

Корец М.А.^{1,2}, Скудин В.М.³

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ДЕШИФРИРОВАНИЕ ЛЕСОТАКСАЦИОННЫХ ВЫДЕЛОВ ПО МАТЕРИАЛАМ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ И ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ

АННОТАЦИЯ

Традиционно картографирование лесотаксационных выделов осуществляется методом ручного контурного дешифрирования спектрально-аэрофотосъемки. Характеристики выдела присваиваются инженером-таксатором по материалам полевых обследований. Очевидно, что такой ручной подход достаточно трудоемок и субъективен. Широкая доступность в последнее время космической съемки высокого пространственного и спектрального разрешений, цифровых моделей рельефа и программного обеспечения для их тематической обработки позволяет реализовать автоматизированную объектно-ориентированную методику контурного дешифрирования выделов.

Разработка и тестирование предлагаемой методики осуществлялось в процессе лесоустроительных работ, выполняемых для территорий ряда тестовых территорий (заповедников «Кузнецкий Алатау», «Саяно-Шушенский» и арендного участка «Карат»), общей площадью более 800 тыс. га и расположенных в районах Центральной и Южной Сибири. Обработка данных осуществлялась с использованием программных пакетов TrimbleCognition 8, Scanex Image Processor (Thematic Pro) и ESRI ArcGIS 10.

Картографирование лесотаксационных характеристик осуществлялось на основе мультиспектральной спутниковой съемки (ДДЗ-композиции): Rapideye (5 спектральных каналов, пространственное разрешение – 5 м) и WorldView-2 (4 спектральных канала R-G-B-NIR с пространственным разрешением 1,8 м, приведенное к панхроматическому каналу 0,5 м). В качестве дополнительной информации использовались векторные карты предыдущего лесоустройства с границами лесотаксационных выделов и кварталов, а также материалы полевых работ 2013–2016 гг.

Для оценки и картографирования лесорастительных условий по топографическим характеристикам была использована растровая цифровая модель рельефа (ЦМР) местности ASTER GDEM2 с пространственным разрешением 20 м в пикселе. На основе ЦМР были рассчитаны двухслойные растровые изображения (ЦМР-композиции): $Sin(a)$ и $Cos(a)$, где a – величина угла солнечной экспозиции пикселя.

Многоканальные ДДЗ- и ЦМР-композиции были подвергнуты двухуровневой автоматической сегментации с заданными уровнями пространственной детализации. Полученные векторные ДДЗ- и ЦМР-сегменты объединялись в единый слой базовых выделов, которые затем классифицировались методом максимального правдоподобия с использованием обучающих выборок эталонных пробных площадей. Окончательное таксационное описание выделов генерализованного уровня формировалось на основе комбинаций описаний выделов детального уровня. На завершающем этапе генерализованные выделы подвергались

¹ Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН – Обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, ул. Академгородок, д. 50/28, 660036, Красноярск, Россия, e-mail: mik@ksc.krasn.ru

² Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, 660041, Красноярск, Россия

³ Филиал ФГБУ «Рослесинфорг» «Востсиблеспроект», ул. Крупской, д. 42, 660062, Красноярск, Россия, e-mail: lespravda@gmail.com

пространственной фильтрации, сглаживанию, увязке с границами кварталов и нумерации в соответствии с требованиями и нормативами лесоустроительных работ.

Предлагаемый автоматизированный подход по сравнению с традиционным позволяет значительно повысить производительность работ при контурном дешифрировании лесотаксационных выделов, снизить влияние субъективного фактора при формировании геометрии и характеристик выделов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автоматизированное дешифрирование выделов, ГИС, ДЗ, ЦМР.

Mikhail A. Korets^{1, 2}, Viktor M. Skudin³

AUTOMATED APPROACH FOR MAPPING OF FOREST INVENTORY POLYGONS ON THE BASE OF SPACE IMAGERY AND DIGITAL ELEVATION MODEL

ABSTRACT

Conventionally forest inventory polygons mapping procedure is done manually by an aerial red-green-near infrared airborne imagery analysis. A forest inventory expert with help of the selective field plot data assigns forest stand attributes to polygons. This manual approach is time-consuming and highly subjective. The current availability of multispectral satellite imagery, digital elevation models of fine resolution and modern software allows implementing of the atomized and object based approach of forest inventory polygons mapping.

We elaborate and test the new approach in the framework of forest inventory tasks for a number of forest management areas ("Kuznetsk Alatau" reserve, "Sayano-Shushenskaya" reserve and forest lease area "Karat") with total area more than 800 000 ha and location in central and southern Siberia. The Trimble eCognition Developer 8, Scanex Image Processor (Thematic Pro) and ESRI ArcGIS 10 software were used.

We used multiband satellite imagery (RS-composites) of Rapideye (5 spectral bands, 5 m resolution) and WorldView-2 (4 spectral bands R-G-B-NIR with spatial resolution of 1.8 m and fused to panchromatic band resolution of 0.5 m) as main data source for forest attributes mapping. As an additional reference data, we used old achieved forest inventory maps of forest inventory polygons and blocks boundaries, as well as recent groundtruth field data of 2013–2016.

We applied the 20m-resolution ASTER GDEM 2 raster digital elevation model to estimate and map the forest growing conditions. A two-layered images (DEM-composites) were calculated with layers of $\sin(a)$ and $\cos(a)$, where a – is an aspect angle of each pixel.

Both RS- and DEM-composites were automatically segmented for two assigned levels of spatial heterogeneity. Then we combined RS- and DEM-based segments into layer of initial forest inventory polygons and classified them with help of the maximum likelihood method, based on training samples of reference field sites. The resulting attributes tables of generalized inventory polygons were compiled as a combination of polygon attributes of initial detailed level. Finally, the output inventory polygons were spatially filtered, smoothed, snapped to the block boundaries and renumber according to the forest inventory regulations.

