

ОРИГИНАЛЬНЫЕ  
СТАТЬИ

УДК 630\*58/64

**ДИСТАНЦИОННОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ  
ЛЕСООБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА  
В ПОСЛЕРУБОЧНЫХ ТАЕЖНЫХ ЛЕСАХ РУССКОЙ РАВНИНЫ**

© 2011 г. В. М. Жирин, С. В. Князева, С. П. Эйдлина

*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН  
117997 Москва, Профсоюзная ул., 84/32  
E-mail: basil@cepl.rssi.ru*

Поступила в редакцию 28.10.2010 г.

Приведены результаты исследования динамики породно-возрастной структуры лесных экосистем, для которых характерны последствия интенсивной лесозаготовки, полученные на основе обработки данных космической съемки высокого пространственного разрешения и результатов наземной таксации.

*Лесные экосистемы, давность мест рубок, возраст лесной экосистемы, доля лиственных пород, эколого-динамические ряды, космический снимок, спектральные яркости изображений, результаты дешифрирования.*

Современным проблемам лесоводства и лесного хозяйства, требующим развития теоретических основ лесоведения и обновления положений концепции лесообразовательного процесса, особенно в условиях масштабных антропогенных воздействий на леса, посвящены труды ведущих ученых [3, 10, 13, 15, 17, 18]. Деструктивные изменения в лесном покрове связаны, в частности, с распространением сплошных и концентрированных рубок в лесах промышленного значения. Так, за период с 1946 по 2002 г. проведены рубки главного пользования на площади более 85 млн. га [10].

Последствия интенсивной эксплуатации лесов Русской равнины привели к широкому распространению насаждений мягколиственных пород в местах промышленных рубок хвойных пород в течение последних 50–60 лет [6, 17].

Как пример дистанционного сопровождения лесообразовательного процесса на лесных землях в местах послевоенных рубок приводятся некоторые результаты исследования динамики породно-возрастной структуры лесных экосистем модельной территории, расположенной в Костромской обл. Цель предпринятого статистического исследования – минимизация вероятности ошибки при обработке эколого-динамических рядов представительных данных наземного лесоустройства,

предназначенных для формирования обучающих выборок с учетом величины заданных ошибок определения характеристик породно-возрастной структуры лесов – возраста и соотношения лиственных и хвойных пород в лесном покрове.

#### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА

В модельную территорию включен лесной массив Варзенгского лесничества бывшего Кологривского лесхоза общей площадью около 45.5 тыс. га, который входит в таежную зону (южнотаежный округ) с преобладанием зеленомошной группы типов леса – черничных и кисличных ельников северных увалов. Из лиственных пород здесь произрастают береза, осина, ольха серая, липа, различные виды ив.

На момент космической съемки места рубок разной давности совместно с насаждениями зеленомошной группы типов леса занимали 30.9 тыс. га (67.9% от общей площади модельной территории). Кроме того, примерно четверть площади (11.4 тыс. га) отнесена лесоустройством к еловым лесным культурам. Незначительная площадь еловых насаждений травяно-болотной группы типов леса составляла 1.3 тыс. га.

Характеристика земель лесного фонда заимствована из базы данных лесоустройства, границы

таксационных участков (выделов), отраженные на цифровых лесных картах, были совмещены в ходе исследования с космическим снимком SPOT-4 (Франция), полученным в июле 2008 г. и целиком покрывающим модельную территорию.

Космические изображения были представлены в четырех спектральных каналах: *G* – зеленом (0.50–0.59 мкм), *R* – красном (0.61–0.68 мкм), *NIR* – ближнем инфракрасном (0.78–0.89 мкм) и *SWIR* – среднем инфракрасном (1.58–1.75 мкм) диапазонах электромагнитного спектра.

Индикаторами восстановительной динамики нарушенных земель при лесообразовательном процессе являются различные признаки экосистем, которые с определенной достоверностью указывают на изменение во времени их породно-возрастной структуры. Для выявления таких признаков были сгруппированы участки свежих, зарастающих и заросших вырубок разной давности и насаждений, относящихся к одной группе типов леса. Объединение мест рубок с коренными и производными насаждениями одного типа местобитания в эколого-динамический ряд позволяет рассматривать эту совокупность как одну послерубочную лесную экосистему, находящуюся на разных стадиях развития.

При выполнении процесса дешифрирования дистанционных материалов съемок достаточно сложной задачей является определение численных значений каких-либо показателей лесных объектов измерительными методами с применением теории статистической оценки. В целях оценки динамического состояния лесных экосистем на основе космического снимка сформированы эколого-динамические ряды (ЭДР). Системы показателей ЭДР образовали характеристики спектральной яркости зональных изображений, значения возраста насаждений и давности мест рубок, доли участия лиственных пород и другие параметры. Общие сведения о статистических совокупностях и их предназначении при обработке эколого-динамических рядов приведены в виде следующего списка<sup>1</sup>.

