

Оценка распознаваемости древесных пород леса на основе спутниковых данных о сезонных изменениях их спектрально-отражательных характеристик

В.О. Жарко, С.А. Барталев

Институт космических исследований РАН, Москва 117997, Россия

E-mail: zharko@d902.iki.rssi.ru

Преобладающая древесная порода является важной характеристикой лесов России, в то время как существующие методы их инвентаризации и мониторинга не позволяют регулярно получать информацию о данном показателе в масштабах страны. Это обуславливает актуальность разработки методов дистанционной оценки породной структуры лесов на основе спутниковых данных, обеспечивающих возможность получения необходимой информации на больших территориях. В работе приводятся результаты экспериментальной оценки распознаваемости преобладающих пород лесов двух тестовых регионов, выбранных таким образом, чтобы обеспечить высокий уровень видового разнообразия хвойных и лиственных насаждений. При этом в основу анализа распознаваемости преобладающих пород лесов были положены особенности фенологической динамики их спектрально-отражательных характеристик, измеряемых спутниковым спектрорадиометром MODIS. Выполнена сравнительная оценка распознаваемости древесных пород на основе недельных и сезонных композитных изображений коэффициентов спектральной яркости земной поверхности. Рассчитаны вероятности ошибочного распознавания различных древесных пород в лесах тестовых регионов. Полученные результаты позволяют прийти к выводу о целесообразности использования получаемых с высокой периодичностью спутниковых данных о фенологической динамике спектрально-отражательных характеристик лесов для распознавания основных преобладающих пород.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, спектрально-отражательные характеристики, временные ряды спутниковых данных, распознавание древесных пород леса.

Введение

Методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) являются эффективным инструментом исследования лесных экосистем, решения прикладных задач оценки ресурсов и состояния лесов на национальном и глобальном уровнях (Барталев и др., 2011а).

Информация о породной структуре лесов, получаемая по данным инвентаризации и лесоустройства, имеет важное хозяйственное значение и необходима для различных экологических оценок биоразнообразия экосистем и их биогеохимического обмена с атмосферой и другими компонентами геосистемы. Одной из широко используемых в отечественном лесоводстве характеристик лесов является преобладающая древесная порода.

Современные исследования породной структуры лесного покрова по данным ДЗЗ носят преимущественно локальный характер и основаны на использовании спутниковых изображений (сверх)высокого разрешения и/или гиперспектральных данных (напр. Colgan et al., 2012; Engler et al., 2013; Zhang, Qiu, 2012). Однако, в силу размеров территории России, использование методов, основанных на данных такого рода, для оценки породного состава лесов в масштабах страны в настоящее время не представляется практически реализуемым. Использование полученных в нескольких спектральных каналах спутниковых

изображений более низкого пространственного разрешения позволяет выделять с достаточной для практического применения точностью лишь ограниченный набор классов лесов различной породной структуры, включая хвойные, лиственные и смешанные древесные стои (Барталев и др., 1995).

Более детальная классификация лесов с выделением отдельных древесных пород, отличающихся, в частности, особенностями своей фенологической динамики, может быть достигнута за счет использования разновременных спутниковых изображений, полученных в различные периоды годового цикла развития растений. В частности, в ряде работ (Bartalev et al., 2003; Барталев и др., 2011б) распознавание лесов различной породной структуры на субконтинентальном уровне проводилось на основе их сезонных значений коэффициентов спектральной яркости (КСЯ). При построении карты растительного покрова России (Барталев и др., 2011б) на основе сезонных композитных изображений КСЯ в красном (620-670 нм), ближнем ИК (841-876 нм) и среднем ИК (1628-1652 нм) диапазонах спектра по данным MODIS выделялись леса с преобладанием сосны, лиственницы, темнохвойных пород, лиственных пород, а также три класса смешанных лесов. При этом классы темнохвойных (ель, пихта, кедр) и лиственных (дуб, береза, осина, липа, клен и др.) лесов объединяют в себе существенно отличающиеся экономической ценностью и экосистемными функциями древесные породы. Более детальная классификация лесов по критерию преобладающей породы позволит расширить применимость получаемой на основе спутниковых данных информации для решения исследовательских и прикладных задач.