¹ Sukachev Institute of Forest SB RAS, Akademgorodok str., 50/28, 660036, Krasnoyarsk, Russia, *e-mail:* mik@ksc.krasn.ru

² Siberian Federal University, Svobodniy str., 79, 660041, Krasnoyarsk, Russia

³ "ROSLESINFORG" "Vostsibleproekt", Krupskaya str., 42, 660062, Krasnoyarsk, Russia, *e-mail:* lespravda@gmail.com

This automated method takes less time and reduces the human factor influence to compare it with traditional one. It may be rapidly repeated and adjusted to other test sites. Moreover, produced inventory polygons geometry and attributes meet Russia's traditional forest inventory requirements.

KEYWORDS: forest inventory polygons mapping, GIS, RS, DEM.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с инструкцией проведения лесоустройства, лесотаксационный выдел является базовым элементом лесоустройства и определяется как относительно однородный участок леса по породному составу и лесорастительным условиям, включая преобладающую крутизну и экспозицию склона [Минаева, 1995].

Традиционно картографирование выделов осуществляется методом ручного контурного дешифрирования спектральной аэрофотосъемки. Характеристики выдела присваивается инженером-таксатором по материалам полевых обследований. Очевидно, что такой «ручной» подход достаточно трудоемок и субъективен, хотя он активно используется и дает хорошие результаты при условии достаточного опыта и ответственности таксатора-дешифровщика [Корец и др., 2007].

На сегодняшний день мультиспектральная спутниковая съемка высокого и сверхвысокого пространственного разрешения (5–0,5 м) приближается к разрешению цифровой (или оцифрованной) аэрофотосъемке (0,3–0,1 м). В распоряжении российских пользователей данных дистанционного зондирования (ДДЗ) сейчас находится неплохой выбор зарубежных и отечественных спутниковых систем пригодных для тематического дешифрирования и картографирования параметров растительности. Например, Rapideye (5 спектральных каналов, Ortho Products, Level 3A, 5м пикс.); Worldview-2 (8 спектральных каналов – 1,84 м пикс. и панхроматическим – 0,46 м пикс.); КАНОПУС-В (4 спектральных канала, 2,1 м пикс.); РЕСУРС-П (4 спектральных канала, 0,7 м пикс.).

В открытом доступе (в сети Интернет) сейчас также находятся цифровые растровые модели рельефа местности (ЦМР) различного пространственного разрешения (от 100 до 20 м пикс.): GMTED2010 (100 м пикс.), SRTM (30 м пикс.), ASTER GLOBAL DEM2 (20 м пикс.). Наличие достаточно детальных данных ЦМР позволяет не только выполнять операции ортонормирования съемки ДДЗ при геометрической и радиометрической коррекции, но также использовать прямые и производные параметры рельефа (высоту, крутизну, экспозицию, кривизну, степень расчлененности и др.) для выделения относительно однородных ландшафтных элементов, определяющих типы лесорастительных условий.

Таким образом, существует возможность учесть при автоматизированной сегментации и классификации как спектральные признаки данных ДДЗ, так и типы лесорастительных условий на основе ЦМР.

Методы объектно-ориентированной сегментации реализованы во многих современных программных пакетах обработки ДДЗ, таких как Scanex Image Processor, TrimbleeCognition, ENVI и др.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для автоматизации процесса классификации и картографирования растительного покрова требуется использование объективных количественных критериев. Эта проблема успешно решается при создании классификации растительного покрова в рамках географо-генетического подхода [Колесников, 1956]. Изучаемая территория дифференцируется на участки, однородные по топографическому положению и сочетанию элементов или

форм мезорельефа, и, следовательно, по экологическим режимам, создающим определенный лесорастительный эффект. Генетический принцип классификации проявляется в том, что все насаждения в пределах относительно однородной по топологическому положению территории объединяются общностью происхождения, т. е. рассматриваются как возрастные стадии характерного для этих условий коренного насаждения. Коренные и производные типы насаждений группируются в восстановительный ряд растительности – тип леса, т. е. ряд генетически связанных и последовательно сменяющихся насаждений, которые развиваются в пределах определенного типа лесорастительных условий [Колесников, 1956; Мкртчян, 2006].

Процесс дешифрирования космических изображений базируется на распространенной схеме, включающей их предварительную обработку, сегментацию, классификацию и интерпретацию, анализ точности классифицированных изображений [Richards, 2005].

Наряду с классическим (попиксельным) подходом для классификации ДДЗ в нашей работе используется объектно-ориентированный подход. Основным отличием данного подхода является использование в качестве минимальной операционно-территориальной единицы однородных областей (сегментов или пространственных кластеров), образованных пикселями исходного изображения. При этом процесс формирования сегментов (сегментация) является управляемым. То есть оператор может управлять размером и формой создаваемых сегментов, что в свою очередь позволяет управлять детальностью (степенью генерализации) итоговой тематической карты. Применение объектно-ориентированного подхода хорошо себя зарекомендовало при автоматизированном дешифрировании данных высокого пространственного разрешения [Vock et al., 2005].

Разработка и совершенствование предлагаемой методики осуществлялись в процессе работ, выполняемых по второму разряду лесоустройства для территорий заповедников «Саяно-Шушенский» (площадь ~390 000 га, рельеф горный), «Кузнецкий Алатау» (площадь ~400 000 га, рельеф горный) и на арендном участке «Карат» (площадь ~42 000 га, рельеф равнинный), расположенных в районах Центральной и Южной Сибири (рис. 1).

