разного возраста.

ОСОБЕННОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ПО СПЕКТРАЛЬНЫМ ПРИЗНАКАМ

Возможности распознавания природно-техногенных объектов по спектральным признакам основаны на различиях регистрируемых спектральных плотностей энергетической яркости (СПЭЯ) в указанном диапазоне длин волн. Такие объекты, как водные поверхности, открытые почвы, проселочные и шоссезные дороги, разные типы растительности уверенно распознаются разработанными методами. Значительно сложнее различить по спектральному характеру разные типы

лесной растительности. Несмотря на то, что известные кривые спектрального хода, соответствующие разным породам деревьев, различаются между собой (Козодеров, Кондранин, 2008), при самолетной съемке с разрешением 1–3 м на пиксел все спектры (в пределах самолетного трека может содержаться до 5 и более млн спектров) на первый взгляд выглядят весьма похоже. Обработка такого числа спектров традиционными методами представляется весьма проблематичной и затратной по времени. Цель исследований авторов данной публикации – создание эффективной автоматизированной системы обработки данных

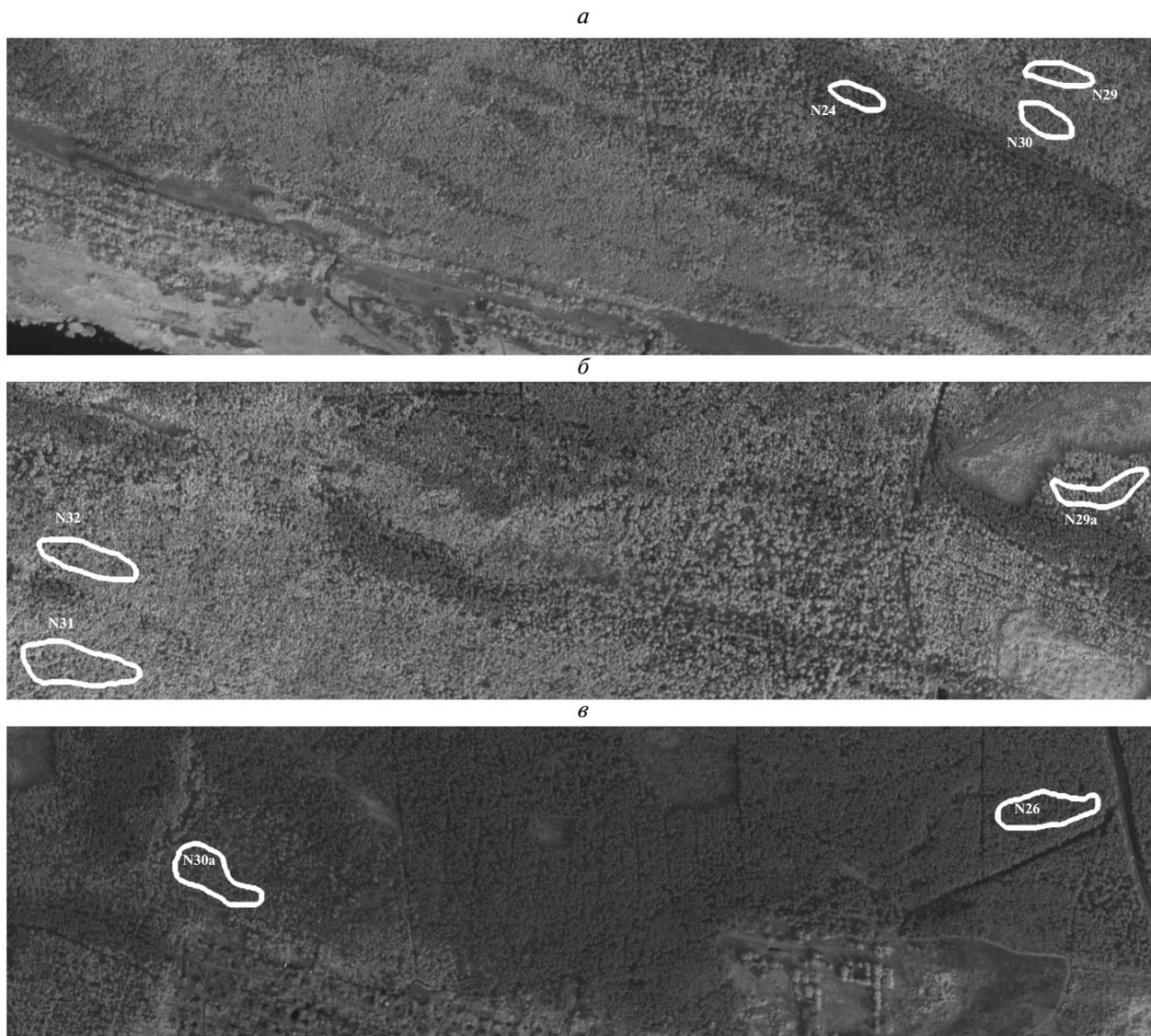


Рис. 3. Фрагменты рис. 1б и контуры участков, выделенных по данным наземной лесотаксации: *а* – участок № 24 с преобладающими сосняками, № 29, 30 – с преобладающими березняками разного возраста; *б* – участки № 29а, 31, 32 с преобладающими березняками разного возраста; *в* – участки № 26, 30а с преобладающими сосняками и березняками; *г* – участок № 33 с преобладающими сосняками; *д* – участки № 25, 34 с преобладающими сосняками разного возраста, № 27, 28 – с преобладающими ельниками, № 35 – с преобладающими березняками.

гиперспектральной съемки, в которой по нажатию кнопки можно было бы обработать спектры с целого участка территории в реальном масштабе времени на обычном современном персональном компьютере.

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕДУР АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Результаты функционирования разработанной системы обработки данных гиперспектрального самолетного зондирования иллюстрируются ниже

на примерах трех самолетных треков. Каждый из треков разбит на фрагменты размером примерно в 1 Гбайт, так что трек представляет шесть фрагментов. Это позволяет максимально эффективно использовать память обычного 32-битного (разрядного) персонального компьютера. Если планировать работу так, что обрабатывать спектры с участков лишь одного фрагмента, а после завершения переходить к следующему фрагменту, то скорость работы системы будет максимальна.

