

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

РАСПОЗНАВАНИЕ ТИПОВ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПО ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫМ САМОЛЕТНЫМ И МНОГОКАНАЛЬНЫМ СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ОЦЕНКА ИХ ТОЧНОСТИ

© 2019 г. В. В. Козодеров^{1,*}, В. Д. Егоров²

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

²Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва

*E-mail: vkozod@mail.ru

Поступила в редакцию 25.06.2019 г.

Изучается возможность распознавания типов лесной поверхности по данным дистанционного зондирования: как гиперспектральным самолетным данным, так и многоканальным спутниковым данным высокого пространственного разрешения WorldView2. В расчетах применены как разработанный авторами ранее метод, так и стандартный статистический подход. Проведено сравнение результатов расчетов. Для трех изученных фрагментов лесной поверхности оценен диапазон изменения точности расчетов распознавания как для самолетных, так и для спутниковых данных в зависимости от применения разных созданных в работе баз данных для системы распознавания. Показаны некоторые возможности автоматической обработки данных созданной системой. Обсуждаются некоторые особенности распознавания типов подстилающей поверхности как по гиперспектральным самолетным, так и по многоканальным спутниковым данным высокого пространственного разрешения.

Ключевые слова: самолетные гиперспектральные изображения, спутниковые многоканальные изображения высокого пространственного разрешения, распознавание типов лесной растительности

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019689-102>

ВВЕДЕНИЕ

В течение ряда лет примерно с 2011 по 2016 год авторы занимались обработкой около двух десятков треков самолетного гиперспектрального зондирования района Савватьевского лесничества Тверской области. Гиперспектральная камера (ГСК), установленная на гиостабилизированную самолетную платформу, имела 290 каналов в диапазоне спектра примерно от 400 нм до 1000 нм, т.е. охватывала область видимой и ближней ИК части спектра. При высоте съемки от 1000 м до 2000 м над поверхностью пространственное ее разрешение составляло от 1 до 2 м на пиксел изображения. Ширина захвата съемки камерой составляла 500 пикселей, длина разных самолетных треков съемки составляла примерно от 5000 до 10000 пикселей и более. Параллельно велась запись координат полета самолета в терминах широты и долготы через подключенное GPS устройство.

В течение 2017–2018 гг. проводилась обработка нескольких многоканальных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения спутника WorldView2. Аппаратура спутника имеет 8 каналов длин волн в диапазоне

400–1040 нм и пространственное разрешение 2 м на пиксел. По обоим рядам данных (самолетным и спутниковым) были построены базы данных для системы распознавания и осуществлен расчет распознавания типов лесной поверхности разными методами для отдельных фрагментов территории. Причем часть спутниковых многоканальных изображений WorldView2 охватывает ту же территорию Савватьевского лесничества. Так что представляет интерес сопоставить полученные результаты распознавания типов поверхности и оценить их точностные характеристики.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Методика проведенных в настоящей работе исследований в значительной степени соответствует и достаточно подробно описана в работах (Козодеров, Егоров, 2013; Егоров, Козодеров, 2016). Здесь же более подробно остановимся на том, что появилось в последнее время, т.е. после выхода в свет упомянутых работ. Так обработка входной информации дистанционного зондирования в настоящей работе за прошедший период в большой степени автоматизирована. В частности геокоординаты входных данных автоматически могут быть

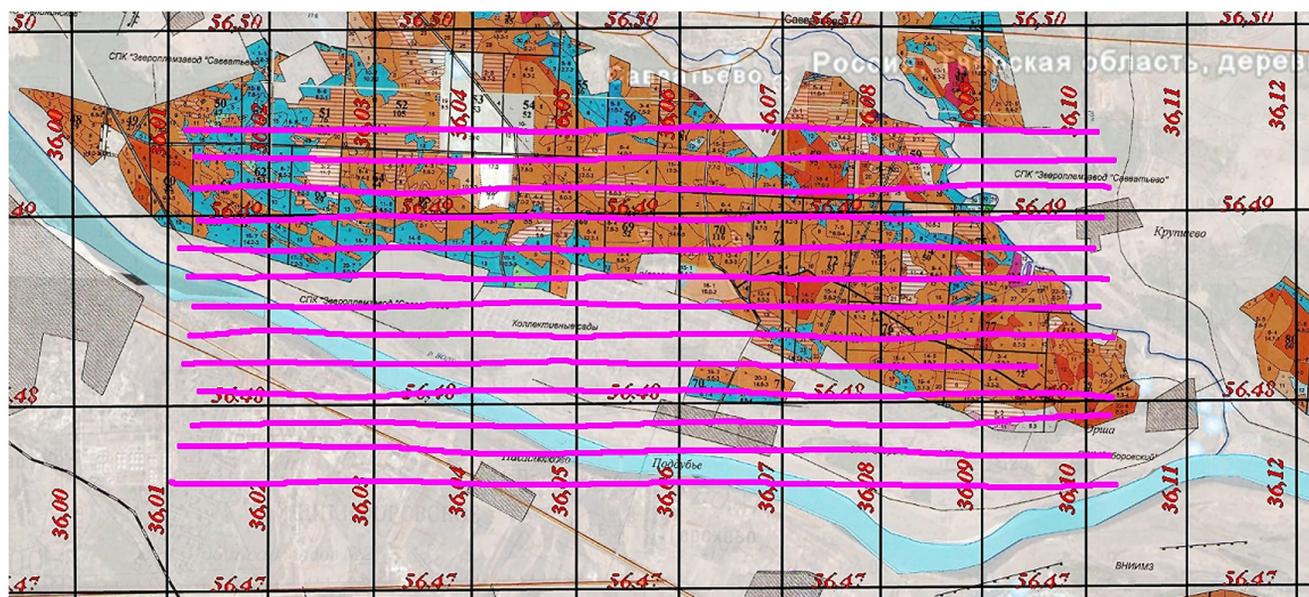


Рис. 1. Изображены треки самолетных измерений в районе Савватьевского лесничества вблизи г. Твери, на которых в июле–августе 2011 г. осуществлены гиперспектральные измерения ГСК 290 каналов: все данные измерений представлены в виде стандартных фрагментов 1800×500 пикселей для использования в разработанной ранее автоматизированной системе обработки гиперспектральных данных.

нанесены на карту местности или карту лесотаксации. Пример такого нанесения (13 самолетных треков из 20 вышеуказанных) изображен на рис. 1.

Для непосредственной обработки гиперспектральных данных по каждому из треков в созданной автоматизированной системе распознавания типов подстилающей и в частности лесной поверхности по дистанционным данным (Козодеров, Егоров, 2013) использовались фрагменты треков размером 1800×500 пикселей. Вся съемка была осуществлена преимущественно в районе лесотаксации Савватьевского лесничества летом (в июле–августе) 2011 г. Это позволило выбирать на фрагментах треков участки с преобладанием тех или иных пород лесной растительности, преимущественно это березняк из лиственных, а также ельник и сосняк из хвойных пород. Была сформирована автоматизированная система обработки гиперспектральных данных (полученные данные составляли несколько десятков гигабайт), с выделением групп спектров принадлежащих каждому “эталонному” участку с расчетом как интегральной яркости, так и параметра смещения области перехода спектра от максимального поглощения солнечных лучей к максимальному отражению их (т.н. Red Edge или $670\text{--}780$ нм) как по каждому отдельному спектру на участке, так и средние величины по участку в целом (Егоров, Козодеров, 2016). Кроме отобранных участков с лесными лиственными и хвойными породами были включены в рассмотрение участки с луговой

