

ОРИГИНАЛЬНЫЕ
СТАТЬИ

УДК 630*58/64

**ЭКОЛОГО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ЛЕСООБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО КОСМИЧЕСКИМ
СНИМКАМ**

© 2013г. В. М. Жирин, С. В. Князева, С. П. Эйдлина

Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН

117799 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

E-mail: vmzh@smtp.ru

Поступила в редакцию 09.01.2013 г.

Рассмотрены вопросы методологии исследования лесообразовательного процесса на основе сочетания биометрических параметров лесных экосистем, представленных в виде эколого-динамических рядов данных лесоустройства, дополненных характеристиками изобразительных свойств космических снимков и условий рельефа местности. Результаты исследования показаны на примере двух модельных лесных массивов – зеленомошных ельников севера Костромской области и лиственничников Магаданской области. При помощи методов статистического анализа получены количественные оценки нелинейной связи возраста и процента участия лиственных пород в составе насаждений со спектральными характеристиками космических снимков.

Лесные экосистемы, лесные массивы, лесообразовательный процесс, породно-возрастная структура, стратификация лесных земель, эколого-динамические ряды, многозональный космический снимок, спектральные характеристики, морфометрические показатели рельефа.

В лесном фонде нередко крупномасштабные изменения под воздействием природных и антропогенных факторов среды. Среди них наиболее распространены последствия сплошных рубок леса и природных пожаров. Немало также таежных лесов, пострадавших от ураганных ветров, массового размножения вредителей и болезней леса, техногенных выбросов, подтопления и т.п.

Для того чтобы иметь представление о трансформации лесов из природных лесных экосистем в нарушенные, необходимо упомянуть важные отечественные работы последних лет, посвященные этой проблеме [7, 9]. По мнению авторитетных исследователей, на рубеже XXI в. лесной покров России почти повсеместно претерпел глубокие деструктивные изменения [14, 17]. Слежение за восстановлением нарушенных таежных лесов и их качеством – актуальная задача современного лесоведения и лесоводства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Лесообразовательный процесс (лесообразование) рассматривается как совокупность явлений возникновения, развития, разрушения и смены

лесных насаждений в пределах одного типа лесорастительных условий. Из этого следует, что к одному типу или группе типов леса относятся не только не покрытые лесной растительностью земли в стадии зарастания и лесовосстановления, но и, помимо коренного, множество типов производных лесных биогеоценозов, отличающихся по породному составу древостоев, возрасту, генезису, сукцессионной динамике и т.д. [12]. Иными словами, индикаторами лесообразования являются различные признаки лесных экосистем, указывающие на изменение во времени их состава и структуры, которые с определенной достоверностью распознаются также на космических снимках, покрывающих значительные территории лесного фонда.

Хотя для каждого биогеоценоза может быть определено большое число разных признаков, наиболее важна оценка динамики породно-возрастной структуры лесных экосистем и сомкнутости полога (полноты) древостоев, которые доступны для измерения как в наземных условиях, так и по материалам космической съемки.

Эколого-динамическое исследование лесообразовательного процесса нарушенных лесных

массивов предусматривает совместную обработку космических изображений, характеристик условий рельефа местности и большого объема таксационных данных лесоустройства (лесоинвентаризации), несмотря на критические замечания авторитетных исследователей по поводу их содержания [16]. Результаты многолетних исследовательских работ в этой области создают предпосылки для разработки методологии изучения лесообразовательного процесса в бореальных лесах по космическим снимкам, включающей выполнение следующих целевых этапов:

- выбор типичных лесных массивов в качестве модельных территорий, объединяющих нарушенные и ненарушенные лесные экосистемы различной сукцессионной динамики;

- стратификация лесных массивов по типам лесорастительных условий (типам или группам типов леса, типам условий местопрорастания), по данным лесоустройства (лесоинвентаризации), их актуализация с помощью космических снимков;

- перегруппировка таксационных выделов лесоустройства в единые биогеоценозы всего возрастного спектра и формирование системы эколого-динамических рядов (ЭДР), характеризующих динамику породно-возрастной структуры лесных экосистем с учетом взаимосвязей таксационных показателей, морфометрических показателей рельефа и изобразительных свойств космических снимков;

- анализ информативности материалов дистанционных съемок при помощи статистической обработки ЭДР и создание обучающих выборок для автоматизированного дешифрирования космических снимков;

- классификация разновременных многозональных (мультиспектральных) космических снимков и оценка динамики породно-возрастной структуры лесных экосистем картографическими методами.

Лесные массивы – оптимальные для изучения лесов модельные территории. К ним относятся различные лесные (вырубки, погибшие насаждения и гари разной давности, редины, насаждения естественного и искусственного происхождения) и нелесные земли, ограниченные естественными или условными границами, устанавливаемыми в зависимости от экологического, экономического или социального назначения лесов. Кроме того, лесные массивы, занимающие значительные территории, позволяют исследовать ландшафтные и региональные особенности условий местопрорастания лесов при помощи цифровой модели рельефа (ЦМР).

