

## Сезонная информативность многоспектральных космических снимков высокого разрешения при изучении породно-возрастной динамики лесов

В.М. Жирин, С.В. Князева, С.П. Эйдлина, Н.В. Зукерт

*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН (ЦЭПЛ РАН)  
117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32  
E-mails: vmzh@smt.ru, aidlina@cepl.rssi.ru, knsvetl@gmail.com*

Статья посвящена изучению информативных возможностей сезонных космических снимков при определении породно-возрастной динамики лесов. В результате статистического исследования выявлены наиболее информативные признаки для разных сезонов съемки.

**Ключевые слова:** многоспектральные космические снимки, породно-возрастная структура лесов, эколого-динамические ряды (ЭДР), статистический анализ.

### Введение

После активных промышленных лесозаготовок во второй половине XX века на вырубках коренных ельников Русской равнины возникли производные леса с преобладанием лиственных пород (береза, осина и др.). Лесоводам известно, что в течение последующих 60–80 лет после рубки под пологом производных насаждений нередко накапливаются хвойные породы, так как таёжные березняки и осинники обладают потенциалом переформирования в еловые насаждения. Проникая в верхний полог лиственного древостоя, ель постепенно становится преобладающей породой, завершая, тем самым, процесс смены пород. Важность фактора времени при смене пород указывает на наличие связи между возрастом послерубочных насаждений и соотношением доли лиственных и хвойных пород.

Оценка хода лесовосстановления и интенсивности смены пород в послерубочный период является важной лесоводственной задачей. Применение для этих целей мультиспектральной космической съёмки позволяет использовать в качестве признаков восстановительной динамики нарушенных лесов значения спектральной яркости изображения лесных участков, уровень которой соответствует энергии отражения солнечной радиации от крон хвойных и лиственных деревьев. Значения яркости изображения, наряду с давностью рубок, долей участия лиственных пород и возрастом насаждений, относящихся к однородной группе типов леса, могут быть определенным образом сгруппированы и обработаны статистическими методами.

Цель настоящего исследования заключалась в изучении информативных возможностей сезонных космических снимков при определении породно-возрастной динамики лесов, установленной на основе анализа эколого-динамических рядов\* (ЭДР) лесных участков (таксационных выделов лесоустройства).

### Исходные данные и формирование эколого-динамических рядов

Лесной массив площадью 45,5 тыс. га, выбранный в качестве модельной территории (север Костромской области), входит в таёжную зону (южно-таёжный округ) с преобладани-

---

\* Эколого-динамические ряды формируются в виде электронных таблиц, в столбцах которых группируются показатели, а каждая строка относится к одному лесному участку (таксационному выделу).

ем зеленомошной группы типов леса – черничных и кисличных ельников северных увалов. Территория лесного массива обеспечена снимками ETM+/Landsat 7 (съёмки 26 апреля, 8 июля, 6 и 24 сентября). Космические изображения были представлены в спектральных каналах оптического диапазона: видимом ( $B, G, R$ ), ближнем инфракрасном ( $NIR$ ) и среднем инфракрасном ( $SWIR1$  и  $SWIR2$ ).

В каждом спектральном канале для лесных участков (таксационных выделов), вошедших в ЭДР, рассчитывались интегральные показатели: средняя яркость\* пикселей изображения ( $\rho_B, \rho_G, \rho_R, \rho_{NIR}, \rho_{SWIR1}, \rho_{SWIR2}$ ) и их стандартные отклонения. Помимо значений яркости изображения лесных участков, были использованы различные индексы в виде зональных отношений ( $NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_R) / (\rho_{NIR} + \rho_R)$ ;  $SR = \rho_{NIR} / \rho_R$ ;  $Green\ NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_G) / (\rho_{NIR} + \rho_R)$ ;  $MSI = \rho_{SWIR1} / \rho_{NIR}$ ;  $ARVI = [\rho_{NIR} - (2\rho_R - \rho_B)] / [\rho_{NIR} + (2\rho_R - \rho_B)]$ ;  $\rho_{SWIR1} / \rho_G$ ;  $\rho_{SWIR2} / \rho_{SWIR1}$ ) (Вегетационные индексы, 2011).