растительностью и болотистой местностью, грунтовые поверхности и дорожные поверхности с твердым покрытием, кроме того несколько типов вырубки порослей молодняком как одного типа, так и разных типов растительности (посадки березы, ели, сосны и др.), участки типа карьера (т.е. без растительности), обводненные участки — это несколько участков поверхности рек и озер. Таким образом построена база данных, содержащая свыше 60 “эталонных” участков, содержащих от несколько сот до нескольких тысяч спектров на участок и каждый участок — это свой тип поверхности. Помимо преобладающего для каждого участка типа лесной растительности, который как правило соответствует некоторому кварталу и выделу карты лесотаксации, на участке зачастую могут содержаться и иные неосновные типы растительности, поэтому качество “эталонных” участков с точки зрения их включения в базу данных разработанной системы распознавания типов лесной растительности может заметно различаться. Так в развитие содержательной части работы (Козодеров, Егоров, 2013) (а речь там шла не только об автоматизации обработки данных) предложен метод построения диаграмм средних величин “интегральная яркость” — “параметр смещения” по всем спектрам с участка, который позволяет заметно улучшить отбор участков в качестве эталонов того или иного типа растительности и повышает качество распознавания типов растительной поверхности по гиперспектральным самолетным

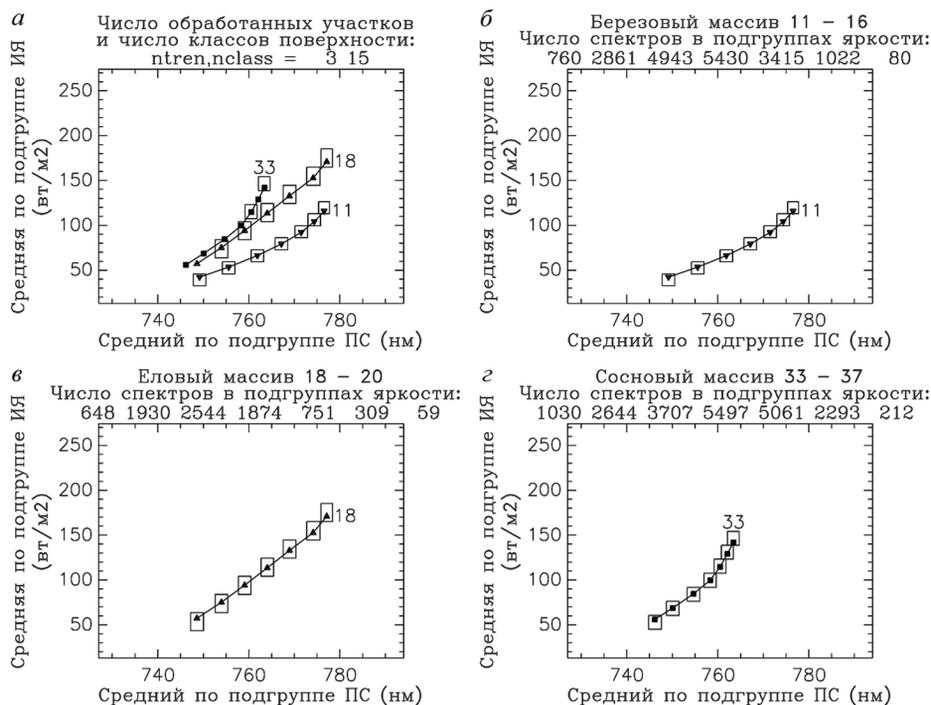


Рис. 2. а — Наложение диаграмм "интегральная яркость (ИЯ)—параметр смещения (ПС) области перехода" с расчетом числа классов поверхности; б, в, г — налагаемые диаграммы с представлением доверительных интервалов по расчетам средних характеристик ИЯ и ПС по подгруппам спектров со следующих участков гиперспектральных измерений: б — объединение данных о спектрах с шести участков № 30, № 29, № 30а, № 29а, № 31, № 32 трек 114625 (березняк), в — объединение данных о спектрах с трех участков № 50 трек 110417, № 27, № 28 трек 114625 (ельник), г — объединение данных о спектрах с пяти участков № 40, № 42, № 44, № 46, № 48 трек 110417 (сосняк).

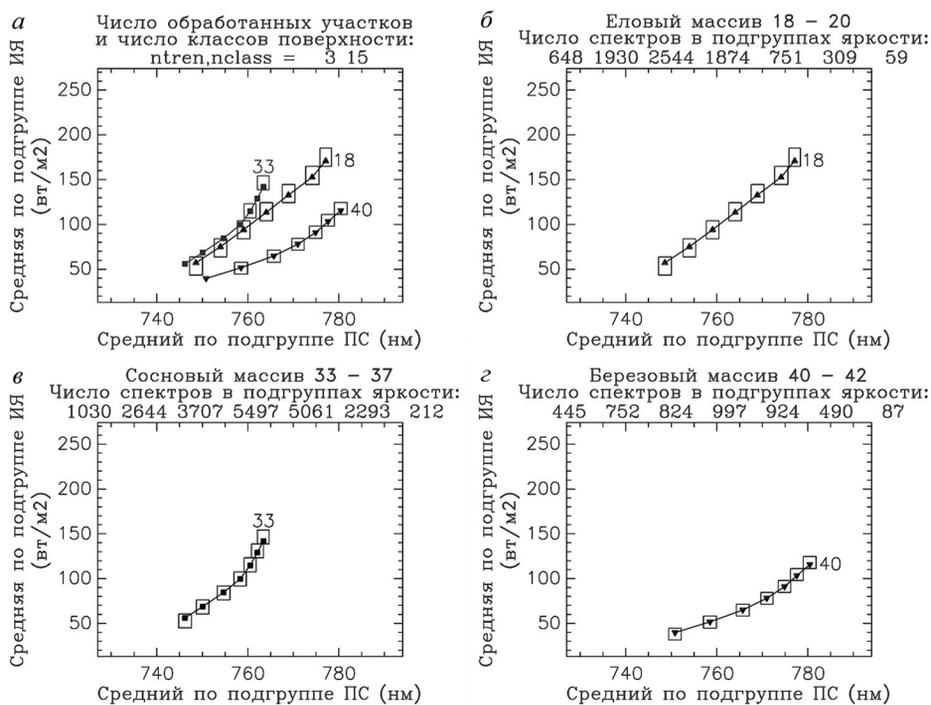


Рис. 3. а — Наложение диаграмм "интегральная яркость (ИЯ)—параметр смещения (ПС) области перехода" с расчетом числа классов поверхности; б, в, г — налагаемые диаграммы с представлением доверительных интервалов по расчетам средних характеристик ИЯ и ПС по подгруппам спектров со следующих участков гиперспектральных измерений: б — объединение данных о спектрах с трех участков № 50 трек 110417, № 27, № 28 трек 114625 (ельник), в — объединение данных о спектрах с пяти участков № 40, № 42, № 44, № 46, № 48 трек 110417 (сосняк), г — объединение данных о спектрах с трех участков № 81, № 82, № 83 трек 115925 (березняк).

данным. Примеры построения таких диаграмм в случае объединения спектров с нескольких участков одного типа растительности (либо ельник, либо сосняк, либо березняк) представлены на рис. 2–3.

Представляет интерес как использование альтернативных методов распознавания (например часто используются статистические подходы), так и перенос разработанных технологий распознавания типов лесной и прочих поверхностей на применение спутниковых данных высокого пространственного разрешения, таких, например, как WorldView2 (Pu, Landry, 2012; Immitzer et al., 2012; Waser et al., 2014; Ramoelo et al., 2015; Karlson et al., 2016; Immitzer et al., 2016; Immitzer et al., 2018). Некоторые результаты многочисленных представленных в литературе исследований с использованием другой спутниковой аппаратуры дистанционного зондирования представлены, например, в работах (Guerschman et al., 2009; Eitel et al., 2011; Gärtner et al., 2016).

ОСОБЕННОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ ТИПОВ ПОВЕРХНОСТИ ПО МНОГОКАНАЛЬНЫМ СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Итак некоторое время назад были получены несколько многоканальных спутниковых изображений WorldView2, два из них покрывают значительную часть Савватъевского лесничества Тверской области и включают по охвату примерно территорию двадцати самолетных треков, о которых упоминалось выше. Эти два 8-канальных

изображения с разрешением по пространству от 2 м на пиксел изображены на рис. 4.