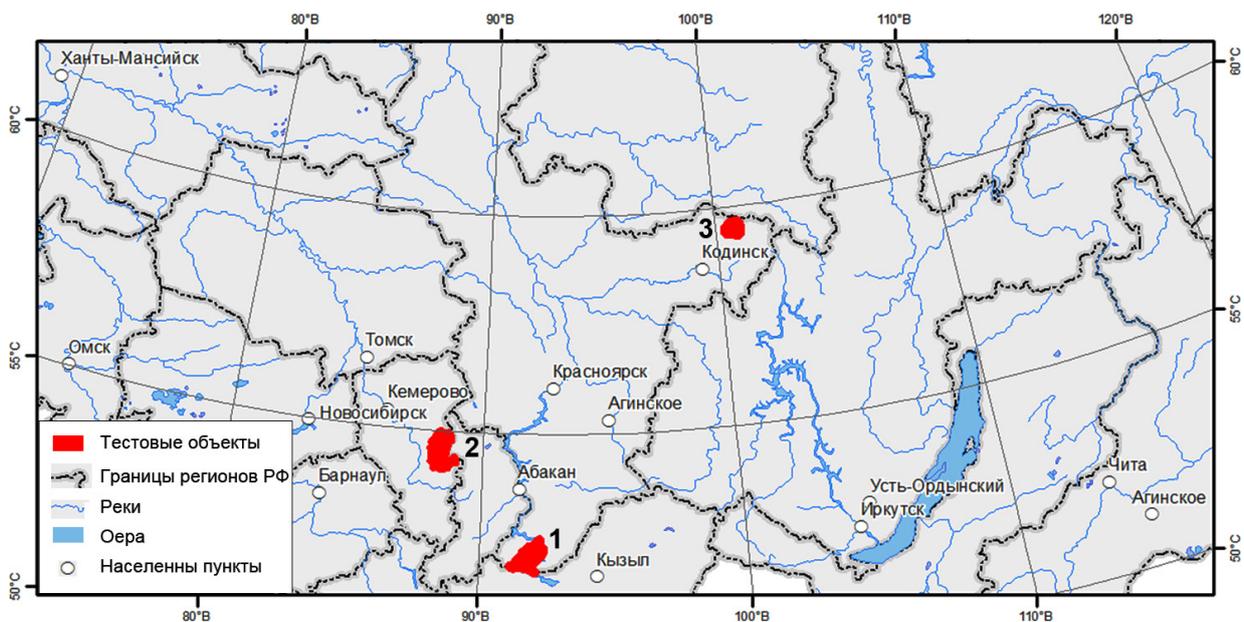


Рис. 1. Расположение тестовых объектов

(1 – заповедник «Саяно-Шушенский», 2 – заповедник «Кузнецкий Алатау», 3 – арендный участок «Карат»)

Fig. 1. Test areas location

(1 – reservation "Sayano-Shushenskiy", 2 – reservation "Kuznetskiy Alatau", 3 – forest lease area "Karat")

Исходными материалами для реализации методики служили: мультиспектральная спутниковая съемка Rapideye (5 спектральных каналов, Ortho Products, Level 3A, пространственное разрешение – 5 м пикс.); мультиспектральная спутниковая съемка WorldView-2 (Ortho-Ready Standard: 4 спектральных канала R-G-B-NIR, 1,8 м пикс., приведенных к 0,5 м пикс.); цифровая растровая модель рельефа местности ASTER GDEM2 – [пространственное разрешение – 20 м/пикс., <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>]; цифровые векторные карты предыдущего лесоустройства, включающие квартальную и выделную сети, а также элементы топографической основы (дороги и реки); материалы современных полевых обследований (описание пробных площадей выборочной таксации).

Обработка данных осуществлялась с использованием программных пакетов Scanex Image Processor 4,2 (Thematic Pro), Trimble eCognition 8 и ESRI ArcGIS 10.

Некоторые элементы разрабатываемой методики были ранее опубликованы в работах [Корец и др., 2007; Корец, 2014; Korets et al., 2016].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основные элементы предлагаемой методики представлены в блок-схеме (рис. 2).

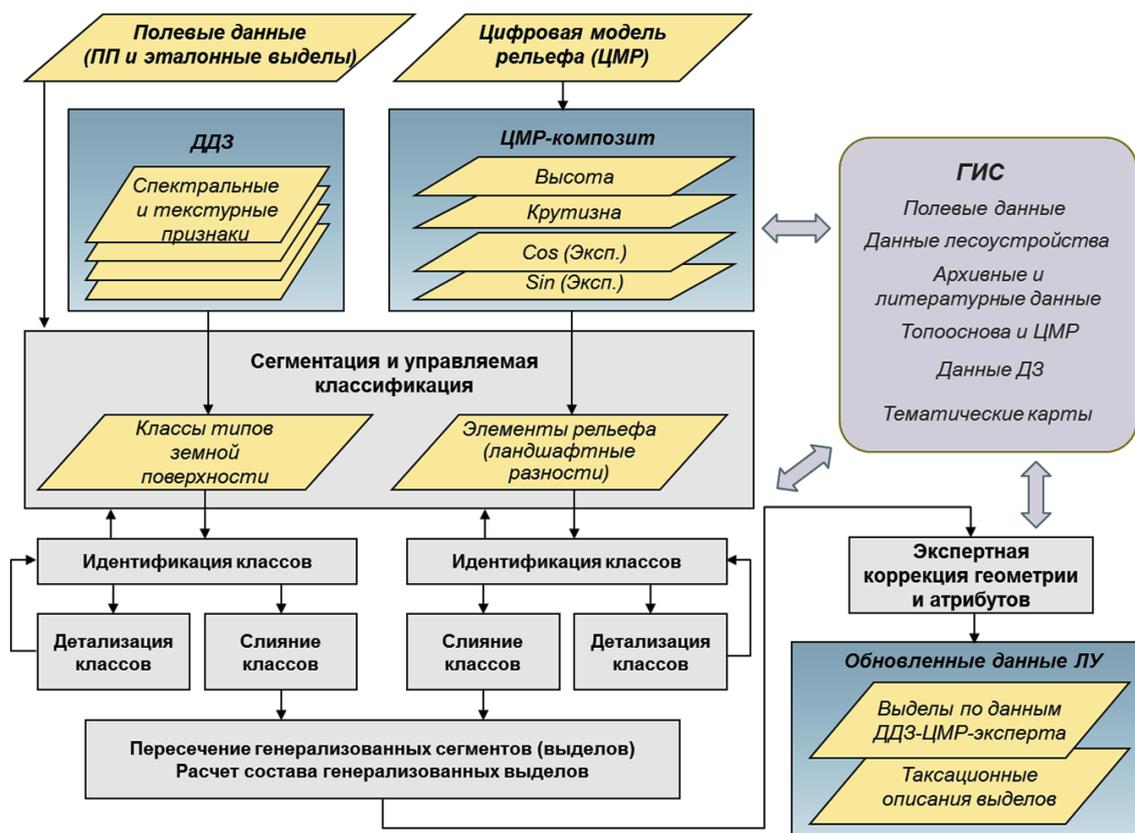


Рис. 2. Блок-схема методики автоматизированного картографирования лесотаксационных выделов

Fig. 2. The block diagram of the atomized approach for forest inventory polygons mapping

1. Подготовка исходных данных

Исходными данными для реализации методики являются: мультиспектральные данные ДЗ, цифровая растровая модель рельефа (ЦМР), полевые опорные таксационные характеристики насаждений (новые полевые пробные площади, эталонные выделы прошлого лесоустройства).

