

УДК 528.8+681.3:574.4

ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ СЕВЕРОТАЕЖНОЙ ПОДЗОНЫ ВОСТОЧНОЙ ФЕННОСКАНДИИ

П. Ю. Литинский

Институт леса Карельского научного центра РАН

Описываются результаты создания геоинформационной модели оригинальным методом моделирования спектрального пространства сканерного снимка Landsat ETM+. Показано, что для лесных экосистем в значительной части случаев локализация спектральных классов модели прямо соответствует их положению в осях эдафофитоценологических координат, причем идентифицируются биогеоценологические комплексы (четвертичные отложения + растительность). Для болотных экосистем спектральные классы четко отражают тип водно-минерального питания (олиготрофное/мезотрофное). Декомпозиция неоднозначных спектральных классов производится по геоморфометрической модели и по разновременным данным, в результате выделяются все основные классы первичных экосистем, а также различные варианты и стадии их естественных и антропогенных нарушений, в общей сложности несколько десятков категорий, с детализацией масштаба примерно 1 : 25 000. Таким образом создается структурная основа для интеграции результатов различных натурных исследований, и в итоге – для построения комплексной структурно-функциональной модели.

Ключевые слова: геоинформационное моделирование, таежные экосистемы, дистанционное зондирование, классификация многоспектральных сканерных снимков.

P. Yu. Litinskiy. GEOINFORMATION MODEL OF EASTERN FENNOSCANDIA NORTHERN TAIGA ECOSYSTEMS

The results of creation of geoinformation model by an original technique of spectral space modeling of Landsat ETM+ image are described. It is shown that for forest ecosystems the location of spectral classes in many cases directly corresponds to their location within the axes of edaphic and phytocenotic coordinates, and the biogeocenotic complexes (quaternary deposits + vegetation) are identified. For mire ecosystems, spectral classes accurately reflect the water and mineral nutrition type (oligotrophic/mesotrophic). Ambiguous classes are decomposed using the geomorphometric model and time series imagery. As the result, all basic classes of primary ecosystems, as well as variants and stages of their natural and anthropogenic disturbance, are distinguished, totalling several dozens of categories, with a scale approximately 1 : 25 000. Thus the structural basis is created for integration of the results of various *in situ* surveys and, eventually – for building of the complex structural and functional model.

Key words: geoinformation modeling, boreal ecosystems, remote sensing, multispectral images classification.

Введение

В настоящее время одним из основных направлений биогеографических исследований в Карелии является «изучение структурно-функциональной организации и динамики лесных экосистем» [Лесобиологические исследования..., 2007, с. 11]. При этом абсолютный приоритет отдается натурным исследованиям биоценозов и их компонентов на отдельных модельных объектах. Но сколь бы детальными такие исследования ни были, все они имеют смысл лишь в том случае, если их результаты в дальнейшем будут интегрированы и экстраполированы на определенную территорию. Для этого необходима ее структурная (геоинформационная) модель, которая может быть создана лишь с использованием данных приборов дистанционного зондирования (ДЗ) – космических сканеров и радаров высокого разрешения [Барталев и др., 2007].

Работы над созданием геоинформационной модели Восточной Фенноскандии ведутся в Институте леса Карельского НЦ РАН с 1990-х гг. В начальный период применялся традиционный подход к классификации сканерных снимков – математическая экстраполяция наземных данных на всю охваченную снимком территорию, в качестве ключевых участков использовались в основном данные ландшафтных исследований [Литинский, 2003, 2004]. Однако постепенно выявилась недостаточная эффективность традиционных методов классификации для создания геоинформационной модели. Все они основаны на формальном математическом сходстве кривых спектрального отражения (сигнатур), без какого-либо учета их формы как таковой, которая определяется биотическими свойствами отражающей поверхности. Более того, ввиду технических ограничений сканера в значительной части случаев не существует взаимно однозначного соответствия между формой сигнатуры и типом экосистемы [Литинский, 2007, с. 70]. Исследователь по сути дела действует вслепую, т. е. не может оценить реальные размеры и взаимное расположение категорий земной поверхности в многомерном спектральном пространстве (СП) снимка, которое остается «черным ящиком».

С другой стороны, очевидной стала недостаточная пригодность ландшафтных профилей как ключевых участков. Информация профилей имеет скорее иллюстративный, нежели количественный характер, и на них затруднительно набрать количество участков, обеспечивающее статистическую достоверность результатов.

Не привела к кардинальному улучшению положения и закладка дополнительных ключевых участков. Поэтому был разработан принципиально иной метод классификации, основанный на моделировании СП снимка и сопоставлении его с массовыми наземными данными – материалами лесоустройства и аэрофотоснимками [Литинский, 2011]. Поскольку имевшиеся в распоряжении пакеты обработки данных ДЗ (GRASS, Idrisi) не содержат средств для реализации данного метода, потребовалась разработка собственного программного обеспечения в виде дополнительного модуля для этих пакетов. В статье кратко изложены первые основные результаты применения данного методического подхода в северотаежной подзоне Восточной Фенноскандии.

Объекты и методика

Для создания геоинформационной модели использовался космический снимок, полученный сканером Landsat 7 (сенсор ETM+) 28 июля 2000 г. Были взяты сцены 14 и 15 витка 186, покрывающие большую часть северотаежной подзоны Восточной Фенноскандии и включающие все основные типы природных комплексов данной территории, за исключением горных тундр хребта Маанселькя (рис. 1). Снимок находится в свободном доступе в архиве по адресу <ftp://ftp.glcf.umd.edu/glcf/Landsat>. Динамика растительного покрова выявлялась путем сравнения данного снимка с двумя сценами Landsat 5 (сенсор TM) того же витка от 12 июня 1992 (северная часть, сцена 14) и 23 июня 1990 (южная часть, сцена 15).

Программное обеспечение

Классификация снимка проводилась методом моделирования СП сканерного снимка [Литинский, 2011]. Для построения модели СП исходное пространство снимка особым образом трансформируется: число размерностей пространства уменьшается до трех наиболее значимых для выявления категорий таежной растительности. Модель строится в осях xyz , где x и y – соответственно первая (PC1) и вторая (PC2) главные компоненты логарифмированной матрицы минимально взаимно коррелирующих каналов сканера (R, NIR, SWIR2), а z – индекс стресса влажности MSI (отношение каналов SWIR1 и NIR в процентах). Каждая категория земной поверхности представляется в модели в виде призматической области СП, в которой основания призмы описываются полигонами векторного файла, а ее высота и положение в оси MSI – атрибутивными значениями полигона.