Входные данные для системы представляют собой файл из строк (может быть даже текстовым), каждая строка, задающая один спектр, – это несколько чисел, первое число – идентификатор

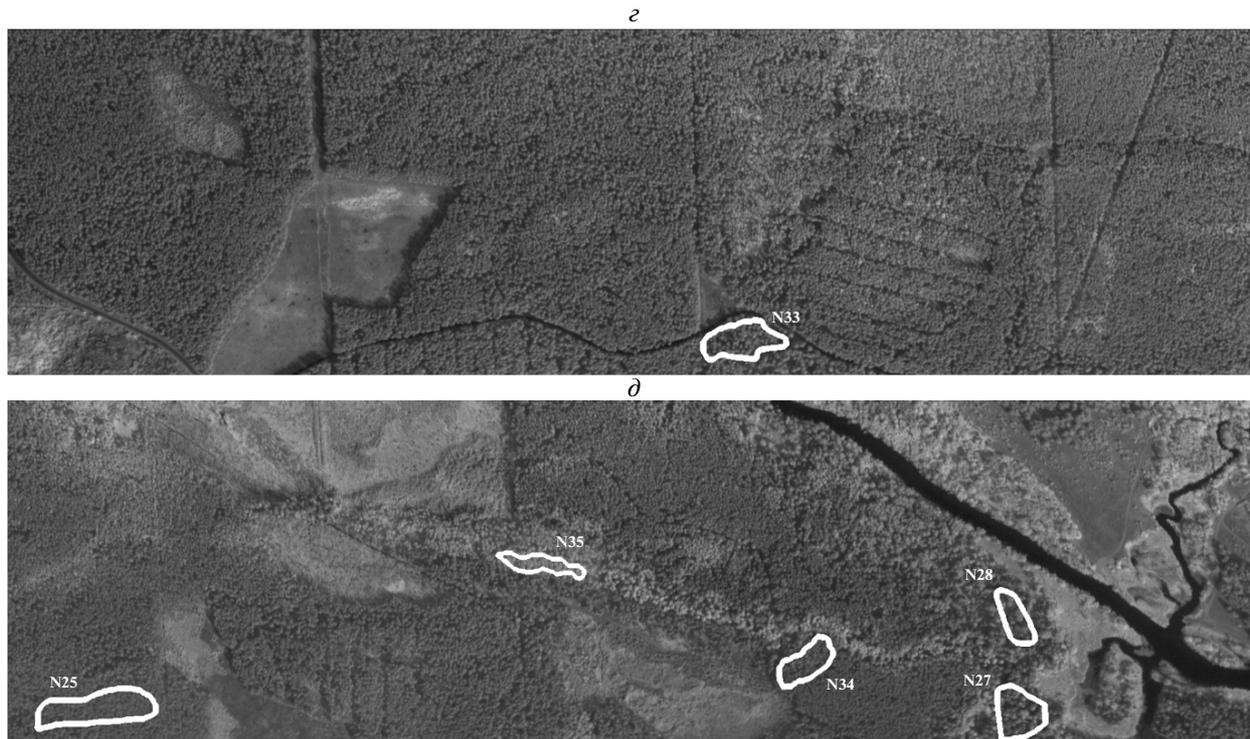


Рис. 3. Окончание.

продолжения счета спектров (если не ноль — переход к следующему спектру — строке входного файла, если ноль — завершение считывания). Система работает так, что не требуется указывать число спектров для обработки, нужно лишь помнить, что одновременно может быть обработано до ста тысяч спектров. Далее в строке задаются числа, определяющие номер трека (1–3), номер фрагмента в треке (1–6) и координаты пиксела во фрагменте (до 500 поперек трека и до целого числа, характеризующего максимальную длину фрагмента). Можно сменить направление считывания изображения вдоль и поперек трека — это определяется отдельным текстовым файлом, где задаются соответственно +1 или -1.

В систему включены некоторые другие сервисные функции, которые кажутся существенными при длительной работе с большими массивами данных. Так, созданы оригинальные программные средства, которые позволяют при очерчивании контура на цифровом изображении участка местности (специальном шаблоне), аналогичном изображению участка трека, считывать координаты всех пикселов либо по периметру контура, либо во внутренней части этого контура. Это позволяет автоматизировать процесс создания файла входных данных для системы обработки спектров. Система ориентирована на вычисление средних значений и дисперсий групп спектров, а также ряда других параметров, таких как смещения каждого спектра или средние смещения групп спектров

по длине волны, которые были использованы авторами при отладке схем распознавания типов подстилающей поверхности. Эта часть созданной автоматизированной системы обработки гиперспектральных данных предполагает постоянное обновление в дальнейшем, если потребуются включать новые критерии распознавания или менять схемы расчета параметров, соответствующих этим критериям.

В автоматическом режиме возможен как цифровой (т.е. ведется запись и исходных спектров, и их средних значений и дисперсий), так и графический вывод посчитанных системой результатов обработки спектров. Для графического вывода используется та же основа, которая применена и при оцифровке координат пикселов с заданного контура цифрового изображения. Эта графическая программная основа постоянно развивается одним из авторов, и была применена ранее при визуализации результатов обработки многоканальных спутниковых данных и далее переработана для использования при обработке данных гиперспектральной съемки (Kozoderov, Egorov, 2011).

НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ РЕАЛИЗАЦИИ РАЗРАБОТАННОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

Здесь приводятся примеры обработки около 40 участков самолетных треков гиперспектральной самолетной съемки, проведенной в августе

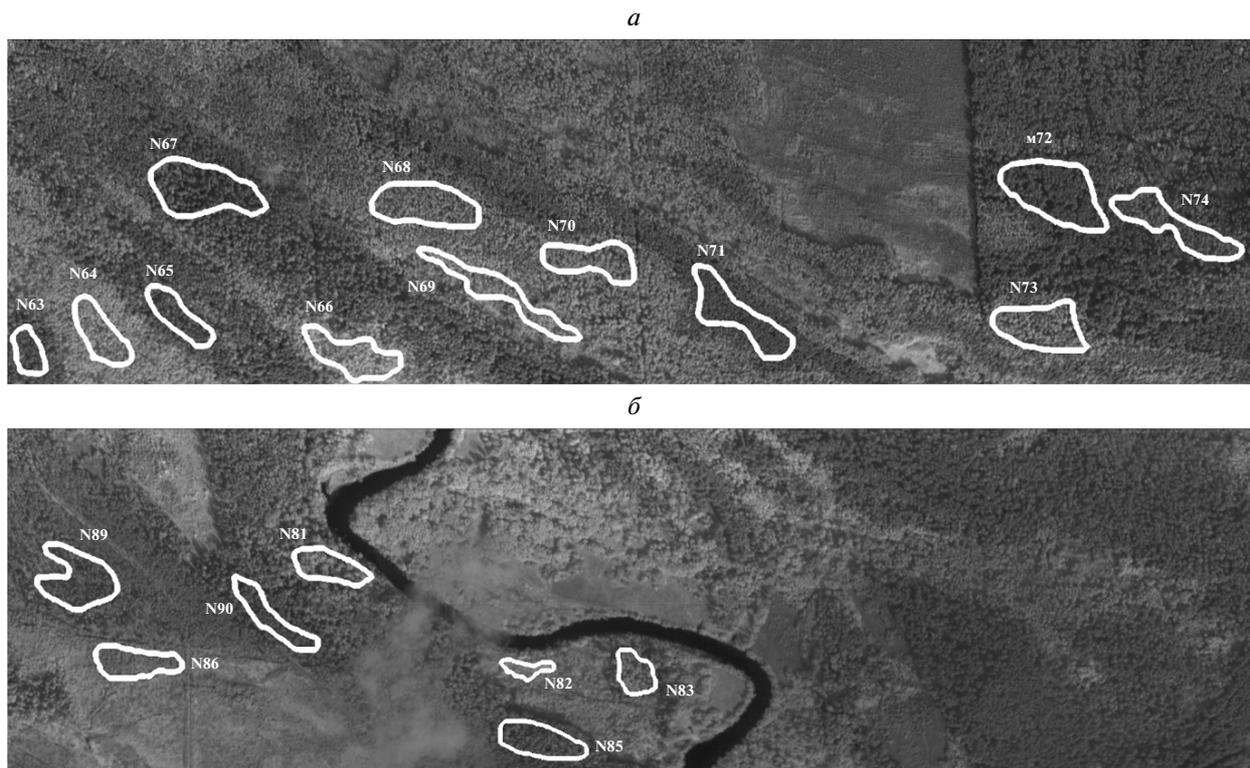


Рис. 4. Фрагменты рис. 1*в* и контуры участков, выделенных по данным наземной лесотаксации: *а* – участки № 63, 65, 67, 71, 72 – соответствуют преобладающим соснякам разного возраста и № 64, 66, 68, 69, 70, 73, 74 – преобладающим березнякам разного возраста; *б* – участки № 85, 86, 89, 90 – соответствуют преобладающим соснякам разного возраста и № 81, 82, 83 – преобладающим березнякам разного возраста.

