

S. V. Kovalevsky

The dynamics structure tables of the modal aspen stands diameter of the Republic of Belarus are created based on the developed system of the structure diameter stands modeling in the geographic information system "Forests resources" and tables "Dynamics of the modal stands characteristics of Belarus". The developed forest mensuration tables of the dynamics structure of the diameter modal aspen stands inventory areas table dynamic structure of the modal diameter of aspen stands can be used for assessment of the timber quality of stands and assortment structure of the cutting fund.

Статья поступила в редколлегию 22.04.2011 г.



УДК 630*524.4

ТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА ЗЕМЕЛЬ ЛЕСНОГО ФОНДА

Пушкин А.А.

*УО «Белорусский государственный технологический университет»
(г. Минск, Беларусь)*

Рассмотрены современные подходы к тематическому дешифрированию материалов космической съемки и особенности их применения для лесных территорий. Изложены основные этапы методики тематического дешифрирования земель лесного фонда на основе разработанного программного обеспечения, представлено описание статистических критериев разделимости выделяемых классов объектов.

Приведены результаты опытных работ по тематическому дешифрированию земель лесного фонда ГЛХУ «Дисненский лесхоз» по материалам космической съемки ALOS AVNIR, приведены коэффициенты разделимости выделенных тематических классов.

ВВЕДЕНИЕ

Широкомасштабное развитие космических систем дистанционного зондирования, наблюдающееся в последние годы, создало предпосылки для широкого использования материалов космической съемки во многих отраслях, в том числе лесоустройстве, лесном хозяйстве и мониторинге природных экосистем. При этом направления их использования весьма различны: оценка поврежденных лесных насаждений, контроль рубок леса, изучение динамики земель лесного фонда на основе одновременных материалов съемки, создание и обновление планово-картографических материалов.

Классически, в процессе обработки получаемых со спутника данных съемки выделяют следующие основные этапы: предварительная обработка (геометрическая и радиометрическая коррекция, яркостные преобразования и кадрирование), тематическое дешифрирование, проведение постобработки результатов дешифрирования (генерализация выделенных тематических классов, создание векторных слоев) [1, 2, 3, 4].

Тематическое дешифрирование (классификация) является наиболее сложным этапом и представляет собой процесс сортировки пикселей изображения космического снимка в конечное число классов. В настоящее время разработано достаточно большое количество методов тематического дешифрирования, использующие различные признаки пикселей изображения, которые реализованы в своем большинстве на базе современных программных комплексов обработки данных дистанционного зондирования: *Erdas Imagine*, *ENVI*, *eCognition*, *ER Mapper*, *IDRISI* и др. В практике тематической обработки материалов космической съемки в настоящее время наиболее часто используются алгоритмы на основе статистической оценки спектральных яркостей с использованием эталонных участков изображения или, так называемых, обучающих выборок [1, 2].

Основная трудность тематической обработки материалов космической съемки заключается в обеспечении делимости близких по спектральным показателям классов объектов с одной стороны, и репрезентативности выделяемых классов – с другой. При проведении тематического дешифрирования земель лесного фонда задача распознавания объектов усложняется. Данный факт объясняется наличием значительного количества сходных по спектральным характеристикам и текстуре изображения классов: несомкнувшиеся лесные культуры и вырубki, болота и сосновые насаждения по болоту, прогалины и лиственные молодняки. Это значительно затрудняет проведение достоверной классификации земель лесного фонда и требует от исследователя применения специальных методик.

Целью данной работы явилась разработка технологии тематического дешифрирования земель лесного фонда, а также оценка возможностей выделения основных видов лесных земель и растительности на основе спектрально-яркостных показателей мультиспектральных материалов космической съемки.

МАТЕРИАЛЫ, ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились на землях лесного фонда ГЛХУ «Дисненский лесхоз» Витебского государственного лесохозяйственного производственного объединения в тесном сотрудничестве с отделом приема и обработки космической информации РУП «Белгослес».

На данную территорию получены материалы космической съемки системы *ALOS AVNIR* 2010 года съемки. Необходимо отметить, что технические характеристики сенсора данной системы космического зондирования (табл. 1) наиболее близки к характеристикам планируемого к запуску Бело-

русского космического аппарата дистанционного зондирования. Это, в свою очередь, позволит с достаточной долей уверенности экстраполировать полученные результаты исследований применительно к материалам, планируемым к получению с отечественного спутника.