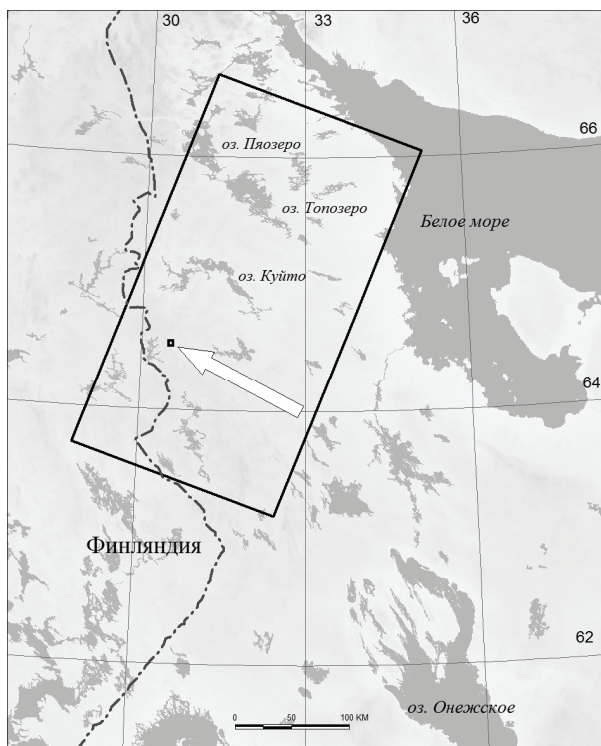


Рис. 1. Локализация объекта исследования – сцены 14 и 15 витка 186 сканера Landsat. Стрелка показывает положение фрагмента, представленного на рис. 5

Для классификации данным методом разработан оригинальный программный модуль (свид. о гос. регистрации № 2011613929 от 20.05.2011). Модуль работает в двух режимах: создания модели СП и собственно классификации. В первом режиме создается векторный файл модели СП (shape-файл ESRI), он может визуализироваться для анализа и редактирования или же сразу использоваться для классификации. Для работы модуля необходимы растровые файлы компонент PC1 и PC2, файл индекса MSI и (в первом режиме) файл локализации ключевых участков. Подготовка растровых файлов, анализ и редактирование модели проводилось с использованием свободно распространяемого пакета Quantum GIS (<http://qgis.org>), который включает векторную ГИС (упрощенный аналог ArcMap ESRI), а также растровый пакет GRASS (*Geographic Resources Analysis Support System*), содержащий широкий набор модулей анализа и обработки геоинформации.

Препроцессорная обработка. Все данные были приведены к картографической проекции сканерного снимка – UTM36N, эллипсоид WGS84. В векторной ГИС создавался shape-файл полигонов ключевых участков и производился анализ и при необходимости редактирование файла модели СП. Файлы компонент

создавались модулем GRASS **i.pca**, файл MSI – модулем **r.mapcalc**, растр ключевых участков – модулем **v.to.rast** из shape-файла их полигонов.

При создании файлов компонент были взяты наименее взаимно коррелирующие каналы снимка – R, NIR, SWIR2 (табл. 1). При таких параметрах трансформации левая, «водная» часть спектрального гиперэллипсоида становится диффузной, но «наземная» часть наиболее развернута в пространстве (серый фон на рис. 2–4). Панхроматический канал использовался для создания цветного растра с разрешением 15 м (подложка на рис. 5) методом двойной трансформации моделей цвета RGB-HIS-RGB с помощью модулей **i.his.rgb** и **i.rgb.his** с подстановкой панхроматического канала как яркостного. Растр применялся при визуальной локализации ключевых участков.

Для повышения достоверности классификации необходимо использование геоморфометрической модели на основе цифровой модели высот (DEM). Построение DEM производилось путем интерполяции точек векторизованных горизонталей топокарты М 1 : 200 000 методом регуляризованных сплайнов с натяжением (модуль **v.surf.rst**). Геоморфометрическая модель, позволяющая определить уклоны и формы рельефа [Wood, 1996], формировалась из DEM с помощью модуля **r.param.scale**.

Таблица 1. Исходные данные и параметры их трансформации для создания модели СП

№	Спектральные каналы ETM+	Разрешение, м	Диапазон, мкм	Эйгенвекторы компонент	
				PC1	PC2
3	Красный, R	30	0,63–0,69	260,8	582,2
4	Ближний инфракрасный, NIR	30	0,78–0,90	791,1	586,0
5	1-й средневолновый инфракрасный, SWIR1	30	1,55–1,75	0	0
7	2-й средневолновый инфракрасный, SWIR2	30	2,09–2,35	553,2	563,5
8	Панхроматический	15	0,52–0,90	0	0

Постпроцессорная обработка. Классифицированный растр обеспечивает высокую детальность – средний размер участка некоторых категорий не более нескольких пикселей (несколько десятых долей гектара), поэтому для генерализации изображения использовалась фильтрация модулем **r.neighbour**. Векторизация осуществляется модулем **r.to.vect**, обработка векторных слоев (удаление малых полигонов, также с целью генерализации) – модулем **v.clean**. Эти операции, требующие боль-

шой вычислительной мощности, выполнялись на суперкомпьютере Карельского НЦ РАН (<http://cluster.krc.karelia.ru>).

Наземные данные. Для калибровки модели использовались приведенные к рабочей проекции фрагменты планов лесонасаждений, картографические данные исследований лесных и болотных экосистем [Волков и др., 1995; Юрковская, Елина, 2005; Токарев, 2005], растровые топографические карты М 1 : 50 000, а также архивные аэрофотоснимки и материалы отчетов Института леса Карельского НЦ РАН.

Результаты и обсуждение

Общее описание модели СП снимка

Положение категории земной поверхности в СП определяется формой ее сигнатуры, т. е. соотношением отражения и поглощения в различных диапазонах спектра на молекулярном (хлорофилл), клеточном (паренхима листа) и макроуровнях (ровность отражающей поверхности, структура лесного полога). При построении модели в 3D-пространстве осей PC1-PC2-MSI наиболее общие различия категорий проявляются в их проекции на плоскость осей компонент (см. рис. 2–4). Ординация сигнатур происходит таким образом, что общая яркость (суммарная величина формирующих сигнатуру значений) возрастает слева направо, вдоль первой главной компоненты.

В самой левой, наиболее «темной» части (значение PC1 менее 500) расположены водные поверхности. Объясняется это тем, что основная часть всего спектра солнечного излуче-

ния отражается от поверхности воды, не попадая в объектив сканера, а значительная часть инфракрасного спектра водой поглощается. Лесной полог отличается сильной неровностью поверхности, поглощающей большую долю как видимого, так и инфракрасного излучения, поэтому высокосомкнутые леса расположены в самой левой части всех наземных категорий (значение PC1 в пределах 500–650), правее расположены редкостойные леса и кустарники. Ровные поверхности, покрытые недревесной растительностью – болота, вырубки, сельхозугодья, поглощают значительно меньшее количество излучения, чем лесной полог, поэтому занимают самую правую часть СП.