2011 г. Каждый участок содержит примерно от двух до десяти тысяч спектров, так что суммарное число обработанных спектров составляет примерно триста тысяч спектров. Участки для обработки были выбраны преимущественно с преобладанием на них сосновой, еловой и березовой лесной растительности. Участки привязаны к имеющимся данным наземной лесотаксации.

На рис. 1 приведены примеры самолетных треков за три разные момента времени съемки на дату 12 августа 2011 г. на канале 278 (длина волны 908.5 нм) гиперспектрометра: 11 ч 04 мин 17 с (рис. 1*а*), 11 ч 46 мин 25 с (рис. 1*б*) и 11 ч 59 мин 25 с (рис. 1*в*) соответственно. Характерные ориентиры представлены р. Волга: слева относительно центра на рис. 1*а* и в самом левом углу на рис. 1*б*.

Данные самолетных треков (рис. 1) были наложены на картосхемы наземной лесотаксации. Контуры соответствующих выделов преобладающих пород лесотаксации разного возрастного состава можно очертить также на данных рис. 1. Оконтуренные участки этих выделов представлены на рис. 2–рис. 4. Нумерация участков идет от 2 до 99, а в некоторых случаях и с буквенными индексами, поскольку всего было рассмотрено более 100 участков и из них отобрано около 40.

Фрагменты первого из указанных треков (рис. 1*а*) с выделенными контурами лесной растительности разного породного состава и возраста, известными из данных наземной лесотаксации, представлены на рис. 2*а, б, в* соответственно. На рис. 2*а* выделен контур преобладающих березняков. Три выделенных контура на рис. 2*б* относятся к преобладающим березнякам, соснякам и ельникам, соответственно. Контуры рис. 2*в* соответствуют соснякам разного возраста. Аналогичным образом на рис. 3*а–д* представлены фрагменты изображения рис. 1*б* с преобладающей на них лесной растительностью разного породного состава и возраста в пределах выделенных контуров точно так же, как на рис. 4*а, б* – фрагменты изображения рис. 1*в* (пояснения – в подрисуночных подписях).

Цель обработки групп спектров, соответствующих разным типам лесной растительности (сосна, ель, береза), – выработать критерий (или критерии), позволяющие отличать группы спектров, соответствующих заранее известным и разным при этом типам лесной растительности. За основу здесь выбран критерий по типу смещения спектра на длинах волн 670–780 нм (Козодеров, Егоров, 2011). По сравнению с использованным ранее расчетом величины смещения, теперь применен