Контуры этих двух спутниковых изображений в соответствии с имеющимися при них данными по геопривязке, а также контуры трех достаточно подробно изучавшихся авторами настоящей работы самолетных треков схематически изображены на рис. 5.

Эти же контуры с автоматическим нанесением на карту лесотаксации изображены на рис. 6.

Для того, чтобы сопоставить результаты изучения по разным данным (самолетным и спутниковым) для одной и той же территории была осуществлена свертка самолетных данных с 290 каналов к спутниковым 8 каналам, которые в целом покрывают тот же диапазон спектра от 400 до 1000 нм. Именно, аппаратура спутника WorldView2 имеет следующие спектральные каналы: 1. COASTAL 400–450 нм; 2. BLUE 450–510 нм; 3. GREEN 510–580 нм; 4. YELLOW 585–625 нм; 5. RED 630–690 нм; 6. RED EDGE 705–745 нм; 7. NIR1 770–895 нм; 8. NIR2 860–1040 нм. Все эти каналы, как уже указывалось выше, имеют пространственное разрешение 2 м на пиксел. Есть еще один панхроматический канал, покрывающий весь диапазон спектра 400–1040 нм и имеющий пространственное разрешение 0.5 м на пиксел, в настоящей работе он не использовался. Далее два спутниковых изображения также как и самолетные были разделены на фрагменты 1800×500 пикселей таким образом, чтобы каждый из изучаемых самолетных фрагментов полностью содержался на некотором спутниковом фрагменте: это возможно



Рис. 4. Представлены две полученные сцены (8-канальные изображения) спутника WorldView2 в районе Савватъевского лесничества вблизи г. Твери: сцена I (3409×3368 пикселей) и сцена II (2743×3142 пиксела).

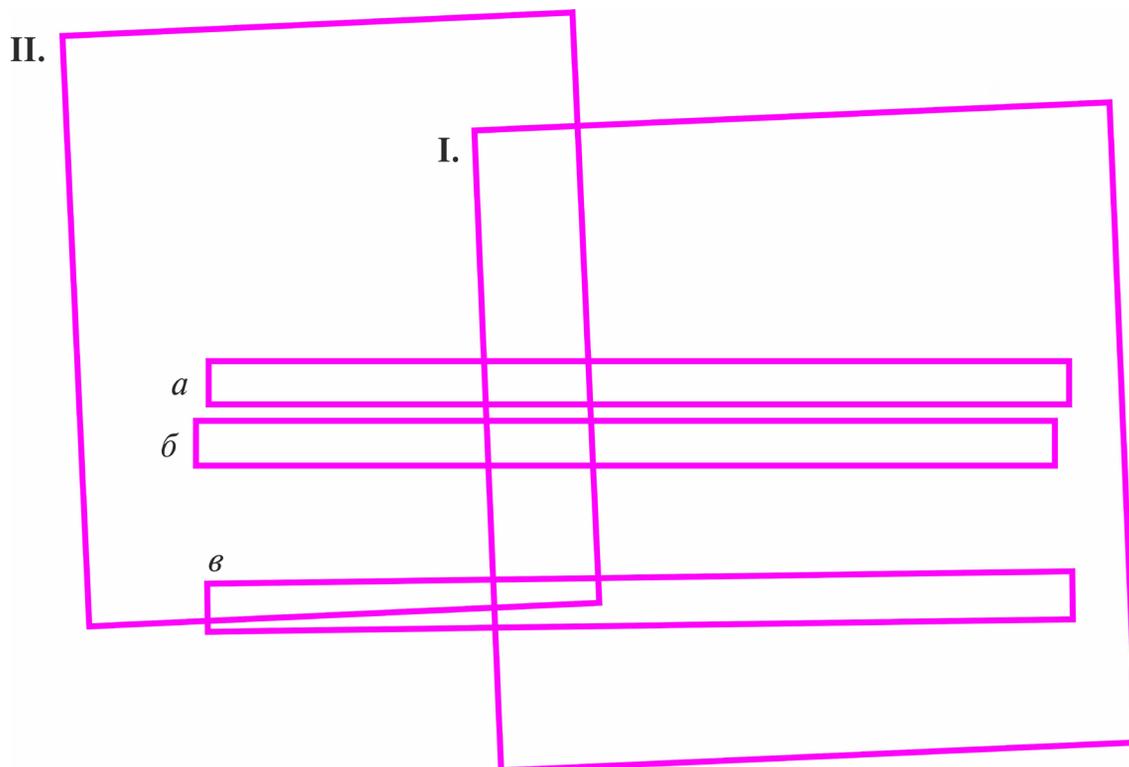


Рис. 5. Схематически представлено расположение в пространстве двух спутниковых изображений: сцены I и сцены II и трех самолетных треков *a* — Tr115925, *б* — Tr114625, *в* — Tr110417.

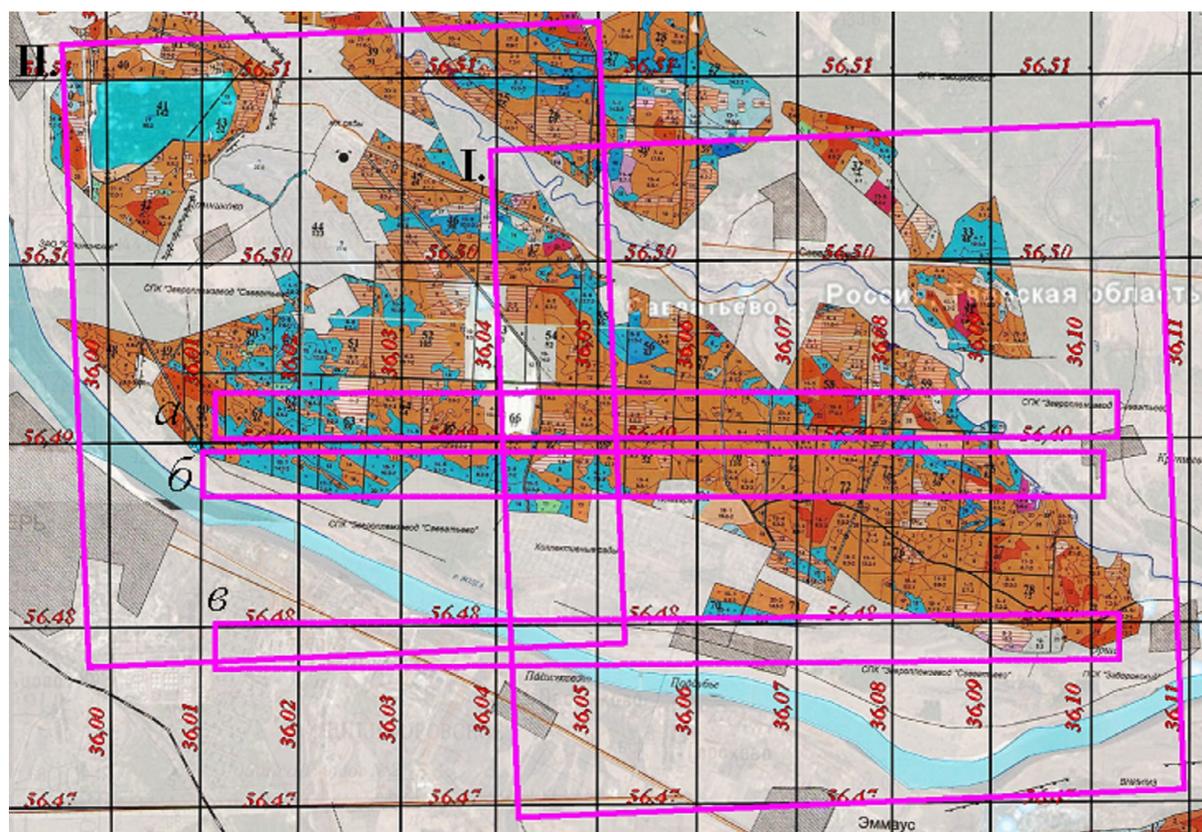


Рис. 6. Наложённые на карту лесотаксации два спутниковых изображения WorldView2: сцена I, сцена II и три самолетных трека: *a* — Tr115925, *б* — Tr114625, *в* — Tr110417.