Вторая главная компонента определяет положение категорий с различным количеством фотосинтезирующей биомассы, причем связь обратно пропорциональная – области лишенных растительности категорий находятся в зоне максимальных значений (PC2 более 250), в противоположной части (на рисунке внизу) – высокопродуктивные хвойные молодняки, луга, сельхозкультуры (см. рис. 4).

Третье измерение модели – индекс влажности MSI. Одну и ту же область в 2D-пространстве компонент могут занимать принципиально различные категории – например, топи болот и высокосомкнутые ельники, отдельные участки олиготрофных болот и сосновые молодняки, различаются они по значению MSI (указано в табл. 2 и 3). Таким образом, в целом модель СП представляет собой сложную объемную фигуру.

Таблица 2. Классы первичных лесных экосистем геоинформационной модели

Спектральные классы			Классы экосистем		
№	Название	Индекс влажности MSI, %	Положение в рельефе и/или типе ландшафта	Индекс экосистемы	Тип леса (С – сосняк, Е – ельник)
1	Сосняки зеленомошные	50–65	Вершины моренных холмов	1а	С. брусничные
			Склоны моренных холмов	1b	С. черничные
2	Сосняки брусничные	60–80	Флювиогляциальные дельты	2	С. брусничные
3	Сосняки скальные, каменистые	70–90	Скальные обнажения	3а	С. скальные
			зандровые равнины	3b	С. каменистые
4	Высокополотные ельники	55–65	Склоны моренных холмов	4а	Е. черничные
			Подножия холмов	4b	Е. долгомошные
			Ложбины стока	4с	Е. логовые
5	Низкополотные хвойные	50–70	Озерные равнины	5а	Е. черничные влажные
			Холмы денудационно-тектонические – тонкий слой морены	5b	С/Е черничные/ брусничные скальные
			Ложбины стока	5с	Е. сфагновые
6	Сосняки багульниковые	55–65	Озерные равнины	6	С. багульниковые
7	Хвойно-лиственные	45–55	Морена	7	С/Е/Б черничные / брусничные
23	Сосняки сфагновые	55–70	Озерные равнины	24	С. сфагновые

Таблица 3. Нарушенные экосистемы и воды

Спектральный класс	Индекс влажности MSI, %	Категория
10	90–160	Свежая вырубка
9	90–160	Вырубка 3–5 лет
11	45–65	Молодняк сосны на морене 10–20 лет
12	40–60	То же, 20–40 лет
14	65–85	Молодняк сосны 10–40 лет на флювиогляциальных отложениях
61, 62	70–90	Гари различного типа и давности
40	90–120	Кустарники
13	40–60	Луга, сельхозкультуры
50	90–150	Застройка, карьеры и т. п.
30	50–90	Озера
31	20–50	Мелководье
33	30–110	Загрязненные воды

По типу растительного покрова таежные экосистемы классифицируются на два основных типа – лесные и болотные, кроме того, существуют и лишённые растительности (как правило, вследствие антропогенного воздействия) участки. Поэтому при описании модели СП снимка таежной территории условно принято, что она состоит из трех взаимопересекающихся подпространств: 1) лесного, 2) болотного и 3) подпространства нарушенных экосистем. Границы между подпространствами во многом также условны, поэтому некоторые сегменты (спектральные классы) модели представлены одновременно на нескольких рисунках.

Лесное подпространство

К этому подпространству отнесены приспевающие, спелые и перестойные леса, находящиеся в естественном состоянии или на поздних стадиях восстановления до состояния, близкого к естественному, после различных видов естественного или антропогенного воздействия. Молодняки (т. е. лесные экосистемы, находящиеся на начальных стадиях восстановления), рассматриваются в подпространстве нарушенных экосистем.

Основные факторы, определяющие положение растительной категории в СП – это количество фотосинтезирующей фитомассы и стресс влажности. Первое зависит от количества и состава элементов питания в почве, второе – от влагообеспеченности условий произрастания. Поэтому наблюдается достаточно четкое соответствие между положением различных типов леса в СП и в эдафитоценотических осях, особенно для наиболее контрастных по условиям водно-минерального питания типов сосновых лесов (см. рис. 2). При этом имеет значение не только название типа леса по доминантным видам напочвенного покрова, но и его экологическая приуроченность к определенному типу четвертичных отложений (основную роль в строении данной территории играют ледниковые, флювиогляциальные и озерно-

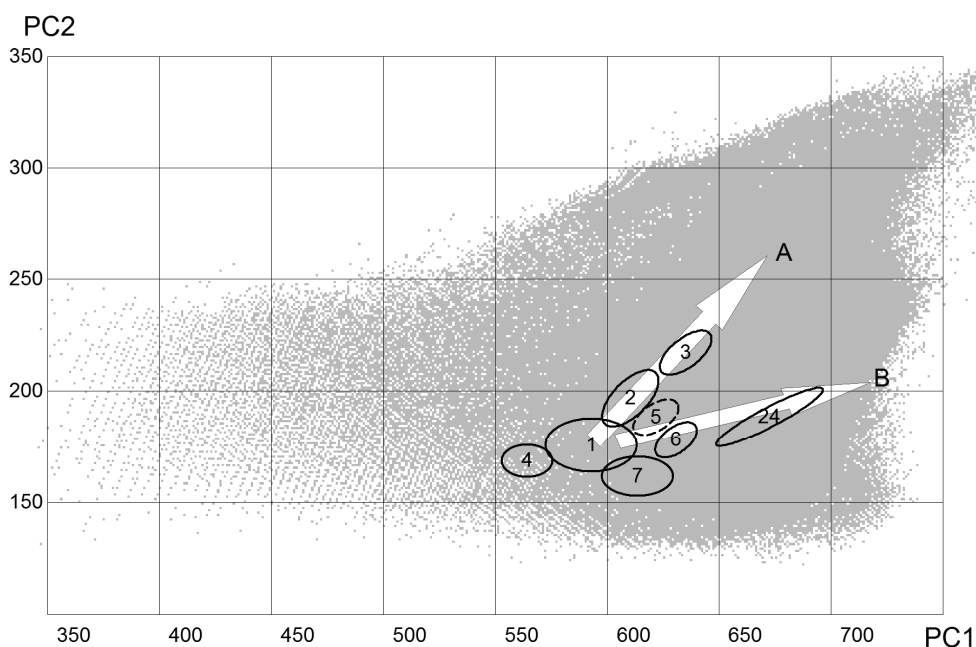


Рис. 2. Лесное подпространство. Стрелки А и В показывают направления осей эдафитоценотических координат. Спектральные классы:

1 – сосняки зеленомошные; 2 – сосняки брусничные/лишайниковые; 3 – сосняки каменистые/скальные; 4 – высокополотные ельники; 5 – низкополотные хвойные; 6 – сосняки багульниковые; 24 – сосняки сфагновые; 7 – хвойно-лиственные приспевающие

ледниковые образования, рыхлый покров осадков часто разомкнут выходами кристаллических пород различной площади [Лукашов, Демидов, 2001]). Названия типов сосняков (там, где не указано иное), даны по: [Зябченко, 1984], ельников – по: [Волков и др., 1995].