Таблица 1 – Характеристика изображений сенсоров системы *ALOS*, используемых в исследованиях (дата съемки – 28.06.2010)

| Режимы | <i>PRISM</i> (панхроматический) | <i>AVNIR-2</i> (мультиспектральный) |
|---|------------------------------------|---|
| Спектральный диапазон (мкм): | 0,52-0,77 | голубой: 0,42-0,50 зеленый: 0,52-0,60 красный: 0,61-0,69 ближний ИК: 0,76-0,89 |
| Пространственное разрешение: | 2,5 м (в надире) | 10 м (в надире) |
| Скорость передачи данных на наземный сегмент: | 960 Мбит/сек | 160 Мбит/сек |
| Ширина полосы съемки: | 35 км (в надире) | 70 км (в надире) |
| Радиометрическое разрешение: | 8 бит на пиксел | 8 бит на пиксел |
| Периодичность съемки: | 46 дней | 46 дней |
| Возможность получения стереопары: | Да, с одного витка | нет |

Методика тематического дешифрирования основана на использовании спектральных яркостей отраженного от лесных объектов света в различных каналах космического изображения. При этом в основе метода дешифрирования лежит использование эталонных участков, представляющих интересующие исследователя классы объектов (виды лесных земель и растительности).

Для создания эталонных участков, а также ограничения территории земель лесного фонда ГЛХУ «Дисненский лесхоз» на материалах космической съемки использовались векторные лесные карты, полученные при проведении базового лесоустройства. При этом выполнялась уточненная координатная привязка данных цифровых карт к координатной системе космического снимка, в результате чего достигнуто точное совмещение квартальной и поведельной сети с ситуацией, просматриваемой на космическом снимке.

К картографическому слою таксационных выделов подключалась поведельная база данных, представленная в формате *MS Access*. Формирование эталонных участков выполнялось по планируемым к выделению тематическим классам с помощью запросов в геоинформационной системе.

Для проведения тематического дешифрирования лесных земель и растительности разработан специализированный программный модуль на основе базового программного обеспечения *ENVI*, позволяющий значительно автоматизировать отдельные этапы работ. В общей методике работ, с учетом разработанного программного обеспечения, необходимо выделить четыре основных этапа:

- подготовка исходных данных;
- статистический анализ распределений спектральных яркостей эталонных участков;
- расчет и оценка статистических коэффициентов разделимости планируемых к выделению тематических классов;
- коррекция массива эталонных участков, тематическая классификация и постобработка полученных результатов.

Подготовка исходных данных предусматривает проведение процедур загрузки и преобразования исходных данных, ограничения дешифрируемой лесной территории во избежание перекрытия классов с сельхозугодиями и селитебными комплексами, создания «маски» изображения определение статистических показателей спектральных яркостей эталонных участков с записью полученных результатов в базу данных.

Этап статистического анализа распределения спектральных яркостей подразумевает визуальный анализ полученных по эталонным участкам распределений во избежание их многомодальности и большого размаха. В противном случае выполняется коррекция массива эталонных участков.

Одним из основных критериев качества полученной при классификации тематической карты является обеспечение разделимости между классами, т.е. полученные в результате тематической классификации классы должны достоверно друг от друга отличаться. Обеспечение данного условия предусматривает расчет и оценку статистических коэффициентов разделимости.

Разделимость - статистическая мера расстояния между двумя тематическими классами, рассчитываемая для всех комбинаций пар выделяемых тематических классов [2]. При вычислении разделимости принимаются во внимание ковариация, а также средние значения спектральных яркостей каналов изображения. В качестве мер разделимости в используемой методике и разработанном программном обеспечении используется система коэффициентов трансформированной дивергенции и Джефриса-Матусита.

Коэффициент трансформированной дивергенции TD_{cd} между двумя классами вычисляется по следующей формуле:

$$Div_{cd} = 0,5Tr[(V_c - V_d)(V_c^{-1} - V_d^{-1})] + 0,5Tr[(V_c + V_d)(M_c - M_d)(M_c - M_d)^T], \quad (1)$$

$$TD_{cd} = 2000 \times \left(1 - \exp \frac{-Div_{cd}}{8} \right). \quad (2)$$

где Div_{cd} - расхождение или дивергенция между двумя классами c и d ; Tr - обозначает след матрицы (т. е. сумму ее диагональных элементов), V_c и V_d - ковариационные матрицы, а M_c и M_d - средние векторы для классов c и d соответственно.