**ЭДР № 1** (места рубок разной давности и насаждения естественного происхождения зеленомошной группы типов леса, число выделов – 1595):

1-1. **Случайная выборка** (642 выдела) – предназначена для нелинейной оценки связи возраста

лесной экосистемы (временной интервал 3-180 лет) с показателями спектральной яркости изображения космического снимка;

1-2. **Стратифицированная выборка** (320 выделов) – предназначена для нелинейной оценки связи возраста лесной экосистемы (временной интервал 3-60 лет) с показателями спектральной яркости космического снимка;

1-3. **Стратифицированная выборка** (620 выделов) – предназначена для нелинейной оценки связи возраста лесной экосистемы (временной интервал 60-100 лет) с показателями спектральной яркости космического снимка;

1-4. **Стратифицированная выборка** (152 выдела) – предназначена для нелинейной оценки связи возраста лесной экосистемы (временной интервал 100–180 лет) с показателями спектральной яркости космического снимка.

**ЭДР № 2** (насаждения естественного происхождения зеленомошной группы типов леса; число выделов – 1468):

2-1. **Случайная выборка** (725 выделов) – предназначена для нелинейной оценки связи доли лиственных пород (временной интервал 100–180 лет) с показателями спектральной яркости изображения космического снимка;

2-2. **Стратифицированная выборка** (337 выделов) – предназначена для сравнения нелинейных оценок связи возраста естественных насаждений и лесных культур (временной интервал 10–60 лет).

**ЭДР № 3** (лесные культуры зеленомошной группы типов леса; число выделов 309):

3-1. **Выборка** предназначена для нелинейной оценки связи возраста лесных культур (временной интервал 10-60 лет) с показателями спектральной яркости изображения космического снимка.

**ЭДР № 4** (насаждения естественного происхождения травяно-болотной группы типов леса; число выделов 170):

4-1. **Выборка** предназначена для сравнения нелинейных оценок связи доли лиственных пород насаждений (временной интервал 10-200 лет) с показателями спектральной яркости изображения космического снимка.

В каждом спектральном канале для всех таксационных выделов рассчитывались суммарные интегральные статистические показатели: средняя яркость пикселей изображения и их стандартное отклонение<sup>2</sup>. Возраст насаждений и давность

<sup>1</sup> Из-за ограниченных возможностей программной обработки больших массивов данных случайные выборки были извлечены из генеральных выборок на основе таблицы случайных чисел [12].

<sup>2</sup> Яркость оценивалась в условных единицах в интервале от 0 (темный тон) до 255 (светлый тон).

мест рубок корректировались с учетом даты космической съемки, т.е. были приведены к году получения снимка SPOT-4. Поскольку давность мест рубок учитывала фактор времени от начала лесовозобновления с последующим развитием насаждений, можно говорить о возрасте послерубочной лесной экосистемы.

Для оценки нелинейной связи возраста ( $A$ ) послерубочной лесной экосистемы, насаждений, лесных культур и доли участия лиственных пород ( $L$ ) в составе насаждений с изобразительными свойствами космического снимка использовался квази-ньютоновский метод, позволяющий получить устойчивые оценки параметров модели кусочно-линейной регрессии с помощью программного пакета *Statistica 6.1*.

В качестве переменных величин модели использовались средние значения яркости выделов в спектральных каналах ( $\rho_G, \rho_R, \rho_{NIR}, \rho_{SWIR}$ ) и индексов в виде зональных отношений:  $NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_R) / (\rho_{NIR} + \rho_R)$ ;  $SR = \rho_{NIR} / \rho_R$ ;  $MSI = \rho_{SWIR} / \rho_{NIR}$ ;  $Green\ NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_G) / (\rho_{NIR} + \rho_R)$ ;  $MSI = \rho_{SWIR} / \rho_{NIR}$ ;  $NDII = (\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}) / (\rho_{NIR} + \rho_{SWIR})$ , описанные в литературе по дистанционному зондированию [2, 5].

Иллюстрацией зависимости породно-возрастной структуры послерубочной лесной экосистемы, насаждений, лесных культур с изобразительными свойствами космического снимка могут служить показатели тесноты связи, приведенные в табл. 1. Следует отметить, что исследования таких связей при использовании материалов космических съемок в интересах лесоводства сравнительно немногочисленны [8].

При обработке статистических выборок 1-1, 1-2, 1-3, 1-4 наибольшие показатели тесноты связи возраста послерубочной лесной экосистемы и значений яркости изображения (индексов зональных отношений) были достигнуты на основе функций вида  $A = f(\rho_G, \rho_R, \rho_{NIR}, \rho_{SWIR})$  и  $A = f(NDVI, SR, Green\ NDVI, MSI, NDII)$ .

Для сравнения точности определения возраста лесных культур (выборка 3-1) и естественных насаждений аналогичного возраста (выборка 2-2) использовалась функция вида  $A = f(\rho_G, \rho_R, \rho_{NIR}, \rho_{SWIR}, NDVI, SR, Green\ NDVI, MSI, NDII)$ .

Функция вида  $L = f(\rho_G, \rho_R, \rho_{NIR}, \rho_{SWIR})$  использована для оценки связи доли лиственных пород насаждений зеленомошной (выборка 2-1) и травяно-болотной (выборка 4-1) групп типов леса с показателями спектральной яркости изображения космического снимка.

Результаты программной реализации включали исходные данные  $A$  и  $L$ , их предсказанные значения и расхождения между ними, что позволило определить как результат дешифрирования при заданной величине ошибки, так и суммарную вероятность ошибки.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

*Динамика изобразительных свойств космического снимка.* В сложных группах типов леса после рубки на месте коренных лесов нередко формируются производные лиственные насаждения со сроком существования 80–100 лет, которые примерно через 200 и более лет сменяются вновь коренными хвойными породами [13].