Использованные в работе данные лесоустройства указывают на множественность вариантов послерубочной смены пород и изменчивый по содержанию характер процесса лесообразования лесного покрова. Ранее в одной из публикаций было показано, что траектория изменения значений спектральной яркости изображения связана, прежде всего, с возрастной динамикой полноты и доли участия лиственных пород в лесном пологе послерубочных насаждений (Жиринов В.М. и др., 2011). Также было отмечено, что при восстановлении послерубочных лесов с возрастом, наряду с уменьшением в верхнем пологе доли лиственных деревьев, снижается также полнота насаждений.

Различия значений спектральной яркости сезонных космических изображений показаны на примере групп лесных участков с абсолютным преобладанием лиственных пород (рис. 1а) и с долей их участия 20% (80% хвойной породы ели) (рис. 1б).

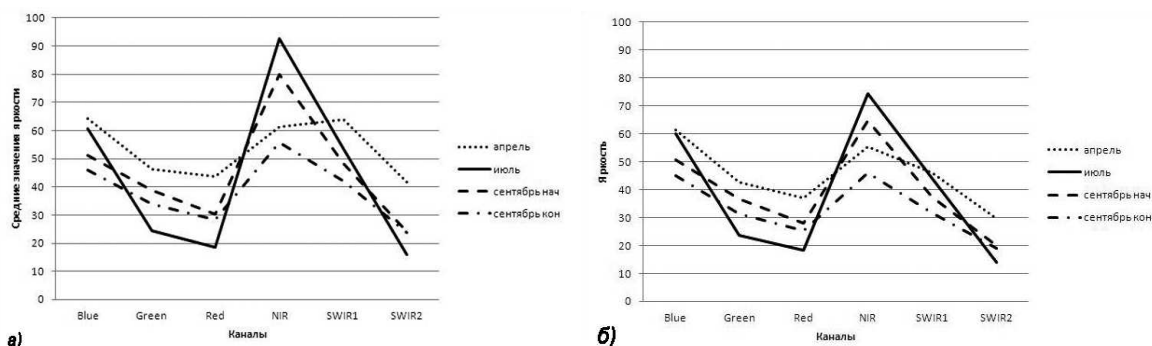


Рис. 1. Средние значения яркости изображения таксационных выделов с участием лиственных пород на космических снимках разных сезонов съёмки: а) 100% и б) 20%

Видно, что сезонные значения спектральной яркости изображения в обоих случаях имеют сходный характер, но отличаются меньшим уровнем значений для лесных участков с преобладанием ели. Перепады значений яркости в различных каналах сильнее выражены у космических снимков летней съёмки, в меньшей степени у снимков начала сентября и существенно ниже у снимков, полученных в апреле и в конце сентября.

Массовые данные лесоустройства в сочетании со спектральными характеристиками космических изображений позволяют формировать представительные ЭДР, включающие несколько сотен таксационных выделов, характеризующих породно-возрастную динамику послерубочных лесов на временном отрезке от стадии молодняков до старовозрастного состояния насаждений.

\* Яркость изображения оценивалась в условных единицах в интервале от 0 (темный тон) до 255 (светлый тон).

Субъективные особенности полевой работы инженеров-таксаторов и погрешности глазомерно-инструментальной оценки биометрических параметров насаждений при наземной таксации лесов, а также влияние внешних факторов среды (рельеф местности, морфология древесного полога и др.) на отражательную способность древесных растений, увеличивают разброс значений спектральной яркости изображения. В связи с этим проведено уточнение данных ЭДР. Для этого были определены предсказанные значения яркости изображения в различных каналах съёмки, полученные на основе аппроксимирующих функций их связи с возрастом, долей листовых пород и полнотой насаждений. В последующем, те предсказанные значения яркости изображения каждого лесного участка, которые не превышали исходное значение спектральной яркости  $\pm 1$  стандартное отклонение (примерно 70–75% от исходного числа лесных участков), образовали уточненный набор выделов эколого-динамических рядов.