израстания лесов при помощи цифровой модели рельефа (ЦМР). Важность использования ЦМР обусловлена ролью рельефа в формировании условий освещенности, увлажнения и температурного режима лесного ландшафта. При помощи ЦМР можно оценить влияние таких показателей рельефа территории, как высота над уровнем моря, крутизна и экспозиция склонов, на формирование пространственных особенностей (закономерностей) породно-возрастной структуры лесного массива и спектральные характеристики космического снимка. Для создания ЦМР возможно использовать как стереопары аэрокосмических снимков, так и топографические данные.

Стратификация – важный этап исследования, поскольку при этом выявляются региональные тенденции лесообразования, а построение ЭДР¹ основано на распространенном представлении о том, что принадлежность лесов к однородным типам лесорастительных условий определяет одинаковый ход восстановления лесных экосистем от стадии зарастания нарушенных лесных земель и формирования молодняков до старовозрастных насаждений [10, 11]. На этапе стратификации лесных массивов проводится статистический анализ таксационных данных по различным биометрическим параметрам насаждений, так как он дает возможность оценить репрезентативность и надежность лесоустроительной информации. Например, детальный анализ процентного распределения площади насаждений с участием групп хвойных и лиственных пород деревьев позволил выявить завышение доли хвойных пород в составе при таксации молодняков лесных культур на местах бывших рубок [1, 18]. Материалы лесоустройства целесообразно использовать в качестве одного из источников данных при составлении тематических карт (типов леса, типов лесорастительных условий, коренных и производных лесов, состава и влажности почв и др.), характеризующих тенденции лесообразовательного процесса и закономерности формирования коренных или производных древостоев в нарушенных лесах.

Многочисленные исследования информативности материалов дистанционных съемок указывают на наличие сопряженности между изобразительными свойствами космических снимков и динамическим состоянием лесного покрова нарушенных экосистем. Иными словами, дешифрирование показателей породно-возрастной структуры нарушенных лесных экосистем основано

¹ ЭДР формируются в виде таблиц, столбцы которых содержат показатели, а каждая строка относится к одному лесному участку (таксационному выделу).

на использовании статистических связей между характеристиками космического изображения (признаками) и таксационными показателями насаждений. С этой целью в состав стратифицированных ЭДР включаются как биометрические параметры лесных экосистем, так и признаки космических изображений (спектральные, структурные, текстурные), дополненные, при необходимости, морфометрическими характеристиками рельефа. Расчет спектральных и морфометрических показателей для формирования ЭДР производится в границах таксационных выделов базы данных модельной территории по многозональным космическим снимкам, ЦМР и поверхностям крутизны и экспозиции склонов программными средствами геоинформационной системы (ГИС). Спектральные показатели для каждого выдела включают в себя число пикселей снимка, попавших в границы выдела, минимальное, максимальное и среднее значения яркости и дисперсию в каждом зональном изображении, показатели рельефа – минимальное, максимальное, среднее значение и дисперсия для высоты над уровнем моря и крутизны склонов, усредненное значение для экспозиции склонов. Все полученные показатели объединяются в одну запись (строку) по уникальному идентификатору выдела.

Первоначально ЭДР формировались в виде электронных таблиц. С увеличением числа модельных территорий, а также различных видов съемок и объемов обрабатываемой информации возникает необходимость создания базы данных (БД). Вполне очевидно, что при большом объеме данных оптимален выбор многопользовательской системы управления базами данных (СУБД), построенной с использованием архитектуры “клиент/сервер”. Такая СУБД позволяет пользователям через сетевой доступ вносить новые, дополнять и редактировать имеющиеся данные, формировать выборки и конвертировать их в пользовательские форматы для статистической обработки и картографического представления ЭДР.

Предполагается, что в основе структуры БД будут таблицы, содержащие основные характеристики таксации (инвентаризации), космической съемки, цифровой модели рельефа, связь между которыми организуется при помощи уникального идентификатора. К обязательным атрибутам БД относятся нормативно-справочная информация, раскрывающая содержание таблиц, оригинальных экспертных данных, необходимых для исследования процесса лесообразования. Формирование выборок и конвертирование данных в форматы для последующего статистического анализа ЭДР и картографического представления в

программных пакетах ГИС организуется при помощи структурированного языка запросов (SQL-запросов).

При широком использовании космических снимков высокого и сверхвысокого разрешения в практике лесного дешифрирования вновь возрастает интерес к изучению особенностей морфологии лесного полога и ее влияния на изобразительные свойства космических изображений. В любом насаждении у деревьев имеются кроны, различные по форме, величине и густоте, неодинаково расположенные относительно друг друга, при неоднородной вертикальной и горизонтальной сомкнутости полога насаждений. Эти особенности морфологии насаждений и морфоструктуры лесного полога зависят от наличия в пологе разновысотных ярусов древостоев или различных возрастных поколений и возрастной трансформации крон деревьев разных пород.