Обработка статистической выборки ЭДР № 1 позволила выявить связь возрастных изменений спектральной яркости космических изображений участков лесной экосистемы (рис. 1).

На рис. 1 видно, что во всех спектральных каналах с увеличением возраста послерубочной лесной экосистемы сохраняется тенденция к снижению яркости изображения. В  $G$ - и  $R$ -каналах оно минимально (5–7%), а в  $NIR$ - и  $SWIR$ -каналах доходит до 25–28% на протяжении 180 лет. Наиболее заметно яркость изображения снижается в течение первых 50–80 лет, затем наблюдается плавное уменьшение значений яркости и возрастание их дисперсии.

Очевидно, что траектория изменения значений яркости изображения связана, прежде всего, с динамикой полноты и долей участия лиственных пород в лесном пологе послерубочных насаждений (рис. 2,  $A$ ).

На рисунке видно, что для начального этапа характерны насаждения средней полноты с преимущественным доминированием лиственных пород. На этот период приходится быстрое снижение яркости изображения, которое затем стабилизируется в 50–60-летнем возрасте. Преобладание в этом возрасте лиственных пород способствует формированию однородной морфоструктуры верхнего полога, и на яркость изображения большее влияние оказывает спектральное отраженное излучение, нежели особенности морфологии лесного полога.

Последующее снижение значений яркости изображения связано как со снижением полноты, так и с увеличением в лесном пологе доли хвойных пород (в основном, ели), которые отличаются от лиственных пород более низкой отражательной способностью, особенно в  $NIR$ -канале [1, 4, 11, 16].

**Таблица 1.** Корреляция показателей породно-возрастной структуры лесных экосистем с изобразительными свойствами космического снимка

Комбинации значений переменных величин	ЭДР № 1				ЭДР № 2		ЭДР №3	ЭДР № 4
	Обозначения статистических выборок (см. табл. 1)							
	1-1*	1-2*	1-3*	1-4*	2-1*	2-2*	3-1*	4-1*
Теснота связи возраста послерубочной лесной экосистемы, насаждений и лесных культур со спектральными признаками изображений								
$A = f(\rho_G, \rho_R, \rho_{NIR}, \rho_{SWIR})$	0.862**	0.918**	0.839*	0.930	–	0.894	0.891	–
$A = f(\rho_{NIR}, \rho_{SWIR}, Green\ NDVI)$	0.861	0.906	0.838	0.926	–	–	–	–
$A = f(\rho_R, \rho_{NIR}, \rho_{SWIR})$	0.860	0.908	0.838	0.930	–	0.890	0.891	–
$A = f(NDVI, SR, Green\ NDVI, MSI, NDII)$	0.860	0.910	0.838	0.933**	–	0.891	0.888	–
$A = f(NDVI, Green\ NDVI, NDII)$	0.856	0.906	0.837	0.930	–	–	–	–
$A = f(\rho_G, \rho_R, \rho_{NIR}, \rho_{SWIR}, NDVI, SR, Green\ NDVI, MSI, NDII)$	–	–	–	–	–	0.896**	0.906**	–
$A = f(\rho_G, \rho_R, \rho_{NIR}, \rho_{SWIR}, NDVI, SR, Green\ NDVI, MSI)$	–	–	–	–	–	0.895	0.903	–
$A = f(\rho_G, \rho_R, \rho_{NIR}, \rho_{SWIR}, NDVI, SR, Green\ NDVI)$	–	–	–	–	–	–	–	–
$A = f(\rho_G, \rho_R, \rho_{NIR}, \rho_{SWIR}, NDVI, SR)$	–	–	–	–	–	0.896	0.902	–
$A = f(\rho_G, \rho_R, \rho_{NIR}, \rho_{SWIR}, NDVI)$	–	–	–	–	–	0.895	0.901	–
$A = f(\rho_G, \rho_R, \rho_{NIR}, \rho_{SWIR}, NDVI)$	–	–	–	–	–	0.894	0.899	–
Теснота связи доли лиственных пород в составе насаждений зеленомошной и травяно-болотной групп типов леса со спектральными признаками изображений								
$L = f(\rho_G, \rho_R, \rho_{NIR}, \rho_{SWIR})$	–	–	–	–	0.906**	–	–	0.925**
$L = f(\rho_R, \rho_{NIR}, \rho_{SWIR})$	–	–	–	–	0.906	–	–	0.924
$L = f(NDVI, Green\ NDVI, NDII)$	–	–	–	–	0.906	–	–	0.923
$L = f(\rho_{NIR}, \rho_{SWIR}, Green\ NDVI)$	–	–	–	–	0.906	–	–	0.923

\* Обозначение статистических выборок см. табл. 1.