Спектральный класс **1** представлен сосняками зеленомошной группы – черничными и брусничными, произрастающими в наиболее благоприятных условиях, в северотаежной подзоне это прежде всего различные ледниковые (моренные) холмы и гряды. В прошлом, до начала концентрированных рубок, это был наиболее распространенный класс лесных экосистем, но к настоящему времени встречается отдельными небольшими фрагментами (за исключением охраняемых природных территорий).

По оси недостаточного водно-минерального питания (стрелка А) ближайшую к центру область (класс **2**) занимают сосняки брусничные свежие флювиогляциальных дельт [Волков и др., 1995]. Класс **3** – сосняки скальные, наиболее распространенные на побережье Белого моря севернее 66 градуса широты. Этот же сегмент занимают и сосняки каменистые на наименее плодородных участках флювиогляциальных отложений, например, на зандровых равнинах севернее оз. Куйто. Далее по оси (на схеме не показана) расположена область скальных пустошей с редкой низкоствольной сосной.

В области избыточного застойного увлажнения (стрелка В) так же, как и на эдафитоценотической схеме, наиболее удалены от центра сосняки сфагновые (класс **24**) с полнотой 0,3–0,4, в самой правой части сегмента – болота с редкой сосной. Класс **6** – сосняки багульниковые. Как и сфагновые, распространены повсеместно, но наиболее крупные массивы таких лесов приурочены к обширным участкам озерных равнин к востоку от оз. Куйто и на перешейке между озерами Пяозеро и Топозеро. Здесь они отличаются несколько большей продуктивностью и значительным (до 25–30 %) участием ели. Вероятно, это обусловлено относительно богатым минеральным составом залегающих под слоем торфа озерных отложений. В остальных случаях участки класса **6** представлены обычными сосняками багульниковыми с участием ели 10–15 %.

Таким образом, система эдафитоценотических координат представляет собой не только абстрактную конструкцию, но и находит свое реальное воплощение в модели СП. Однако взаимно однозначное соответствие между типом биогеоценоза и классом модели СП

наблюдается не во всех случаях. Сегмент класса **5** показан пунктирной линией, для индикации того, что его «содержимое» различно в различных типах ландшафта. Можно обозначить его как «низкополнотные хвойные леса» – сосняки и ельники с различной долей участия обеих пород, в неэкстремально неблагоприятных условиях местообитания, т. е. в системе эдафитоценотических координат, занимающих среднее положение на осях А и В. В спектральной модели данный сегмент находится на биссектрисе угла между осями. Неоднозначность этого спектрального класса объясняется тем, что при размере пиксела 30 x 30 м в редкостойных древостоях сканер регистрирует интегральную величину отражения от полога и напочвенного покрова. При этом оказывается, что основные факторы, определяющие форму сигнатуры, практически одинаковы в разных по преобладающей породе древостоях, поэтому определить, сосна это или ель, не представляется возможным – тем более что в большинстве случаев в разных соотношениях присутствуют обе породы.

Декомпозиция этого спектрального класса проводится с учетом экологической приуроченности типов леса к формам рельефа и типам ландшафта с использованием геоморфометрической модели. Так, в ландшафтах денудационно-тектонического генезиса с тонким прерывистым чехлом ледниковых отложений, на вершинах и склонах холмов класс **5** представлен сосняками и ельниками черничными скальными [Волков и др., 1995]. Крупнейший массив таких лесов находится к западу от оз. Куйто.

На равнинах прибеломорской низменности и повсеместно у подножий склонов и вдоль ложбин стока класс **5** представлен ельниками черничными влажными и чернично-сфагновыми. Имеет значение также положение участков данного класса в контексте территориально сопряженных биоценозов: отдельные небольшие участки класса **5**, окруженные зеленомошными сосняками (класс **1**), вероятнее всего, представляют собой участки выборочных рубок, поляны, прогалины и т. д. Следует отметить, что в настоящее время, когда в северотаежной подзоне высокопродуктивные зеленомошные леса (класс **1**) сохранились лишь в пределах охраняемых природных территорий, класс **5** стал одним из наиболее распространенных.

Класс **7** – смешанные хвойно-лиственные леса с долей березы и осины до 40–50 %, обычно это вторичные приспевающие насаждения на месте рубок 80–100-летней давности. В северотаежной подзоне леса этого класса

встречаются относительно редко, поскольку в соответствующий период массовых рубок не проводилось.

Для **ельников** соответствие эдафифитоценотической схеме менее выражено. Четко определенное положение в СП занимают лишь монодоминантные высокополнотные ельники (класс **4**). Во всех участках спектра коэффициент отражения еловой хвои меньше, чем сосновой, кроме того, архитектура полога сомкнутых ельников способствует большему поглощению, поэтому этот класс расположен в самой левой части СП. В зависимости от положения в рельефе он представлен ельниками черничными на вершинах и склонах холмов, ельниками чернично-сфагновыми у подножий склонов и в котловинах, а также ельниками логовыми вдоль линий стока.

Декомпозиция по геоморфометрической модели применяется также и для класса 1, для разделения зеленомошных типов на черничные и брусничные. Вершины гряд соответствуют брусничным, склоны – черничным типам, подножия склонов и котловины – наиболее высокополнотным участкам долгомошных.

Таким образом, для лесных экосистем создание геоинформационной модели включает две основные стадии: локализация сегментов в модели СП и декомпозиция полученных спектральных классов по геоморфометрической модели. Результаты представлены в табл. 2, соответственно в левой и правой ее частях.

Болотное подпространство

В северотаежной подзоне распространены два основных типа болот: мезотрофные аапа и олиготрофные осоково-сфагновые [Токарев, 2005; Юрковская, Елина, 2005], доля низинных болот составляет лишь 0,5 % [Морозова, 2001]. Различия в типе водно-минерального питания определяют тип растительного покрова болота и, соответственно, его сигнатуру и, в конечном итоге, положение в СП (рис. 3). Различия эти столь существенны, что болота данных типов занимают практически диаметрально противоположные области. Аапа-болота расположены в зоне, граничащей с областью нерастительных категорий. Слева направо уменьшается влажность поверхностного слоя: **26** – внутриболотная гидрографическая сеть (топи, водотоки, вторичные озера), **27** – крупногрядовые и **28** – мелкогрядовые. Олиготрофные болота, ввиду значительного количества фотосинтезирующей фитомассы в верхнем слое сфагновых мхов, занимают нижнюю часть пространства, в том же порядке убывания влажности поверхности: сегмент **21** – топи, **22** – влажные, **23** – среднего увлажнения, **29** – сухие. Наиболее распространены в северотаежной подзоне аапа и осоково-сфагновые болота классов 23 и 28, несколько реже класса 22. Крупногрядовые аапа класса 27 на значительной площади расположены лишь в крупнейшем болотном массиве к востоку от оз. Куйто.