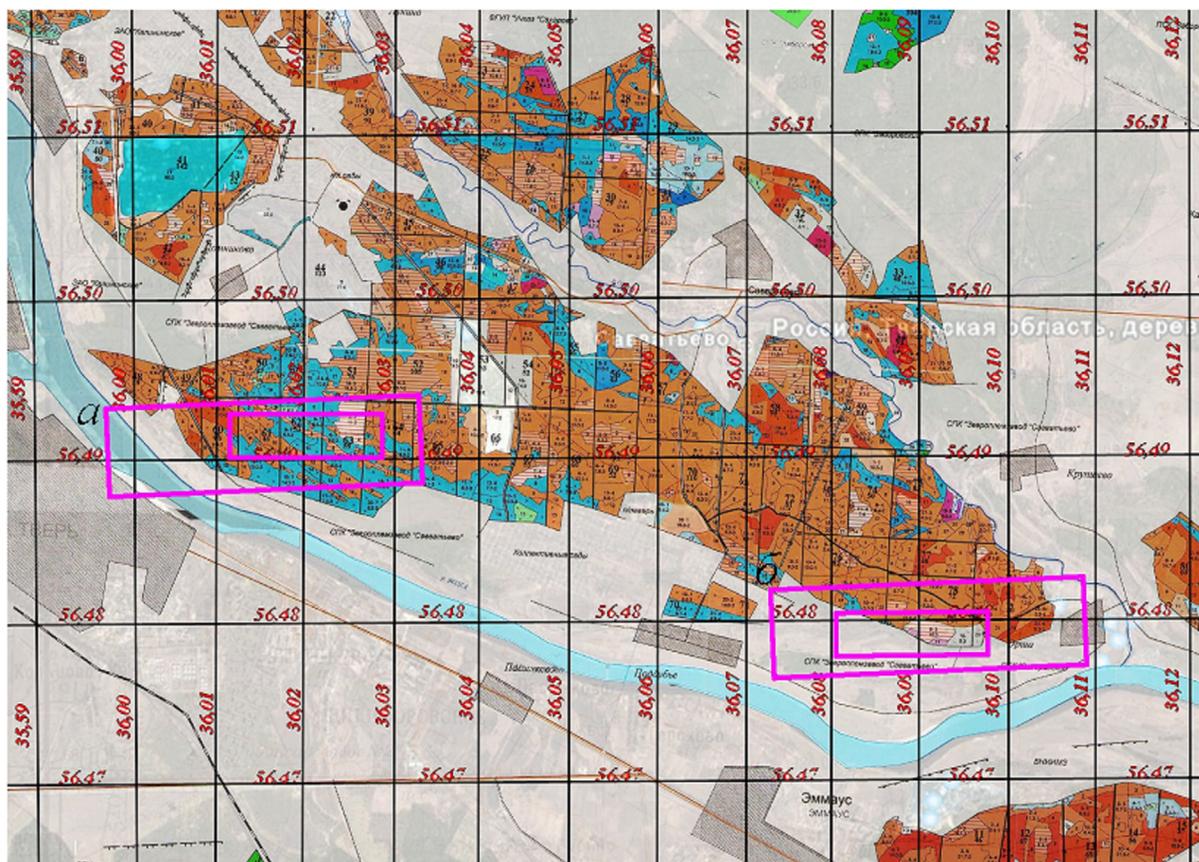


Рис. 7. Выбранные фрагменты спутниковых изображений размера 1800×500 пикселей, покрывающие ранее введенные фрагменты самолетных треков: *а* — трек 115925 фрагмент 1, *б* — трек 110417 фрагмент 5.

сделать поскольку на карте местности из-за чуть более низкого разрешения спутниковые фрагменты оказываются крупнее самолетных. Пример такого выбора спутниковых фрагментов, покрывающих заданные самолетные фрагменты, приведен на рис. 7.

Далее были отобраны примерно 40 эталонных участков с вышеуказанных трех самолетных треков для пересчета на спутниковую систему координат для формирования базы данных для распознавания типов поверхности методами линейного и квадратичного дискриминантного анализа по спутниковым многоканальным данным WorldView2. Была осуществлена геокоррекция и перенос контуров эталонных участков самолетных треков на спутниковую систему координат в пределах вновь образованных спутниковых фрагментов, что позволяет получить эти контуры на спутниковом изображении и заполнить их 8-ми точечными спектрами 8-ми канального спутникового изображения, см. рис. 8.

Таким образом, в итоге каждому из 40 выбранных эталонных участков соответствует три группы спектров: одна 290-канальных самолетных спектров, другая свертка с 290-канальных

к 8-канальным самолетным спектрам и третья уже чисто спутниковые 8-канальные спектры. По каждой из трех групп по 40 эталонным участкам построены базы данных для системы распознавания с целью сравнения результатов распознавания: сперва сравнение результатов распознавания по 290-канальным данным, где в качестве критерия распознавания используется параметр смещения (Козодеров, Егоров, 2013) с результатами распознавания методом квадратичного дискриминантного анализа по свернутым 8-канальным самолетным данным, а затем сравнение последних результатов с результатами расчета этим же методом, но уже чисто по спутниковым данным WorldView2.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ТИПОВ ПОВЕРХНОСТИ ПО ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫМ САМОЛЕТНЫМ И МНОГОКАНАЛЬНЫМ СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ И ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ

Все результаты распознавания типов лесной поверхности по гиперспектральным данным получены с использованием комбинированной



Рис. 8. Отображение выбранных ранее эталонных участков типов поверхности самолетной съемки на спутниковую систему координат: *а* — оцифрованный ранее участок фрагмента самолетного трека, *б* — автоматический перенос контура участка через GPS геопривязку на спутниковую систему координат, *в* — автоматическая оцифровка спутниковых спектров в пределах контура.

модели (Егоров, Козодеров, 2016), где в качестве критерия распознавания использовался как правило параметр смещения области перехода спектра (RedEdge). Результаты распознавания по 8-ми канальным данным получены с использованием метода квадратичного дискриминантного анализа (QDA). Оценка погрешности распознавания по гиперспектральным данным рассчитывалась приближенно следующим образом. Поскольку каждая база данных для расчета по схеме распознавания создавалась из некоторого набора эталонных участков, как правило не превышающего 30 (например 28 или менее), а расчет осуществлялся для тестового фрагмента трека куда попадало

обычно несколько эталонных участков не обязательно присутствовавших при формировании базы данных, то можно посчитать число пикселей в данных участках которые по расчету распознавания не соответствовали типу растительности декларированному для данного участка. Среднее число таких неадекватно распознанных пикселей отнесенных к общему числу пикселей на этих участках и принималось за погрешность (т.е. 20% точности, если 20% неверно распознаны, а 80% распознаны верно; 10% точности, если 10% распознаны неверно, а 90% пикселей распознаны верно). В случае квадратичного дискриминантного анализа для оценки точности распознавания

Таблица 1. Предварительная оценка точности распознавания — классификации разными методами по результатам расчетов по комбинированной модели и квадратичным дискриминантным анализом типов лесной растительности по дистанционным гиперспектральным данным для трех выделенных фрагментов 1800 × 500 пикселей самолетных треков *a*, *б*, *в* работы (Козодеров, Егоров, 2013)

Фрагмент трека	Комбинированная схема (SHI) и метод оценки	Комбинированная схема (SHI) и метод оценки	Квадратичный дискриминантный анализ (QDA) и метод оценки	Квадратичный дискриминантный анализ (QDA) и метод оценки
	Точность приближения по критерию распознавания	Точность распознавания	Точность классификации (кросс валидация)	Точность разделения данных обучения по классам
Tr110417fr5	$9.879 \cdot 10^{-4}$	0.2077	0.2376	$1.1182 \cdot 10^{-5}$
Tr114625fr5	$6.494 \cdot 10^{-4}$	0.2594	0.2724	$8.1603 \cdot 10^{-6}$
Tr115925fr1	$8.571 \cdot 10^{-4}$	0.1631	0.2684	$1.4677 \cdot 10^{-5}$

Таблица 2. Представлены оценки точности классификации тестом кросс валидации для двух используемых в работе баз данных обучения 1 и 2 для одного и того же тестируемого фрагмента Tr110417fr5: показана возможность улучшения точности распознавания — классификации типов поверхности в зависимости от используемой базы данных обучения.