При вычислении расхождения (дивергенции) используется выражение (1), которое состоит из двух членов. Первый член обусловлен только лишь различиями между матрицами ковариации. Второй член - нормализованное расстояние между средними значениями. Поведение расхождения как функ-

ции нормализованного расстояния между классами значительно отличается от поведения вероятности правильного распознавания. Второй член суммы в правой части уравнения (1) продолжает быстро возрастать по мере увеличения нормализованного расстояния между средними значениями. Вероятность же правильного распознавания может возрастать только до единицы [2].

Мера «трансформированная дивергенция» вычисляется исходя из выражения (2) и имеет насыщающее поведение. Именно эффект насыщения, обусловленный наличием члена с отрицательной экспонентой делает этот коэффициент наиболее полезным для оценки разделимости тематических классов.

Коэффициент Джефриса-Матусита рассчитывается исходя из следующего выражения:

$$\alpha = \frac{1}{8}(M_c - M_d)^T \left(\frac{V_c - V_d}{2} \right)^{-1} (M_c - M_d) + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{|(V_c + V_d)/2|}{\sqrt{|V_c| \times |V_d|}} \right) \quad (3)$$

$$JM_{cd} = \sqrt{2(1 - e^{-\alpha})} \quad (4)$$

где JM_{cd} – расстояние Джефриса-Матусита между c и d тематическими классами, V_c и V_d – ковариационные матрицы, а M_c и M_d – средние векторы для классов c и d соответственно; $|V_c|$ и $|V_d|$ – детерминант ковариационной матрицы для классов c и d .

Расстояние Джефриса-Матусита представляет собой среднюю разность между функциями плотности двух классов. Благодаря члену с отрицательной экспонентой в выражении (3), функция дает экспотенциально увеличивающийся вес возрастающим разностям между функциями плотности классов. В результате расстояние Джефриса-Матусита имеет насыщающее поведение.

Рассчитываемые значения коэффициентов трансформированной дивергенции и Джефриса-Матусита находятся в диапазоне от 0 до 2. Значение 2 соответствует идеальной разделимости классов, значение 1,9 – хорошей, а значение 1,7 – низкой [2].

По результатам оценки создается таблица, содержащая значения коэффициентов разделимости для каждой пары тематических классов, на основе которой пользователь принимает решение о коррекции массива эталонных участков в случае неудовлетворительной разделимости или проведения тематического дешифрирования, если разделимость классов соответствует требуемым критериям.

Коррекция массива эталонных участков предусматривает удаление тех из них, статистические показатели которых не соответствуют сформированному ряду распределения, а также путем удаления ошибочных пикселей отнесенных к тому или иному эталонному участку. Данная процедура выполняется на основе анализа статистических показателей спектральных яркостей.

Тематическое дешифрирование выполняется на основе существующих базовых алгоритмов реализованных в программном комплексе *ENVI*: метод спектрального угла, параллелепипеда, максимального правдоподобия, минимального расстояния и расстояния Махаланобиса [3, 4]. В результате процедуры дешифрирования создается растровая тематическая карта, содержащая классы объектов в соответствии с эталонными участками.

Проведение постобработки предусматривает проведение генерализации и векторизации полученных при дешифрировании растровых объектов. Генерализация дешифрированных объектов необходима для удаления мелких, неправильно классифицированных групп пикселей.

На основе вышеизложенной методики проведения работ выполнено тематическое дешифрирование земель лесного фонда по материалам космической съемки *ALOS AVNIR*.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эталонные участки создавались по следующим, планируемым к дешифрированию на космическом снимке классам объектов: сосновые насаждения, березовые насаждения, дубовые насаждения, еловые насаждения, сероольховые насаждения, черноольховые насаждения, осиновые насаждения, болота и избыточно увлажненные земли, водные объекты, вырубки (за исключением свежих), луговая растительность, несомкнувшиеся лесные культуры, пашни и прогалины. Следует отметить, что создание эталонных участков на покрытых лесом землях осуществлялось лишь для чистых и условно чистых насаждений (с коэффициентом состава 8 единиц и более).

Проведенный статистический анализ распределения спектральных яркостей первоначально созданных эталонных участков показал неоднородность полученных данных для не покрытых лесом и нелесных земель: несомкнувшиеся лесные культуры, вырубки, участки луговой растительности, болота. Данные распределения характеризуются многомодальностью и большим размахом. В этой связи проводилось предварительное редактирование массива эталонных участков: разбиение некоторых тематических классов на несколько (например, выделялось несколько классов болот по степени их увлажнения), а также удаление некоторых участков для уменьшения размаха распределений спектральных яркостей.