Известно, что леса разных пород могут демонстрировать различную динамику фенологического развития (Елагин, 1994). Так, например, появление листьев на деревьях дуба в основном происходит на 2-3 недели позже, чем у деревьев других лиственных пород в сходных климатических условиях. Цветение деревьев липы происходит позже других лиственных пород. Для березы характерно наиболее раннее появление листьев весной и наиболее позднее их опадание осенью. У еловых деревьев в начале лета заканчивается рост хвои и начинается ее вызревание раньше, чем у деревьев пихты и кедра. Существование различий в фенологической динамике древесных пород позволяет предположить и возможность выявления различий в динамике их спектрально-отражательных характеристик по данным регулярных спутниковых наблюдений достаточно высокой частоты (рис. 1). Вместе с тем, положительные результаты экспериментальной оценки возможностей распознавания древесных пород на основе разновременных спутниковых изображений Landsat (Гаврилюк, Ершов, 2013) получены с использованием подходов, практическое применение которых в масштабах России в настоящее время затруднено. Одновременно следует отметить, что методически близкие к задаче распознавания древесных пород экс-

перименты по классификации сельскохозяйственных культур (Плотников и др., 2011) позволили прийти к выводу о целесообразности использования временных рядов спутниковых данных высокого временного разрешения, в силу обеспечиваемой ими более полной возможности выявления фенологических различий спектрально-отражательных характеристик растительного покрова.

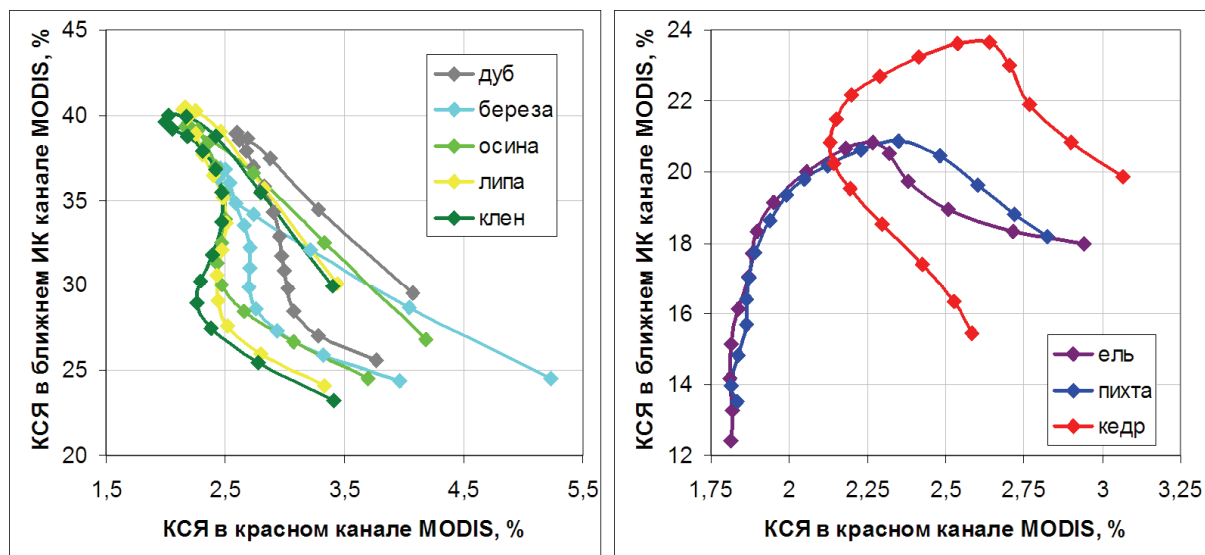


Рис. 1. Фенологическая динамика средних значений КСЯ лесов различных пород по данным MODIS; движение вдоль кривой соответствует изменению значений в течение вегетационного периода

Целью данной работы является экспериментальная оценка возможностей распознавания древесных пород в лесах на основе данных о сезонных изменениях их спектрально-отражательных характеристик по данным спутникового спектрорадиометра MODIS, установленного на спутнике TERRA и обеспечивающего ежедневные наблюдения всей территории России.

Экспериментальные данные и тестовые участки

Использование данных MODIS позволяет с высокой частотой получать регулярные измерения спектрально-отражательных характеристик древесных пород для анализа различий их сезонной динамики и оценки возможностей распознавания. В Институте космических исследований РАН создан ежедневно актуализируемый архив данных MODIS, охватывающий период с 2000 года (Бурцев и др., 2006). Входящий в состав архива данных MODIS стандартный продукт MOD09 содержит скорректированные с учетом влияния атмосферы измерения КСЯ наблюдаемой поверхности в различных диапазонах спектра (https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table).