<p>1) VW1 23 class from tr110417fr5 qdaResubErrSpe = $2.2882 \cdot 10^{-5}$ K-fold cross validation partition N: 43702 NumTestSets: 10 TrainSize: 39332 39331 39331 39332 39332 39332 39332 39332 39332 39332 TestSize: 4370 4371 4371 4370 4370 4370 4370 4370 4370 4370 ldaCVERr = 0.2176 qdaCVERr = 0.1695</p> <p>2) WABW1 28 class from tr110417fr5 qdaResubErrSpe = $1.8403 \cdot 10^{-5}$ K-fold cross validation partition N: 54340 NumTestSets: 10 TrainSize: 48906 48906 48906 48906 48906 48906 48906 48906 48906 48906 TestSize: 5434 5434 5434 5434 5434 5434 5434 5434 5434 5434 ldaCVERr = 0.1893 qdaCVERr = 0.1395</p>

использовалась стандартная процедура кроссвалидации. Некоторые оценки точностных характеристик расчетов распознавания по первым из созданных баз данных для схем распознавания представлены в табл. 1.

То, что точность распознавания для одного и того же тестового фрагмента можно улучшать за счет включения более подходящих эталонных участков при создании базы данных, например, с использованием выше представленных диаграмм “интегральная яркость—параметр смещения” иллюстрирует табл. 2.

О ТОЧНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ — КЛАССИФИКАЦИИ ТИПОВ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ДАННЫМ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИМЕНЯЕМЫМИ МЕТОДАМИ

Как уже упоминалось в последней части работы в качестве метода расчета распознавания типов поверхности были использованы статистические методы как линейного (LDA), так и квадратичного (QDA) дискриминантного анализа. Поскольку точность результатов распознавания

последним из них оказалась заметно выше, то если не оговорено особо везде в дальнейшем будем подразумевать именно его. Причем при создании баз данных для расчета распознавания использовались одновременно до 28 эталонных участков (содержащие по соответствующим данным либо самолетные, либо спутниковые спектры), причем 15 из них соответствовали тем или иным типам лесной растительности. Каждый из основных типов лесной растительности подразделен на подклассы по величинам параметра смещения: три еловых, пять сосновых и семь березовых в предположении, что эти подклассы отражают возрастной состав каждого из этих типов растительности. Конечно эталонными участки того или иного типа растительности, входящие в ту или иную базу данных системы распознавания и представляющие спектральный состав каждого из типов растительности можно назвать так весьма условно. Поскольку каждый участок отражает, как правило, принадлежность к какому-либо кварталу или выделу карты лесотаксации. Если сопоставить карту лесотаксации с сопроводительными данными, то оказывается, что выдел, соответствующий например ельнику, может содержать часто лишь от 60% до 90% преобладающей породы, а остальная часть выдела — это некие пропорции из сосны, березы, ольхи и других пород. Так же дело обстоит и с другими основными типами лесной растительности. Чистые выделы со 100% того же ельника либо полностью отсутствуют, либо занимают крайне незначительные с точки зрения обучения системы распознавания по типам растительности участки территории поверхности. Ельники, сосняки и березняки в чистом 100% виде — это, как правило, молодняки, посаженные на месте проведенных вырубок. Высота таких насаждений составляет часто 1–2 м или чуть более, имеется ли там сомкнутость крон и какого качества таких участков, если их принять за эталонные по данному типу растительности представляется не совсем ясным. Таким образом, даже если брать в качестве эталонных участков собственно выделы с данным типом породы с карты лесотаксации, то это вовсе не означает 100% содержания данной породы деревьев или типа лесной поверхности на данном участке, это лишь преобладание в той или иной степени данного типа или породы на этом участке. Так что вопрос о выборе эталонных участков, спектры с которых в считанных массивах данных отражают тот или иной тип леса (березовый, сосновый, еловый и др.) остается актуальным. И даже с использованием подробной карты лесотаксации каждый выбранный участок,

как бы он не был выбран, — это по сути в той или иной степени смешанный лес, но с преобладанием той или иной породы. Тем не менее по каждому типу леса отобраны по 10–20 “эталонных” участков, из которых можно сформировать несколько баз данных со спектральными характеристиками как по типам растительности, так и по их возрастному составу. А далее по проведению расчетов по распознаванию типов поверхности тем или иным методом, находим с какой из этих баз данных результаты распознавания оказываются лучше в сравнении как с картами лесотаксации, так и с фото или RGB изображениями изучаемой местности. Для Савватьевского лесничества было создано не менее пяти таких баз данных.

Оказывается, если в качестве критерия распознавания типов лесной растительности использовать параметр смещения области перехода спектра от максимума поглощения хлорофиллом солнечных лучей к его минимуму, то результаты распознавания с одной и той же базой данных оказываются одинаково хорошими или одинаковыми по точности как для соседних фрагментов, так иногда и для соседних самолетных треков. В то время как при использовании статистического подхода (квадратичного дискриминантного анализа) лучше базу данных формировать по эталонным участкам, принадлежащим изучаемому фрагменту, только тогда получается высокое качество распознавания для данного самолетного фрагмента. В случае спутниковых данных последнее замечание, видимо, менее актуально, но и точность распознавания здесь в целом ниже в сравнении с самолетными данными. Возможно, это связано с меньшим набором статистики при использовании старых баз данных для более протяженных по пространству спутниковых фрагментов.

ИЛЛЮСТРАЦИЯ НЕКОТОРЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ТИПОВ ПОВЕРХНОСТИ ПО ИСПОЛЬЗОВАННЫМ МОДЕЛЯМ

Далее приведем некоторые примеры иллюстрации результатов расчетов распознавания типов лесной растительности и их сравнение, как по самолетным данным, так и по спутниковым данным WorldView2. Так для сопоставления с предыдущими результатами на рис. 9а, рис. 10а, рис. 11а воспроизведены результаты расчетов по комбинированной модели (Егоров, Козодеров, 2016), где в качестве критерия распознавания используется параметр смещения области перехода спектров.