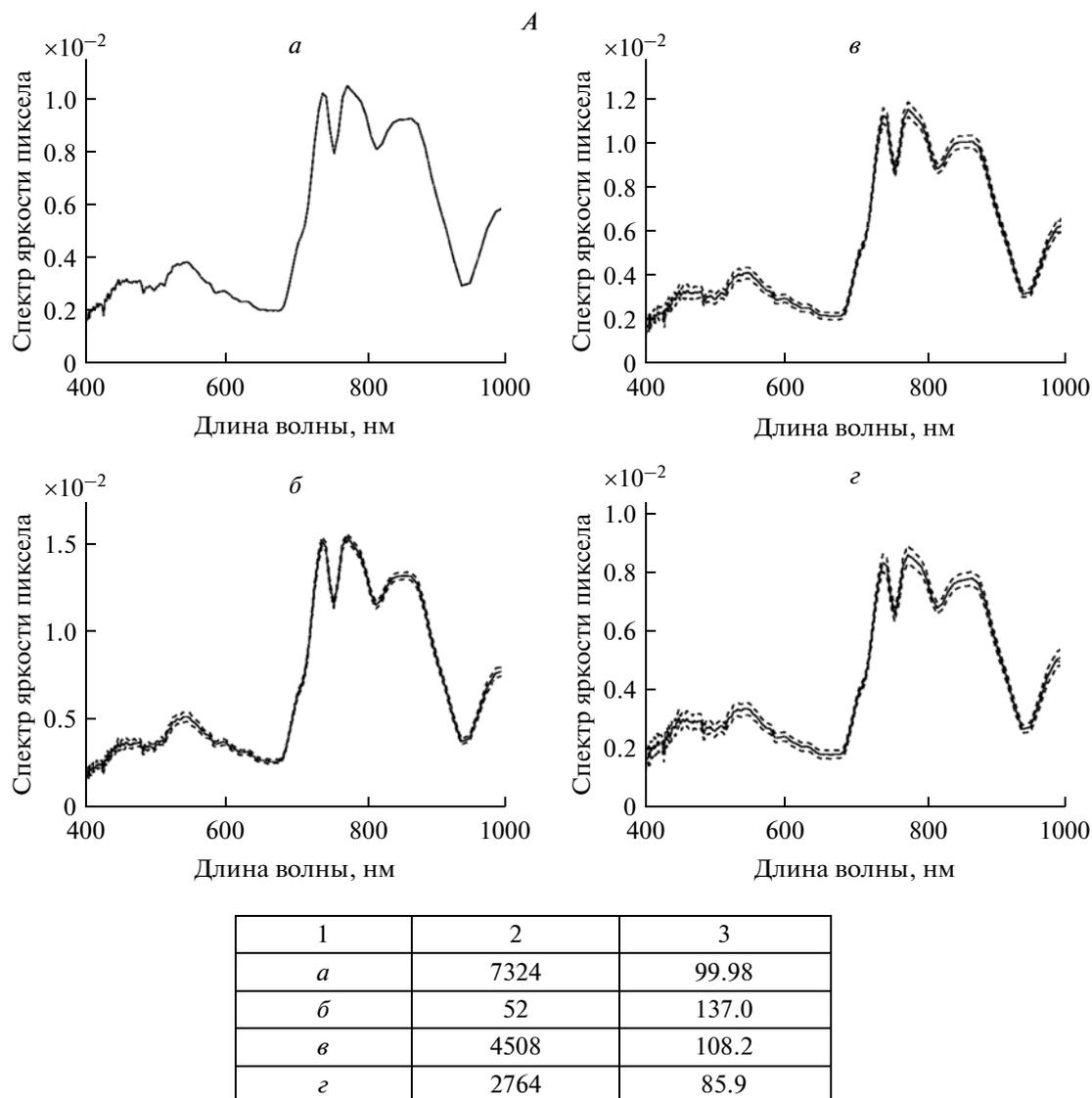


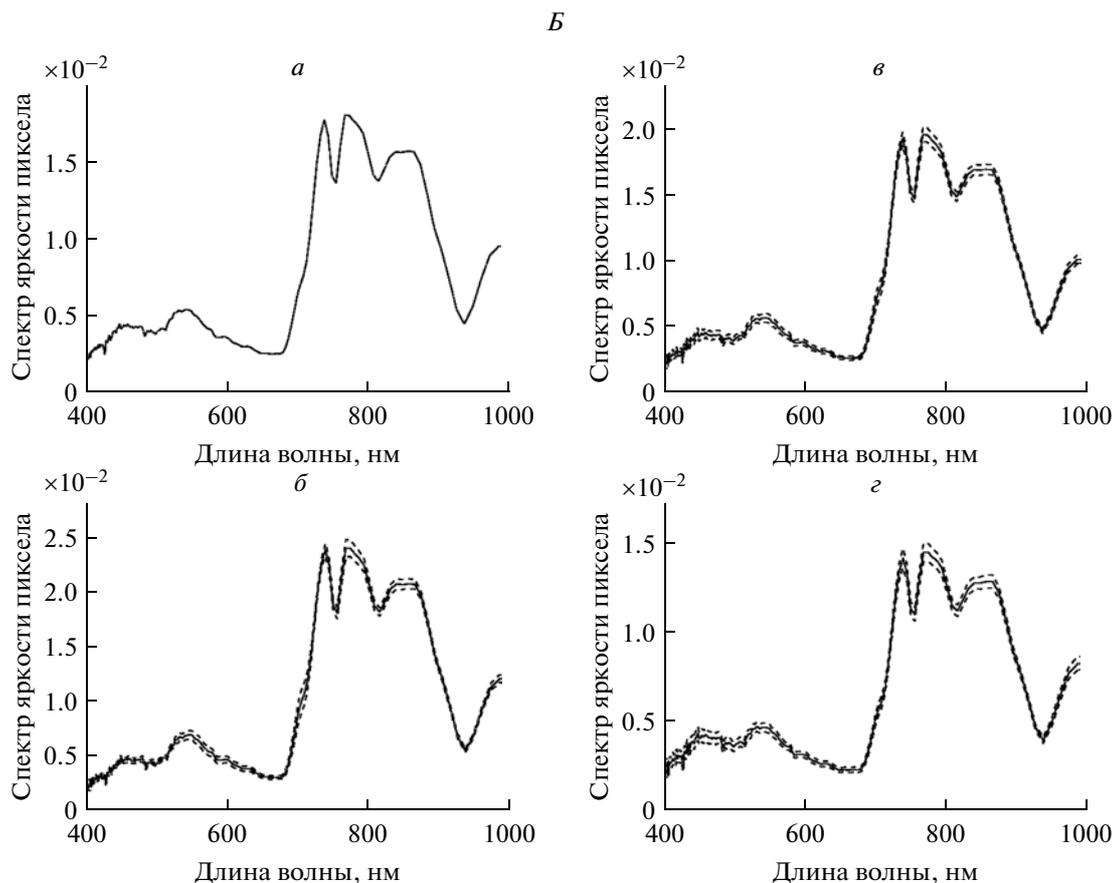
Рис. 5. Средние значения спектральной плотности энергетической яркости в единицах Вт/(см² мкм стер) для: *а* – всего выбранного участка, а также эти же значения вместе со среднеквадратическими отклонениями (пунктир) для ансамблей градаций: *б* – 80–100%, *в* – 40–80%, *г* – 0–40% относительно их максимальных значений. Три столбца прилагаемых таблиц характеризуют: 1 – иллюстрируемые примеры спектров (*а–г*); 2 – общее число пикселей в пределах выделенных контуров; 3 – интегральные значения спектров. Соответствие участков: *А* – № 25 (сосняк); *Б* – № 86 (сосняк); *В* – № 27 (ельник); *Г* – № 28 (ельник); *Д* – № 35 (березняк); *Е* – № 66 (березняк); *Ж* – № 82 (березняк).

вновь созданный обобщенный параметр смещения, который можно рассчитывать не обязательно на интервале 670–780 нм, но и на более широком спектральном диапазоне вплоть до (400–1000 нм), хотя практика показывает, что лучше не использовать точки спектра левее 450 нм. Параметр смещения теперь рассчитывается с использованием некоторой весовой функции, так что можно увеличить или уменьшить вклад в величину смещения участков спектра на малых или больших длинах волн (в пределах 400–1000 нм). В процессе обработки выше указанных участков трех самолетных треков варьировались парамет-

ры расчета смещения спектров, а также ширина диапазонов интегральных яркостей, на которые разбивались группы спектров с каждого участка.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Представленные на рис. 2–4 контуры выделенных объектов должны служить для обучения используемого классификатора (вычислительной процедуры) по соответствующей тестовой выборке. Процесс обучения состоит в нахождении коэффициентов связи между регистрируемыми значениями СПЭЯ и априорными сведениями о



	1	2	3
<i>а</i>		4874	160.56
<i>б</i>		86	208.5
<i>в</i>		3244	171.5
<i>г</i>		1544	135.0

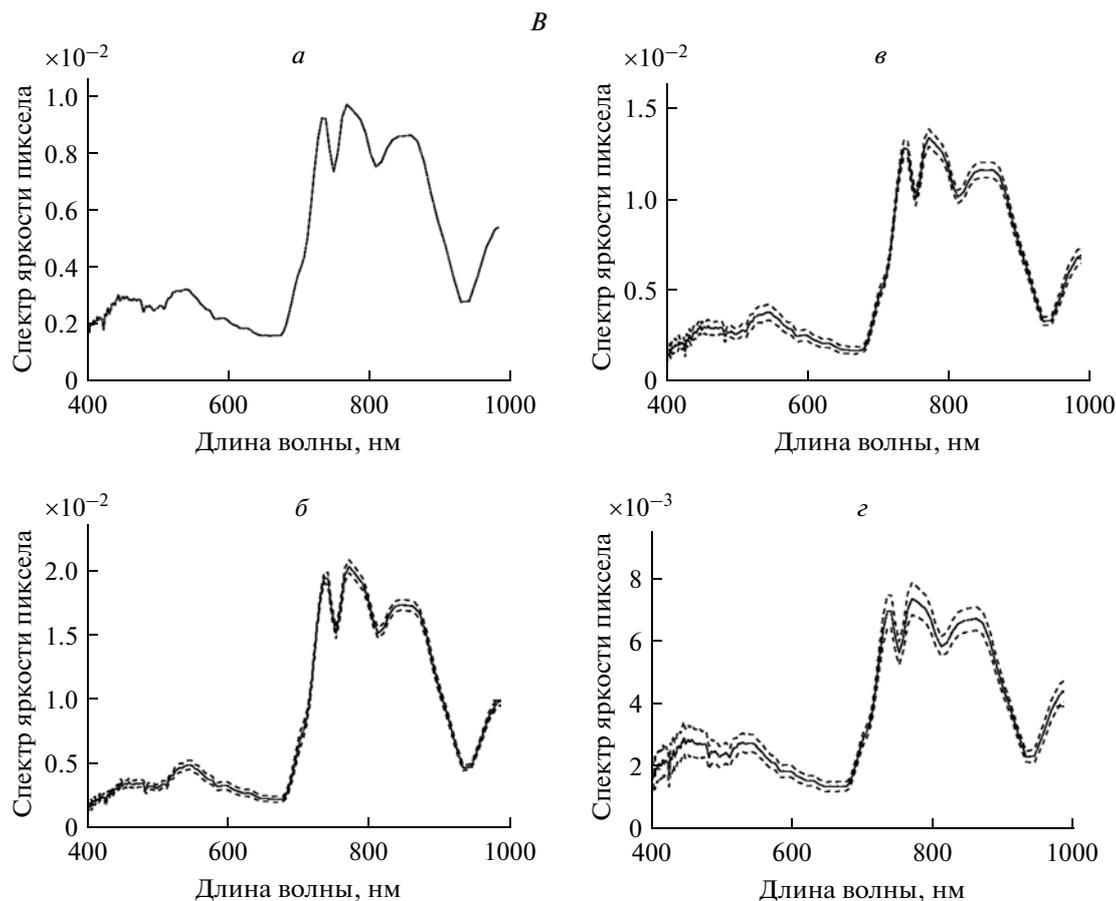
Рис. 5. Продолжение.