Для исключения неинформативных измерений и повышения качества использованных для экспериментов данных была проведена их предварительная обработка (Барталев и др., 2011в), включающая в себя:

- исключение измерений, полученных при экстремальных значениях углов положения Солнца или визирования земной поверхности;
- фильтрацию искаженных под влиянием облачного покрова данных;
- выявление участков снежного покрова на земной поверхности;
- статистическая фильтрация временных рядов измерений КСЯ для исключения выбросных значений, обусловленным влиянием случайных помех различной природы;
- формирование на основе очищенных от мешающих факторов ежедневных данных композитных изображений, содержащих средние значения КСЯ земной поверхности за заданные периоды.

Для оценки распознаваемости древесных пород за вегетационные периоды 2004-2010 годов были сформированы временные ряды композитных изображений, содержащих осредненные за последовательные семидневные интервалы значения КСЯ в красном и ближнем ИК спектральных диапазонах с пространственным разрешением 230 метров.

Наличие многолетних данных MODIS позволило выполнить дополнительную фильтрацию остаточных шумов во временных рядах КСЯ, основанную на предположении о медленной возрастной эволюции спектрально-отражательных характеристик лесов при отсутствии воздействия на них возмущающих факторов, таких как пожары, вырубки, ветровалы, насекомые-вредители. Упомянутое выше предположение позволило для не претерпевших воздействия возмущающих факторов лесов уточнить характерную сезонную динамику их спектрально-отражательных характеристик путем применения медианной фильтрации к совокупности календарно близких значений КСЯ. При этом указанная совокупность значений КСЯ для каждого семидневного интервала года была представлена 21 измерением, полученным на основе многолетних композитных изображений для календарно совпадающих и двух ближайших к ним во времени интервалов. Целесообразность применения скользящего временного окна при медианной фильтрации многолетних рядов данных обеспечивается характерной для лесов монотонной динамикой КСЯ с одним экстремумом в течение вегетационного сезона.

Для заполнения оставшихся пропусков и окончательной фильтрации случайных ошибок к временным рядам значений КСЯ был также применен алгоритм полиномиальной аппроксимации с использованием динамического скользящего окна, включающего фиксированное количество измерений для вычисления коэффициентов полинома (Плотников и др., 2014).

Обусловленные метеорологическими условиями различия периодов доступности свободных от мешающих факторов спутниковых измерений КСЯ земной поверхности для пространственно распределенных участков лесного покрова приводят к несовпадению границ соответствующих им интервалов со значащими измерениями КСЯ во временных рядах спутниковых данных. Это, в свою очередь, затрудняет корректное использование критериев делимости классов, предполагающих наличие единого множества классификационных признаков для распознаваемых образов. Для компенсации влияния указанных различий проводилось выравнивание эффективных интервалов временных рядов КСЯ за счет их дополнения с обеих сторон величинами, равными соответственно первому и последнему значащим измерениям в сезоне. Для корректной оценки статистической делимости классов было выполнено нормирование всей совокупности используемых композитных изображений приведением их к одинаковым значениям среднего и дисперсии спектрально-отражательных характеристик.

Дополнительно сформированные за период с наличием на земной поверхности снежного покрова композитные изображения средних значений КСЯ в значительной степени характеризуют горизонтальную и вертикальную структуру лесов и также используются для распознавания различных преобладающих пород леса.

Значения КСЯ разновременных композитных изображений рассматривались как признаки для оценки распознаваемости лесов различных древесных пород. Оценка статистической делимости классов в пространстве признаков их распознавания выполнялась на основе набора опорных данных, сформированного в виде изображения с известной принадлежностью выборочных пикселей к одной из древесных пород.

Подготовка опорных данных была основана на совместном использовании построенного по данным MODIS многолетнего ряда карт растительного покрова России (Барталев и др., 2011б), и карты лесов СССР (ред. А.С. Исаев, 1990). Для проведения экспериментов были выбраны два, расположенных на Южном Урале и в южной части озера Байкал (рис. 2), тестовых участка с высоким уровнем породного разнообразия лиственных (дуб, береза, осина, липа и клен) и хвойных (сосна, ель, пихта и сибирский кедр) лесов. На основе анализа временного ряда карт растительного покрова России были выбраны стабильные пиксели, устойчиво принадлежащие на протяжении периода 2000-2010 годов лишь к одному из трех классов лесов, включая темнохвойные, сосновые и лиственные древостои. Выявленные стабильные пиксели рассматривались в дальнейшем как опорные с присвоением им древесной породы в соответствии с картой лесов СССР, при условии тематической ее согласованности на данном участке с картой растительного покрова России. Использование данного подхода позволяет исключить из рассмотрения участки из-

менений в лесах и обеспечить корректность использования многолетних спутниковых данных при подготовке композитных изображений КСЯ. Из набора опорных данных были исключены пиксели, демонстрирующие нетипичные для своих классов значения признаков. Число опорных пикселей различных классов приведено в *табл. 1*.