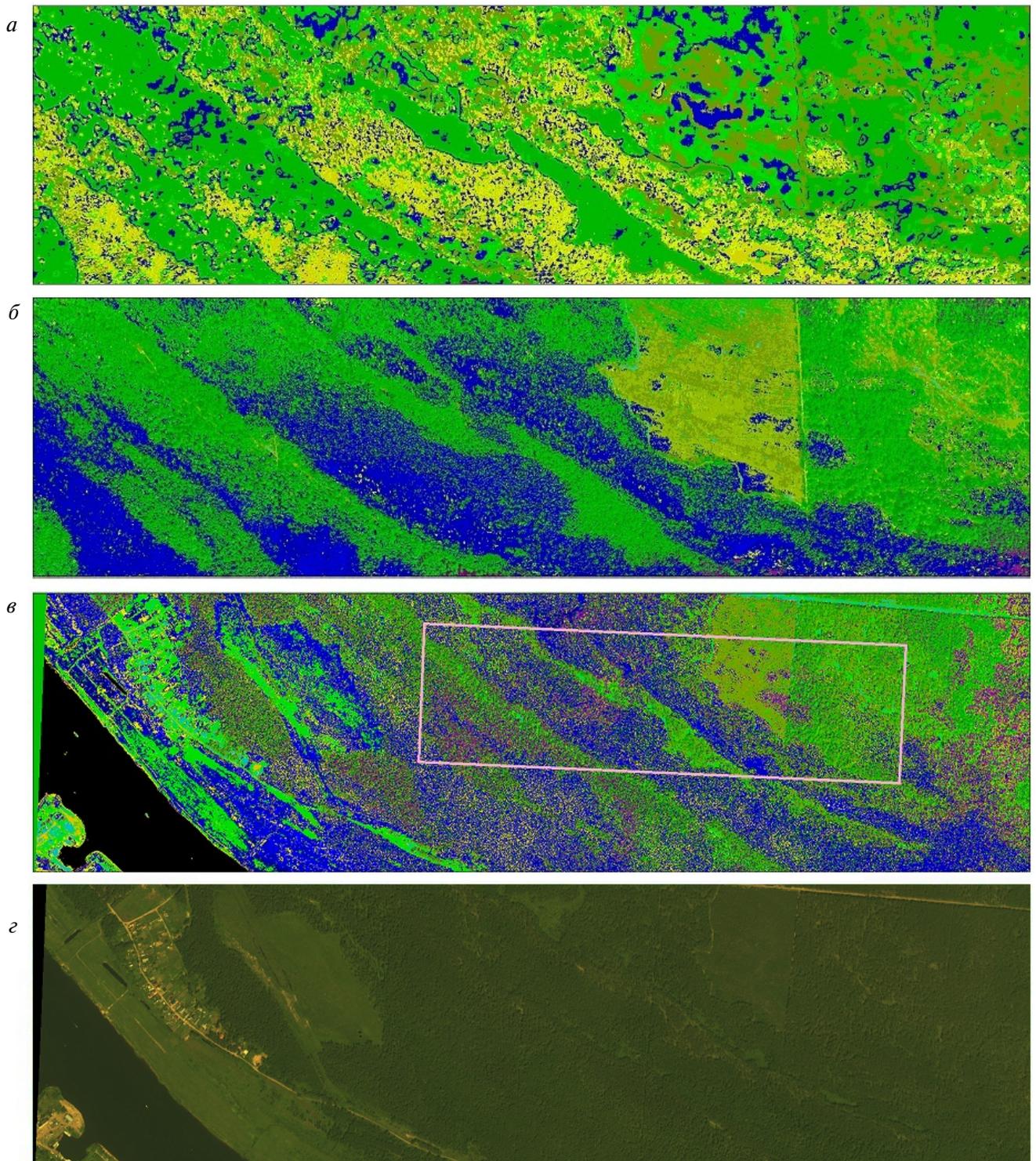


Рис. 9. *a* — ранее полученный результат распознавания типов растительной поверхности по смещениям области перехода спектров (Tr115925 Fr1) (Егоров, Козодеров, 2016) (290 каналов, данные августа 2011 г.), *б* — результат расчета по статистической модели QDA по самолетным гиперспектральным данным (290 каналов свернуты к 8 каналам, соответствующим WorldView2), *в* — результат расчета распознавания типов поверхности по статистической модели QDA по спутниковым данным WorldView 2 (как и ранее контур на рисунке соответствует области самолетного фрагмента), *г* — сгенерированное RGB изображение соответствующего спутникового фрагмента.

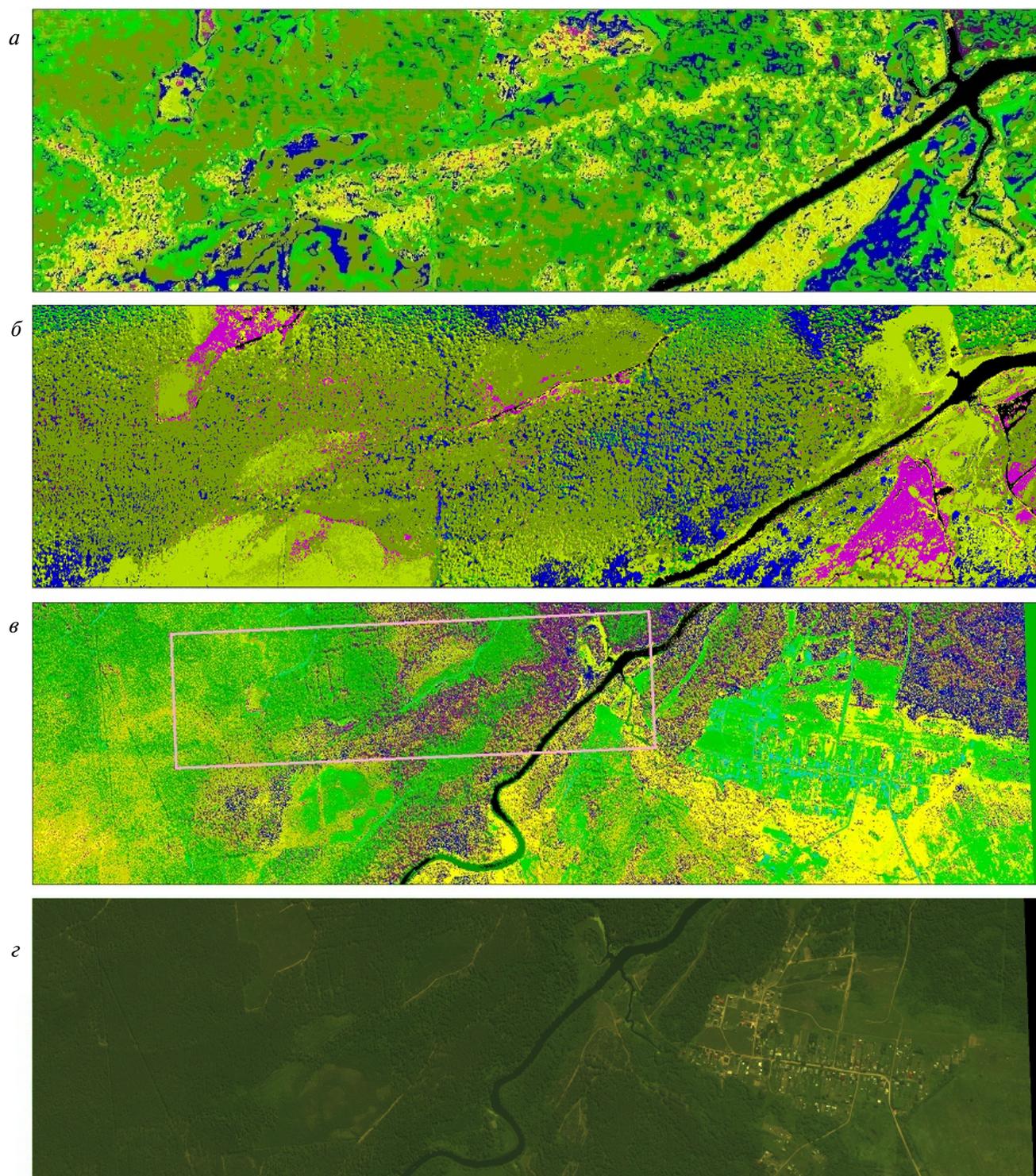


Рис. 10. *а* — ранее полученный результат распознавания типов растительной поверхности по смещениям области перехода спектров (Tr114625 Fr5) (Егоров, Козодеров, 2016) (290 каналов, данные августа 2011 г.), *б* — результат расчета по статистической модели QDA по самолетным гиперспектральным данным (290 каналов свернуты к 8 каналам, соответствующим WorldView2), *в* — результат расчета распознавания типов поверхности по статистической модели QDA по спутниковым данным WorldView 2 (как и ранее контур на рисунке соответствует области самолетного фрагмента), *г* — сгенерированное RGB изображение соответствующего спутникового фрагмента.