Сложная геометрия полога лесных насаждений и неравномерный характер распределения светотеней в сочетании с относительным положением Солнца в момент съемки влияет на интегральную яркость пикселей изображения. В молодняках нет большой дифференциации деревьев по высоте, размеры крон незначительны, их формы имеют выраженную точку роста, вследствие чего формируется ровный и слитный древесный полог, который отличается малым участием теней и, соответственно, повышенной отражательной способностью. В средне- и старовозрастных насаждениях структура лесного полога меняется в результате большего участия в нем деревьев различных пород или поколений разной высоты, проявления возрастных изменений размеров и форм крон деревьев, изреживания полога и увеличения затененных промежутков между кронами [2, 13, 15].

Общая освещенность земной поверхности в момент съемки складывается из освещенности прямыми солнечными лучами и рассеянным светом. При высоком стоянии Солнца и безоблачном небе преобладает доля прямого солнечного излучения в уровне освещенности земной поверхности, из-за чего возрастает чернота теней, что также влияет на изобразительные свойства космических снимков. В гористой или холмистой местности контрастность рельефа может также влиять на освещенность местности и, соответственно, на яркость пикселей изображения склонов различной ориентации по отношению к Солнцу в момент космической съемки. Экспериментально установлено, что высота Солнца над горизонтом при дистанционной съемке должна быть более 25°.

Лесоводственный анализ космических изображений земель лесного фонда обычно основан на использовании снимков, полученных при безоблачной атмосфере либо при наличии кучевой облачности, не превышающей 5% исследуемой площади. Показатель освещенности склонов в момент съемки вычисляется для каждой космической сцены по определенному алгоритму [6].

В состав ЭДР могут включаться как показатели морфоструктуры, так и значения освещенности склонов в момент съемки. Анализ статистических распределений этих показателей имеет практическое значение при обработке ЭДР, позволяя проводить группировку лесных участков с учетом однородности морфологии насаждений и одинаковой освещенности в момент космической съемки.

Основная цель совместной статистической обработки биометрических параметров, морфометрических показателей местности и спектральных характеристик изображения заключается в определении количественных показателей тесноты связи между ними и формировании на их основе достоверных обучающих выборок для классификации космических снимков, что позволит повысить правильность дешифрирования породно-возрастной структуры лесных экосистем.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящее время многие лесные районы могут быть обеспечены архивными космическими снимками относительно высокого разрешения (типа *Landsat*) давностью до 20 и более лет. Это способствует вовлечению в научный оборот данных прошлых ревизий лесоустройства и практической реализации дистанционной оценки лесообразования в одних и тех же таежных лесных массивах на основе анализа разновременных материалов съемок.

Формат статьи не позволяет дать подробное описание целевых этапов эколого-динамического исследования лесообразовательного процесса. В связи с этим ограничимся иллюстрацией примеров, характеризующих изобразительные свойства космических снимков *ETM+/Landsat 7* и возможности оценки динамики породно-возрастной структуры послерубочных (зеленомошные ельники севера Костромской обл.) и послепожарных (лиственничники Магаданской обл.) лесных экосистем.

Изобразительные свойства космических снимков послерубочных насаждений. Известное в лесоводстве явление смены пород после рубки ель-

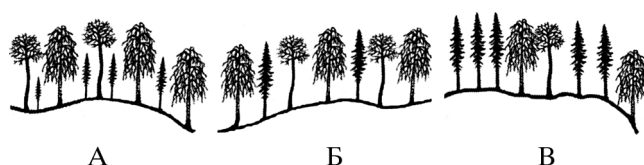


Рис. 1. Изменение участия ели в верхнем пологе насаждения в зависимости от возраста: А — 45–50 лет, Б — 65–70 лет, В — 80–90 лет

ников сложных типов леса, произрастающих в условиях слегка волнистой равнины, схематично показано на рис. 1. В таблице 1 приведены средние значения яркости² изображения одного из наиболее информативных каналов многозональной съемки³ с учетом изменения участия хвойных пород в верхнем пологе, фенологического состояния лиственных пород и высоты стояния Солнца в момент съемки.

Данные ЭДР показывают, что под кронами 45–50-летнего лиственного насаждения идет накопление ели, которая к 65–70 годам пробивается в первый ярус, а после 80–90 лет начинает доминировать в верхнем пологе (рис. 1). Отмечается снижение уровня яркости изображения с 83.8 до 73.6 усл. ед. (–12%), вычисленного в *NIR*-канале, который особо чувствителен к участию в пологе древостоев хвойных пород [3]. Последующее снижение значений яркости в начале и конце сентября связано с совместным влиянием сезонных изменений морфологии листопадных пород и условий космической съемки. Особенность солнечно-синхронной орбиты космического аппарата *Landsat* заключается в прохождении над одной и той же территорией примерно в одно и то же местное время [8]. Следовательно, осенью угол падения солнечных лучей на поверхность земли в момент съемки уменьшается только за счет сезонного изменения угла стояния Солнца над уровнем горизонта. Это приводит к увеличению доли падающих и собственных теней крон деревьев. Как видно из приведенных данных, в конце сентября яркость одних и тех же таксационных выделов составляет 56–63% в сравнении с июльскими значениями.