1.1. Подготовка данных ДДЗ

Учитывая современные требования к пространственной точности, как правило, необходима дополнительная геометрическая коррекция полученных данных ДДЗ с использованием опорных точек привязки и ортотрансформации на основе ЦМР.

Для повышения точности автоматизированной оценки характеристик растительности можно использовать дополнительные производные от спектральных признаки: зональные отношения (вегетационные индексы) и характеристики пространственной изменчивости (текстура и форма).

1.2. Подготовка данных ЦМР

На основе исходной высоты по ЦМР (ASTER GDEM) рассчитываются дополнительные растровые слои крутизны и экспозиции склонов ($a, ^\circ$), а также двухслойное изображение: $Sin(a)$, $Cos(a)$, где a – величина угла экспозиции пикселя, измеряемая в градусах относительно направления на север (рис. 3).

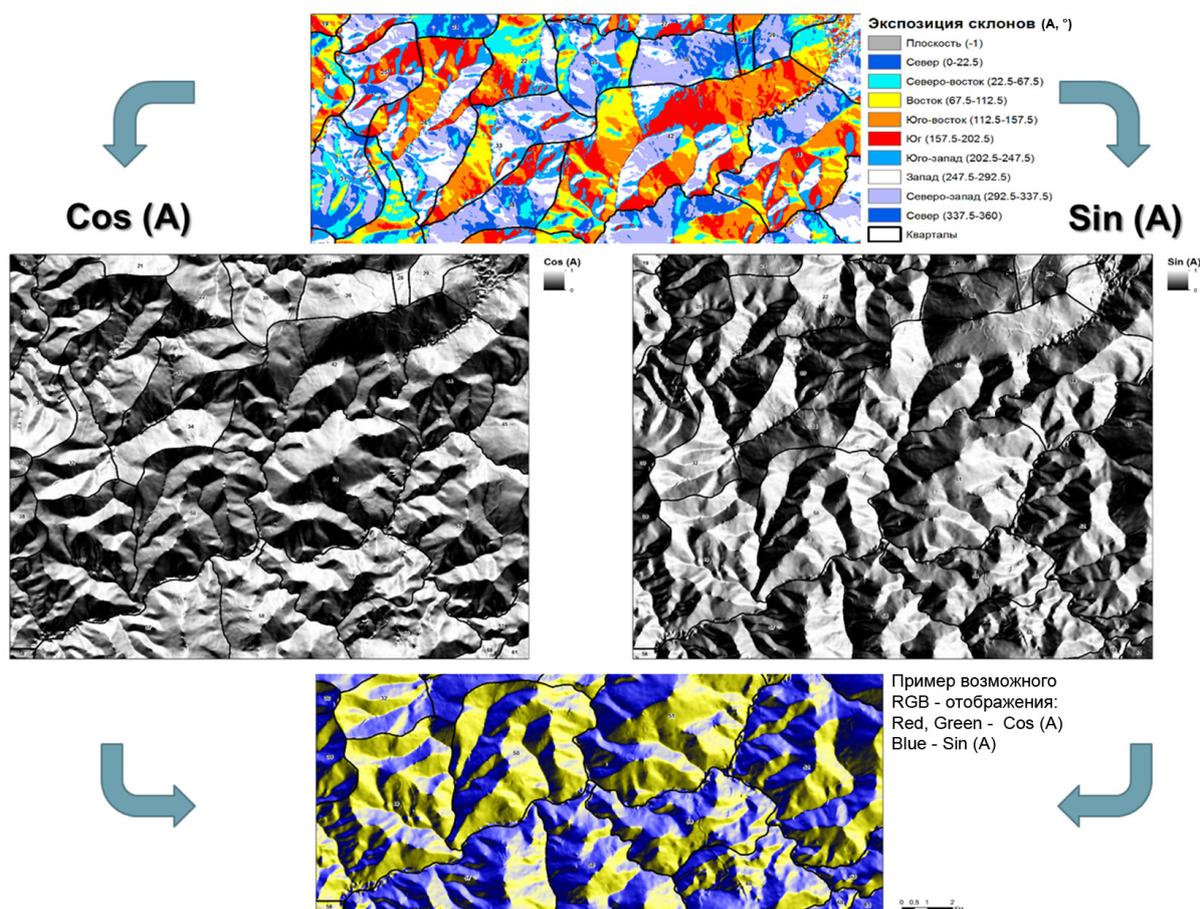


Рис. 3. Формирование ЦМР-композиата
Fig. 3. The building of the DEM-composite

1.3. Подготовка эталонных данных

Нами предложен метод формирования эталонных выборок на базе совместного анализа лесоустроительных выделов прошлого лесоустройства и спутникового изображения современной ситуации.

С целью повышения статистической достоверности связи дистанционных оптических признаков выдела (сигнатура выдела) с дискретными характеристиками из лесотаксационной базы данных необходимо для эталонной выборки отобрать выдела, наиболее одно-

родные по пространственной структуре. Карты уровня однородности выделов (дисперсии признаков сигнатур выделов), совмещенные с композитным изображением спутниковой сцены, потенциально позволяют сделать это. Для эталонных выборок отбираются только относительно однородные выделы с заданным уровнем величины среднеквадратичного отклонения яркости. Эталонные выделы группируются по принадлежности к информационным классам, представляющих сочетания основных характеристик насаждений (тип леса, породный состав, полнота, возраст и запас преобладающей породы).