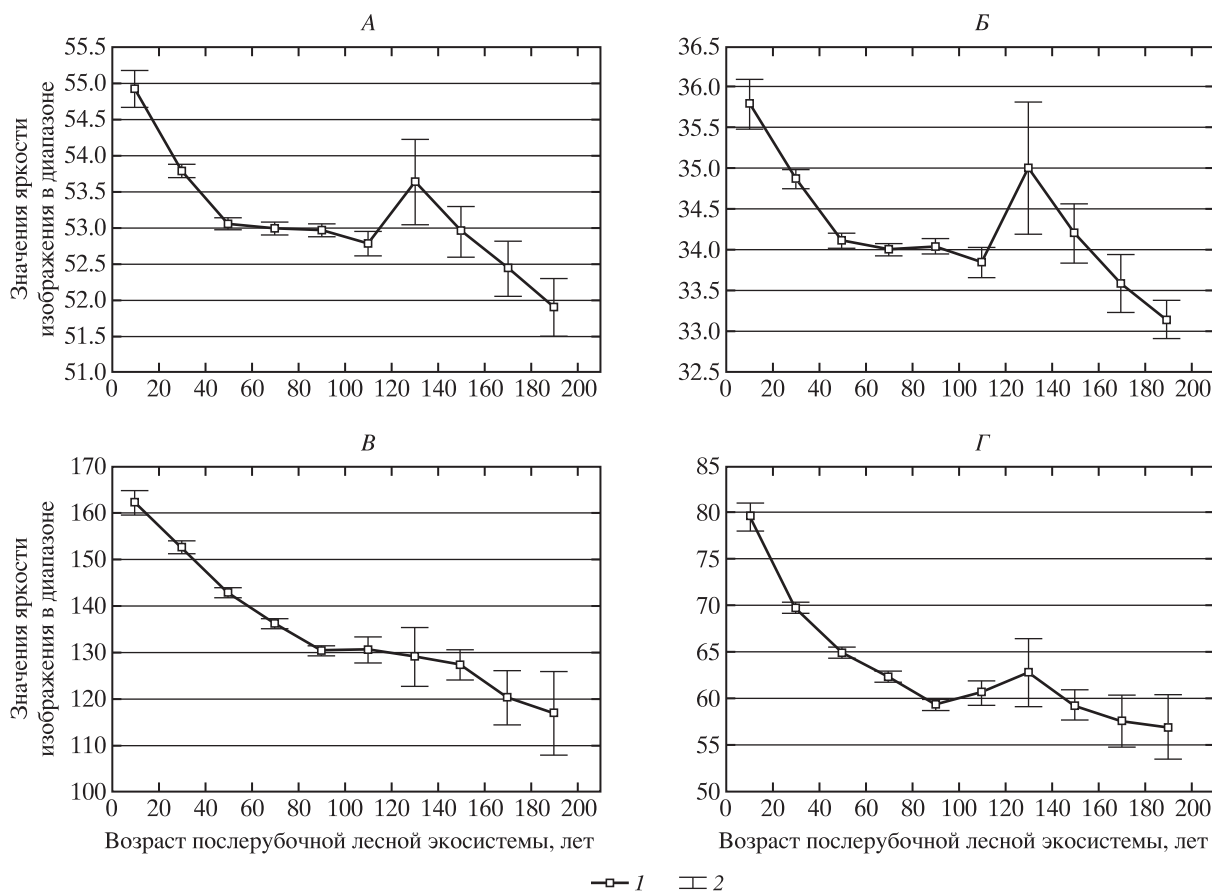
\*\* Для иллюстрации возможностей дешифрирования породно-возрастной структуры лесного покрова были отобраны виды функций с комбинацией переменных величин, при использовании которых отмечены наибольшие показатели тесноты связи.

Графики на рис. 2, Б и графические тренды, изображенные на рис. 3, более детально объясняют особенности формирования отраженной радиации в ближнем инфракрасном (рис. 3, А) и среднем инфракрасном (рис. 3, Б) диапазонах электромагнитного спектра [8].

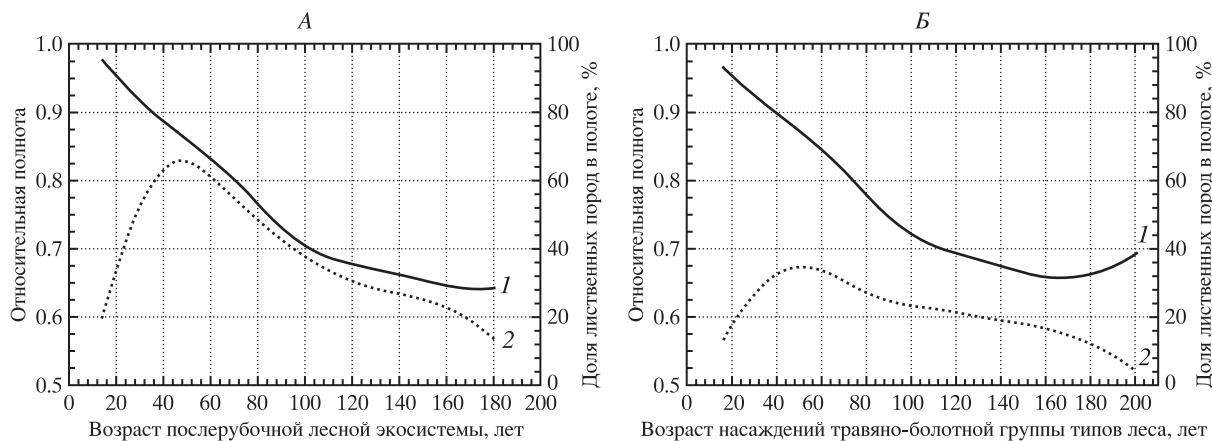
Возрастная динамика доли лиственных пород в насаждениях разных групп типов леса практически одинаковы. Возрастные изменения полноты насаждений в зеленомошной и травяно-болотной группах типов леса имеют однотипный характер, но отличаются по уровню значений (рис. 2). Это означает, что площадь проекций крон деревьев, формирующих отраженную радиацию, больше

при повышенной полноте и, соответственно, сомкнутости полога. Поэтому в NIR-канале при доминировании лиственных пород (до 80 лет) изображение лесов ярче в зеленомошной группе насаждений по сравнению с травяно-болотной, а после 80 лет – оно, наоборот, темнее (рис. 3, А).