На распределение светотеней в пологе оказывает также влияние густота насаждений, опосредованным показателем которой может служить полнота древостоев, регистрируемая при таксации леса и включенная в состав ЭДР. Подразде-

² Яркость приведена в условных единицах в интервале от 0 до 255.

³ Используются зональные изображения ближнего инфракрасного (*NIR*) и среднего инфракрасного (*SWIR1*) диапазонов электромагнитного спектра.

Таблица 1. Изменение яркости верхнего полога разновозрастных еловых насаждений в зависимости от даты съемки и высоты Солнца β

Дата съемки	Высота Солнца β , градусы	Средняя яркость изображения в канале <i>NIR</i> различных по возрасту еловых насаждений		
		45–50 лет	65–70 лет	80–90 лет
8 июля	52.0°	83.8 (1.0)	78.2 (0.93)	73.6 (0.88)
6 сентября	36.6°	76.4 (0.91)	72.1 (0.86)	66.6 (0.79)
24 сентября	29.7°	52.8 (0.63)	50.2 (0.60)	47.1 (0.56)

Примечание. В скобках указана доля яркости в сравнении с июльским значением яркости листового насаждения соответствующего возраста.

лив насаждения на высоко-, средне- и низкополнотные, можно определить для каждой группы тенденции возрастной динамики яркости изображения в *NIR*-канале космической съемки, проведенной в июле (рис. 2). Из графиков, приведенных на рисунке, следует, что в лесном массиве высокополнотные насаждения не встречаются в возрасте старше 120 лет. В возрасте молодняков (до 20 лет) высокополнотные насаждения, имея слитный характер преимущественно листового полога, отличаются наибольшей отражательной способностью. Возрастная динамика яркости изображения высоко- и среднеполнотных насаждений практически совпадает. Яркость изображения полога низкополнотных насаждений в период с 20 до 140 лет превышает яркость полога древостоев других двух групп. В низкополнотных древостоях много освещенных участков, заросших, как правило, травянистой растительностью, обладающей высокой отражательной способностью, что сказывается на повышенной интегральной яркости многих пикселей изображений таксационных выделов.

Оценка связи породной структуры послерубочных насаждений зеленомошной группы типов леса с изобразительными свойствами космического снимка *ETM+/Landsat 7* проведена на примере 1250 выделов. Своеобразное распределение таксационных выделов с участием листовых пород в составе насаждений является результатом интенсивных рубок в ельниках и последующей смены пород (рис. 3). Для большинства выделов характерно преобладание листовых пород (береза, осина, ольха серая, липа и др.), оставшиеся выделы также относятся к смешанным листово-хвойным, реже хвойно-лиственным насаждениям. Чистые насаждения ели практически отсутствуют.

По мере сокращения среднего процента листовых пород и, соответственно, увеличения доли ели в составе насаждений происходит характер-

ное снижение яркости изображения, которое составляет для *NIR*-канала 26%, а для *SWIR1*-канала – 20% (рис. 4). Значения яркости изображения этих двух каналов использованы в качестве переменных при определении участия листовых пород на основе кусочно-линейной регрессии с помощью программного пакета *Statistica 6.1*. На рисунке 5 показана диаграмма рассеяния значений яркости изображения в *NIR* и *SWIR1*-каналах и аппроксимирующая кусочно-линейная функция *quasi-Newton*, вычисленная методом наименьших квадратов.

Представленный на рисунке 3 статистический ряд имеет двухмодальное распределение и распадается на две гистограммы. Эта особенность распределения учитывалась при расчете правильности определения процентного участия листовых пород в насаждениях зеленомошной группы типов леса на основе июльского космического снимка (табл. 2). Было образовано две выборки ЭДР: в одну из них вошли выделы послерубочных насаждений с участием листовых пород от 100 до 60%, в другую – насаждения с участием листовых пород от 60 до 0%, а также входящие в эти выборки июльские значения яркости в каналах *NIR* и *SWIR1*.

При производственной таксации лесов принимаются результаты, правильность которых подтверждается в 68% случаев. Этому условию отвечают результаты, полученные при определении процента листовых в составе пород при заданном отклонении $\pm 10\%$ (91 и 95%, соответственно).

Изобразительные свойства космических снимков послепожарных насаждений. Пожары на северо-востоке Сибири и на Дальнем Востоке – постоянно действующий фактор формирования листовых лесов, широко распространенных в отдаленных и труднодоступных районах. На этой территории лесного фонда материалы разновременной многозональной космической съемки