принадлежности выделенных контуров к выбранным классам объектов. Результаты обучения распространяются на все пиксели обрабатываемого изображения. Существенной, однако, оказывается мера пространственной изменчивости спектров в пределах этих контуров. Эта изменчивость связана с чередованием освещенных и затененных элементов разрешения (пикселей), относящихся к соответствующим классам объектов.

Данные рис. 5 характеризуют средние спектры и их среднеквадратические отклонения для семи участков, относящихся к “чистым выделам” (100% преобладающей породы) в общей совокупности выделенных контуров. На рис. 5а представлены средние значения СПЭЯ для каждого из выделенных участков, а также средние значения СПЭЯ и их среднеквадратические отклонения по диапазонам интегральных яркостей: 100–80% (рис. 5б),

80–40% (рис. 5в), 40–0% (рис. 5г). Эти градации соответствуют разным уровням солнечного освещения объектов: от полностью освещенных крон деревьев (рис. 5б) до полностью затененных фитоземлеугодий лесной растительности (рис. 5г). К каждому из графиков на рис. 5а–г прилагается таблица, показывающая общее число пикселей в пределах выбранных контуров, их распределение по указанным градациям солнечного освещения и интегральные значения иллюстрируемых СПЭЯ. Данные рис. 5А и рис. 5Б соответствуют соснякам (участки № 25 и № 86), рис. 5В и рис. 5Г – ельникам (участки № 27 и № 28), рис. 5Д–Ж – березнякам (участки № 35, № 66, № 82).

Сравнение данных рис. 5А и 5Б показывает, что средний спектр всего участка № 86 более чем в 1.5 раза превышает средний спектр участка № 25. Это связано с тем, что возраст сосняков участка



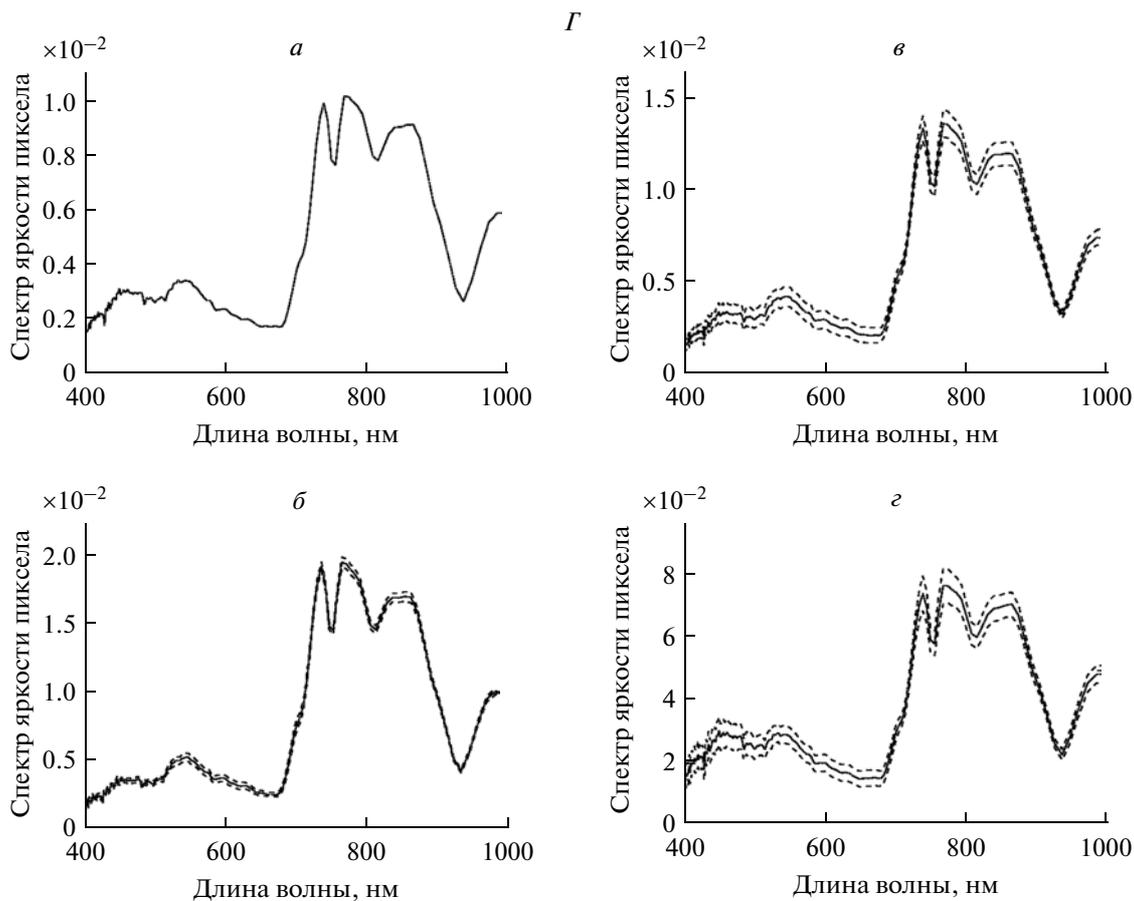
1	2	3
<i>а</i>	4624	90.56
<i>б</i>	68	165.6
<i>в</i>	1532	119.2
<i>г</i>	3024	74.4

Рис. 5. Продолжение.