В среднем инфракрасном диапазоне электромагнитного спектра интенсивность интегральной отраженной радиации от полога деревьев и почвенного покрова зависит от повышенного содержания воды в клеточной структуре листьев (хвои). При меньшем уровне полноты насаждений травяно-болотной группы типов леса пространство между кронами деревьев занимает



**Рис. 1.** Изменение яркости изображений в различных спектральных каналах съемки (А – 0.50–0.59 мкм, Б – 0.61–0.68 мкм, В – 0.78–0.89 мкм, Г – 1.58–1.75 мкм) с возрастом послерубочной лесной экосистемы: 1 – среднее значение, 2 – среднее  $\pm 0.95$  доверительный интервал.

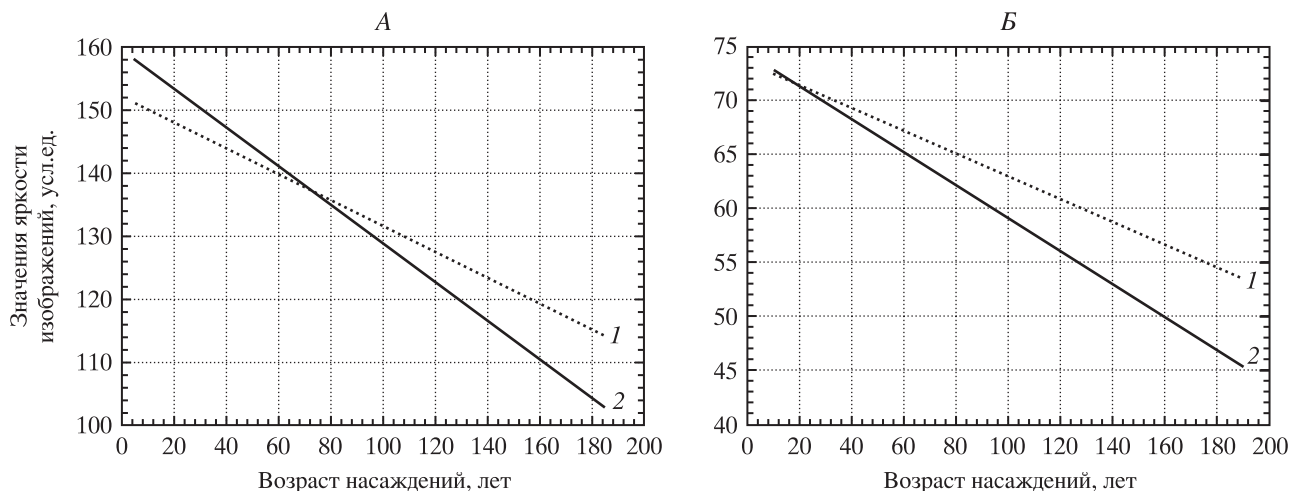


**Рис. 2.** Возрастная динамика полноты и доли участия лиственных пород в лесном пологе послерубочной лесной экосистемы (А) и в насаждениях травяно-болотной группы типов леса (Б): 1 – относительная полнота, 2 – доля лиственных пород.

преимущественно влаголюбивая растительность. Поэтому в SWIR-канале яркость изображения лесных участков травяно-болотной группы типов леса устойчиво превышает яркость изображения зеленомошных насаждений одного и того же возраста (рис. 3, Б).

*Оценка связи показателей породно-возрастной структуры леса с изобразительными свойствами космического снимка. Для проведения нелинейных оценок привлекались данные ЭДР № 1–3.*

Первоначальная процедура обработки включала анализ ряда распределения значений воз-



**Рис. 3.** Сравнение значений яркости изображения насаждений зеленомошной и травяно-болотной групп типов леса в ближнем инфракрасном (А) и среднем инфракрасном (Б) диапазонах электромагнитного спектра: 1 – травяно-болотная группа типов леса, 2 – зеленомошная группа типов леса.

раста 1595 выделов послерубочной лесной экосистемы, а также формирование случайной и трех стратифицированных выборок разной численности.

Приведенный на рис. 4 ряд распределения значений возраста участков охватывает интервал от 3 до 180 лет и характеризуется многомодальностью.