2. Сегментация изображений ДДЗ и ЦМР

Сегментация – это процесс формирования новых областей (сегментов) за счет слияния смежных областей (сегментов), состоящих из пикселей исходного изображения, объединенных с использованием одной или нескольких характеристик. В качестве характеристик используются спектральные и текстурные признаки изображений.

В первую очередь сливаются те смежные сегменты, для которых метрика несходства (неоднородность результата слияния, представленная численным значением используемой характеристики) минимальна. Основной характеристикой сегмента при многоканальной сегментации, используемой при слиянии сегментов, является гетерогенность или неоднородность сегмента (ScanEx Image Processor, модуль «Тематик Про»).

2.1. Сегментация многоканальных изображений ДДЗ

На этом этапе многоканальные изображения ДДЗ-компози́ты (спектральные и текстурные слои) подвергаются двухуровневой автоматической сегментации (рис. 4).

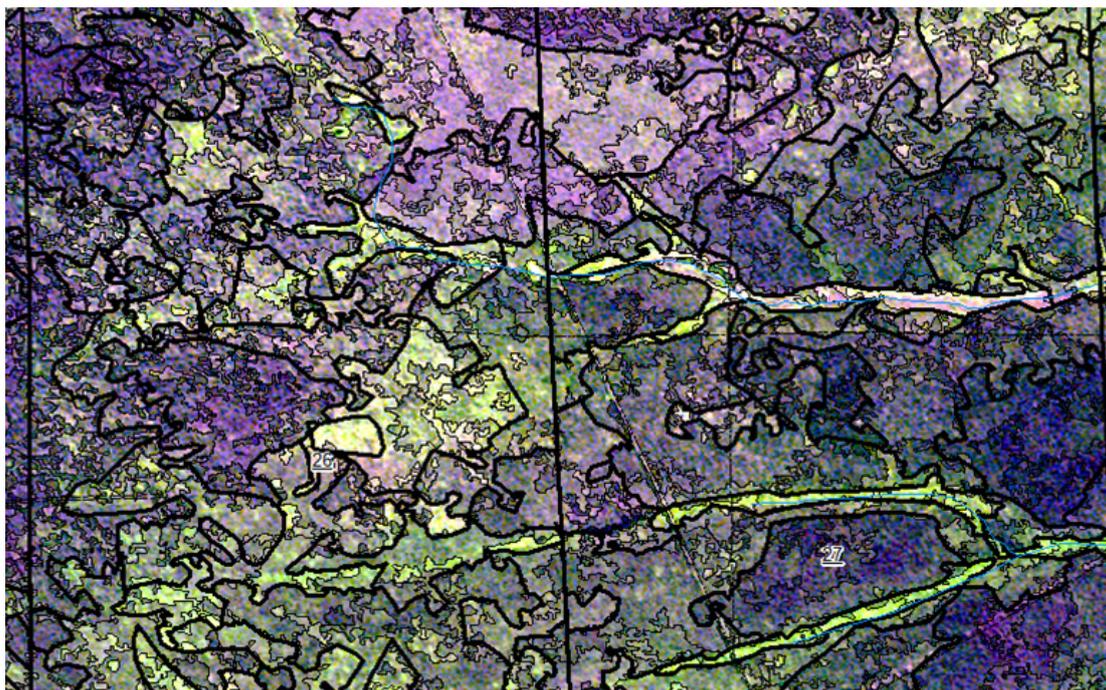


Рис. 4. Фрагмент многоканального спутникового изображения (RapidEye, 5 м) с наложенными сегментами: детальный уровень (тонкие линии) и генерализованный уровень (жирные линии)

Fig. 4. The fragment of Rapideye satellite image overlaid by polygons of segments: detailed level (thin lines), generalized level (bold lines)

При этом первый (детальный) уровень детализации (размера) сегментов определяется минимальной допустимой площадью однородного участка насаждения, выделяемого на данном исходном изображении. Площадь таких сегментов зависит от разрешения исходных изображений ДДЗ и может колебаться от 0,1 до 1 га. Второй генерализованный уровень

сегментации определяется минимальной, средней и максимальной площадью выделов для заданного разряда лесоустройства. Полученные сегменты генерализованного уровня включают в себя сегменты детального уровня, что необходимо в дальнейшем для расчета породного состава результирующих выделов.

2.2. Сегментация ЦМР-композиата

На этом этапе выполняется одноуровневая сегментация многоканальных изображений ЦМР-композиата (высота, крутизна, Sin (эксп.), Cos (эксп.)). Размер сегментов зависит от исходного разрешения используемой ЦМР и заданной минимальной площади выделов при заданном разряде работ (рис. 5). Для каждого сегмента рассчитывается среднее значение вышеуказанных характеристик рельефа для последующей классификации. Описанный этап может быть опущен для равнинных территорий и участков со слабо выраженным рельефом.