### Статистическая обработка и анализ информативности спектральных признаков

Статистический анализ породно-возрастной структуры на основе нелинейной оценки связи возраста ( $A$ ) и доли участия листовых пород насаждений ( $L$ ) со спектральными характеристиками сезонных космических изображений проведен средствами программного пакета *Statistica 6.1*.

Использован квази-ньютоновский метод, позволяющий получить устойчивые оценки параметров модели кусочно-линейной регрессии, а также регрессия степенного вида  $y = ax_1^{b_1} x_2^{b_2} \dots x_n^{b_n}$  обоих случаях при аппроксимации связи спектральных признаков с  $A$  и  $L$  используется метод наименьших квадратов. При статистической обработке регрессия степенного вида подверглась предварительному логарифмированию для программной реализации алгоритма множественной линейной корреляции спектральной яркости изображения с  $A$  и  $L$ . Применение регрессий кусочно-линейного и степенного вида ранее описано при анализе дистанционных изображений в работах (Жиринов, Князева, Эйдлина, 2011; Жиринов, Эльман, Агеев, 1978). Коэффициент корреляции  $R$ , а также критерий Фишера  $F$ , могут быть использованы для оценки относительной информативности и ранжирования сезонных спектральных признаков, взаимосвязанных с  $A$  и  $L$ .

Наибольшую информативность, равную единице, демонстрировали те значимые сезонные спектральные признаки, которые имели наибольшие показатели тесноты связи с  $A$  и  $L$ , а информативность остальных признаков оценивалась долями единицы с учетом значений их  $R$  или  $F$  (рис. 2–5).

При использовании более гибкого алгоритма кусочно-линейной регрессии в группу информативных (относительная информативность 0,99–1,0) попадает значительно большее число сезонных спектральных признаков при определении породной структуры, нежели число признаков, характеризующих возрастную структуру насаждений (рис. 2, 3). Анализ комбинаций переменных величин кусочно-линейной регрессии показал, что в группе наиболее информативных признаков, независимо от сезона космической съёмки, регулярно встречаются значения яркости спектрального канала  $NIR$  и отчасти  $SWIR1$ .

При анализе летних космических снимков к информативным значениям спектральной яркости изображений в каналах  $NIR$  и  $SWIR1$  добавляются зональные отношения типа  $NDVI$ ,  $Green\ NDVI$ ,  $SR$ ,  $ARVI$ , в то время как в весенний и осенний периоды съёмки они не входят в группу ведущих признаков. Для периода ранней осени характерно сокращение группы информативных спектральных признаков из-за неустойчивого фенологического состояния лесного покрова. К концу сентября формируется осенний аспект лесного полога с массовым пожелтением листопадных пород и повышением их контраста с вечнозелёными хвойными породами. В составе информативных признаков, помимо  $NIR$  и  $SWIR1$ , появляются спектральные яркости каналов  $G$  и  $R$ .