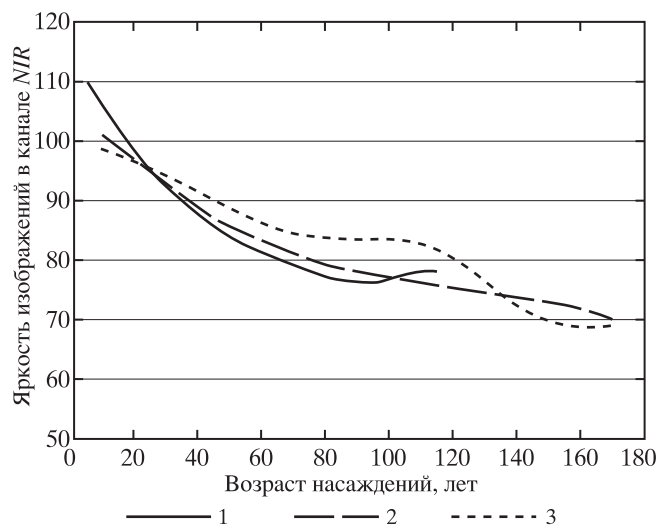


Рис. 2. Возрастная динамика яркости изображения в NIR-канале насаждений разных групп полноты: 1 – высокополнотные (0.8–1.0); 2 – среднеполнотные (0.6–0.7); 3 – низкополнотные (0.3–0.5)



Рис. 4. Связь яркости изображений в NIR (1) и SWIR1 (2) каналах с участием лиственных пород в составе насаждения

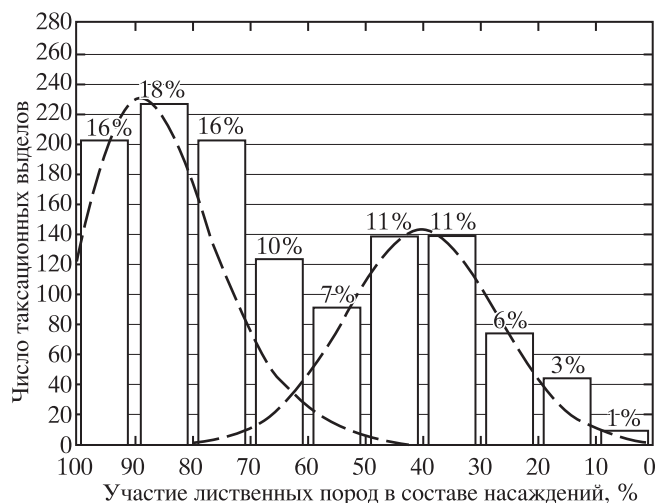


Рис. 3. Ряд распределения лиственных пород в составе послерубочных насаждений

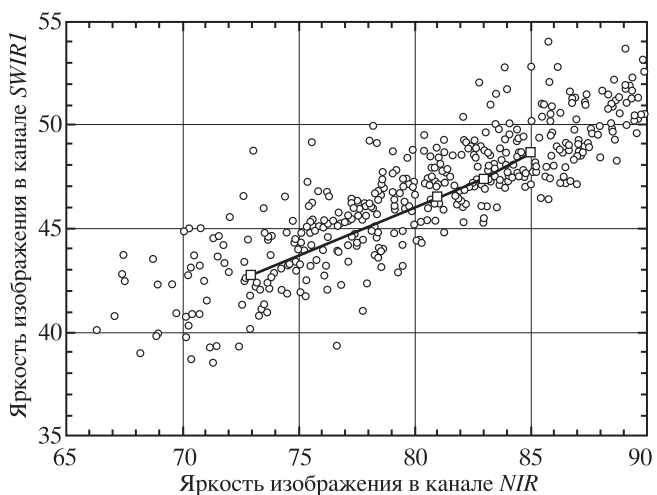


Рис. 5. Диаграмма рассеяния значений яркости изображения в NIR и SWIR1 каналах и аппроксимирующая кусочно-линейная функция

высокого разрешения оказываются одними из немногих источников информации о состоянии лесов, пострадавших от природных пожаров.

Исходя из регенерационной концепции вторичных сукцессий, после скачкообразных нарушений наблюдается постепенное возвращение лесной растительности к состоянию, наиболее характерному для данных условий местопроизрастания [10, 19]. Следуя этому принципу, был сформирован ЭДР, характеризующий послепожарное восстановление лиственных лесов разных типов леса на протяжении до 200 и более лет [4, 5].

В состав ЭДР вошли 245 таксационных выделов, для которых измерялись средневзвешенные значения яркости пикселей спектральных изображений, полученные аппаратурой *ETM+/Landsat 7* в летний период, а также приводились значения сроков давности гарей, возраст насаждений и естественных рединов лиственницы, относящихся к пирологически сходным типам леса, и другие таксационные показатели, установленные при фотостатистической лесоинвентаризации.