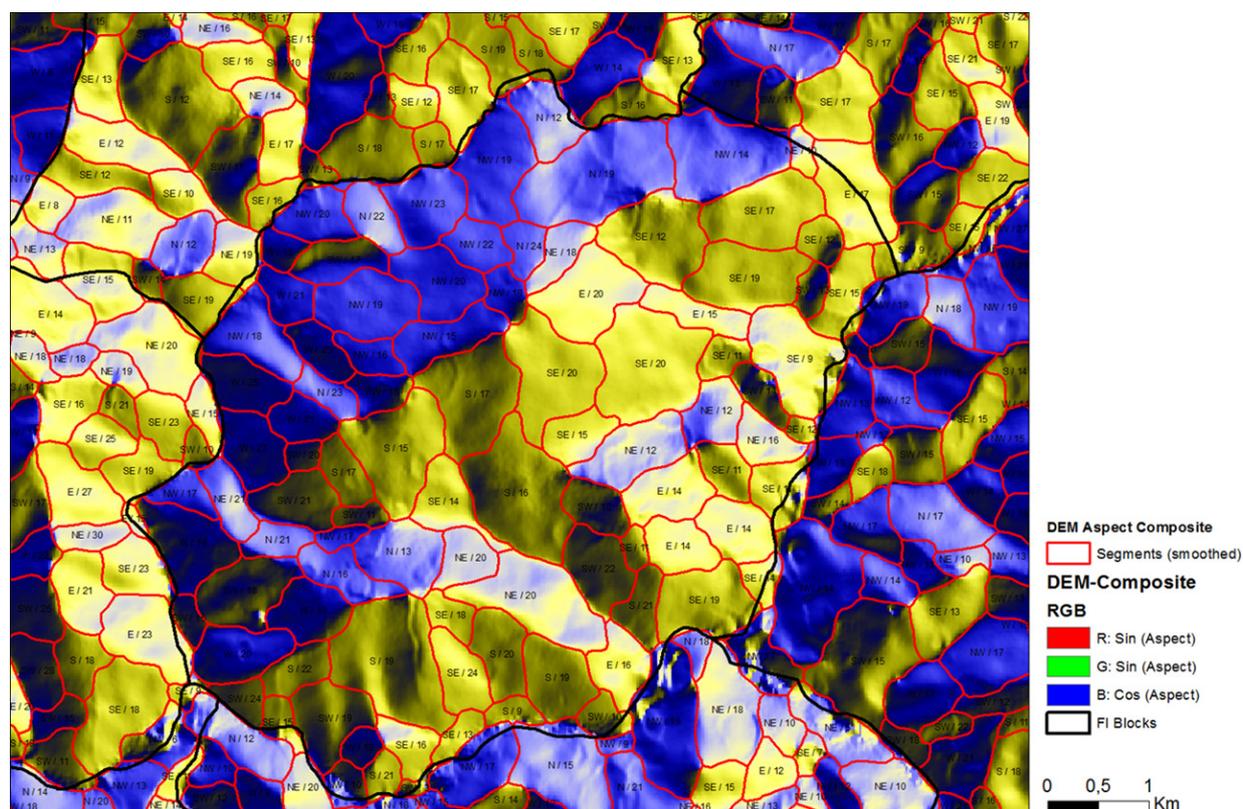


Рис. 5. Пример сегментации ЦМР-композиата

Fig. 5. DEM-composite segmentation example

3. Выбор и идентификация классов для классификации сегментов ДДЗ и ЦМР композиатов

Отобранные на предыдущих этапах эталонные выделы совмещаются с полученными сегментами всех уровней, при этом оценивается необходимость и координаты закладки новых пробных площадей внутри сегментов детального уровня в местах отсутствия достоверной эталонной информации из архивных данных. Эталоны выбираются также с учетом транспортной доступности из множества предварительных кандидатов.

Таксационные описания, сформированные в ходе новых полевых работ, анализируются с целью выделения наиболее представленных сочетаний основных таксационных признаков (категория земель, породный состав, тип леса, полнота, группа возраста). В результате формируется набор эталонных сегментов детального уровня, составляющий 1–5 % от общей площади объекта дешифрирования (рис. 6).