Выполнив анализ коэффициентов делимости, установлено, что ниже следующие тематические классы плохо разделяются между собой:

- березовые, дубовые, сероольховые, черноольховые и осиновые насаждения (коэффициенты делимости составляют 0,272-0,703);
- сосновые и еловые насаждения (коэффициенты делимости составляют 0,809-0,900);
- несомкнувшиеся лесные культуры, вырубки и прогалины (коэффициенты делимости составляют 0,260-0,559);

- еловые и березовые насаждения, что обусловлено особенностями строения древесного полога, когда даже небольшая примесь березы в еловых древостоях занимает верхнюю часть полога, формируя тем самым изображение, характерное для березняков (коэффициенты делимости составляют 0,986-0,998).

Для повышения делимости данных тематических классов выполнялось редактирование эталонных участков – удаление из них пикселей изображения, которые перекрываются с другими классами, а в случае получения при этом неудовлетворительных результатов – проводилось объединение схожих по спектральным признакам классам в один. Проведенные исследования показывают, что процесс объединения должен выполняться ступенчато: вначале объединяются два класса с наименьшей делимостью (например, березовые и дубовые насаждения с коэффициентами делимости 0,272), после чего опять оцениваются коэффициенты делимости и к полученному генерализированному классу (береза+дуб), в случае необходимости, добавляется следующий класс, имеющий с генерализированным классом наименьшую делимость. Данный процесс повторяется до тех пор, пока не будет получен перечень классов делимых между собой.

В результате получен следующий перечень тематических классов, которые целесообразно дешифровать в соответствии с полученными коэффициентами делимости: еловые насаждения, сосновые насаждения, лиственные насаждения, не покрытые лесом и нелесные земли, болота и избыточно увлажненные земли, луговая растительность, водные объекты.

Коэффициенты делимости указанных тематических классов представленные в таблице 2 показывают, что в подавляющем большинстве случаев делимость достаточно хорошая. Исключение составляют тематические классы лиственные насаждения – еловые насаждения (как ранее отмечалось, объясняется закономерностями строения древесного полога); луговая растительность – не покрытые лесом и нелесные земли, что объясняется схожей спектральной характеристикой данных объектов.

Таблица 2 – Коэффициенты разделимости тематических классов после статистической обработки эталонных участков по материалам космической съемки *ALOS AVNIR* (Джефриса-Матусита/Трансформированной дивергенции)

| Тематические классы | Болота и избыточно увлажненные земли | Водные объекты | Еловые насаждения | Листо-венные насаждения | Луговая растительность | Не покрытые лесом и нелесные земли | Минерализованные почвы |
|------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|------------------------------------|------------------------|
| Водные объекты | $\frac{1.998}{2,000}$ | – | – | – | – | – | – |
| Еловые насаждения | $\frac{1.913}{2,000}$ | $\frac{1.999}{2,000}$ | – | – | – | – | – |
| Листо-венные насаждения | $\frac{1.924}{2,000}$ | $\frac{2.000}{2,000}$ | $\frac{0.995}{1,160}$ | – | – | – | – |
| Луговая растительность | $\frac{1.987}{1,999}$ | $\frac{2.000}{2,000}$ | $\frac{1.977}{1,998}$ | $\frac{1.790}{1,922}$ | – | – | – |
| Не покрытые лесом и нелесные земли | $\frac{1.606}{1,693}$ | $\frac{2.000}{2,000}$ | $\frac{1.952}{2,000}$ | $\frac{1.773}{1,982}$ | $\frac{1.165}{1,287}$ | – | – |
| Минерализованные почвы | $\frac{1.856}{2,000}$ | $\frac{2.000}{2,000}$ | $\frac{1.993}{2,000}$ | $\frac{1.995}{2,000}$ | $\frac{1.999}{2,000}$ | $\frac{1.970}{2,000}$ | – |
| Сосновые насаждения | $\frac{1.766}{1,999}$ | $\frac{2.000}{2,000}$ | $\frac{1.405}{1,689}$ | $\frac{1.691}{1,953}$ | $\frac{2.000}{2,000}$ | $\frac{1.989}{2,000}$ | $\frac{1.987}{2,000}$ |

Таким образом, в результате дешифрирования материалов космической съемки *ALOS AVNIR* выделены следующие генерализированные тематические классы:

- лиственные насаждения, включающие классы березовых, дубовых, осиновых, сероольховых и черноольховых насаждений;
- не покрытые лесом и нелесные земли, включающие классы вырубок (за исключением свежих), несомкнувшихся лесных культур и прогалин;
- минерализованные почвы, включающие классы свежих вырубок и площадей сельскохозяйственного назначения.