В северо-восточных редкостойных лесах деревья лиственницы имеют ажурную слабо развитую

Таблица 2. Правильность определения участия лиственных пород в насаждениях зеленомошной группы типов леса на основе июльского космического снимка *ETM+/Landsat 7*

Переменные кусочно-линейной регрессии	Статистические параметры выборок ЭДР			Результат определения процента лиственных пород в составе насаждения при заданном отклонении, %			
	объем выборки (число выделов)	коэффициент корреляции	доля дисперсии, объясненная моделью, %	до ± 5	до ± 10	до ± 15	до ± 20
<i>Насаждения с участием лиственных пород от 100 до 60%</i>							
Значения яркости в каналах <i>NIR</i> и <i>SWIR1</i>	817	0.860	73.9	$\frac{458}{0.56}$	$\frac{744}{0.91}$	$\frac{806}{0.99}$	$\frac{817}{1.0}$
<i>Насаждения с участием лиственных пород от 60 до 0%</i>							
Значения яркости в каналах <i>NIR</i> и <i>SWIR1</i>	433	0.840	70.6	$\frac{205}{0.47}$	$\frac{410}{0.95}$	$\frac{422}{0.97}$	$\frac{424}{0.98}$

Примечание. В таблицах 2 и 3 в числителе – число таксационных выделов с заданным отклонением, в знаменателе – доля от объема выборки.

крону. Под пологом леса, особенно в насаждениях низкого класса бонитета, мощно развит подлесок. Пожары способствуют однообразию лиственных лесов. Поэтому зачастую типы леса под влиянием прошедших палов утрачивают первоначальные различия.

Сходство морфологии древостоев и их изобразительных свойств на космическом снимке позволяет рассматривать последовательность послепожарной демутиации лесной экосистемы на основе возрастной динамики значений спектральной яркости (рис. 6). Как видно из графика, наиболее

наглядно ход восстановления и развития лесов лиственницы передается динамическими кривыми яркости в каналах *NIR* и *SWIR1*.

Начальная стадия с наименьшими значениями яркости изображения соответствует состоянию свежих пожарищ и распаду материнского полога древостоев. Последующее увеличение значений яркости связано с вымыванием продуктов горения, формированием древостоя в конкурентной борьбе с другими типами растительности. Видно, что пик отражательной способности зеленой растительности приходится на 25–40-летний период после прохождения пожара. В дальнейшем до 100 лет наблюдается снижение яркости космических изображений, что примерно совпадает с понижением полноты древостоев, и затем отмечается относительно стабильное состояние послепожарной лесной экосистемы (100–200 лет). Эти особенности динамики спектральной яркости изображения учитывались при расчете правильности определения продолжительности послепожарного периода с помощью кусочно-линейной регрессии (табл. 3).

Наибольшая достоверность регрессионного определения послепожарного периода лиственной экосистемы достигается при разбиении данных на две выборки – от 0 до 100 лет и старше 100 лет. Для участков лесной экосистемы, продолжительность послепожарного периода которых не превышает 100 лет, правильность его определения составляет 66% при заданном отклонении до ± 5 и 75% при отклонении до ± 10 лет. Правильность определения продолжительности послепожарного периода для участков лесной экосисте-

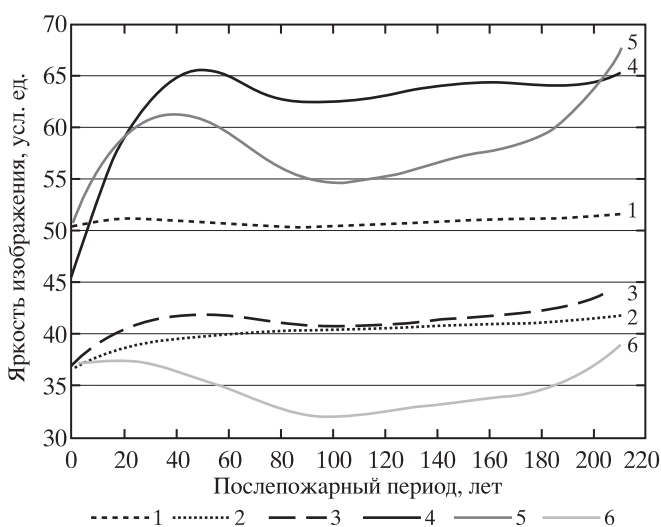


Рис. 6. Динамика значений спектральной яркости каналов *ETM+/Landsat 7* в послепожарный период восстановления лиственничников: 1 – *B*, 2 – *G*, 3 – *R*, 4 – *NIR*, 5 – *SWIR1*, 6 – *SWIR2*

Таблица 3. Правильность определения послепожарного периода с учетом динамики спектральной яркости летнего космического снимка *ETM+/Landsat 7*

Переменные кусочно-линейной регрессии	Статистические параметры выборок ЭДР			Результат определения процента листовых пород в составе насаждения при заданном отклонении, %			
	объем выборки (число выделов)	коэффициент корреляции	доля дисперсии, объясненная моделью, %	до ± 5	до ± 10	до ± 15	до ± 20
<i>Послепожарный период продолжительностью от 0 до 100 лет</i>							
Значения яркости в каналах <i>NIR</i> и <i>SWIR1</i>	123	0.880	77.4	$\frac{81}{0.66}$	$\frac{92}{0.75}$	$\frac{100}{0.81}$	$\frac{107}{0.87}$
<i>Послепожарный период продолжительностью более 100 лет</i>							
Значения яркости в каналах <i>NIR</i> и <i>SWIR1</i>	122	0.852	72.6	$\frac{11}{0.09}$	$\frac{68}{0.56}$	$\frac{105}{0.86}$	$\frac{15}{0.94}$

мы старше 100 лет существенно ниже – 9 и 56%, соответственно. И только при отклонении до ± 15 лет правильность определения продолжительности послепожарного периода достигает 86% случаев.