Таблица 1. Количество опорных пикселей для лесов различных преобладающих пород на тестовых участках (участок 1 - Южный Урал и участок 2 - оз. Байкал)

Тестовый участок 1		Тестовый участок 2	
преобладающая порода	кол-во пикселей	преобладающая порода	кол-во пикселей
дуб	87768	ель	11952
береза	218450	пихта	24796
осина	102308	кедр	26834
липа	98451	сосна	8219
клен	70605	береза	521
сосна	69254	осина	809
ель	4848		

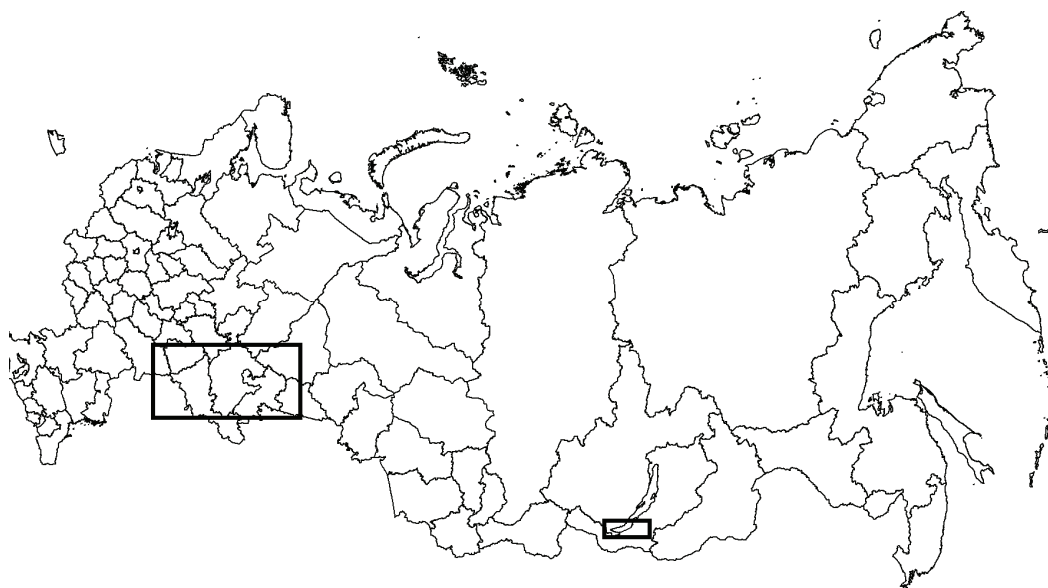


Рис. 2. Расположение тестовых регионов

Оценка статистической разделимости древесных пород на основе сформированных за семидневные интервалы временных рядов значений КСЯ проводилась в сравнении с использованием для их распознавания сезонных композитных изображений, применяемых в настоящее время для картографирования растительного покрова России (Барталев и др., 2011б).

Методика и результаты экспериментов

Для оценки распознаваемости древесных пород для каждой их пары (i, j) в качестве меры статистической разделимости классов было рассчитано значение преобразованной дивергенции согласно следующей формуле (Дейвис и др., 1983):

$$D_{ij}^T = 2000(1 - \exp(-D_{ij}/8)),$$

$$D_{ij} = \text{tr}[(\Sigma_i - \Sigma_j)(\Sigma_j^{-1} - \Sigma_i^{-1})]/2 + \text{tr}[(\Sigma_i^{-1} + \Sigma_j^{-1})(U_i - U_j)(U_i - U_j)^T]/2,$$

где D_{ij}^T – преобразованная дивергенция, принимающая значения в интервале от 0 до 2000, Σ_i и Σ_i^{-1} – ковариационная матрица i -го класса и обратная ей матрица соответственно, U_i – вектор средних значений признаков i -го класса, $\text{tr}(\dots)$ и $(\dots)^T$ – матричные операции следа (суммы диагональных элементов) и транспонирования матрицы соответственно. Рассчитанные значения D_{ij}^T пар классов лесов, представленных на первом тестовом участке, приведены в *табл. 2*.