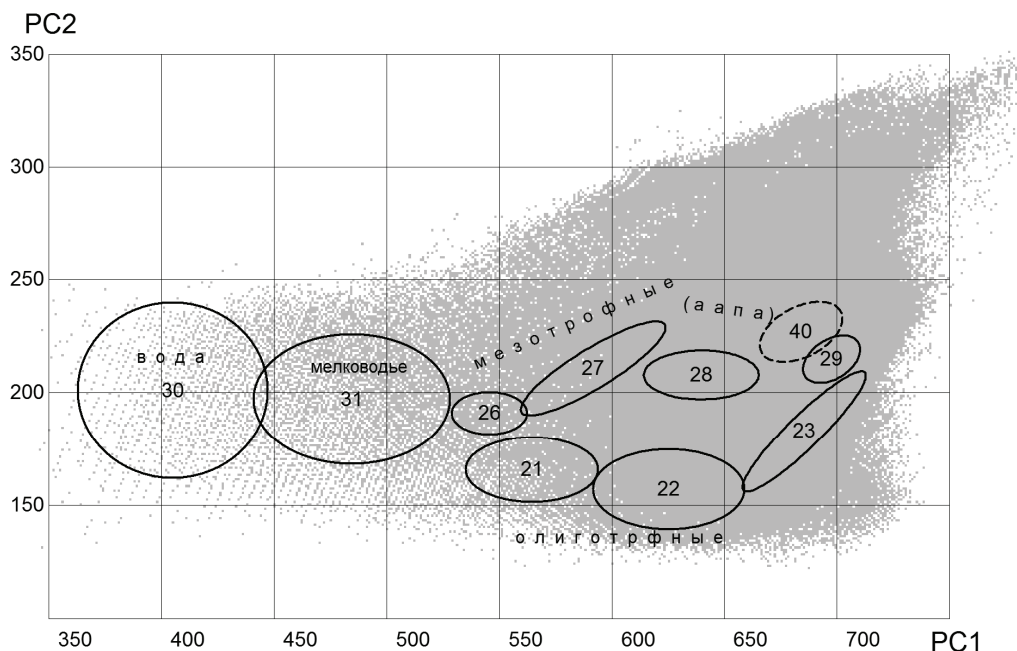


Рис. 3. Болотное подпространство. Спектральные классы: 30 – открытая вода; 31 – мелководье; 21–23, 29 – олиготрофные болота; 26–28 – аапа-болота

Как видно из рис. 2 и 3, некоторые сегменты спектральных классов лесных и болотных экосистем занимают одно и то же положение в осях PC1 и PC2. Различаются они по величине индекса влажности MSI: олиготрофные болота (21 и 22) имеют значение индекса меньшее, чем соответствующие сегменты лесных экосистем, а сегменты аапа-болот (26 и 27) – наоборот, большее.

В болотном подпространстве, как и в лесном, имеются неоднозначные спектральные классы, в частности, показанный пунктиром сегмент **40**. Это различные кустарники – ивняки, ольшаники. Такого рода растительность встречается как на заболоченных участках в естественном состоянии, так и на вырубках, поэтому декомпозиция сегмента будет рассмотрена далее, в подпространстве нарушенных экосистем.

При классификации выявляются искажения, вызванные наличием контактной зоны между лесным и болотным подпространствами. Так, частично соприкасаются сегменты 1 и 21, 3 и 28, 4 и 21, 7 и 22 и др. (ср. рис. 2 и 3). Реальные границы между категориями в СП диффузны в силу ряда причин: естественной гетерогенности растительного покрова, измерительной погрешности сканера и дискретности его сигнала, а также компьютерных погрешностей при построении модели СП. При классификации же по призматическим сегментам они представляют собой плоскости. В результате появляются

отдельные пиксели ельников среди топей, пиксели аапа-болот среди сухих сосняков и другие маловероятные в природе комбинации территориального сопряжения экосистем. Такие дефекты устраняются с использованием контекстных ГИС-операторов (например: полигону класса 1, находящемуся внутри полигона класса 21 назначается класс 21, и наоборот).

Подпространство нарушенных экосистем

Данное подпространство объединяет категории, в прошлом занятые лесами, а ныне находящиеся в той или иной стадии естественной или антропогенной трансформации. В свою очередь в подпространстве выделяются несколько групп категорий в зависимости от обратимости трансформации (см. рис. 4, табл. 3). Полностью лишенные растительности категории занимают область **50**. Это грунтовые и асфальтированные дороги, песчаные и горные карьеры, участки застройки. Категория **10** – свежие вырубки (давностью до 2–3 лет).

Траектории лесовосстановительного процесса непохожи в различных эдафических условиях. Более длинная траектория – на ледниковых (моренных) отложениях. Здесь четко выделяются несколько стадий: появление растительности (**9**), затем два класса молодняков (**11, 12**) и приспевающие (**7**). Последние уже могут быть отнесены к лесному подпространству. На водно-ледниковых отложениях траектория прямее и короче, классы молодняков практически не выражены, они объединены в класс **14**.

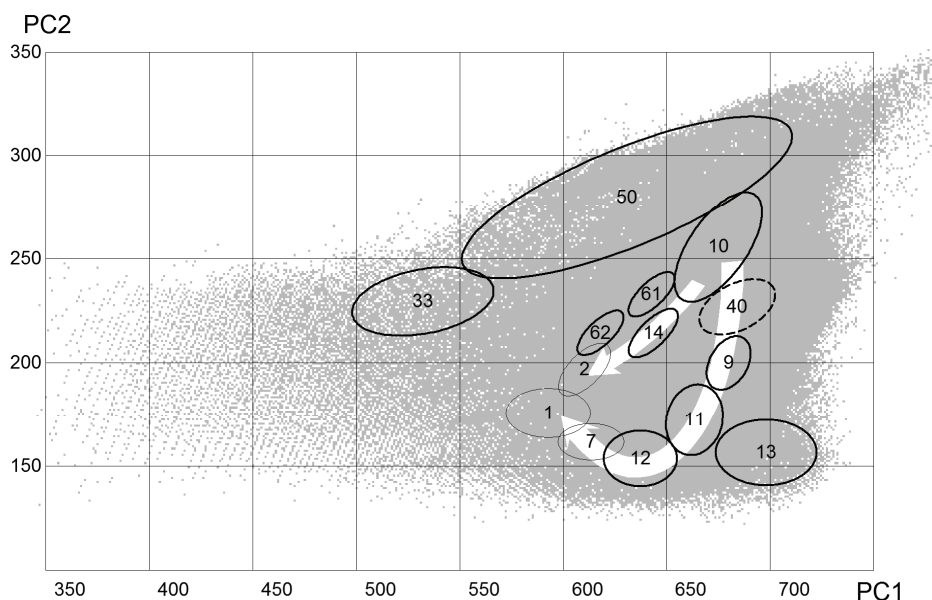


Рис. 4. Подпространство нарушенных экосистем. Наименования спектральных классов указаны в табл. 3. Длинной стрелкой показана траектория лесовосстановительного процесса на моренных местообитаниях, от свежей вырубки (10) до спелого леса (40–9–11–12–7–1), короткой – на флювиогляциальных (10–14–2)