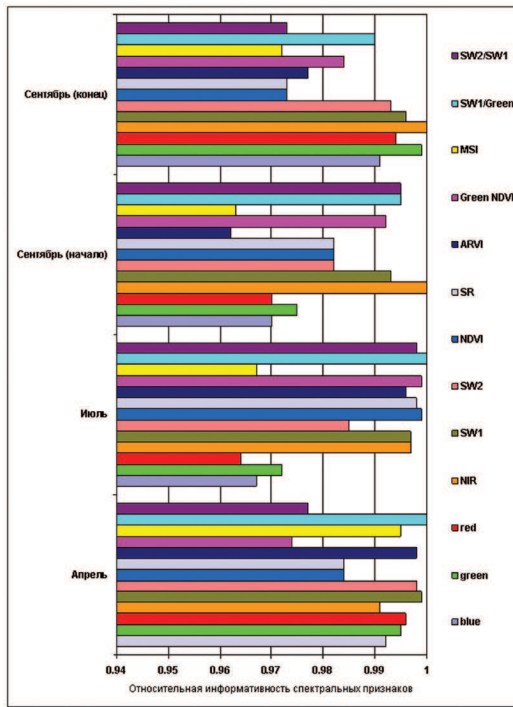


Рис. 2. Ранжирование спектральных признаков космических изображений Landsat 7 лесных участков модельного лесного массива в зависимости от сезона съёмки при определении доли лиственных пород в насаждениях на основе алгоритма кусочно-линейной регрессии

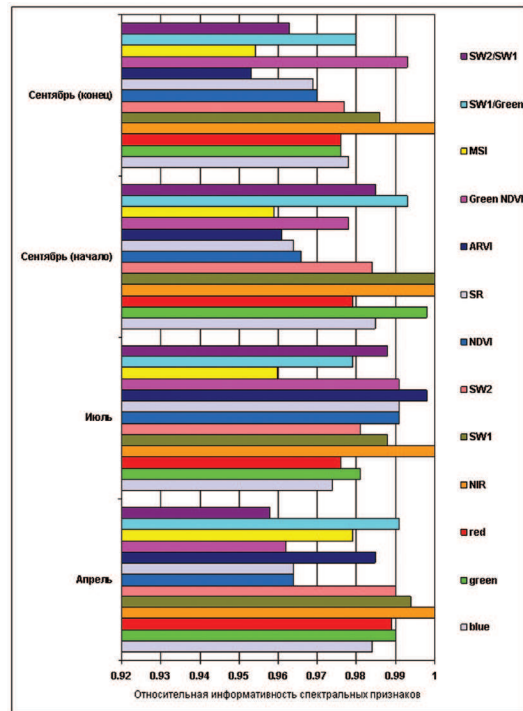


Рис. 3. Ранжирование спектральных признаков космических изображений Landsat 7 лесных участков модельного лесного массива в зависимости от сезона съёмки при определении возраста насаждений на основе алгоритма кусочно-линейной регрессии

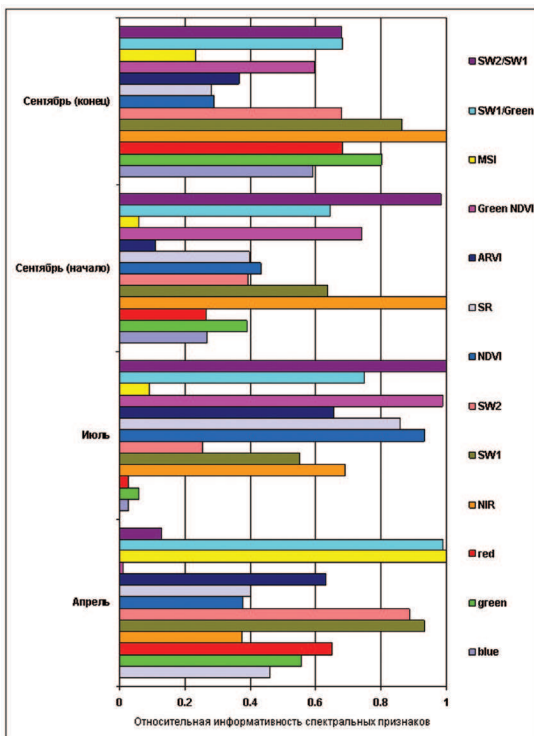


Рис. 4. Ранжирование спектральных признаков лесных участков на космических изображениях Landsat 7 в зависимости от сезона съёмки при определении доли лиственных пород в насаждениях на основе степенной функции