Согласно имеющимся критериям (Jensen, 1996), превышение D_{ij}^T пороговой величины 1700 может свидетельствовать о хорошем уровне разделимости соответствующей пары классов в заданном пространстве признаков. Из *табл. 2* видно, что оба использованных для распознавания набора признаков позволяют хорошо отделять леса хвойных пород. Однако использование сезонных композитных изображений КСЯ не позволяет разделить между собой ряд пород лиственных лесов, и в целом демонстрирует более низкую разделимость. При использовании временных рядов семидневных композитных изображений леса всех древесных пород могут считаться хорошо различимыми, поскольку полученные для них значения D_{ij}^T во всех случаях превышают установленную величину порогового критерия разделимости.

Таблица 2. Значения преобразованной дивергенции для лесов тестового участка 1 при использовании семидневных (слева) и сезонных (справа) композитных изображений КСЯ

		1	2	3	4	5	6
дуб	1						
береза	2	1889					
осина	3	1815	1828				
липа	4	1918	1998	1716			
клен	5	1998	2000	1945	1733		
сосна	6	2000	1996	2000	2000	2000	
ель	7	2000	2000	2000	2000	2000	1999

		1	2	3	4	5	6
дуб	1						
береза	2	1459					
осина	3	1468	1064				
липа	4	1463	1832	943			
клен	5	1993	1992	1706	1154		
сосна	6	1994	1922	1992	1999	2000	
ель	7	2000	2000	2000	2000	2000	1981

Таблица 3. Интервалы значений эффективной вероятности (%) ошибочного распознавания древесных пород в лесах тестового участка 1 на основе семидневных (слева) и сезонных (справа) композитных изображений КСЯ

		1	2	3	4	5	6			1	2	3	4	5	6	
дуб	1															
береза	2	0,6-11,2							5,0-31,6							
осина	3	1,2-15,4	1,2-15,2						7,0-37,4	13,0-50,8						
липа	4	0,6-10,2	0,0-1,6	2,4-21,8					7,2-38,0	1,6-17,8	17,0-58,2					
клен	5	0,0-2,2	0,0-0,4	0,4-8,4	2,4-21,8				0,8-11,8	0,2-5	2,6-22,6	13,0-50,8				
сосна	6	0	0,0-0,8	0,0-0,2	0	0			0,0-1,2	0,2-7	0,0-1,4	0,0-0,2	0			
ель	7	0	0	0	0	0	0-0,2		0	0	0	0	0	0	0,0-1,4	

Кроме того, для всех пар классов были рассчитаны значения расстояния Джеффриса-Матусита, согласно формуле (Дейвис и др., 1983):

$$J_{ij} = \sqrt{2(1 - e^{-\alpha})},$$

$$\alpha = \frac{1}{8}(U_i - U_j)^T \left(\frac{\Sigma_i + \Sigma_j}{2} \right)^{-1} (U_i - U_j) + \frac{1}{2} \ln \left[\frac{(\Sigma_i + \Sigma_j) / 2}{\sqrt{|\Sigma_i| |\Sigma_j|}} \right],$$

где J_{ij} - расстояние Джеффриса-Матусита, $|\Sigma_i|$ - определитель ковариационной матрицы i -го класса. Согласно (Дейвис и др., 1983), информация о значении расстояния Джеффриса-Матусита может быть использована для оценки границ интервала вероятности ошибочного распознавания p_{ij}^E , то есть вероятности отнесения пикселя i -го класса к j -тому классу, на основе следующего выражения:

$$(2 - J_{ij}^2)^2 / 16 \leq p_{ij}^E \leq 1 - (1 + J_{ij}^2 / 2) / 2.$$

Эффективные вероятности ошибочного распознавания, рассчитанные для пар классов лесов различных пород как $p^E = p_{ij}^E + p_{ji}^E$ на первом тестовом участке, приведены в табл. 3 (рассчитанные таким образом вероятности неправильного распознавания могут быть интерпретированы как вероятности перепутывания классов). Полученные результаты наглядно показывают, что вероятность неправильного распознавания устойчиво выше при использовании в качестве признаков сезонных композитных изображений КСЯ.

Результаты расчета значений преобразованной дивергенции и вероятности неправильного распознавания древесных пород в лесах второго тестового участка приведены в табл. 4 и 5, соответственно. Анализ полученных значений говорит о том, что сосновые леса хорошо отделяются от всех других древесных пород, демонстрируя близкие значения D_{ij}^T при использовании двух различных наборов признаков распознавания. В то же время, по отношению к использованию временных рядов семидневных композитных изображений КСЯ, применение их осредненных за различные сезоны значений обеспечивает существенно более низкий уровень дискриминационных возможностей при выделении древес-

ных пород, входящих в состав групп лиственных и темнохвойных лесов. Использование в качестве признаков сезонных композитных изображений КСЯ для данного тестового участка также характеризуется более высокими вероятностями неправильного распознавания древесных пород.

