

Использование материалов съемок при оценке восстановительной динамики лесов на равнинных территориях

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

Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН (ЦЭПЛ РАН)
117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32
E-mails: vmzh@smtp.ru

В статье предлагаются методические подходы к изучению возможностей дистанционного сопровождения процесса лесовозобновления на основе выявления связей признаков восстановительной динамики лесов с изобразительными свойствами материалов дистанционных съемок. Анализ взаимосвязей и их практическое применение рассматривается как один из путей осуществления мониторинга крупномасштабных процессов в бореальных лесах и исследования динамики лесных экосистем.

Ключевые слова: процесс лесовосстановления, послерубочные лесные экосистемы, дистанционное сопровождение, зеленомошная группа типов леса, мультиспектральный космический снимок, спектральные яркости, эколого-динамические ряды (ЭДР), цифровая модель рельефа (ЦМР), стратифицированные выборки, статистический анализ ЭДР

Введение

Лесовозобновление – процесс образования нового поколения леса под пологом древостоя, на вырубках, гарях и других лесных землях. Формирование лесного покрова в большинстве регионов таежной зоны осуществляется естественным путем, так как он больше соответствует природе таежных лесов.

Интерес к дистанционному изучению восстановительной динамики лесов определяется наличием значительных по площади и частых по времени возникновения нарушений лесного покрова после лесных пожаров, массового размножения насекомых-вредителей, ветровалов, рубок леса и др.

Первые опыты по применению космических снимков для изучения послерубочного зарастания вырубок в таежных лесах проведены в 80-е годы прошлого века [1]. Было установлено, что для фотоснимков КФА-1000 характерна неодинаковая достоверность дешифрирования состояния лесовозобновления. Вероятность распознавания по космическим фотоснимкам свежих и невозобновившихся вырубок достигала 83%. Вырубки с преимущественным возобновлением хвойных пород опознавались с невысокой вероятностью – 65,3%. Уверенно распознавались вырубки с успешным возобновлением лиственных пород (83,5% случаев).

В настоящее время для аэрокосмического мониторинга лесовосстановительных процессов на территориях интенсивных лесозаготовок, используются, преимущественно, мультиспектральные снимки высокого пространственного разрешения (HRVIR/SPOT, ASTER/Terra, LISS-3/IRS и др.), и сверхвысокого пространственного разрешения (QuickBird и др.). В таблице 1 приведен перечень основных объектов, характеризующих восстановительную динамику лесов на разных стадиях, и дана оценка достоверности их распознавания по материалам аэрокосмических съемок различного пространственного разрешения.

Таблица 1. Перечень объектов, распознаваемых на аэрокосмических снимках и используемых для характеристики восстановительной динамики лесов на разных стадиях

Категории земель, классы объектов и их характеристики	Способы оценки и ошибки определения характеристик лесов (при достоверности 0,68)				
	Наземные работы	Аэроснимки R<1м	Космические снимки R≤2 м	Космические снимки R=4-15 м	Космические снимки R=20-40 м
Покрытые лесом земли, %	Точно	+5	+7	+10	+20
Земли, не покрытые лесной растительностью:					
Несомкнувшиеся лесные культуры, %	Точно	±30	+50	Не распознаются	
Редины, %	+ 20	+ 30	+ 30	+40	+ 50
Вырубки, %	Точно	+10	+10	+20	+30
Гари, %	Точно	Точно	+10	+20	+30
Ветровал, %	Точно	Точно	+10	+20	+20
Прогалины, %	Точно	+30	+30	+50	+50
Нелесные земли:					
Болота, %	Точно	+ 10	+10	+ 20	+ 30
Мари, тундры, %	Точно	+ 10	+10	+20	+30
Сенокосы, %	Точно	+20	+20	+50	+50
Биометрические параметры					
Состав насаждений, единицы	+1	+1-3	+1-3	Определяются группы пород	
Группы насаждений (хвойные, лиственные, смешанные), %	Точно	Точно	+10	+10-20	+30
Группа возраста	Точно	+1	+1-2	+1-2	Приближенно
Сухостойные деревья (куртины), %	Точно	±10-13	+13-15	Не определяется	
Встречаемость крупного подроста, семенных деревьев, %	Точно	±15	±20	Не определяется	
"Окна" в верхнем пологе древостоя, %	Точно	±10	±10	Не определяется	