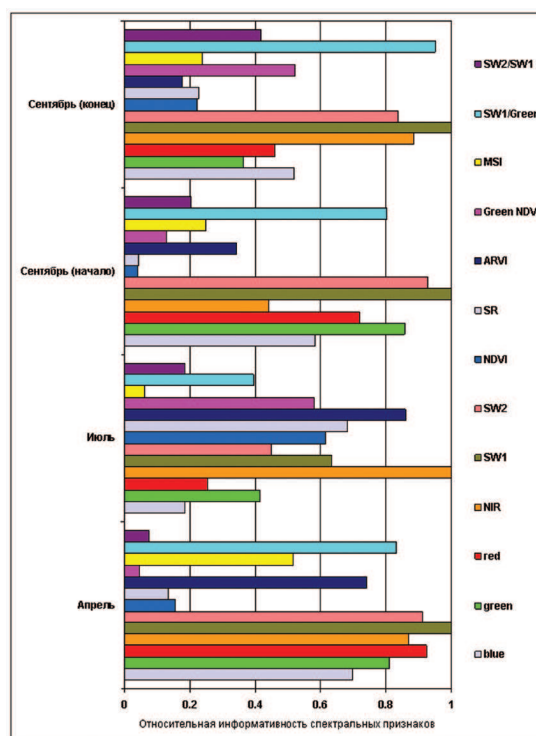


Рис. 5. Ранжирование спектральных признаков лесных участков на космических изображениях Landsat 7 в зависимости от сезона съёмки при определении возраста насаждений на основе алгоритма степенной функции

Выше было отмечено, что при смене пород в послерубочных лесных экосистемах по мере лесовосстановления в лесном пологе снижается доля лиственных и нарастает доля хвойных пород. Известно, что для распознавания хвойных и лиственных пород наилучшим образом происходит по изображениям, полученным в ближнем инфракрасном диапазоне электромагнитного спектра. При регрессионном определении возраста послерубочной лесной экосистемы эффект канала *NIR* проявился в том, что наиболее информативным признаком практически во все сезоны съёмки были значения спектральной яркости изображений этой зоны спектра.

Для анализа весенней космической съёмки были привлечены метеорологические данные о сроках начала вегетационного периода, который характеризуется устойчивой температурой воздуха выше +5 °С. В 2000 году (год съёмки) начало вегетационного периода отмечено 10 апреля, за период с 10 по 26 апреля (дата съёмки) средняя температура воздуха достигла 10,6 °С, что более чем в два раза превысило среднюю многолетнюю температуру апреля, равную 4,9 °С (рис. 6).

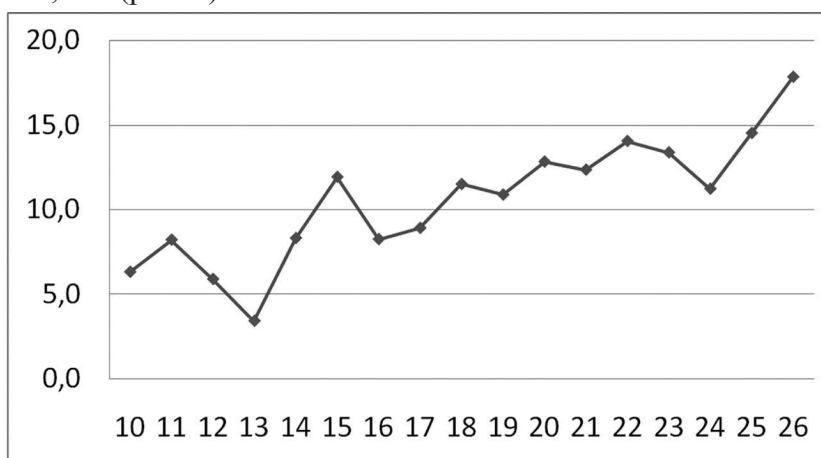


Рис. 6. Ход дневных температур с 10 по 26 апреля 2000 г.