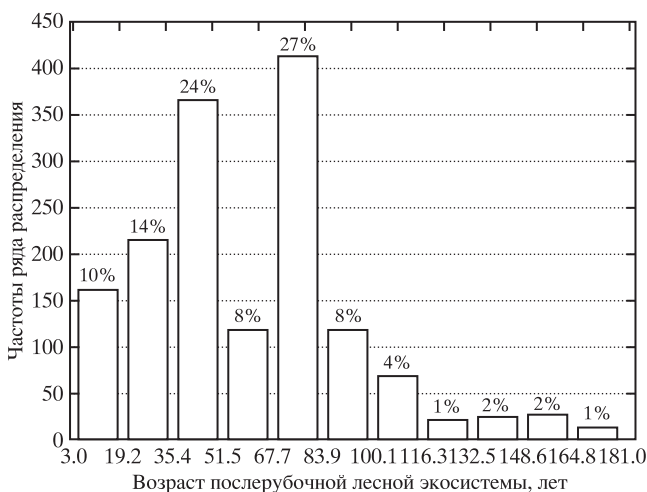
Эта особенность статистического распределения предполагает возможность формирования, по крайней мере, трех стратифицированных выборок, которые иллюстрируют особенности лесообразовательного процесса после интенсивной лесоэксплуатации. К первой выборке в интервале возраста от 3 до 60 лет относятся участки мест рубок различной давности, а сформировавшиеся

в последующем насаждения представлены преимущественно лиственными породами. Во второй выборке (интервал возраста от 60 до 100 лет) сосредоточены, как правило, участки смешанных хвойно-лиственных насаждений. Третью выборку (интервал возраста от 100 до 180 лет) образовали незначительные по площади выделы с преобладанием хвойных пород, необходимость выделения которых предусматривается нормативами лесоустройства.

В ходе обработки данных ЭДР результаты дешифрирования возраста определялись порознь для участков послерубочной лесной экосистемы в интервале от 3 до 60 лет, от 60 до 100 лет и от 100 до 180 лет (табл. 2, 3). Кроме того, в табл. 4 показаны результаты дешифрирования для всех участков послерубочной лесной экосистемы в интервале от 3 до 180 лет.

Набор переменных величин функции нелинейной оценки возраста участков, организованных в ЭДР № 1 (выборки 1-1, 1-2, 1-3), одинаков и включает значения спектральной яркости изображений в каналах *G*, *R*, *NIR* и *SWIR*. Однако для старовозрастных насаждений (выборка 1-4) более предпочтительным оказался состав переменных величин, который включает индексы зональных отношений *NDVI*, *SR*, *Green NDVI*, *MSI*, *NDII*. Для объяснения этой особенности требуется дополнительный научный анализ.

Для практических целей может представлять интерес анализ вероятности заданных ошибок дешифрирования возраста и доли лиственных пород. Обычно при таксации лесов в качестве минимального порога вероятности принимается 68%.



**Рис. 4.** Ряд распределения значений возраста участков послерубочной лесной экосистемы.

**Таблица 2.** Вероятность определения возраста участков послерубочной лесной экосистемы разной стадии развития на основе космического снимка

Вид функции	Статистические параметры выборок ЭДР			Результат определения возраста лесной экосистемы при заданной ошибке				
	Объем выборки	Коэффициент корреляции	Доля дисперсии, объясненная моделью, %	до ±1 года	до ±3 лет	до ±5 лет	до ±10 лет	> ±10 лет
Участки лесной экосистемы возраста от 3 до 60 лет (ЭДР № 1, выборка 1-2)								
$A = f(\rho_G, \rho_R, \rho_{NIR}, \rho_{SWIR})$	320	0.918	84.4	$\frac{20.0^*}{0.20}$	$\frac{21.2}{0.41}$	$\frac{25.0}{0.66}$	$\frac{30.4}{0.97}$	$\frac{3.4}{1.0}$
Участки лесной экосистемы (60–100 лет) (ЭДР № 1, выборка 1-3)								
$A = f(\rho_G, \rho_R, \rho_{NIR}, \rho_{SWIR})$	620	0.839	70.4	$\frac{11.0}{0.11}$	$\frac{25.6}{0.37}$	$\frac{31.8}{0.68}$	$\frac{29.4}{0.98}$	$\frac{2.2}{1.0}$

\* Примечание. В числителе – % ошибки, в знаменателе – суммарная вероятность ошибки.

**Таблица 3.** Вероятность определения возраста участков старовозрастных насаждений и всех участков послерубочной лесной экосистемы на основе космического снимка

Вид функции	Статистические параметры выборок ЭДР			Результат определения возраста лесной экосистемы при заданной ошибке, %				
	Объем выборки	Коэффициент корреляции	Доля дисперсии, объясненная моделью, %	до ±5 лет	до ±10 лет	до ±15 лет	до ±20 лет	> ±20 лет
Участки старовозрастных насаждений (100 – 180 лет) (ЭДР № 1, выборка 1-4)								
$A = f(NDVI, SR, Green, NDMI, MSI, NDII)$	152	0.933	87.1	$\frac{44.1^*}{0.44}$	$\frac{30.3}{0.74}$	$\frac{15.8}{0.90}$	$\frac{5.9}{0.96}$	$\frac{3.9}{1.0}$
Все участки послерубочной лесной экосистемы (3–180 лет) (ЭДР № 1, выборка 1-1)								
$A = f(\rho_G, \rho_R, \rho_{NIR}, \rho_{SWIR})$	642	0.862	74.3	$\frac{32.5}{0.32}$	$\frac{26.7}{0.59}$	$\frac{16.8}{0.76}$	$\frac{12.8}{0.89}$	$\frac{11.2}{1.0}$

\* Примечание. В числителе – % ошибки, в знаменателе – суммарная вероятность ошибки.