№ 25 больше, чем возраст сосняков участка № 86: по мере увеличения возраста возрастает число пикселей освещенных крон в пределах выбранных контуров этих объектов. Сказанное подтверждается также данными для градаций 100–80% освещения крон. Таких пикселей не очень много в пределах выделенных контуров (52 из общей совокупности 7324 для участка № 25 в сравнении с 86 из общей совокупности 4874 для участка № 86). Соответственно интегральные значения яркости возрастают от 99.98 до 160.56 Вт/м², а для выбранной градации от 137.0 до 208.5 Вт/м². Спектры затененных фитоэлементов (градации 0–40%) в определенной степени соответствуют спектрам освещенных фитоэлементов (по-прежнему заметна полоса поглощения хлорофилла 620–670 нм), но амплитуда спектров оказывается приблизи-

тельно в 2 раза меньше для пикселей, относящихся к затененным фитоэлементам. Число таких пикселей уменьшается от 2764 для участка № 25 до 1544 для участка № 86 при том, что интегральные яркости этих градаций возрастают от 85.9 Вт/м² до 135.0 Вт/м² соответственно. Можно видеть, что при переходе от освещенных к затененным пикселям сохраняются характерные свойства растительности в виде полосы хлорофилла. Это означает, что полностью затененные пиксели несут информацию о наличии травянистой и кустарниковой растительности в межкروновых просветах в момент съемки.

Перечисленные особенности формирования спектров и распределения пикселей по градациям яркости сохраняются и для ельников (рис. 5*B* и рис. 5*Г* для участков № 27 и № 28 соответствен-



1	2	3
<i>а</i>	2868	95.73
<i>б</i>	80	163.4
<i>в</i>	1014	122.4
<i>г</i>	1774	77.5

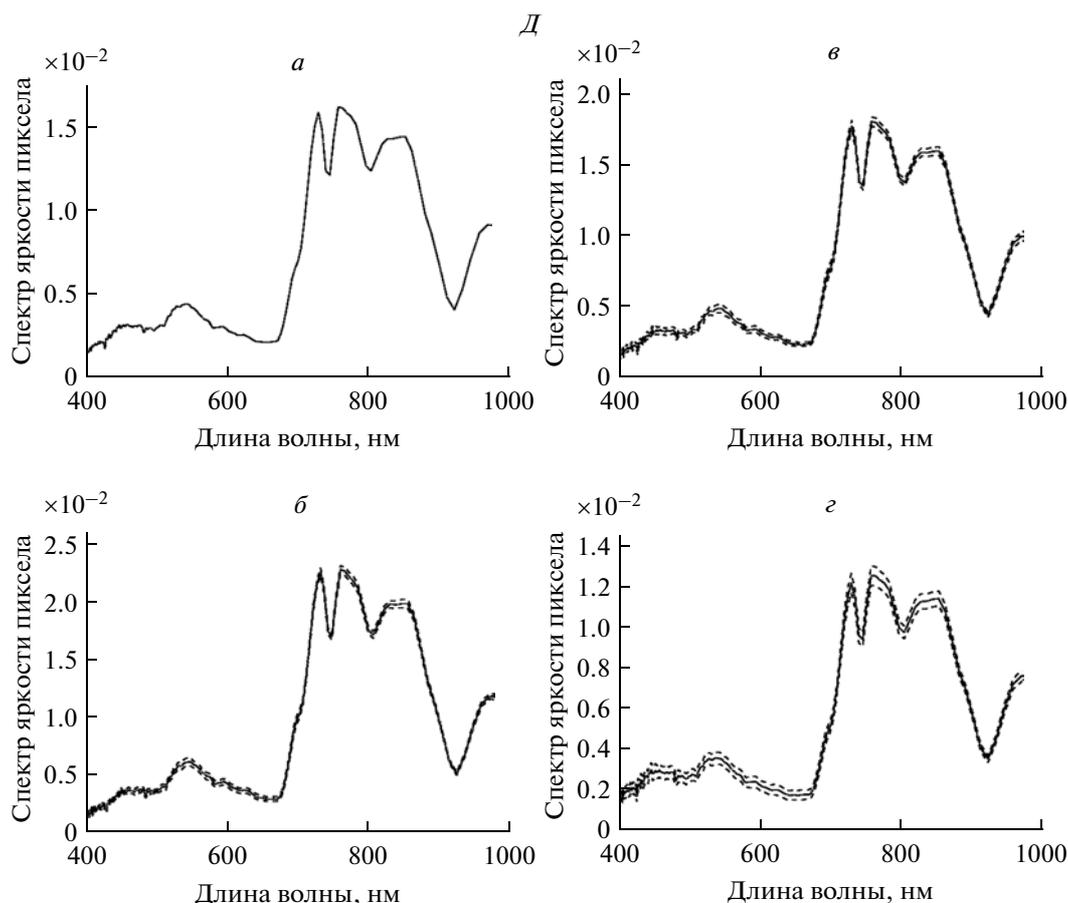
Рис. 5. Продолжение.

но). Здесь, однако, средние значения спектров в пределах выбранных контуров отличаются незначительно (90.56 и 95.73 Вт/м²), а для градаций 100–80% им соответствуют значения 165.6 и 163.4 Вт/м². При этом можно видеть, что изменчивость спектров затененных фитоэлементов для этих ельников разного возрастного состава значительно больше, чем для сосняков, а средние спектры для градаций солнечного освещения 0–40% изменяются слабо (74.4 и 77.5 Вт/м² соответственно).

Средние спектры типичных березняков (рис. 5Д для участка № 35, рис. 5Е для участка № 66, рис. 5Ж для участка № 82) приблизительно в 1.5 раза выше, чем для сосняков и ельников. При общем небольшом числе пикселей, принадлежащих градациям 100–80% освещения (60, 84 и

122 соответственно, из общего числа в несколько тысяч пикселей) можно видеть, что для этих градаций интегральные значения яркостей равны 193.0, 231.0 и 239.8 Вт/м². Вместе с тем для полностью затененных фитоэлементов (градации 0–40%) эти значения убывают до 114.3, 139.7 и 161.1 Вт/м² соответственно. Число таких спектров оказывается в среднем меньше (858, 2562 и 304) в сравнении с тем, что наблюдается для хвойных (сосняки, ельники) пород: там эти цифры достигают 2000–3000.

Необходимость указанной детализации ярких и темных пикселей в пределах выделенных контуров заданных классов объектов связана с тем, что такое разделение освещенных и затененных фитоэлементов лесной растительности приводит к повышению точности распознавания таких объ-



	1	2	3
<i>a</i>		2546	142.24
<i>б</i>		60	193.0
<i>в</i>		1628	155.1
<i>г</i>		858	114.3