В подпространстве болот и нарушенных экосистем также присутствуют спектральные классы с неоднозначным «содержимым». Практически идентичны по форме сигнатуры некоторых участков болот и вырубок давностью более 5 лет, с редкой кустарниковой растительностью (класс 40). Следует отметить, что для некоторых задач – например, при оценке запаса фитомассы в данный момент времени, эти категории могут совпадать, но с точки зрения структурно-функциональной организации это принципиально различные категории. Дифференциацию этих категорий в данном случае можно осуществить известным методом использования разновременных снимков. Если в прошлом в данном месте был лес, то категория является вырубкой, если же она остается неопределенной, следует рассмотреть траекторию ее движения в СП. Изменения сигнатур болот в основном имеют сезонный характер, в зависимости от температурного режима и осадков. В засушливые годы некоторые типы аапа-болот (класс 28) перемещаются в сегмент класса 10 (свежая вырубка). Динамика сигнатур вырубок принципиально иная, соответствует траекториям, показанным на рис. 4. Следовательно, если на снимках разных лет наблюдаются небольшие ненаправленные перемещения положения участка «неопределенной» категории в СП – то это болото, если же сигнатура медленно перемещается по описанной выше траектории – участок является вырубкой. В результате одновременно и выявляется *динамика* растительного покрова, и детализируется его *структура*. Таким образом, для подпространств болотных и нарушенных экосистем декомпозиция неоднозначных спектральных классов проводится в основном по разновременным снимкам. В некоторых случаях также эффективно использование геоморфометрической модели. Поскольку вырубки проводились в основном в наиболее продуктивных суходольных лесах, и если объект класса 40 расположен на вершине или склоне холма, то он, вероятнее всего, является заросшей кустарником вырубкой.

Рассмотренные результаты показывают, что модель СП сканерного снимка в значительной части случаев непосредственно отражает биогеоценотическую структуру (левая часть табл. 2). В результате декомпозиции неоднозначных сегментов СП по геоморфометрической модели выделяются все основные классы первичных экосистем (правая часть табл. 2 и табл. 4). В совокупности с различными вариантами и стадиями их естественных и антропогенных нарушений, выявляемых путем декомпозиции спектральных классов по разновременным

данным, геоинформационная модель включает несколько десятков категорий, с детализацией масштаба примерно 1 : 25 000. Фрагмент модели, созданной по данным рис. 2–4, представлен на рис. 5. Для наглядности модель подвергнута двухстадийной генерализации. Первая стадия – фильтрация классифицированного растра фильтром «мода» в скользящем окне 3 x 3 пиксела, затем растр был переведен в векторную форму, на котором удалены полигоны площадью менее 0,2 га.

Таблица 4. Соответствие классов экосистем типам четвертичных отложений

Четвертичные отложения	Преобладающие классы экосистем
Отсутствуют	3а – сосняки скальные
Флювиогляциальные	2 – сосняки брусничные/лишайниковые 3b – сосняки каменистые 14 – сосновые молодняки
Тонкий чехол морены	5b – сосняки черничные/брусничные скальные
Мощная морена	1 – сосняки зеленомошные 4 – высокополотные ельники черничные 7 – хвойно-лиственные 11, 12 – сосновые молодняки
Озерно-ледниковые	6 – сосняки багульниковые 5а – ельники черничные влажные 24 – сосняки сфагновые 21–23 – болота олиготрофные с различной степенью влажности поверхности 26–28 – аапа-болота нескольких типов

Созданные традиционными методами на основе снимков Landsat 7 модели сопредельных территорий существенно менее информативны. В Ленинградской области [Nealy et al., 2005] выделяют около десяти категорий; на Кулойском плато в Архангельской области [Гофоров и др., 2006] выделены лишь пять классов растительности – еловые, светлохвойные, мелколиственные и смешанные леса и открытые болота, причем указывается, что такой набор классов обусловлен низким пространственным разрешением сканера (с. 125). Наши результаты показывают, что причина в другом: именно традиционный подход к классификации не дает возможность в полной мере использовать потенциал сканерной информации. Пространственное разрешение сенсоров TM/ETM+ позволяет создавать модели значительно большей детальности, которая еще более увеличивается при использовании геоморфометрической модели.

Тип растительности в комплексе с типом четвертичных отложений определяют в целом ход почвообразовательного процесса, биологическую продуктивность биоценоза и прочие его характеристики. Поэтому в традиционном понимании, геоинформационная модель – это