Таблица 4. Значения преобразованной дивергенции для лесов тестового участка 2 при использовании семидневных (слева) и сезонных (справа) композитных изображений КСЯ

		1	2	3	4	5
ель	1					
пихта	2	1839				
кедр	3	1944	1970			
сосна	4	2000	2000	1985		
береза	5	2000	2000	2000	2000	
осина	6	2000	2000	2000	2000	1943

		1	2	3	4	5
ель	1					
пихта	2	690				
кедр	3	1518	1545			
сосна	4	1999	1994	1708		
береза	5	2000	2000	1999	1996	
осина	6	2000	2000	1999	1998	868

Таблица 5. Интервалы значений эффективной вероятности (%) ошибочного распознавания древесных пород в лесах тестового участка 2 на основе семидневных (слева) и сезонных (справа) композитных изображений КСЯ

		1	2	3	4	5
ель	1					
пихта	2	0,8-12,6				
кедр	3	0,2-7,4	0,2-4,6			
сосна	4	0	0	0,0-3,4		
береза	5	0	0	0	0	
осина	6	0	0	0	0	0,2-6,4

		1	2	3	4	5
ель	1					
пихта	2	23,0-67,8				
кедр	3	6,0-34,6	5,2-32,2			
сосна	4	0,0-1,0	0,0-1,4	2,2-21,2		
береза	5	0	0	0,0-0,4	0,0-1,6	
осина	6	0	0	0,0-0,6	0,0-1,2	17,8-59,8

При проведении экспериментов расчет значений критериев, характеризующих статистическую разделимость различных древесных пород, проводился средствами программного пакета ERDAS Imagine.

Заключение

Результаты проведенных экспериментов позволили исследовать возможности использования данных разновременных спутниковых измерений КСЯ земной поверхности спектрорадиометром MODIS для распознавания древесных пород в лесах России на основе признаков, характеризующих сезонные изменения их спектрального отражения. Возможности распознавания лесов различных преобладающих пород исследованы с использованием как недельных, так и сезонных композитных изображений.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о хорошей взаимной делимости классов, принадлежащих к различным группам пород (темнохвойные, сосновые и лиственные леса) практически вне зависимости от используемого набора признаков. При этом анализ значений преобразованной дивергенции, являющейся мерой статистической делимости классов, свидетельствует о недостаточно высоком уровне дискриминационных возможностей сезонных композитных изображений КСЯ при разделении отдельных пород, входящих в группы лиственных и темнохвойных лесов. В то же время, использование временных рядов недельных композитных изображений КСЯ свидетельствует на основе анализа значений преобразованной дивергенции о достаточно хорошем уровне взаимной делимости всех представленных на выбранных тестовых участках древесных пород.

Можно также отметить, что использование сезонных композитных изображений КСЯ для оценки делимости между сосной и сибирским кедром показало лишь незначительное превышение порогового значения преобразованной дивергенции, характерного для достижения хорошей распознаваемости классов, что может говорить о возможном их перепутывании. Анализ сезонных композитных изображений показывает, что сибирский кедр по своим спектральным характеристикам занимает промежуточное положение между темнохвойными лесами и сосной, что и объясняет относительно невысокие значения преобразованной дивергенции. Использование недельных композитных изображений обеспечивает более надежное разделение двух указанных классов.

Анализ полученных значений вероятности ошибочного распознавания древесных пород в лесах подтверждает сделанные выше выводы об устойчиво более высоком уровне их делимости при использовании недельных композитных изображений КСЯ.

В целом, выполненное исследование позволяет прийти к выводу о достаточно высоком потенциале использования данных о сезонных изменениях спектрально-отражательных характеристик земной поверхности для распознавания древесных пород в лесах России.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-17-00389) в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космических исследований Российской академии наук.

Литература

1. *Барталев С.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Луян Е.А.* Основные задачи и перспективы создания системы глобального спутникового мониторинга лесов // Лесоведение. 2011а. № 6. С. 3–15.
2. *Барталев С.А., Егоров В.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Луян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А.* Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011б. Т. 8. № 4. С. 285–302.