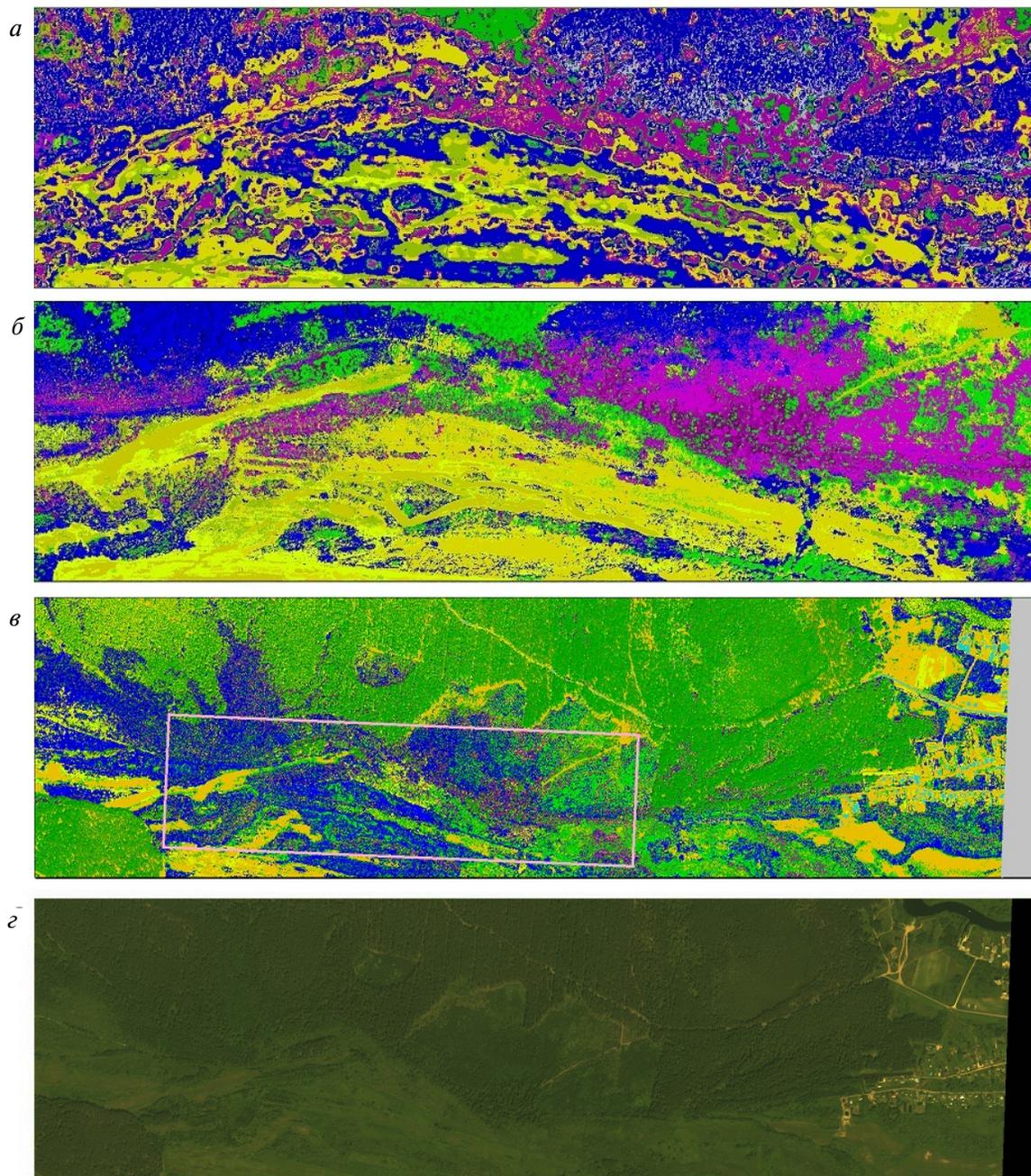
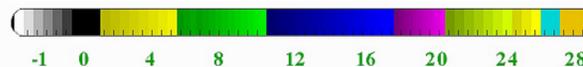


Рис. 11. *a* — ранее полученный результат распознавания типов растительной поверхности по смещениям области перехода спектров (Tr110417 Fr5) (Егоров, Козодеров, 2016) (290 каналов, данные августа 2011 г.), *б* — результат расчета по статистической модели QDA по самолетным гиперспектральным данным (290 каналов свернуты к 8 каналам, соответствующим WorldView2), *в* — результат расчета распознавания типов поверхности по статистической модели QDA по спутниковым данным WorldView 2 (как и ранее контур на рисунке соответствует области самолетного фрагмента), *г* — сгенерированное RGB изображение соответствующего спутникового фрагмента.

Примечание к рис. 9–11 (о шкале цветов на рисунках):



Распознавание типов лесной поверхности по 28 участкам обучения исходя из сдвига переходной области спектра относительно оси длин волн в диапазоне 670–780 нм (Red Edge); распознавание типов лесной поверхности по 28 классам обучения с применением статистического метода (квадратичный дискриминантный анализ) по многоканальным спутниковым данным World View 2; классы расположены по возрастанию яркости (величины смещения), (0–2) — вода, (3–5) — грунтовая поверхность, (6–20) — лесная растительность разного возрастного состава: (6–10) — сосновая, (11–17) — березовая, (18–20) — еловая; (21–24) — вырубка, (25) — болото, (26) — луговая растительность, (27) — дорожное покрытие твердого типа, (28) — карьер, (–1) — объект не распознан.

Результаты воспроизведены для самолетных фрагментов трек 115925 фрагмент 1, трек 114625 фрагмент 5, трек 110417 фрагмент 5 соответственно. На рис. 9б, рис. 10б, рис. 11б представлены результаты расчетов по статистической модели методом квадратичного дискриминантного анализа по гиперспектральным самолетным данным, свернутым к 8-ми каналам длин волн, соответствующим спутнику WorldView2 и для тех же самолетных фрагментов, что и на рисунках с индексом *a*. На рис. 9в, рис. 10в, рис. 11в представлены результаты расчетов по статистической модели методом квадратичного дискриминантного анализа по спутниковым данным WorldView2. Как уже говорилось соответствующие базы данных для этих расчетов строились переносом контуров эталонных участков для самолетных баз данных на спутниковую систему координат и заполнением этих контуров спутниковыми “спектрами”. (Если самолетный спектр гиперспектральных данных для каждого пиксела изображения имеет размерность 290, то спутниковый “спектр” многоканальных данных WorldView2 для каждого пиксела изображения имеет размерность 8.) Прямоугольными контурами здесь изображены соответствующие самолетные фрагменты, которые полностью попадают на специальным образом подобранные спутниковые фрагменты. Как самолетные, так и спутниковые фрагменты имеют одинаковую размерность 1800 × 500 пикселей, но поскольку пространственное разрешение самолетных данных оказывается выше, чем спутниковых, то спутниковые фрагменты оказываются чуть больше в размерах при нанесении на карту местности. Наконец на рис. 9г, рис. 10г, рис. 11г представлены сгенерированные в работе по трем каналам данных WorldView2 RGB изображения тех же спутниковых фрагментов (являющиеся до какой-то степени аналогами фото изображений местности).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение отметим, что для самолетных фрагментов Tr115925fr1, Tr114625fr5 и Tr110417fr5 было протестировано 8 созданных баз данных для метода QDA: точность расчетов менялась от 26.9% до 10.6%. Для соответствующих спутниковых фрагментов было протестировано 5 созданных баз данных для метода QDA: точность расчетов менялась от 25.8% до 20.9%. Лучшая точность распознавания типов подстилающей поверхности, достигнутая расчетом методом квадратичного дискриминантного анализа в случае спутниковых данных WorldView2 составляет для фрагментов, охватывающих самолетные фрагменты Tr115925fr1,