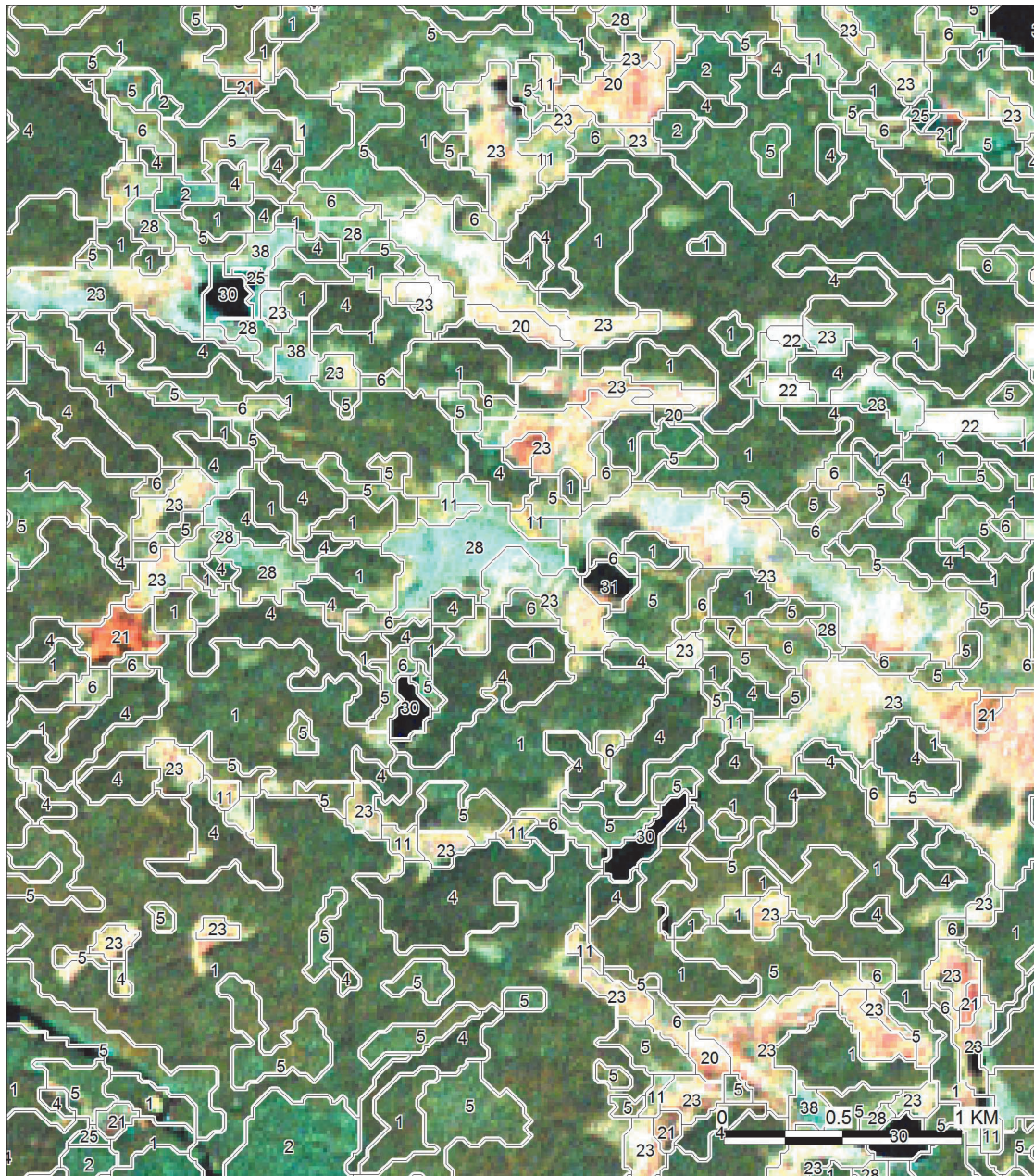


Рис. 5. Фрагмент векторного слоя геоинформационной модели. Индексы полигонов соответствуют спектральным классам на рис. 2–4. Растровая подложка синтезирована из инфракрасных и панхроматического каналов (4, 5, 7 и 8), разрешение 15 м

«комплект карт» М 1 : 25 000 (для Карелии около 2000 листов формата А3), в зависимости от подключаемых атрибутивных данных:

- четвертичных отложений;
- растительности (план лесонасаждений);
- типов болот;
- почв;
- биоресурсов;
- антропогенной нарушенности и др.

Использование модели СП изменяет не только детальность, но сам подход к количественной оценке биогеоэкологической структуры

и выявления межэкосистемных связей. В традиционных методах классификации и количественного анализа ландшафтной структуры (модули GRASS с общим префиксом **r.le**) экотоны линейны, рассматриваются как протяженность линии контакта. Из рис. 2–4 видно, что спектральное пространство имеет пустоты. Фактически это означает, что при использовании данного метода классификации возможно выделение экотонных зон между категориями в виде площадных объектов (полигонов), что переводит на качественно новый уровень исследования пространственной неоднородности

растительности и ее связей со средой. Это особенно актуально для таежных экосистем ввиду обширной площади экотонных между лесными и болотными экосистемами. Сосняки сфагновые (класс 24) сами представляют собой экотон между болотом и суходолом.

Опыт создания геоинформационной модели на основе описанных принципов позволяет сделать следующие выводы методического плана. На современном этапе развития систем ДЗ основной источник данных модели – снимки сканеров Landsat TM/ETM+ благодаря своей доступности и достаточно высокой информативности. Вследствие технических ограничений сканера по спектральному и пространственному разрешению реальная информация, заложенная в снимке в виде многомерного массива данных, лишь частично отражает структуру растительного покрова. Для разрешения этого противоречия целесообразно представить массив данных снимка в виде визуальной модели. Для таежных территорий модель СП целесообразно строить в осях *xyz*, где *x* и *y* – соответственно первая и вторая главные компоненты логарифмированной матрицы снимка, а *z* – индекс MSI (SWIR1/NIR). Отметим, что снимки сканеров, не имеющих канала SWIR1 (к которым относятся все современные сканеры сверхвысокого разрешения), значительно менее информативны, поскольку нет возможности получить значение индекса влажности, и исчезает одна размерность модели.

Классификация снимка с использованием модели СП представляет собой постепенный исследовательский процесс выяснения соответствия между областями СП (спектральными классами) и наземными данными. Схема классификации (набор целевых классов растительного покрова) перестает быть наперед заданной, как при использовании традиционного подхода, а формируется и уточняется в процессе моделирования СП. Иными словами, модель в определенной степени и представляет собой схему классификации.

Для значительной части лесных и болотных экосистем модель СП прямо отражает биогеоценотическую структуру (комплекс четвертичные отложения + растительность), а также различные варианты и стадии естественных и антропогенных нарушений. Но ввиду наличия неоднозначных спектральных классов непосредственные результаты классификации лишь частично соответствуют действительности, даже если ключевые участки включают большинство априори известных категорий. В северо-таежной подзоне неоднозначные классы включают прежде всего редкостойные хвойные леса

различного типа и породного состава, а также некоторые естественные и производные экосистемы с растительностью кустарникового типа. Поэтому в целом процесс создания геоинформационной модели включает две стадии: построение модели СП и декомпозиция неоднозначных классов по геоморфометрической модели и разновременным снимкам.

При построении модели спектральное пространство целесообразно условно разделить на три подпространства – лесных, болотных и нарушенных экосистем. Такое деление соответствует наиболее генерализованным классам растительного покрова, с другой стороны, процесс создания геоинформационной модели несколько различается для каждого подпространства.

Для *лесных экосистем* он включает следующие основные стадии:

- подбор наземных данных, классифицированных по условиям водно-минерального питания (согласно эдафифитоценотической схеме) и с учетом типа четвертичных отложений;

- сопоставление наземных данных с моделью СП (иными словами, локализация осей эдафифитоценотической схемы в 3D-пространстве модели);

- декомпозиция полученных спектральных классов по геоморфометрической модели с учетом приуроченности к определенным формам рельефа, водотокам и т. д.

Для *нарушенных экосистем* необходимо локализовать в модели СП положение молодняков различного возраста (траектории лесовозобновительного процесса). Эти траектории отличны в разных типах четвертичных отложений – моренных и флювиогляциальных, что и определяет принцип подбора ключевых участков. Сегменты лишенных растительности категорий и вторичной антропогенной растительности (луга, сельхозкультуры) занимают обособленное от других категорий положение, и декомпозиция этих классов обычно не требуется.

Для *болотных экосистем* ключевые участки подбираются по типу водно-минерального питания и уровню грунтовых вод. При локализации их в модели СП возможно взаимопересечение некоторых сегментов с подпространством нарушенных экосистем, соответственно, декомпозиция этих подпространств проводится параллельно. При этом помимо геоморфометрической модели, в большинстве случаев необходимо использование разновременных снимков.