При дальнейшем разделении генерализированного класса лиственных насаждений на составляющие его тематические классы по древесным видам установлено, что по спектральным признакам наиболее близки между собой березовые, дубовые и осиновые древостои и несколько отличаются от них ольховые насаждения (включая ольху черную и ольху серую). Коэффициенты разделимости между двумя данными классами составили 0,931-1,013.

При разделении генерализированных классов «не покрытые лесом и нелесные земли», «минерализованные почвы» удовлетворительных результатов добиться не удалось – значения коэффициентов разделимости после всех

этапов обработки не превысили 0,2. Это свидетельствует о невозможности достоверного разделения данных классов на их составляющие на основе спектрально-яркостных характеристик материалов космической съемки *ALOS AVNIR*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований разработана методика, технология и специализированное программное обеспечение тематического дешифрирования земель лесного фонда по материалам мультиспектральной космической съемки высокого разрешения на основе использования спектрально-яркостных показателей и эталонных участков изображения.

Выполненные опытные работы по тематическому дешифрированию земель лесного фонда на материалах космической съемки системы *ALOS AVNIR* показали, что на основе спектрально-яркостных характеристик, с использованием эталонных участков и стандартных алгоритмов классификации возможно достоверное выделение следующих тематических классов лесных объектов: сосновые насаждения, еловые насаждения, лиственные насаждения, болота и избыточно увлажненные земли, не покрытые лесом и нелесные земли, минерализованные почвы и водные объекты. Необходимо отметить, что использование разновременных данных космической съемки и технологий геоинформационного анализа данных позволяет в некоторых случаях разделять генерализированные классы на основе анализа расположения объектов.

С практической точки зрения представленная технология позволяет решать задачи мониторинга сплошнолесосечных рубок леса, повреждений лесных насаждений в результате воздействия неблагоприятных факторов окружающей среды, оценку динамики и пространственного моделирования основных видов лесных земель и растительности по материалам разновременной съемки.

Для целей лесотаксационного дешифрирования земель лесного фонда необходимо применение материалов с более высоким пространственным разрешением, данных радиолокационной съемки, а также разработка специальных алгоритмов дешифрирования основанных на математических моделях взаимосвязи таксационных и дешифровочных признаков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лурье, И.К. Теория и практика цифровой обработки изображений / И.К. Лурье, А.Г. Косиков // Дистанционное зондирование и географические информационные системы. под ред. А.М. Берлянта. – Москва: Научный мир, 2003. – 168 с.

2. Кравцов С.Л. Обработка изображений дистанционного зондирования Земли (анализ методов) / С.Л. Кравцов. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2008. – 256 с.

3. Чандра, А.М. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / А.М. Чандра, С.К. Гош; пер. с англ. А.В. Кирюшина. – Москва: Техносфера, 2008. – 307 с.

4. Капралов, Е. Г. Геоинформатика: учеб. для студ. высш. учебн. заведений / Е. Г. Капралов [и др.]; под ред. В.С. Тикунова – 2-е изд. – М.: Академия, 2008. – 384 с.

THEMATIC PROCESSING OF SATELLITE REMOTE SENSING DATA FOR MAPPING AND MONITORING OF FOREST LAND

Pushkin A.A.

Modern approaches of the thematic interpretation of satellite remote sensing data, and especially their application to forest lands are considered. The basic stages of the technique of thematic interpretation of forest land based on the developed software, and description of statistical tests of separability available classes of objects are presented in this work.

The results of experimental work of the thematic interpretation of forest lands Dismensky forest enterprise based on ALOS AVNIR satellite remote sensing data, separation coefficients of the interpretations thematic classes are presented in this article.

Статья поступила в редколлегию 23.04.2011 г.



УДК 630*562.2

ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ НОРМИРОВАНИЯ ЛЕСОПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕКУЩИМ ПРИРОСТОМ ПО ЗАПАСУ СОСНОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИС «ЛЕСНЫЕ РЕСУРСЫ»

Сидельник Н.Я.

*Белорусский государственный технологический университет
(г. Минск, Беларусь)*

На основе разработанной лесотаксационной модели прироста по запасу сосновых древостоев, был рассчитан текущий прирост сосновых лесов Логойского, Полоцкого, Лунинецкого лесхозов с использованием ГИС «Лесные ресурсы». Выполнен расчет экономического