3. *Барталев С.А., Егоров В.А., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А.* Распознавание пахотных земель на основе многолетних спутниковых данных спектрорадиометра MODIS и локально-адаптивной классификации // Компьютерная оптика. 2011в. Т. 35. № 1. С. 103–116.
4. *Барталев С.А., Журинов В.М., Еришов Д.В.* Сравнительный анализ данных спутниковых систем Космос-1939, SPOT и Landsat-TM при изучении бореальных лесов // Исследование Земли из космоса. 1995. № 1. С. 101–114.
5. *Бурцев М.А., Мазуров А.А., Нейштадт И.А., Прошин А.А.* Построение архива спутниковых данных для анализа динамики растительности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Вып. 3. Т. 1. С. 170–174.
6. *Гаврилюк Е.А., Еришов Д.В.* Тематическое картографирование породной структуры лесов на основе спутниковых изображений Landsat-TM/ETM+ // Пятая Всероссийская конференция с международным участием «Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве». Москва, ЦЭПЛИ РАН, 22–24 апреля 2013 г. Сборник трудов конференции. С. 112–115.
7. *Дейвис Ш.М., Ландгребе Д.А., Филлипс Т.Л., Свейн Ф.Х., Хоффер Р.М., Ланденлауб Д.С., Ле Р.Ф. Сивева* Дистанционное зондирование: количественный подход: Пер. с англ. М.: Недра, 1983. 415 с.
8. *Елагин И.* Времена года в лесах России. Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1994. 272 с.
9. *Плотников Д.Е., Барталев С.А., Жарко В.О., Михайлов В.В., Просяникова О.И.* Экспериментальная оценка распознаваемости агрокультур по данным сезонных спутниковых измерений спектральной яркости // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 199–208.
10. *Плотников Д.Е., Миклашевич Т.С., Барталев С.А.* Восстановление временных рядов данных дистанционных измерений методом полиномиальной аппроксимации в скользящем окне переменного размера // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 103–110.
11. *Bartalev S.A., Belward A., Ershov D.V., Isaev A.S.* A New SPOT4-VEGETATION Derived Land Cover Map of Northern Eurasia // International Journal of Remote Sensing. 2003. Vol. 24. № 9. P. 1977–1982.
12. *Colgan M.S., Baldeck C.A., Féret J.-B., Asner, G.P.* Mapping Savanna Tree Species at Ecosystem Scales Using Support Vector Machine Classification and BRDF Correction on Airborne Hyperspectral and LiDAR Data // Remote Sens. 2012. Vol. 4. P. 3462–3480.
13. *Engler R., Waser L., Zimmermann N., Schaub M., Berdos S., Ginzler C., Psomas A.* Combining ensemble modeling and remote sensing for mapping individual tree species at high spatial resolution // Forest Ecology and Management. 2013. Vol. 310. P. 64–73.
14. *Jensen J. R.* Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective. 2d ed. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1996.
15. *Zhang C., Qiu F.* Mapping Individual Tree Species in an Urban Forest Using Airborne Lidar Data and Hyperspectral Imagery // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2012. Vol. 78. № 10. P. 1079–1087.

Forest tree species recognizability assessment based on satellite data on their spectral reflectance seasonal changes

V.O. Zharko, S.A. Bartalev

*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: zharko@d902.iki.rssi.ru*

Dominant tree species is an important characteristic of Russian forests, whereas current forest inventory and monitoring methods do not allow obtaining information on this parameter regularly at the scale of the whole country. Thus the development of satellite data based forests' species structure remote assessment methods, which enable obtaining necessary information over large areas, is of interest. Presented in the paper are the results of the experimental recognizability assessment of different dominant forest species for two test sites, selected to ensure high species diversity of coniferous and broadleaf forests. The analysis of dominant forest species recognizability was based on phenological dynamics features of their spectral reflectance, measured using MODIS spectroradiometer. Comparative tree species recognizability assessment based on weekly and seasonal surface spectral reflectance composite images has been carried out. The probability of misrecognition between different forest tree species was evaluated for the chosen test sites. The results obtained demonstrate good potential of using high temporal resolution satellite data on phenological dynamics of forests' spectral reflectance to identify main dominant forest species.

Keywords: remote sensing, spectral reflectance, satellite data time series analysis, forest tree species recognition.