В лесной зоне сроки проведения аэрофотосъёмки в интересах лесного хозяйства обычно согласовывались с фенологическим состоянием березы, продолжительность развития листьев которой составляет от 20 до 35 дней после начала вегетационного периода. Период от начала распускания листьев до формирования полного листа, проф. Г.Г. Самойлович определял как время «запестрения» березы, т.е. для этого временного отрезка характерно быстро меняющееся неустойчивое фенологическое состояние лесного полога (Самойлович, 1964).

Весенняя и раннелетняя листва березы, осины и других лиственных пород отличается повышенным содержанием воды, которая по некоторым данным превышает 80% от общей массы листьев, а затем в течение вегетационного периода снижается до 60–70%. Эта физиологическая особенность кронового пространства смешанных насаждений сказывается на повышении информативности спектральных признаков канала *SWIR1* и *SWIR2*, а также индексов зональных отношений с их участием ( $MSI$ ,  $\rho_{SWIR1}/\rho_G$ ), так как от содержания воды в листьях зависит интенсивность поглощения солнечной радиации в среднем инфракрасном диапазоне электромагнитного спектра.

При использовании алгоритма степенной регрессии для определения породно-возрастной структуры насаждений в группу информативных (относительная информативность 0,9–1,0) попадает 1–2 значимых сезонных спектральных признаков (рис. 4, 5). Анализ комбинаций переменных величин показал, что к информативным признакам в течение вегетационного периода могут быть отнесены значения яркости спектрального канала *SWIR1*, *SWIR2* и *NIR*, а также спектральные отношения:  $\rho_{SWIR2}/\rho_{SWIR1}$ ,  $\rho_{SWIR1}/\rho_G$ , *Green NDVI* (таблица 1).

Таблица 1. Корреляция показателей породной структуры с изобразительными свойствами космического снимка (степенная регрессия)

Показатели		Время космической съёмки и обозначения спектральных признаков							
		26 апреля		08 июля		06 сентября		24 сентября	
		<i>MSI</i>	$\rho_{SWIR1}/\rho_G$	<i>Green NDVI</i>	$\rho_{SWIR2}/\rho_{SWIR1}$	$\rho_{NIR}$	$\rho_{SWIR2}/\rho_{SWIR1}$	$\rho_{NIR}$	$\rho_{SWIR1}$
<b>26 апреля</b>	<i>MSI</i>	-	0,533	0,682	0,688**	0,715	0,718	0,676**	0,669**
	$\rho_{SWIR1}/\rho_G$		-	0,681	0,685**	0,717	0,714	0,668	0,676
<b>08 июля</b>	<i>Green NDVI</i>			-	0,699**	0,725**	<b>0,744**</b>	0,718**	0,701**
	$\rho_{SWIR2}/\rho_{SWIR1}$				-	0,734**	<b>0,740**</b>	0,735**	0,731**
<b>06 сентября</b>	$\rho_{NIR}$					-	<b>0,741**</b>	0,726	0,730
	$\rho_{SWIR2}/\rho_{SWIR1}$						-	<b>0,744**</b>	<b>0,751**</b>
<b>24 сентября</b>	$\rho_{NIR}$							-	0,689**
	$\rho_{SWIR1}$								-

Примечание: значком \*\* обозначена достоверность R при 1%-ном уровне значимости.

Выделенные в таблице курсивом значения *R* указывают на информативное сочетание спектральных признаков космических изображений разных сезонов съёмки при определении *L* на основе функций вида:

$$L=f(\textit{Green NDVI}, \rho_{SWIR2}/\rho_{SWIR1}) \quad R=0,744$$

июль сентябрь (начало)

$$L=f(\rho_{SWIR2}/\rho_{SWIR1}, \rho_{SWIR2}/\rho_{SWIR1}) \quad R=0,740$$

июль сентябрь (начало)

$$L=f(\rho_{SWIR2}/\rho_{SWIR1}, \rho_{NIR}) \quad R=0,744$$

сентябрь сентябрь  
(начало) (конец)

$$L=f(\rho_{SWIR2}/\rho_{SWIR1}, \rho_{SWIR1}) \quad R=0,751$$

сентябрь сентябрь  
(начало) (конец)