На заключительном этапе создания модели, после перевода ее в векторную форму, с помощью операторов контекстного ГИС-

анализа устраняются искажения, вызванные наличием соприкасающихся сегментов спектральной модели, территориальная сопряженность которых в природе невозможна (или маловероятна).

Таким образом, для создания геоинформационной модели, наиболее достоверно отражающей пространственную структуру таежных экосистем, помимо сканерной информации, необходима также геоморфометрическая модель. Модель высот, используемая для ее построения, должна иметь разрешение, соответствующее разрешению сканерного снимка, т. е. может быть получена из горизонталей топокарты масштаба не более 1 : 50 000. Наилучшие характеристики имеет модель высот, полученная лазерным сканированием, которое дает не только детальную модель рельефа, но и данные о параметрах и архитектонике древесного полога [Данилин и др., 2005], но в настоящее время эти данные еще малодоступны ввиду их высокой стоимости.

Заключение

В результате исследований впервые для рассматриваемой территории получена геометрически корректная цифровая информация о структуре четвертичных отложений и лесных и болотных экосистем, в их реальном современном состоянии и со столь высокой степенью детальности. Однако целью данной работы было не столько получить картографическую информацию, сколько на примере инновационной методики показать возможности и перспективы геоинформационного моделирования. На данном этапе модель в основном имеет качественный характер (но, с другой стороны, это и является одним из ее достоинств), для подключения к ней точных биоресурсных характеристик экосистем необходима дальнейшая калибровка по наземным данным. Работы по развитию модели идут в направлении расширения территориального охвата, увеличения степени детализации и постепенного подключения к модели функциональных блоков.

В процессе создания модели получил дальнейшее развитие комплексный метод извлечения информации из сканерных снимков, основанный на моделировании спектрального пространства. Установлено, что спектральная модель в значительной степени отражает естественную структуру растительного покрова, определяемую типом четвертичных отложений и условиями водно-минерального питания. Это обстоятельство принципиально увеличивает

достоверность результатов классификации по сравнению с традиционным подходом. Предварительный анализ спектральных моделей показывает, что их структура весьма сходна у всех снимков ТМ/ЕТМ+ таежных территорий (Фенноскандии, Сибири, Канады), поэтому данный подход, на наш взгляд, целесообразно использовать во всей бореальной зоне. Этим может быть достигнута более достоверная унификация результатов, поскольку они становятся менее зависимыми от имеющихся локальных классификаций экосистем по видовому составу.

Важнейшее значение геоинформационной модели для фундаментальных исследований заключается в том, что она является структурной основой для интеграции результатов дискретных периодических натуральных наблюдений о состоянии отдельных экосистем и его динамике в единый пространственно-временной континуум – комплексную структурно-функциональную модель взаимодействия наземных экосистем с атмо-, гидро- и литосферой.

Автор признателен д. б. н. О. Л. Кузнецову (ИБ КарНЦ РАН) и к. с.-х. н. С. М. Синькевичу (ИЛ КарНЦ РАН) за консультации по дешифрированию аэрофотоснимков болотных и лесных экосистем, а также сотруднику ИПМИ А. С. Румянцеву за помощь в организации обработки больших объемов данных на вычислительном кластере Карельского НЦ РАН.

Выполнение работы стало возможным исключительно благодаря открытию правительством США свободного доступа к космическим снимкам Landsat и программному обеспечению GRASS.

Литература

Барталев С. А., Исаев А. С., Ершов Д. В. Актуальные задачи, возможности и перспективные направления методов спутникового мониторинга бореальных лесов // Международная конференция «Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве». М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2007. С. 20–22.

Волков А. Д., Громцев А. Н., Еруков Г. В. и др. Экосистемы ландшафтов запада северной тайги (структура, динамика). Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 1995. 194 с.

Гофаров М. Ю., Болотов И. Н., Кутинов Ю. Г. Ландшафты Беломорско-Кулойского плато: тектоника, подстилающие породы, рельеф и растительный покров. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 141 с.

Данилин И. М., Медведев Е. М., Мельников С. Р. Лазерная локация земли и леса: Учеб. пособие. Красноярск: Ин-тут леса им. В. Н. Сукачева, 2005. 182 с.

Зябченко С. С. Сосновые леса европейского Севера. Л.: Наука, 1984. 244 с.

Лесобиологические исследования на Северо-Западе таежной зоны России: итоги и перспективы // Материалы науч. конф., посвящ. 50-летию Института леса Карельского научного центра РАН (3–5 октября 2007 г.). Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2007. 214 с.

Литинский П. Ю. Ландшафтно-экологическая ГИС Восточной Фенноскандии // Труды Карельского НЦ РАН. Вып. 5. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2003. С. 100–107.

Литинский П. Ю. Концепция и методика создания ландшафтно-картографической основы геосистемного космического мониторинга // Материалы Междунар. конф. «Антропогенная трансформация таежных экосистем Европы: экологические, ресурсные и хозяйственные аспекты». Петрозаводск, 2004. С. 334–337.

Литинский П. Ю. Трехмерное моделирование структуры и динамики таежных ландшафтов. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2007. 107 с.

Литинский П. Ю. Классификация сканерных снимков методом моделирования спектрального пространства // Труды Карельского НЦ РАН. Сер. «Математическое моделирование и информационные технологии». Вып. 2. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2011. С. 45–54.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Литинский Петр Юрьевич

старший научный сотрудник, к. с.-х. н.
Институт леса Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: litinsky@krc.karelia.ru
тел.: (8142) 768160

Лукашов А. Д., Демидов И. Н. Условия формирования рельефа и четвертичных отложений Карелии в поздне- послеледниковые как основа становления современной природной среды // Труды Карельского НЦ РАН. Серия Б. «Биология». Вып. 2. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2001. С. 3–12.

Морозова Р. М. Географические закономерности формирования почвенного покрова Карелии // Труды Карельского НЦ РАН. Серия Б. «Биология» Вып. 2. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2001. С. 12–18.

Токарев П. Н. Разработка методики дешифрирования на космоснимках основных типов болотных участков Карелии с использованием материалов наземных и дистанционных исследований на основе ГИС-технологий // Труды Карельского НЦ РАН. Вып. 8. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2005. С. 65–79.

Юрковская Т. К., Елина Г. А. Картографический анализ болот Северо-Востока Карелии // Там же. С. 6–15.

Healy S. P., Cohen W. B., Zhiqiang Y., Krankina O. N. Comparison of Tasseled Cup-based Landsat data structure for use in forest disturbance detection // Remote Sens. Environ., 2005. V. 97. P. 301–310.

Wood, J. The Geomorphological characterisation of Digital Elevation Models. Diss., Department of Geography, University of Leicester, U. K. 1996
<http://www.soi.city.ac.uk/~jwo/phd/>

Litinskiy, Pyotr

Forest Research Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: litinsky@krc.karelia.ru
tel.: (8142) 768160