Классификация многозональных снимков. Рассчитанные с учетом заданных отклонений количественные оценки нелинейной связи возраста насаждений и процента участия листовых пород со спектральными характеристиками космических снимков могут быть использованы при создании обучающих эталонных выборок для дешифрирования. В качестве примера приведем вариант классификации многозонального космического снимка *HRVIR/SPOT-4* для послерубочных ельников севера Костромской области. Результаты статистического анализа эколого-динамических рядов послерубочных экосистем модельной территории, сформированных на основе таксационных и спектральных данных космического снимка, подробно описаны ранее [3].

Для проведения классификации с обучением выбран алгоритм на основе топографических отображений при помощи искусственных нейронных сетей Кохонена, реализованный в программном пакете обработки данных дистанционного зондирования *ScanEx Image Processor*. Основными достоинствами алгоритма являются возможность построения спектральной структуры снимка, которая отражает спектральные связи всех выделяемых классов, и интерактивность дешифрирования, позволяющая эксперту на любом этапе классификации определять граничные условия тематических классов и их число на изображении результатов классификации [20]. Для созда-

ния обучающих эталонов из базы таксационных данных были отобраны выделы, характеризующиеся минимальными заданными отклонениями дешифрирования по интегральному породно-возрастному показателю. Обучающие эталоны сначала выбрали по показателю «процент листовых пород в составе насаждений» с учетом минимальных заданных отклонений правильности дешифрирования $\pm 10\%$, а затем разделили на подклассы по возрастным грациям с учетом минимальных заданных отклонений ± 10 лет. В диапазоне соотношения хвойных и листовых пород обучающие выборки представлены 5 грациями (2 единицы состава или 20% листовых пород), а в возрастном диапазоне – девятью неравномерными грациями с увеличением интервала по мере увеличения возраста древостоев. В результате дешифрирования породно-возрастной структуры лесной экосистемы нейросетевым алгоритмом выделены 17 интегральных тематических классов, представленных в виде матрицы на рисунке 7.

Анализ достоверности тематических классов, проведенный по контрольным выборкам, показал, что только 9 обобщенных классов можно распознать с достоверностью более 60%. Объединенные классы на рис. 7 представлены одним условным знаком. Наиболее уверенно с достоверностью распознавания более 80% дешифрируются молодые листовые и листово-хвойные древостои (более 60% листовых пород в составе древостоев в возрасте до 40 лет) и хвойные старовозрастные древостои (менее 30% листовых пород в составе древостоев в возрасте старше 90 лет). Труднее всего распознаются смешанные на-

Возраст Состав	0–5	5–10	10–20	20–30	30–40	40–60	60–90	90–140	140–190
10Л									
8Л2Х									
6Л4Х									
4Л6Х									
2Л8Х									

Рис. 7. Легенда к карте-схеме дешифрирования породно-возрастной структуры лесов модельной территории Костромской обл.

саждения средних возрастов (процент лиственных пород в составе древостоя от 40 до 70%, возраст древостоя от 40 до 90 лет) – достоверность распознавания от 60 до 75%.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности использования при дешифрировании лесов комплексного интегрального подхода, учитывающего взаимную корреляцию породно-возрастных характеристик при определенных условиях лесообразовательного процесса. Большое значение в процессе классификации космического снимка имеет выявление достоверных спектральных признаков, характеризующих границы наиболее ярко выраженных переходов между породными и возрастными грациями древостоев, которые в большинстве случаев являются в природе нечеткими и постепенными.

Заключение. Исследование лесообразовательного процесса включает следующие целевые этапы: стратификацию земель лесных массивов, используемых в качестве модельных территорий; формирование на основе базы данных эколого-динамических рядов, характеризующих динамику породно-возрастной структуры лесных экосистем на протяжении от начала лесовосстановления до состояния старовозрастных насаждений на модельных территориях; анализ информативности материалов дистанционных съемок; оптимизацию статистической обработки больших массивов данных лесоустройства (лесоинвентаризации); создание обучающих выборок и классификацию многозональных космических снимков; разработку методов эколого-динамического картографирования породно-возрастной структуры лесных экосистем.

В результате статистического анализа эколого-динамических рядов послерубочных и послепожарных насаждений получены количественные

оценки нелинейной связи возраста и процента участия лиственных пород в составе насаждений со спектральными характеристиками космических снимков относительно высокого пространственного разрешения. Важной задачей в процессе статистического анализа является также поиск наиболее информативных комбинаций переменных величин регрессионных моделей с учетом особенностей лесорастительных условий модельных территорий.