Tr114625fr5 и Tr110417fr5 во всех случаях 20.9%, тогда как для случаев самолетных гиперспектральных данных свернутых к 8 каналам аналогичным по длинам волн спутнику WorldView2 эта точность оказалась равной: для фрагмента Tr115925fr1 20.0%, для фрагмента Tr114625fr5 18.8% и для фрагмента Tr110417fr5 10.6%. Таким образом, лучшая точность распознавания типов подстилающей поверхности, достигнутая расчетом методом квадратичного дискриминантного анализа по созданным ранее базам данных по эталонным участкам составляет примерно 11% (случай Tr110417 Fr5 расчет QDA по самолетным данным). Лучшая точность распознавания, достигнутая в работе по спутниковым данным WorldView2, составляет примерно 21%.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19–01–00215.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Козодеров В.В., Егоров В.Д.* Автоматизация обработки гиперспектральных данных самолетного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 6. С. 65–80.
- Егоров В.Д., Козодеров В.В.* Распознавание лесной растительности по самолетным гиперспектральным данным // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 3. С. 47–58.
- Eitel J.U.H., Vierling L.A., Litvak M.E., Long D.S., Schulthess U., Ager A.A., Krofcheck D.J., Stoscheck L.* Broadband, red-edge information from satellites improves early stress detection in a New Mexico conifer woodland // Remote Sensing of Environment. 2011. V. 115. P. 3640–3646.
- Gärtner P., Förster M., Kleinschmit B.* The benefit of synthetically generated RapidEye and Landsat 8 data fusion time series for riparian forest disturbance monitoring // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 177. P. 237–247.
- Guerschman J.P., Hill M.J., Renzullo L.J., Barrett D.J., Marks A.S., Botha E.J.* Estimating fractional cover of photosynthetic vegetation, non-photosynthetic vegetation and bare soil in the Australian tropical savanna region upscaling the EO-1 Hyperion and MODIS sensors // Remote Sensing of Environment. 2009. V. 113. P. 928–945.
- Immitzer M., Atzberger C., Koukal T.* Tree species classification with Random Forest using very high spatial resolution 8-band WorldView-2 satellite data // Remote Sensing. 2012. V. 4. P. 2661–2693.
- Immitzer M., Stepper C., Böck S., Straub C., Atzberger C.* Use of WorldView-2 stereo imagery and National forest inventory data for wall-to-wall mapping of growing stock // Forest Ecology and Management. 2016. V. 359. P. 232–246.
- Immitzer M., Böck S., Einzmann K., Vuolo F., Pinnel N., Wallner A., Atzberger C.* Fractional cover mapping of spruce and pine at 1 ha resolution combining very high and medium spatial resolution satellite imagery // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 204. P. 690–703.

Karlson M., Ostwald M., Reese H., Bazié H.R., Tankoano B. Assessing the potential of multi-seasonal WorldView-2 imagery for mapping West African agroforestry tree species // *International Journal of Applied Earth Observation and Geo-information*. 2016. V. 50. P. 80–88.

Pu R., Landry S. A comparative analysis of high spatial resolution IKONOS and WorldView-2 imagery for mapping urban tree species // *Remote Sensing of Environment*. 2012. V. 124. P. 516–533.

Ramoelo A., Cho M.A., Mathieu R., Madonsela S., Van de Kerchove R., Kaszta Z., Wolff E. Monitoring grass nutrients and biomass as indicators of rangeland quality and quantity using random forest modelling and WorldView-2 data // *International Journal of Applied Earth Observation and Geo-information*. 2015. V. 43. P. 43–54.

Waser L.T., Kuchler M., Jütte K., Stampfer T. Evaluating the potential of WorldView-2 data to classify tree species and different levels of Ash mortality // *Remote Sensing*. 2014. V. 6. P. 4515–4545.

Pattern Recognition of Forest Canopy Using the Airborne Hyperspectral Data and Multi-bands High Spatial Resolution Satellite Sensor WorldView-2 Data. A Results Comparison and Accuracy Estimation

V. V. Kozoderov¹, V. D. Egorov²

¹*Lomonosov Moscow State University, Moscow*

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

Pattern recognition of forest surface from remote sensing data: using the airborne hyperspectral data and using multi-bands high spatial resolution satellite sensor WorldView-2 data are investigated. The early proposed method and standard QDA method for calculations were used. A comparison of calculations results were conducted. A recognition calculation accuracy range for airborne and satellite remote sensing data for three forest surface fragments for different created data bases for recognition system has been assessed. Some opportunities of automatic data preparing of created system were displayed. Some special features of pattern recognition of forest surfaces from hyperspectral airborne data and from multi-bands high spatial resolution satellite data were discussed.

Keywords: airborne hyperspectral imagery, multi-bands high spatial resolution satellite data, forest canopy recognition

REFERENCES

Egorov V.D., Kozoderov V.V. Raspoznavanie lesnoi rasti-tel'nosti po samoletnym giperspektral'nym dannym [Forest vegetation recognition by aircraft hyperspectral data] // *Issled. Zemli iz kosmosa*. 2016. № 3. P. 47–58. (In Russian).

Eitel J.U.H., Vierling L.A., Litvak M.E., Long D.S., Schul-thess U., Ager A.A., Krofcheck D.J., Stoscheck L. Broadband, red-edge information from satellites improves early stress detection in a New Mexico conifer woodland // *Remote Sensing of Environment*. 2011. V. 115. P. 3640–3646.

Gärtner P., Förster M., Kleinschmit B. The benefit of synthetically generated RapidEye and Landsat 8 data fusion time series for riparian forest disturbance monitoring // *Remote Sensing of Environment*. 2016. V. 177. P. 237–247.

Guerschman J.P., Hill M.J., Renzullo L.J., Barrett D.J., Marks A.S., Botha E.J. Estimating fractional cover of photosynthetic vegetation, non-photosynthetic vegetation and bare soil in the Australian tropical savanna region upscaling the EO-1 Hyperion and MODIS sensors // *Remote Sensing of Environment*. 2009. V. 113. P. 928–945.

Immitzer M., Atzberger C., Koukal T. Tree species classification with Random Forest using very high spatial resolution 8-band WorldView-2 satellite data // *Remote Sensing*. 2012. V. 4. P. 2661–2693.

Immitzer M., Stepper C., Böck S., Straub C., Atzberger C. Use of WorldView-2 stereo imagery and National forest inventory data for wall-to-wall mapping of growing stock // *Forest Ecology and Management*. 2016. V. 359. P. 232–246.

Immitzer M., Böck S., Einzmann K., Vuolo F., Pinnel N., Wal-lner A., Atzberger C. Fractional cover mapping of spruce and pine at 1 ha resolution combining very high and medium spatial resolution satellite imagery // *Remote Sensing of Environment*. 2018. V. 204. P. 690–703.

Karlson M., Ostwald M., Reese H., Bazié H.R., Tankoano B. Assessing the potential of multi-seasonal WorldView-2 imagery for mapping West African agroforestry tree species // *International Journal of Applied Earth Observation and Geo-information*. 2016. V. 50. P. 80–88.

Kozoderov V.V., Egorov V.D. Avtomatizatsiya obrabotki giperspektral'nykh dannyykh samoletnogo zondirovaniya [Automation of processing of hyperspectral data of aircraft sounding] // *Issled. Zemli iz kosmosa*. 2013. № 6. P. 65–80. (In Russian).

Pu R., Landry S. A comparative analysis of high spatial resolution IKONOS and WorldView-2 imagery for mapping urban tree species // *Remote Sensing of Environment*. 2012. V. 124. P. 516–533.

Ramoelo A., Cho M.A., Mathieu R., Madonsela S., Van de Kerchove R., Kaszta Z., Wolff E. Monitoring grass nutrients and biomass as indicators of rangeland quality and quantity using random forest modelling and WorldView-2 data // *International Journal of Applied Earth Observation and Geo-information*. 2015. V. 43. P. 43–54.

Waser L.T., Kuchler M., Jütte K., Stampfer T. Evaluating the potential of WorldView-2 data to classify tree species and different levels of Ash mortality // *Remote Sensing*. 2014. V. 6. P. 4515–4545.