Успешность применения данных дистанционных съемок зависит от оптимального решения триединой задачи, включающей достоверное обнаружение, опознание объектов наблюдений на космическом изображении и интерпретацию полученных результатов с учетом современных научных представлений об этапах восстановительной динамики лесов. Среди перечисленных задач наиболее сложной представляется интерпретация результатов обработки изображений, так как это требует профессиональной подготовки специалистов, а также привлечения дополнительной атрибутивной информации лесоустройства, цифровых моделей рельефа, данных дистанционного мониторинга организации и состояния лесопользования и др.

Исходные материалы и методика исследований

Изучение процессов лесовосстановления с помощью материалов космической съемки проведено на территории Варзенгского лесничества Костромской области, которая представляет собой с середины XX века участок интенсивных промышленных лесозаготовок. Территория лесничества, площадью около 45,5 тыс. га, относится к южно-таежному округу с преобладанием ельников северных увалов. Помимо ели, занимающей доминирующее положение, в хвойную группу лесообразующих пород входят также пихта и сосна. Из лиственных пород произрастают береза, осина, ольха серая, липа, различные виды ив. Экологиче-

ский ряд ельников представлен преимущественно зеленомошными и травяно-болотными группами типов леса. Древостои зеленомошной группы типов леса, занимая наибольшую площадь и отличаясь наиболее высокой производительностью, отводились в первоочередную рубку в течение всей второй половины прошлого века и в настоящее время представлены производными мелколиственными лесами и лесными культурами [2].

Индикаторами восстановительной динамики являются различные признаки лесных экосистем, которые с определенной достоверностью указывают на изменения во времени породного состава, возрастной структуры и морфологии лесного покрова. Для их изучения разработана методика систематизации признаков восстановительной динамики лесов, которая позволяет формировать так называемые эколого-динамические ряды (ЭДР), исходя из принадлежности лесных экосистем к однородным и характерным условиям местопроизрастания. Системы показателей эколого-динамических рядов позволяют изучать особенности породно-возрастной структуры послерубочных экосистем при помощи статистического анализа и могут включать таксационные данные лесоустройства (среди которых основными являются значения доли участия лиственных или хвойных пород, возраста насаждений и давности мест рубок), характеристики спектральной яркости изображения, различные показатели рельефа и др.

В качестве съемочных материалов для исследования использованы мультиспектральные космические снимки высокого пространственного разрешения ASTER/Terra 2001 года и HRVIR/SPOT-4 2008 года, полученные в период вегетации. Космический снимок ASTER, ввиду большого процента облачности сцены, позволяет получить спектральные характеристики лишь для части территории Варзенгского лесничества, поэтому применен для автоматического дешифрирования с целью предварительной оценки вероятностей распознавания спектральных классов. Космический снимок SPOT-4 использован для расчета интегральных спектральных показателей эколого-динамических рядов послерубочных лесных экосистем на всей территории Варзенгского лесничества.

Таксационная база Варзенгского лесничества (1997 г.) актуализирована для космических съемок 2001г. (ASTER) и 2008 г. (SPOT-4), т.е. новые вырубки, появившиеся за период, прошедший с года лесоустройства до года съемки, оцифрованы и внесены в таксационную базу с новыми идентификаторами и указанием возраста вырубки, а возраст насаждений увеличен на соответствующий временной интервал.

На территорию Варзенгского лесничества создана цифровая модель рельефа (ЦМР) на основе векторных слоев горизонталей рельефа и гидрографии топографической карты масштаба 1:200000. Размер ячейки растра ЦМР соответствует размеру пикселя снимка SPOT-4. Точность интерполяции значений высоты поверхности составляет 10 м и соответствует точности заложения горизонталей на карте данного масштаба. На основе ЦМР рассчитаны поверхности углов наклона (крутизны) и экспозиции склонов в градусах.