Полученные показатели тесноты связи возраста древостоев и процента лиственных пород в составе насаждений послерубочных и послепожарных экосистем со спектральными характеристиками космических снимков имеют методическое значение для сравнения информативности одновременных съемочных материалов при одинаковых заданных отклонениях показателей дешифрирования. Результаты дешифрирования породно-возрастной структуры лесных экосистем могут служить основой для эколого-динамического картографирования лесов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Жирин В.М., Князева С.В.* Изменение лесного покрова после интенсивных лесозаготовок в южной тайге Русской равнины // Лесоведение. 2010. № 6. С. 3–11.
2. *Жирин 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.
3. *Жирин В.М., Князева С.В., Эйдлина С.П.* Дистанционное сопровождение лесообразовательного процесса в послерубочных таежных лесах Русской равнины // Лесоведение. 2011. № 6. С. 29–38.

4. *Жирин В.М., Сухих В.И., Шаталов А.В., Бутусов О.Б., Эйдлина С.П.* Использование космических снимков для изучения динамики зарастания гарей // Исследование Земли из космоса. 2004. № 5. С. 69–76.
5. *Жирин В.М., Эйдлина С.П., Князева С.В.* Анализ послепожарного восстановления лиственничников на основе космических снимков // Матер. V Всерос. конф. «Леса российского Дальнего Востока: Мониторинг динамики лесов российского Дальнего Востока». Владивосток: ЛАИНС, 2012. С. 71–75.
6. *Жирин В.М., Эльман Р.И., Агеев В.Н.* Результаты машинного определения запасов насаждений лиственницы по аэрофотоснимкам // Лесоустройство, таксация, аэрометоды. Сб. научных трудов. Л.: ЛенНИИЛХ, 1978. С. 128–132.
7. *Исаев А.С., Коровин Г.Н., Лукина Н.В., Сухих В.И., Еришов Д.В.* Катастрофические воздействия антропогенных и природных факторов на лесные экосистемы // 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 / Отв. ред. Г.А. Заварзин, В.Н. Кудеяров. М.: Изд-во ИФХ и БПП РАН, ИФЗ РАН, 2008. С. 66–79.
8. *Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В.* Аэрокосмические методы географических исследований: Учеб. для студ. высш. учеб. заведений. Изд. 2-е доп. и пер. М.: Академия, 2011. 416 с.
9. Мониторинг биологического разнообразия лесов России: методология и методы / Отв. ред. А.С. Исаев. М.: Наука, 2008. 453 с.
10. *Мордкович В.Г.* Очерк сукцессионных проблем // Изв. СО АН СССР. Сер. биол. Вып. 1. 1988. № 6. С. 13–23.
11. Рекомендации по выделению групп типов леса в таежной зоне европейской части РСФСР. М.: Изд-во ВНИИЛМ, 1979. 61 с.
12. *Рысин Л.П.* Прошлое и настоящее лесной типологии в России // Продукционный процесс и структура лесных биогеоценозов: теория и эксперимент (Памяти А.И. Уткина). М.: Товарищество научных изданий КМК, 2009. С. 161–183.
13. *Самойлович Г.Г.* Применение аэрофотосъемки и авиации в лесном хозяйстве. М.: Лесн. пром-сть, 1964. 486 с.
14. *Седых В.Н.* Как понимать лесообразовательный процесс // Лесная таксация и лесоустройство. 2009. № 1(41). С. 33–41.
15. *Сухих В.И., Жирин В.М., Зиелелис Т.А., Шаталов А.В.* Оценка информативности космических фотоснимков высокого разрешения для инвентаризации лесов // Исследования Земли из космоса. 1996. № 2. С. 45–56.
16. *Сухих В.И., Уткин А.И.* Информационно-инвентаризационные проблемы лесного фонда России в связи с экологизацией лесного хозяйства // Лесоведение. 2003. № 1. С. 3–15.
17. *Уткин А.И.* «Лесообразовательный процесс» – концепция российского лесоведения // Лесоведение. 1999. № 3. С. 13–23.
18. *Цветков В.Ф.* Лесовозобновление: природа, закономерности, оценка, прогноз. Архангельск: Арханг. гос. техн. ун-т, 2008. 212 с.
19. *Leckie D., Gillis M., Joyce S.* A forest monitoring system based on satellite imagery // Proceedings of the 15th Canadian Symp. On Remote Sensing. 1992. P. 79–84.
20. www.scanex.ru/ru/software

The Eco-dynamical Study of Forest-forming Process with Space Imagery

V. M. Zhirin, S. V. Knyazeva, S. P. Eydlina

The paper deals with the research methodology of forest-forming process based on the combination of biometric parameters of forest ecosystems, being the eco-dynamical datasets on forest organization complemented with space imagery- and topography-derived characteristics. The results of the study are shown for two model woodlands, as follows: spruce forest (*Piceetum hylocomiosum*) in the North of Kostroma region, and larch forest (*Larix*) in Magadan region. The nonlinear equations linking the forest age and the percentage of deciduous species with the spectral characteristics of the space imagery is estimated statistically.

Forest ecosystem, woodland, forest-forming process, species and age structure, stratification of forest lands, eco-dynamical datasets, multispectral space image, spectral characteristics, morphometric parameters of relief.