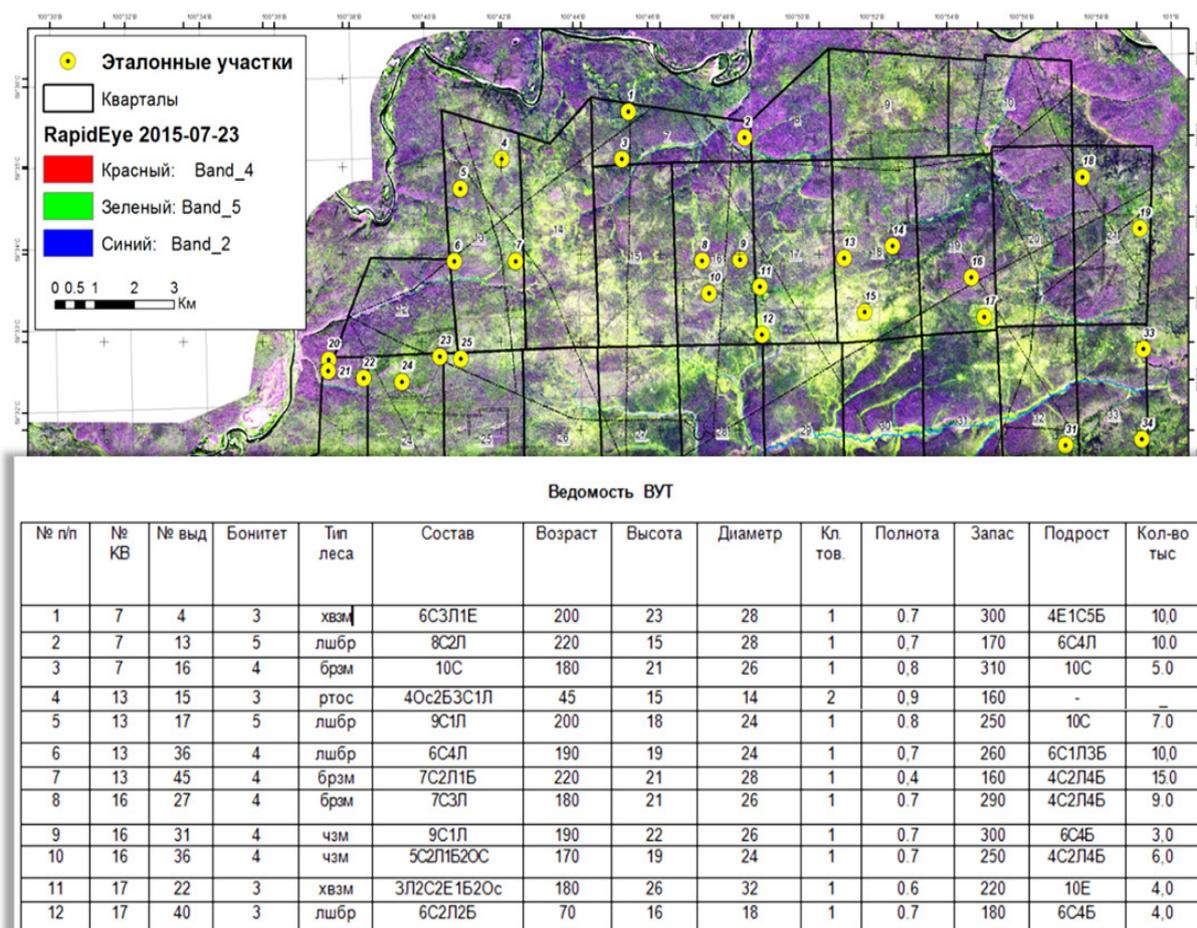


Рис. 6. Формирование набора эталонных данных
Fig. 6. The building of the training sample set

4. Автоматизированная тематическая классификация сегментов

Полученные сегменты рассматриваются как операционно-территориальные единицы, для которых решается задача отнесения к тематическим классам на основании вычисленных для них характеристик (средних значений и дисперсий в каналах признаков ДДЗ и ЦМР). Для этого используется заданная эталонная тематическая информация, позволяющая отнести сегменты обучающей выборки к тому или иному тематическому классу, и математические методы дискриминации, а именно линейный или квадратичный дискриминационный анализ (ScanEx Image Processor, модуль «Тематик Про»).

5. Пересечение и генерализация базовых выделов и классов

На этом этапе полученные в п. 2.1. генерализованные сегменты ДДЗ геометрически пересекаются с сегментами ЦМР и полигонами квартальной сети, при этом их атрибутивные данные объединяются. Также необходимо выполнить фильтрацию и слияние образовавшихся после пересечения мелких полигонов, неудовлетворяющих требованию минимальной площади выдела при заданном разряде работ.

6. Расчет состава генерализованных выделов

Полученные генерализованные выделы накладываются на тематически классифицированные в п. 4. базовые (детальные) сегменты, при этом выполняется автоматизированное формирование таксационного описания генерализованных выделов, в которое классы (категории земель и породы) базовых сегментов заносятся с коэффициентами состава, пропорциональными их площади в составе объединяющего их генерализованного выдела.

7. Экспертная коррекция геометрии и атрибутов

Автоматически сформированные выделы и их описания проверяются экспертом-таксатором, который вносит необходимые правки в машинный вариант. Проверенный и отредактированный картографический слой выделов проходит этапы автоматического сглаживания (упрощения) и увязки границ, а также этап автоматической нумерации (рис. 7).

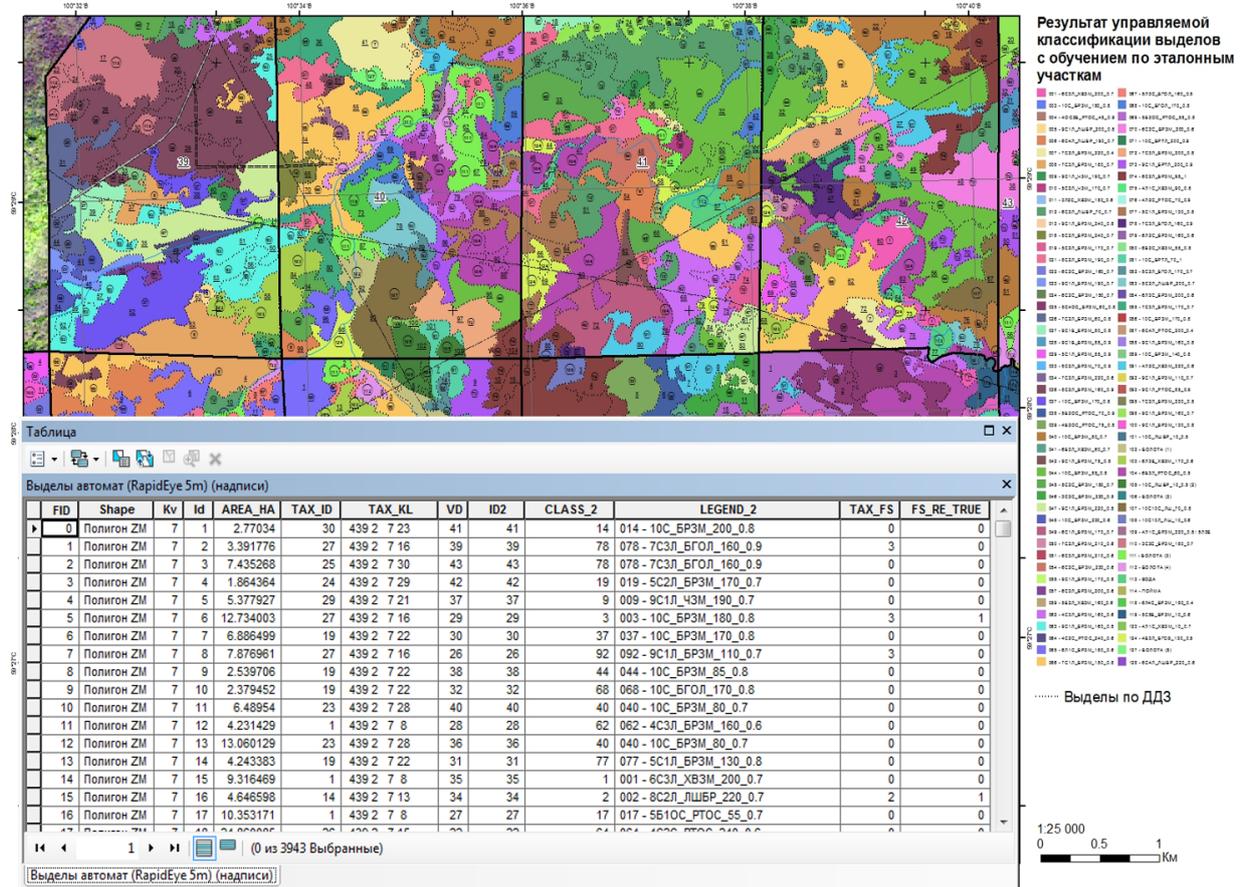


Рис. 7. Пример автоматически сформированных выделов и их описаний
 Fig. 7. An example of the automatically generated forest inventory polygons with their attributes

ВЫВОДЫ

Предложенная методика комбинированного анализа данных дистанционного зондирования, цифровой модели рельефа и материалов наземных обследований позволяет в значительной мере автоматизировать процесс формирования лесотаксационных карт и описаний. Расширенный набор дешифровочных признаков, включающий спектральные, текстурные и ландшафтные характеристики территории, позволяет повысить точность автоматического картографирования лесотаксационных выделов в условиях равнинного и горного рельефа местности.