В границах таксационных выделов актуализированной базы данных по космическому снимку SPOT-4 и ЦМР рассчитан набор спектральных и орографических характеристик при помощи пакетов ENVI и ScanEx Image Processor. Спектральные показатели для каждого выдела включают в себя количество пикселов снимка, попавших в границы выдела, минимальное, максимальное и среднее значения яркости и стандартное отклонение в каждой зоне (зеленая-G, красная-R, ближняя инфракрасная-NIR и средняя инфракрасная-SWIR). Показатели рельефа (орографические) – минимальное, максимальное, среднее значения и стандартное отклонение для высоты над уровнем моря (ВНУМ) и крутизны склонов, сред-

нее значение для экспозиции склонов. Все полученные показатели подсоединены к таксономической базе по уникальному идентификатору выдела.

Кластеризация снимка ASTER

В качестве метода предварительного компьютерного дешифрирования снимка ASTER выбран способ неконтролируемой классификации без обучения – кластеризация алгоритмом ISODATA. Автоматическая классификации снимка проведена в пяти вариантах с разным количеством выделяемых кластеров. Для тематической интерпретации полученных спектральных классов (кластеров) использованы таксационные данные 950 выделов. По тестовым участкам, которые составили таксационные выделы, представляющие разные стадии развития лесной экосистемы и имеющие значительную площадь, была составлена схема объединения спектральных классов (кластеров) в выбранные тематические классы на основе однозначного соответствия группировки кластеров внутри границ выделов. Оценка достоверности тематической интерпретации кластеров проводилась на основе выборки в количестве 20-50 выделов (площадь каждого из которых более 10 га) из таксационной базы данных для каждого класса. В границах выделов рассчитывалось долевое соотношение площадей тематических классов в процентах и, если класс занимал более 70% площади выдела с соответствующими таксационными характеристиками, распознавание считалось достоверным [3].

При тематической интерпретации результатов автоматического дешифрирования выделены следующие классы:

- 1) свежие вырубки без возобновления (1-3 года) - достоверность распознавания 96%;
- 2) места бывших вырубок с лиственным возобновлением или лиственными молодняками 3-10 лет – достоверность распознавания 90%;
- 3) места бывших вырубок с лиственными и смешанными хвойно-лиственными молодняками 15-25 лет – достоверность распознавания 70%;
- 4) места бывших вырубок с хвойно-лиственными молодняками и с лиственными насаждениями 30-45 лет – достоверность распознавания 62%;
- 5) хвойные (еловые) насаждения возраста 70 лет и более - достоверность распознавания 93% .

Таким образом, предварительная кластеризация космического снимка дает возможность достоверного распознавания некоторых обобщенных классов породно-возрастной структуры послерубочной лесной экосистемы. Результаты эксперимента приводят к выводу, что для системной оценки информативности дистанционных данных в целях лесовосстановления, целесообразно построение эколого-динамических рядов лесных экосистем, охватывающих значительный временной интервал от начальной стадии лесовозобновления до климаксовых насаждений.

Формирование эколого-динамических рядов послерубочных лесных экосистем

На основе статистических выборок по определенным условиям из актуализированной и дополненной таксационной базы Варзенгского лесничества сформированы эколого-динамические ряды (ЭДР). Исходным положением при создании статистических выборок является представление о том, что принадлежность к однородным стратам групп типов леса или типов условий местопроизрастания определяет одинаковый ход развития лесных экосистем и

позволяет дать вероятностную оценку степени проявления и характера сукцессионных изменений лесного покрова и сопряженных с ним изобразительных свойств космических снимков.