References

1. Bartalev S.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Loupian E.A. Osnovnye zadachi i perspektivy sozdaniya sistemy global'nogo sputnikovogo monitoringa lesov (Main tasks and perspectives of global forest satellite monitoring system creation), *Lesovedenie*, 2011, No. 6, pp. 3–15.
2. Bartalev S.A., Egorov V.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Uvarov I.A. Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii po dannym spektrometriya MODIS (Russian land cover satellite mapping using MODIS spectroradiometer data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 4, pp. 285–302.
3. Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Uvarov I.A. Raspoznavaniye pakhotnykh zemel' na osnove mnogoletnykh sputnikovyykh dannykh spektrometriya MODIS i lokal'no-adaptivnoi klassifikatsii (Arable lands recognition based on multi-annual MODIS spectroradiometer satellite data and locally-adaptive classification), *Komp'yuternaya optika*, 2011, Vol. 35, No. 1, pp. 103–116.
4. Bartalev S.A., Zhirin V.M., Ershov D.V. Sravnitel'nyi analiz dannykh sputnikovyykh sistem Kosmos-1939, SPOT i Landsat-TM pri izuchenii boreal'nykh lesov (Comparative analysis of Kosmos-1939, SPOT and Landsat-TM satellite data for boreal forests research), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1995, No. 1, pp. 101–114.
5. Burtsev M.A., Mazurov A.A., Neishtadt I.A., Proshin A.A. Postroyeniye arkhiva sputnikovyykh dannykh dlya analiza dinamiki rastitel'nosti (Creation of satellite data archive for the analysis of vegetation dynamics), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2006, Issue 3, Vol. 1, pp. 170–174.
6. Gavriluyuk E.A., Ershov D.V. Tematicheskoye kartografirovaniye porodnoi struktury lesov na osnove sputnikovyykh izobrazhenii Landsat-TM/ETM+ (Thematic mapping of forests' species structure using Landsat-TM/ETM+ satellite images), *Pyataya Vserossiyskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem "Aerokosmicheskiye metody i geoinformatsionnyye tekhnologii v lesovedenii i lesnom khozyaistve"* (Proc. Conf. 5th All-Russia Conference with International Participation "Aerospace Methods and GIS Technologies in forestry and forest management"), Moscow, 22–24 April 2013, pp. 112–115.
7. Davis S., Landgrebe D., Phillips T., Swain P., Hoffer R., Lindenlaub J., Silva L. *Distantsionnoye zondirovaniye: kolichestvennyy podkhod* (Remote sensing: The quantitative approach), Moscow: Nedra, 1983, 415 p.
8. Elagin I. *Vremena goda v lesakh Rossii* (Seasons in Russian forests), Novosibirsk: VO "Nauka", Sibirskaya izdatel'skaya firma, 1994, 272 p.
9. Plotnikov D.E., Bartalev S.A., Zharko V.O., Mikhailov V.V., Prosyannikova O.I. Eksperimental'naya otsenka raspoznavayemosti agrokul'tur po dannym sezonnykh sputnikovyykh izmerenii spektral'noi yarkosti (An experimental assessment of crop types recognizability using time-series of intra-seasonal spectral reflectance measurements by satellite sensor), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 1, pp. 199–208.
10. Plotnikov D.E., Miklashevich T.S., Bartalev S.A. Vosstanovleniye vremennykh ryadov dannykh distantsionnykh izmerenii metodom polinomial'noi approksimatsii v skol'zyashchem okne peremennogo razmera (Using local polynomial approximation within moving window for remote sensing data time-series smoothing and data gaps recovery), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 103–110.
11. Bartalev S.A., Belward A., Ershov D.V., Isaev A.S. A New SPOT4-VEGETATION Derived Land Cover Map of Northern Eurasia, *International Journal of Remote Sensing*, 2003, Vol. 24, No. 9, pp. 1977–1982.
12. Colgan M.S., Baldeck C.A., Féret J.-B., Asner, G.P. Mapping Savanna Tree Species at Ecosystem Scales Using Support Vector Machine Classification and BRDF Correction on Airborne Hyperspectral and LiDAR Data, *Remote Sens*, 2012, Vol. 4, pp. 3462–3480.
13. Engler R., Waser L., Zimmermann N., Schaub M., Berdos S., Ginzler C., Psomas A. Combining ensemble modeling and remote sensing for mapping individual tree species at high spatial resolution, *Forest Ecology and Management*, 2013, Vol. 310, pp. 64–73.
14. Jensen J. R. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*, 2d ed., Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1996.
15. Zhang C., Qiu F. Mapping Individual Tree Species in an Urban Forest Using Airborne Lidar Data and Hyperspectral Imagery, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2012, Vol. 78, No. 10, pp. 1079–1087.