Для участков лесной экосистемы, имеющих возраст от 3 до 60 лет, ошибка, равная 5 годам и менее, встречалась в 66% случаев, для участков старшего возраста (60–100 лет) – в 68% случаев (табл. 2). Для участков старовозрастных насаждений (100–180 лет) ошибка, равная 10 годам и менее, характерна для 74% случаев, а для всех участков послерубочной лесной экосистемы ошибка, равная 15 годам и менее, – для 76% случаев (табл. 3).

Создание лесных культур на больших площадях после рубок леса проводилось для того, чтобы избежать нежелательной смены пород в ходе лесовосстановления. Однако из-за отсутствия

должного ухода и воздействия других неблагоприятных факторов облесение на модельной территории протекает в основном путем естественной смены пород. Тем не менее годы посадки лесных культур, как правило, отмечаются в материалах лесоустройства, т.е. точность исходных данных о послерубочном возрасте участков бывших лесных культур значительно выше, чем о возрасте естественных насаждений, который при таксации леса определяется глазомерным способом.

Набор переменных функции нелинейной оценки возраста естественных насаждений и лесных культур (в интервале от 10 до 60 лет), организованных в ЭДР №№ 2 и 3 (выборки 2-2, 3-1), оди-

**Таблица 4.** Вероятность определения возраста участков естественных насаждений и лесных культур зеленомошной группы типов леса на основе космического снимка

Вид функции	Статистические параметры выборок ЭДР			Результат определения возраста естественных насаждений и лесных культур при заданной ошибке, %				
	Объем выборки	Коэффициент корреляции	доля дисперсии, объясненная моделью, %	до ±1 года	до ±3 лет	до ±5 лет	до ±10 лет	> ±10 лет
Участки естественных насаждений возрастом от 10 до 60 лет (ЭДР № 2, выборка 2-2)								
$A = f(\rho_G, \rho_R, \rho_{NIR}, \rho_{SWIR}, NDVI, SR, Green\ NDVI, MSI, NDII)$	337	0.896	80.4	$\frac{13.9^*}{0.14}$	$\frac{28.8}{0.43}$	$\frac{22.6}{0.65}$	$\frac{33.8}{0.99}$	$\frac{0.9}{1.0}$
Участки лесных культур возрастом от 10 до 60 лет (ЭДР № 3, выборка 3-1)								
$A = f(\rho_G, \rho_R, \rho_{NIR}, \rho_{SWIR}, NDVI, SR, Green\ NDVI, MSI, NDII)$	309	0.906	82.0	$\frac{23.9}{0.24}$	$\frac{30.1}{0.54}$	$\frac{21.1}{0.75}$	$\frac{22.3}{0.97}$	$\frac{2.6}{1.0}$

\* Примечание. В числителе – % ошибки, в знаменателе – суммарная вероятность ошибки.

**Таблица 5.** Вероятность определения доли лиственных пород в насаждениях зеленомошной и травяно-болотной групп типов леса на основе космического снимка

Вид функции	Статистические параметры выборок ЭДР			Результат определения доли лиственных пород при заданной ошибке, %				
	Объем выборки	Коэффициент корреляции	доля дисперсии, объясненная моделью, %	до ±5%	до ±10%	до ±15%	до ±20%	>±20%
Насаждения зеленомошной группы типов леса возраста от 10 до 180 лет (ЭДР № 2, выборка 2-1)								
$L = f(\rho_G, \rho_R, \rho_{NIR}, \rho_{SWIR})$	725	0.906	82.0	$\frac{35.0^*}{0.35}$	$\frac{27.4}{0.62}$	$\frac{22.9}{0.85}$	$\frac{10.1}{0.95}$	$\frac{4.6}{1.0}$
Насаждения травяно-болотной группы типов леса возраста от 10 до 200 лет (ЭДР № 4, выборка 4-1)								
$L = f(\rho_G, \rho_R, \rho_{NIR}, \rho_{SWIR})$	163	0.925	85.6	$\frac{36.2}{0.36}$	$\frac{28.8}{0.65}$	$\frac{20.8}{0.86}$	$\frac{11.1}{0.97}$	$\frac{3.1}{1.0}$

\* Примечание. В числителе – % ошибки, в знаменателе – суммарная вероятность ошибки.

наков и включает значения спектральной яркости изображений и индексов зональных отношений (табл. 4).

Точность определения возраста лесных культур по космическим изображениям существенно выше, чем естественных насаждений. Так, для участков насаждений ошибка, равная 5 годам и менее, встречалась в 65% случаев, а для лесных культур – в 75% случаев (табл. 2).

Определение доли лиственных пород в насаждениях зеленомошной и травяно-болотной групп типов леса основано на нелинейной связи со зна-

чениями спектральной яркости космических изображений в каналах  $G$ ,  $R$ ,  $NIR$  и  $SWIR$  (табл. 5).

Точность определения доли лиственных пород в насаждениях зеленомошной и травяно-болотной групп типов леса на основе космического снимка практически одинакова. Так, ошибка, равная 10% и менее, встречалась в 62–65% случаев, а 15% и менее – в 85–86% случаев (табл. 5).

**Заключение.** Развитие концепции лесообразовательного процесса нуждается в совершенствовании, в том числе в части методов дистанционного изучения послерубочных таежных лесов,



широко распространенных в результате проведения интенсивной лесозаготовки во второй половине XX в.