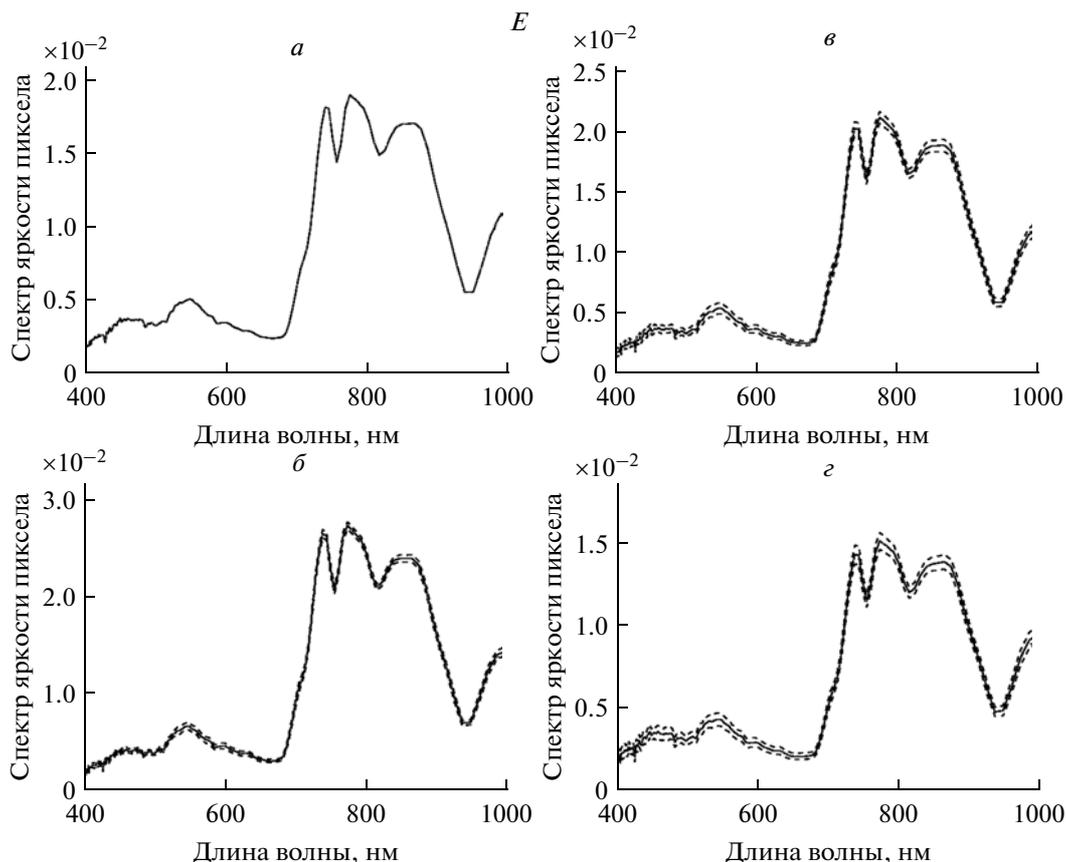
Рис. 5. Продолжение.

ектов (Козодеров и др., 2013). Выбранный в работе (Козодеров, Егоров, 2011) критерий распознавания по величине смещения области перехода от полосы хлорофилла к максимуму спектральной отражательной способности растительности в значительной степени нивелирует этот эффект. Применимость этого критерия связана преимущественно с использованием освещенных фитоэлементов, число которых, как видно из данных рис. 5, оказывается незначительным (до сотни пикселей при общем их числе в несколько тысяч в пределах выделенных контуров).

Результаты расчетов указанных смещений спектров на диапазоне длин волн (520–980 нм) для выбранных градаций (100–80%) приведены в табл. 1 по данным рис. 2*a–в*, в табл. 2 по данным рис. 3*a–д* и в табл. 3 по данным рис. 4*a, б*. Неплохая разли-

чимось трех разных пород лесной растительности заметна по данным табл. 1. По данным табл. 2 можно видеть, что используемый критерий позволяет различить сосняки и березняки, но сложнее обстоит дело с ельниками. Здесь по наклону кривых спектрального хода ельники оказываются неразличимы даже относительно березняков, что требует введения дополнительных критериев. Также сравнительно хорошо различаются участки сосны и березы по данным табл. 3.

С целью устранения указанных сложностей с отделением ельников от остальных пород лесной растительности в создаваемую автоматизированную систему был введен дополнительный расчетный блок. Он позволяет по заданному среднему значению интегральной яркости с одного участка выбрать группу спектров в рамках определенного



1	2	3
<i>а</i>	6382	167.82
<i>б</i>	84	231.0
<i>в</i>	3736	185.7
<i>г</i>	2562	139.7

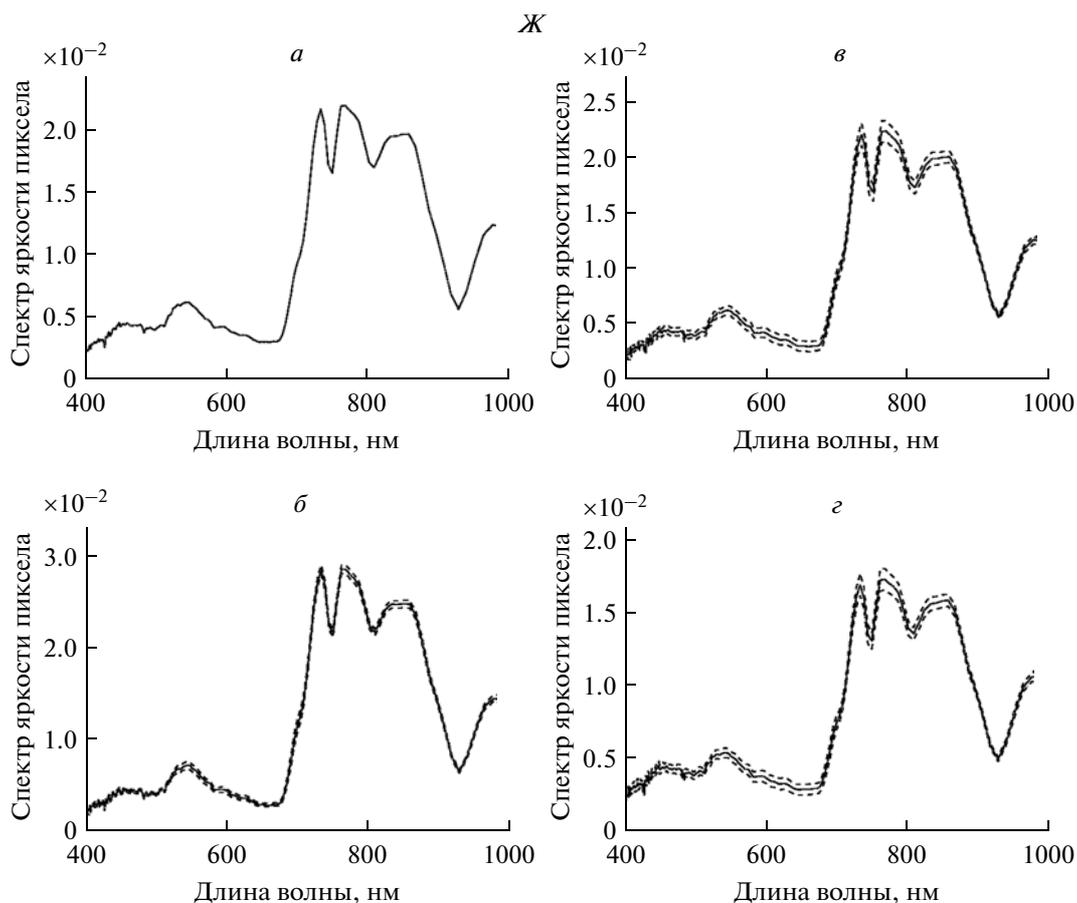
Рис. 5. Продолжение.