Степенные уравнения связи с долей лиственных пород в древесном пологе: одно - с участием спектральных признаков *Green NDVI* и  $\rho_{SWIR2}/\rho_{SWIR1}$  (июль),  $\rho_{NIR}$  и  $\rho_{SWIR2}/\rho_{SWIR1}$  (начало сентября),  $\rho_{NIR}$  и  $\rho_{SWIR1}$  (конец сентября), другое – с участием  $\rho_{SWIR2}/\rho_{SWIR1}$  (июль),  $\rho_{SWIR2}/\rho_{SWIR1}$  (начало сентября) и  $\rho_{SWIR1}$  (конец сентября), характеризовались коэффициентом  $R=0,780$ .

### Заключение

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что при эколого-динамическом изучении по космическим снимкам породной структуры послерубочных насаждений, следует в первую очередь ориентироваться на особенности формирования изображений в среднем инфракрасном диапазоне электромагнитного спектра *NIR* и отчасти *SWIR1*, независимо от сезона съёмки.

При анализе летних космических снимков к информативным значениям спектральной яркости изображений в каналах *NIR* и *SWIR1* добавляются зональные отношения типа *NDVI*, *Green NDVI*, *SR*, *ARVI*, в то время как в весенний и осенний периоды съёмки они не входят в группу ведущих признаков. Для периода ранней осени характерно сокращение группы информативных спектральных признаков из-за неустойчивого фенологического состояния лесного покрова. К концу сентября формируется осенний аспект лесного полога с массовым пожелтением листопадных пород и повышением их контраста с вечнозелёными хвойными породами. В составе информативных признаков, помимо *NIR* и *SWIR1*, появляются спектральные яркости каналов *G* и *R*.

Состав переменных величин и их информативность зависит не только от особенностей сезонной космической съемки, но и различий лесорастительных условий, характерных для разных групп типов леса. Так, в травяно-болотной группе, в отличие от лесов зеленомошной группы, насаждения из-за повышенной влажности почв более разрежены, в подлеске и напочвенном покрове немало влаголюбивой растительности. Лесотипологические особенности сезонной информативности космических изображений – предмет дальнейших исследований.

Практическим результатом проведенного исследования можно считать целевое формирование представительных обучающих выборок для классификации изображений послерубочных насаждений и анализа интенсивности процесса смены пород в таёжных лесах.

### Литература

1. Вегетационные индексы. Сводные таблицы подготовил *А.С. Черепанов* // М.: Совзонд. 2011. №2(11). С. 98–102.
2. *Жирин В.М., Князева С.В., Эйдлина С.П.* Дистанционное сопровождение лесообразовательного процесса в послерубочных таёжных лесах Русской равнины // Лесоведение. 2011. № 6. С. 29-38.
3. *Жирин В.М., Эльман Р.И., Агеев В.Н.* Результаты машинного определения запасов насаждений лиственницы по аэрофотоснимкам // Лесоустройство, таксация и аэрометоды. Ленинград: ЛенНИИЛХ, 1978. С. 128–132.
4. *Самойлович Г.Г.* Применение аэрофотосъёмки и авиации в лесном хозяйстве. М.: Лесн. пром-сть, 1964. 486 с.

# Seasonal informative properties of multispectral high-resolution space images for studying of forest species and age dynamics

V. Zhirin, S. Knyazeva, S. Eydlina, N. Zukert

*Centre of Forest Ecology and Productivity Problems, Russian Academy of Sciences*

*117997 Moscow, Profsoyuznaya str., 84/32*

*E-mails: vmzh@smtp.ru, aidlina@cepl.rssi.ru, knsvetl@gmail.com*

Article is devoted to the study of informative features of seasonal space images in determining of forest species and age dynamics. As a result of statistical study it was identified the most informative characters of different seasons satellite images.

**Keywords:** multispectral satellite images, species and age structure of forests, ecologic-dynamic series, statistical analysis.