В один тип лесорастительных условий обычно объединяется серия коренных и производных типов леса (групп типов леса). В результате многолетних исследований в таежной зоне европейской части России все многообразие типов леса рекомендовано объединять в несколько групп со сходной тенденцией лесовосстановления [1]. Процесс лесо-возобновления на лесных землях после рубок проходит либо без смены пород (восстановление таежных лесов с преобладанием коренных хвойных пород), либо – со сменой преобладающих древесных пород. В ряде случаев из-за разрушающих воздействий факторов среды происходит замещение одних лесных экосистем экосистемами других типов (заболачивание мест рубок, образование лугов, возникновение на месте древостоев пустырей после многократного прохождения лесных пожаров и др.). Исходя из существующей ре-генерационной концепции вторичных сукцессий реакция растительности на скачкообразное нарушение лесного покрова, сводится при отсутствии хозяйственного воздействия к постепенному ее возвращению к состоянию, наиболее характерному для данных условий местопроизрастания [4]. Иными словами предполагается, что, например, непосредственно после рубки начинается процесс восстановления древесного полога, внешнее проявление которого обнаруживается не сразу, а через определенный период времени, в течение которого происходит формирование древостоя в конкурентной борьбе с другими видами растительности. Хотя лесообразовательный процесс продолжается в течение всей жизни леса, его направление определяется, в основном, начальной фазой лесовозобновления. Поэтому для ускорения роста на вырубках новой генерации лесов в ряде случаев применяются меры содействия естественному лесовозобновлению, к которым относятся минерализация почвы и сохранение при рубке имеющегося под пологом леса хвойного подроста.

Для территории Варзенгского лесничества составлена карта с подразделением земель лесного фонда по тенденциям лесообразовательного процесса в зависимости от принадлежности их к группам типов леса с указанием естественного или искусственного происхождения насаждений и коренных или производных преобладающих пород насаждений (рис. 1). Назначение подобных карт состоит в прогнозной оценке тенденции лесовозобновления и выявление закономерностей формирования коренных или производных лесов после сплошных рубок, ветровалов, пожаров и др.

При формировании ЭДР применен метод построения естественных рядов насаждений путем создания совокупностей однородных по биологическим и экологическим признакам насаждений, характеризующихся одинаковым ходом роста и развития, но различающихся возрастами. Объединение коренных и производных насаждений одного типа местообитания в один динамический ряд позволяет рассматривать эту совокупность как одну лесную экосистему, находящуюся в разной стадии развития.

Площадь 1595 выделов, образовавших эколого-динамический ряд из мест рубок разной давности и насаждений зеленомошной группы типов леса (временной интервал 3-180 лет), составила более 30,9 тыс. га (средняя площадь выдела 19,9 га). Площадь 170 выделов, образовавших эколого-динамический ряд из насаждений травяно-болотной группы типов леса (временной интервал 10-200 лет), составила почти 1,4 тыс. га (средняя площадь выдела 8,2 га). ЭДР зеленомошной группы типов леса для выявления связи таксационных и спектральных показателей был разбит на несколько стратифицированных выборок по ряду условий: возрастные градации насаждений и давность мест рубок, естественные и искусственные насаждения, доля участия лиственных пород в насаждениях.