Разработка и апробация элементов методики осуществлялось в рамках лесоустроительных работ, выполняемых на территории крупных тестовых объектов, расположенных в районах Центральной и Южной Сибири.

Предложенная схема интерпретации дистанционных данных позволяет значительно ускорить процесс тематической обработки изображений, а также снизить влияние субъективного фактора на результат.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, проект № 18-05-00781 и № 18-05-00235.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Foundation of Basic Research, No 18-05-00781 and No 18-05-00235.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесников Б.П. Кедровые леса Дальнего Востока. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1956. 262 с.
2. Корец М.А., Данилова И.В., Черкашин В.П. Дистанционная индикация структуры лесных территорий // Региональные проблемы экосистемного лесоводства. Красноярск: Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2007. С. 52–68.
3. Корец М.А. Использование объектно-ориентированного подхода для автоматизированного дешифрирования лесотаксационных выделов по материалам космической съемки и цифровой модели рельефа местности // Материалы Междунар. науч. конф. «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли», 23–36 сентября 2014 г., Красноярск: ИКИТ СФУ, 2014. С. 294–298.
4. Минаева Л.Ю. Инструкция по проведению лесоустройства в лесном фонде России. Ч. 1. Организация лесоустройства. М.: Воениздат, 1995. № 6. 274 с.
5. Мкртчян А.С. Автоматизированное выделение ландшафтных единиц путем классификации рельефа с применением ГИС // Ландшафтное планирование. Общие основания. Методология. Технология: тр. Междунар. школы-конф. М.: Географический факультет МГУ, 2006. С. 203–208.
6. Рыжкова В.А. Восстановительная динамика южнотаежных лесов. // Лесные экосистемы Енисейского меридиана. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. С. 146–157.
7. Рыжкова В.А. Закономерности восстановительной динамики подтаежных и горнотаежных лесов // Региональные проблемы экосистемного лесоводства. Красноярск: Изд-во Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2007. С. 78–90.
8. Bock M., Xofis P., Mitchley J., Rossner G., Wissen M. Object-oriented methods for habitat mapping at multiple scales – Case studies from Northern Germany and Wye Downs, UK // Journal for Nature Conservation. 2005. V. 13. P. 75–89. DOI: 10.1016/j.jnc.2004.12.002.
9. Korets M., Ryzhkova V., Danilova I., Prokushkin A. Vegetation cover mapping based on remote sensing and digital elevation model data, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., 2016. V. XLI-B8. P. 699–704. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B8-699-2016.
10. Richards J., Xiuping J. Remote sensing digital image analysis: an introduction. Birkhäuser, Basel, 2005. Switzerland. 439 p.
11. Ryzhkova V., Danilova I. GIS-based classification and mapping of forest site condition and vegetation. BOSQUE, 2012. V. 33(3). P. 293–297.

REFERENCES

1. Bock M., Xofis P., Mitchley J., Rossner G., Wissen M. Object-oriented methods for habitat mapping at multiple scales – Case studies from Northern Germany and Wye Downs, UK. Journal for Nature Conservation. 2005. V. 13. P. 75–89. DOI: 10.1016/j.jnc.2004.12.002.
2. Kolesnikov B.P. Siberian pine forests of the Russian Far East. M.; L.: Nauka, 1956. 261 p. (in Russian).
3. Korets M.A., Danilova I.V., Cherkashin V.P. Remote indication of forest landscape structure, In: Regional Sustainable Forestry Problems. Sukachev Institute of Forest, Krasnoyarsk, 2007. P. 52–68 (in Russian).

4. *Korets M.A.* The use of object-based image analysis for mapping forest inventory stands based on satellite imagery and digital elevation model. International conference proceedings "Regional problems of remote sensing of the Earth", 2014. Krasnoyarsk: SFU, 2014. P. 294–298 (in Russian).
5. *Korets M., Ryzhkova V., Danilova I., Prokushkin A.* Vegetation cover mapping based on remote sensing and digital elevation model data, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 2016. V. XLI-B8. P. 699–704. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B8-699-2016.
6. *Minayeva L.U.* Forest inventory regulation of the Russia. V. 1. M.: Voenizdat, 1995. No 6. 274 p. (in Russian).
7. *Mkrtchan A.S.* Atomized mapping of the landscape units on the base of relief classification with help of GIS. International conference proceedings. M.: MGU, 2006. P. 203–208 (in Russian).
8. *Richards J., Xiuping J.* Remote sensing digital image analysis: an introduction. Birkhäuser, Basel, 2005. Switzerland. 439 p.
9. *Ryzhkova V.A.* Southern taiga forest regeneration dynamics. In: *Forest Ecosystems of the Yenisei Meridian*. Novosibirsk, 2002. P. 146–157 (in Russian).
10. *Ryzhkova V.A.* Regeneration of subtaiga and mountain taiga forests. In: *Regional Sustainable Forestry Problems*. Sukachev Institute of Forest Publications. Krasnoyarsk, 2007. P. 78–90 (in Russian).
11. *Ryzhkova V., Danilova I.* GIS-based classification and mapping of forest site condition and vegetation. *BOSQUE*, 2012. V. 33(3). P. 293–297.