Использование обучающих выборок при классификации изображений – основной метод количественного анализа данных дистанционного зондирования [14]. В его основе лежат, как правило, спектральные признаки изображений. В результате статистического анализа эколого-динамических рядов мест рубок разной давности и насаждений получены количественные оценки нелинейной связи возраста послерубочной лесной экосистемы, доли участия лиственных пород в составе насаждений со спектральными характеристиками космического снимка высокого пространственного разрешения (SPOT-4).

При определении возраста участков лесной экосистемы вероятность заданной ошибки до  $\pm 5$  лет во временном интервале от 3 до 100 лет составила 0.66-0.68, в интервале от 100 до 180 лет – 0.44. При заданной ошибке до  $\pm 10$  лет вероятность ошибки была соответственно 0.97; 0.98 и 0.74, а для всего временного ряда от 3 до 180 лет – 0.59. При определении возраста участков бывших лесных культур вероятность ошибки до  $\pm 5$  лет составила 0.75.

При определении доли лиственных пород вероятность заданной ошибки до  $\pm 10\%$  составила в насаждениях зеленомошной группы типов леса 0.62, а травяно-болотной группы – 0.65. При заданной ошибке до  $\pm 15\%$  вероятность была соответственно 0.85 и 0.86.

Методика обработки данных эколого-динамических рядов применима также при оценке тематической информативности различных космических систем и картографировании территории послерубочных таежных лесов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аэрокосмические методы в охране природы и в лесном хозяйстве / Под ред. Сухих В.И., Сеницына С.Г. М.: Лесн. пром-сть, 1979. 288 с.
2. Виноградов Б.В. Аэрокосмический мониторинг экосистем. М.: Наука, 1984. 320 с.
3. Вомперский С.Э. Экологизация лесного и сельского хозяйства в связи с задачами устойчивого развития // Лесн. хоз-во. 1999. № 3. С. 2–4.
4. Данилюс Е.П., Журинов В.М., Сухих В.И., Эльман Р.И. Дистанционное зондирование в лесном хозяйстве. М.: Агропромиздат, 1989. 223 с.
5. Журинов В.М., Князева С.В. Изучение особенностей лесного полога на основе значений вегетационных индексов, вычисленных по данным космической съемки МСУ-Э // Исследования Земли из космоса. 2003. № 2. С. 73–79.
6. Журинов В.М., Князева С.В. Изменение лесного покрова после интенсивных лесозаготовок в южной тайге Русской равнины // Лесоведение. 2010. № 6. С. 3–11.
7. Журинов В.М., Лебедева Г.С. Применение материалов аэрокосмических съемок для проведения мониторинга зеленых насаждений. М.: НИА-Природа, 2006. 40 с.
8. Журинов В.М., Сухих В.И., Шаталов А.В., Бутусов О.Б., Эйшлин С.П. Использование космических снимков для изучения динамики зарастания гарей // Исследования Земли из космоса. 2004. № 5. С. 69–76.
9. Замолодчиков Д.Г., Коровин Г.Н., Уткин А.И., Честных О.В., Сонген Б. Углерод в лесном фонде и сельскохозяйственных угодьях России. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2005. 200 с.
10. Изменение окружающей среды и климата. Природные и связанные с ними техногенные катастрофы: Т. 4: Процессы в биосфере: изменения почвенно-растительного покрова и территориальных вод РФ, круговорот веществ под влиянием глобальных изменений климата и катастрофических процессов / Под ред. кол.: Н.П. Лаверов. Отв. ред. Г.А. Заварзин, В.Н. Кудяров. Пушино; Москва: ИФХ и БПП РАН, ИФЗ РАН, 2008. 268 с.
11. Исаев А.С., Сухих В.И., Калашников Е.Н. и др. Аэрокосмический мониторинг лесов. М.: Наука, 1991. 240 с.
12. Митропольский А.К. Техника статистических исчислений. М.: Физматгиз, 1961. 479 с.
13. Мониторинг биологического разнообразия лесов России: методология и методы / Под ред. Исаева А.С. М.: Наука, 2008. 453 с.
14. Рис У.Г. Основы дистанционного зондирования. М.: Техносфера, 2006. 336 с.
15. Седых В.Н. Как понимать лесообразовательный процесс // Лесная таксация и лесоустройство. 2009. № 1 (41). С. 33–41.
16. Сухих В.И. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве: Учебник. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. 392 с.
17. Сухих В.И., Уткин А.И. О совершенствовании системы учета лесного фонда // Лесн. хоз-во. 2000. № 2. С. 36–39.
18. Сухих В.И., Уткин А.И. Информационно-инвентаризационные проблемы лесного фонда России в связи с экологизацией лесного хозяйства // Лесоведение. 2003. № 1. С. 3–15.
19. Уткин А.И. Лесообразовательный процесс: концепция российского лесоведения // Лесоведение. 1999. № 3. С. 13–23.

## **Remote Maintenance of Forest-Forming Process in Taiga Forests After Their Cutting in the Russian Plain**

**V. M. Zhirin, S. V. Knyazeva, S. P. Eidlina**

Systems of indices for ecological-dynamic series were elaborated to characterize the dynamic state of forest ecosystems after intense logging. These systems included characteristics of spectral brightness of the SPOT cosmic image, age of stands, time after cutting, and a share of deciduous trees in the stand. The analysis was performed on the basis of the piecewise-linear regression model. The methodology is intended for the formation of training samplings with given properties and their following application in the assessment of topical information content of various cosmic systems and mapping of taiga forests grown on felled areas.