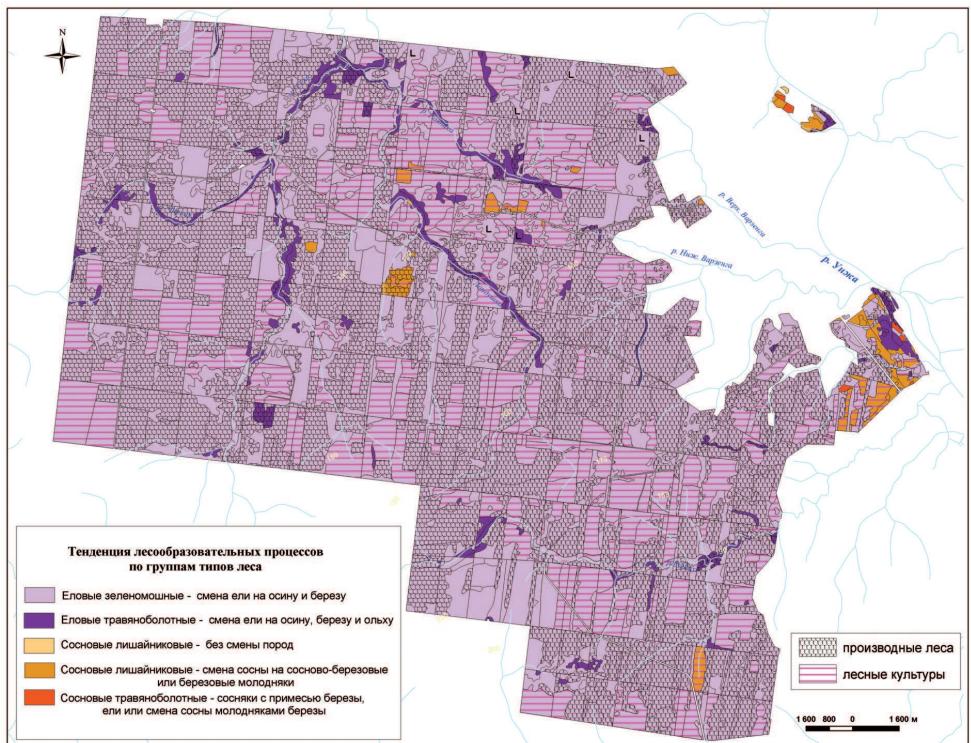


Рис. 1. Тенденции лесообразовательных процессов для групп типов леса южной подзоны тайги

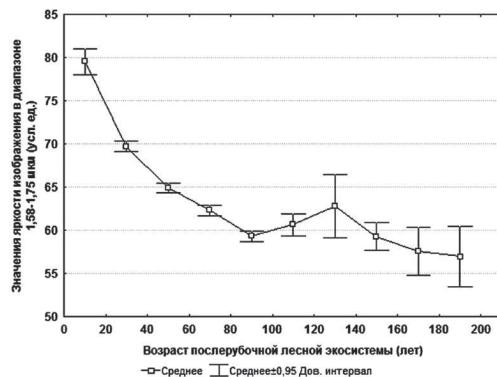
Результаты статистического анализа ЭДР

Для нелинейной оценки связи возраста (A) послерубочного 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 пакета программ 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: $NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_R) / (\rho_{NIR} + \rho_R)$; $SR = \rho_{NIR} / \rho_R$; $MSI = \rho_{SWIR} / \rho_{NIR}$; $Green\ NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_G) / (\rho_{NIR} + \rho_R)$; $MSI = \rho_{SWIR} / \rho_{NIR}$; $NDII = (\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}) / (\rho_{NIR} + \rho_{SWIR})$

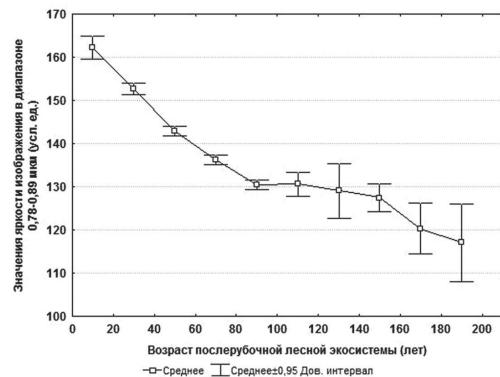
При обработке статистических выборок наибольшие показатели тесноты связи возраста послерубочного лесной экосистемы и значений яркости изображения (индексов зо-нальных отношений) были достигнуты при решении функций вида $A = f(\rho_G, \rho_R, \rho_{NIR}, \rho_{SWIR})$, $A = f(NDVI, SR, Green\ NDVI, MSI, NDII)$ и составили 0,862 - 0,933. Для сравнения точности определения возраста лесных культур и естественных насаждений аналогичного возраста использовалась функция вида $A = f(\rho_G, \rho_R, \rho_{NIR}, \rho_{SWIR}, NDVI, SR, Green\ NDVI, MSI, NDII)$. Функция вида $L = f(\rho_G, \rho_R, \rho_{NIR}, \rho_{SWIR})$ наилучшим образом описывала нелинейную связь доли лиственных пород насаждений зеленоношной и травяно-болотной групп типов леса с показателями спектральной яркости изображения космического снимка (теснота связи 0,906-0,925).

Статистический анализ ЭДР (1595 выделов) позволил выявить связь возрастных изменений экосистемы и спектральной яркости соответствующих участков снимка. Во всех спектральных зонах с увеличением возраста 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% (рис. 2). Наиболее заметно яркость изображения снижается в течение первых 50-80 лет, затем наблюдается плавное уменьшение значений яркости и возрастание их дисперсии. Изменение яркости связано в основном с динамикой полноты и доли участия лиственных пород в лесном пологе насаждений разного возраста.