по ширине и настраиваемого автоматически по расположению границ диапазона яркостей с другого участка со средней интегральной яркостью, равной заданной. Система сама находит соответству-

ющие градации яркостей и формирует подгруппу спектров, средняя яркость которых равна заданной априори. Такая дополнительная процедура способствовала указанному отделению ельников от берез-

Таблица 1. Результаты расчета средних параметров смещения спектров для данных рис. 2а, б, в

Сосна, № участка	Яркость (80–100%); среднее смещение спектров	Ель, № участка	Яркость (80–100%); среднее смещение спектров	Береза, № участка	Яркость (80–100%); среднее смещение спектров
40	762.675	50	774.0	52	778.3
42	762.988			54	778.9
44	762.602				
46	763.055				
48	762.952				
	[762.6–763.1]		[774.0]		[778.3–778.9]



1	2	3
<i>а</i>	1430	195.15
<i>б</i>	122	239.8
<i>в</i>	1004	200.0
<i>г</i>	304	161.1

Рис. 5. Окончание.

няков и сосняков. Указанные смещения после таких преобразований для данных табл. 2 по березня-

кам оказались равными: (748.3–751.5 нм), по ельникам – (743.2–743.7 нм).

Таблица 2. Результаты расчета средних параметров смещения спектров для данных рис. 3а–д

Сосна, № участка	Яркость (80–100%); среднее смещение спектров	Ель, № участка	Яркость (80–100%); среднее смещение спектров	Береза, № участка	Яркость (80–100%); среднее смещение спектров
24	770.589	27	778.349	29	774.356
25	767.966	28	777.717	30	773.804
26	765.802			31	774.937
33	768.948			32	775.134
34	771.090			35	780.910
				29а	777.241
				30а	776.337
	[765.8–771.1]		[777.7–778.3]		[773.8–780.9]

Таблица 3. Результаты расчета средних параметров смещения спектров для данных рис. 4а, б

Сосна, № участка	Яркость (80–100%); среднее смещение спектров	Ель, № участка	Яркость (80–100%); среднее смещение спектров	Береза, № участка	Яркость (80–100%); среднее смещение спектров
63	772.774			64	780.847
65	775.956			66	784.003
67	774.392			68	781.503
71	766.234			69	780.487
72	768.393			70	781.815
85	772.367			73	782.987
86	771.717			74	777.256
89	769.309			81	779.962
90	768.506			82	778.891
				83	778.671
	[766.2–776.0]				[777.3–784.0]

Можно утверждать о перспективах использования такого многокритериального подхода для различения групп лесной растительности разного породного состава и возраста уже на стадии рассмотрения всей совокупности используемых тестовых участков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создается автоматизированная система обработки данных гиперспектрального самолетного зондирования с использованием разных критериев различимости регистрируемых спектров в пределах выделенных контуров лесной растительности разного породного состава и возраста. Система позволяет уже на стадии обучения используемого классификатора (вычислительной процедуры) разделить множество всех спектров по величине их интегральной яркости с учетом освещенных и затененных пикселей обрабатываемого ГСИ. Показаны особенности формирования таких обучающих выборок, привязанных к имеющимся данным наземной лесотаксации территории. Перспективы системы – в ее наполнении данными гиперспектрального зондирования в увязке с данными лесотаксации, которые нуждаются в обновлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Козодеров В.В., Егоров В.Д.* Распознавание растительности по данным гиперспектрального аэрозондирования // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 3. С. 40–48.
- Козодеров В.В., Кондранин Т.В.* Методы оценки состояния почвенно-растительного покрова по данным оптических систем дистанционного аэрокосмического зондирования. М.: МФТИ, 2008. 222 с.
- Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Дмитриев Е.В., Казанцев О.Ю., Персев И.В., Щербаков М.В.* Обработка дан-

ных гиперспектрального аэрокосмического зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 5. С. 3–11.

Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Дмитриев Е.В., Каменцев В.П. Вычислительная система обработки данных гиперспектрального аэрокосмического зондирования // Научно-техническая конф. “Гиперспектральные приборы и технологии”. Красногорск, 17–18 января 2013 г. С. 102–103.

Blackburn G.A., Steele C.M. Towards the remote sensing of matorral vegetation physiology: Relationships between spectral reflectance, pigment, and biophysical characteristics of semiarid bushland canopies // Rem. Sens. Env. 1999. V. 70. P. 278–292.

Carter G.A. Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress // Int. J. Rem. Sens. 1994. V. 15. P. 697–703.

Chang C.-I., Ren H., Chiang S.S. Real time processing algorithms for target detection and classification in hyperspectral imagery // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2001. V. 39. P. 760–768.

Collins W., Chang S.H., Raines G., Canney F., Ashley R. Airborne biogeophysical mapping of hidden mineral deposits // Econ. Geol. 1983. V. 78. P. 737–749.

Curran P.J., Kupiec J.A., Smith G.M. Remote sensing the biochemical composition of a slash pine canopy // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 1997. V. 35. P. 415–420.

Janetos A.C., Justice C.O. Land cover and global productivity: A measurement strategy for the NASA programme // Int. J. Rem. Sens. 2000. V. 21. № 6. P. 1491–1512.

Kozoderov V.V., Egorov V.D. Vegetation Pattern Recognition Using Hyperspectral Air Sounding Data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. Pleiades Publishing, Ltd., 2011. V. 47. № 9. P. 1135–1142.

Lyon J.G., Yuan D., Lunetta R.S., Elvidge C.D. A change detection experiment using vegetation indices // Photogram. Engin. Rem. Sens. 1998. № 64. P. 143–150.

McGwire K., Minor T., Fenstermaker L. Hyperspectral mixture modeling for quantifying sparse vegetation cover in arid environments // Rem. Sens. Env. 1999. V. 72. № 3. P. 360–374.

Penuelas J., Filella I., Lloret P., Munoz F., Vilajeliu M. Reflectance assessment of mite effects on apple trees // Int. J. Rem. Sens. 1995. V. 16. P. 2727–2733.

Thenkabail P.S. Optimal hyperspectral narrowbands for discriminating agricultural crops // *Rem. Sens. Rev.* 2002. V. 20. № 4. P. 257–291.

Vane G., Goetz A.F.H. Terrestrial imaging spectroscopy // *Rem. Sens. Env.* 1988. V. 24. P. 1–29.

An Automation of Hyperspectral Airborne Remote Sensing Data Processing

V. V. Kozoderov¹, V. D. Egorov²

¹ *M.V. Lomonosov Moscow State University*

² *Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow*

An automated system is proposed of discrimination of the spectral radiances registered by the hyperspectral airborne instruments based on average spectra and their interclass variability while distinguishing pixels related to the illuminated and shaded elements of the crown trees for various species and ages. Maps of the ground-based inventory for the selected area of airborne remote sensing are used as prior information. The system forms data bases of the selected classes of objects in an automated regime using the contours of these objects drawn on the image under processing. An opportunity to distinguish these classes is demonstrated in the red edge region of the spectra transition from the chlorophyll spectral band to the maximum of the spectral vegetation reflectivity.

Keywords: hyperspectral imaging, pattern recognition, characteristic features of vegetation