а



б

Рис. 2. График зависимости средних значений яркости снимка SPOT-4 от возраста лесной экосистемы:
а) в зоне NIR, б) в зоне SWIR

Для практических целей представляют интерес результаты дешифрирования (предсказания) породно-возрастной структуры (возраст и соотношение лиственных и хвойных пород) лесной экосистемы разной стадии развития при заданных величинах ошибок и значений вероятности этих ошибок. Обычно при наземной таксации лесов минимальный порог вероятности глазомерного определения показателей принимается 68%.

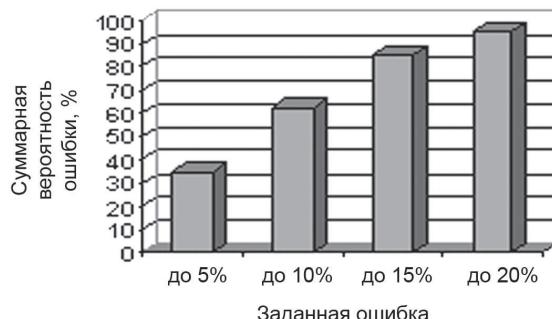
Суммарная вероятность ошибки дешифрирования возраста лесной экосистемы со-ставила при заданной ошибке до ± 5 лет: в интервале от 3 до 60 лет(1) – 0,66, от 60 до 100 лет (2) – 0,68, от 100 до 180 лет (3) – 0,44 и для всего временного ряда от 3 до 180 лет - 0,32. При заданной ошибке до ± 10 лет суммарная вероятность ошибки дешифрирования возраста составила для временной выборки 1 – 0,97, 2 – 0,98, 3 – 0,74, для всего временно-го ряда – 0,59. При заданной ошибке до ± 20 лет суммарная вероятность ошибки дешифрирования возраста составила для временной выборки 1 – 1,0, 2 – 1,0, 3 – 0,96, для всего временного ряда – 0,89 (рис. 3 а.).

Вероятность определения по космическому снимку возраста послерубочных насаждений



а

Вероятность определения по космическому снимку доли лиственных пород в послерубочных насаждениях



б

Рис. 3. Суммарные вероятности ошибок определения по космическому снимку SPOT-4:
а) возраста лесной экосистемы, б) лиственных пород

Суммарная вероятность ошибки определения по космическому снимку доли лиственных пород при заданной ошибке до $\pm 10\%$ составила для насаждений зеленомошной группы типов леса 0,62, травяно-болотной группы – 0,65. При заданной ошибке до $\pm 15\%$ суммарная вероятность ошибки составила для насаждений зеленомошной группы типов леса 0,85, травяно-болотной группы – 0,86 (рис.3б).

Для оценки связи возраста (A) лесной экосистемы и доли участия лиственных пород (L) в составе насаждений зеленомошной и травяно-болотной групп типов леса с характеристиками ЦМР использовались методы стандартной статистики. Гистограммы средних значений ВНУМ находятся в пределах от 100 до 220 м, однако для разных групп типов леса характерно различие максимумов гистограмм относительно друг друга, т.е. большинство выделов зеленомошной группы типов леса расположены выше выделов травяно-болотной группы в среднем на 25 м (рис.4). Гистограммы распределения средних значений экспозиции и крутизны склонов практически одинаковы для двух групп типов леса: большинство насаждений произрастает на склонах северной и северо-восточной экспозиции крутизной не более 2,5 град. Коэффициенты корреляции между параметрами A, L и показателями ЦМР для обоих групп типов леса весьма незначительны и составляют 0,05-0,2. Таким образом, для оценки лесовосстановительной динамики лесов на равнинных территориях показатели рельефа сами по себе являются малоинформационными и могут быть использованы только в качестве дополнительных данных при анализе космических снимков.

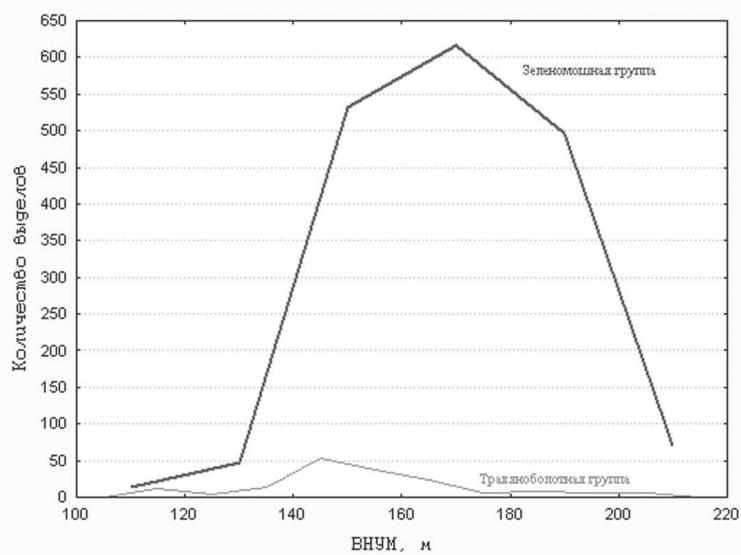


Рис. 4. Гистограммы средних значений ВНУМ для зеленомошной и травянистоболотной групп типов леса

Заключение

Исследования тесноты связи породно-возрастной структуры послерубочной лесной экосистемы, насаждений, лесных культур с изобразительными свойствами космического снимка на основе интегральных статистических характеристик таксационных выделов в лесоводстве сравнительно немногочисленны. Статистически обоснованные количественные показатели тесноты связи таксационных, спектральных и орографических характеристик дополняют базу научных знаний в целях оценки процесса лесовосстановления по дан-

ным космической съемки. Результаты статистического анализа эколого-динамических рядов мест рубок разной давности и насаждений разных групп типов леса имеют методическое значение для сравнения информативности разных съемочных материалов при одинаковых заданных ошибках дешифрирования и возможности создания на их основе наборов обучающих выборок для классификации.

Таким образом, основная роль дистанционных методов при оценке восстановительной динамики лесов заключается в индикации породно-возрастной структуры после-рубочных экосистем на всем протяжении лесообразовательного процесса. Помимо этого материалы космических съемок различного пространственного разрешения могут быть использованы при решении других практических вопросов лесоводства.

Литература

1. *Данюлис Е.П., Жирин В.М., Сухих В.И., Эльман Р.И.* Дистанционное зондирование в лесном хозяйстве. М.: Агропромиздат. 1989, 223 с.
2. *Жирин В.М., Князева С.В.* «Изменение лесного покрова после интенсивных лесозаготовок в южной тайге Русской равнины // Лесоведение, 2010, №6, с.3-11.
3. *Князева С.В.* Информативные возможности космических снимков высокого разрешения ASTER для изучения лесовосстановления на территориях интенсивных лесозаготовок // Сб. статей «Современное состояние и перспективы применения ГИС-технологий и аэрокосмических методов в лесном хозяйстве и садово-парковом строительстве. Особенности преподавания данных дисциплин в высших и средних учебных заведениях», Йошкар-Ола, МарГТУ, 2008, с. 28-33.
4. *Мордкович В.Г.* Очерк сукцессионных проблем // Изв. СО АН СССР. Сер. биол. 1988. Вып. 1. № 6. С. 13-23.

Application of space images for reforestation dynamics evaluating on the plane territories

V. Zhirin, S. Knyazeva, S. Eydlina

*Centre of forest ecology and productivity problems RAS (CEPL RAS), Moscow
117997 Moscow, 84/32 Profsoyuznaya str.
E-mails: vmzh@smtp.ru;*

The article deals with methodological approaches of using remote sensing data for reforestation by identifying relations of reforestation dynamics signs and visual remote materials properties.

An analysis of the relationship and their practical application is seen as one way to monitor large-scale processes in the boreal forests and forest ecosystems dynamics research.

Keywords: reforestation, after-logging forest ecosystems, remote sensing data, group of forest types, multispectral space image, digital elevation model, statistical analysis