

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 528.8+681.3:574.4

### СОПОСТАВЛЕНИЕ И ВЗАИМНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ И ЭКОЛОГО-ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛЕЙ РАЗНООБРАЗИЯ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ

**А. М. Крышень, П. Ю. Литинский**

*Институт леса Карельского научного центра РАН*

Показана высокая степень соответствия двух моделей разнообразия лесных экосистем, созданных независимо друг от друга и с различными целями. Первая базируется на наземных описаниях и оригинальной классификации биотопов, вторая – на космической сканерной информации. В обеих в качестве основных классифицирующих признаков, помимо признаков растительности, используется тип четвертичных отложений и механический состав почвы. Важно также то, что признаки растительных сообществ соотносятся с их положением в динамических рядах.

**Ключевые слова:** таежные экосистемы, местообитания, геоинформационное моделирование, динамика лесных экосистем.

#### **A. M. Kryshen', P. Yu. Litinskiy. COMPARISON AND MUTUAL VERIFICATION OF THE GEOINFORMATION AND THE ECOLOGICAL DYNAMICS MODELS OF FOREST ECOSYSTEMS DIVERSITY**

High extent of similarity between two independently created models is shown. One of them is based on in situ survey of biotopes, the other one – on satellite imagery, but both use the type of quaternary deposits and soil texture as the main clustering criteria, in addition to vegetation traits. Besides, characteristics of the plant communities correlate with their position in dynamic series.

**Key words:** boreal ecosystems, habitats, geoinformation modeling, forest dynamics.

---

#### **Введение**

В Институте леса КарНЦ РАН в течение продолжительного времени независимо друг от друга развивались два методологи-

чески разных направления исследований, ориентированных на систематизацию знаний о разнообразии, строении и динамике лесных растительных сообществ и их классифицирование.

Результатом исследований по первому направлению явилась база данных «Местообитания Восточной Фенноскандии». Типы местообитаний (биотопов) выделяются по двум основным признакам: экотопа и растительности, кроме того, учитывается антропогенное влияние. Систематизация описаний в базе данных биотопов [Крышень и др., 2009] закономерно привела к созданию эколого-динамической модели разнообразия лесных сообществ на автоморфных почвах [Крышень, 2010; 2012].

Цель второго направления – создание геоинформационной модели, отражающей пространственную структуру растительного покрова. В основе модели, подробно описанной ранее на страницах Трудов КарНЦ РАН [Литинский, 2011; 2012], лежит сопоставление трехмерной модели спектрального пространства космического сканерного снимка и полученных из различных источников наземных данных о четвертичных отложениях и растительном покрове территории. Особо отметим, что база данных биотопов при создании геоинформационной модели не использовалась.

Таким образом, если для первого направления классифицирующий признак – определенные *in situ* эдафитоценоотические характеристики местообитания, то для второго – спектр отражения лесного полога, зафиксированный за пределами земной атмосферы. В предлагаемой статье приводятся результаты сопоставления разработанных моделей и их взаимной верификации, которая базируется на использовании описаний лесных сообществ северотаежной подзоны Карелии (точек базы данных биотопов) с определенными по приборам GPS координатами.

Материал излагается в предельно краткой форме, так как на страницах этого журнала [Крышень и др., 2009; Литинский, 2011, 2012] и некоторых других [Крышень, 2010, 2012] основные положения моделей уже опубликованы. В данной статье останавливаемся только на тех моментах, которые их сближают, поскольку считаем, что совместное развитие представленных моделей приведет к созданию современного и точного инструмента познания структуры и динамики лесного покрова.

### **Краткое описание моделей**

*Эколого-динамическая модель* лесной растительности отражает процессы естественного восстановления леса после сильного, но однократного воздействия человека (рубка). В основу модели заложен принцип исключительности процессов в пределах ле-

сорастительных условий – динамические ряды сходятся на поздних стадиях развития и не могут пересекаться с динамическими рядами других типов лесорастительных условий. Всего для Карелии выделено пять типов лесорастительных условий с автоморфными почвами [Крышень, 2010]. Принципы их определения кратко можно описать следующим образом.

Первый этап – определение экотопа по геоморфологическим признакам и типу увлажнения (уровень залегания грунтовых вод). Второй этап – определение условий трофности. В качестве простого (легко определяемого в природе) признака, прямо или косвенно указывающего на почвенное плодородие, используется механический состав почвы. Последний является определяющим еще и в силу различной коагуляционной способности частиц различной размерности [Качинский, 1965]. Именно этот момент может быть решающим в силу того, что две главные породы лесов Фенноскандии сосна и ель значительно отличаются строением корневой системы, и для каждой из них механический состав почвы является фактором, определяющим продуктивность соответствующих лесов [Казимиров 1971, 1995].

Далее модель опирается на характеристики растительного покрова – определяется стадия сукцессии по признакам возраста древостоя или его отсутствия в случае вырубок или других катастрофических разрушений растительного покрова в сочетании с определением состава древесного яруса (там, где он есть). На заключительном этапе определялся тип местообитания по диагностирующим видам.

Таким образом, в отличие от других широко известных зрительных моделей ценоотического разнообразия лесов [Погребняк, 1955; Сукачев, 1972 и др.] представляемая эколого-динамическая модель трехмерна – к плоскости типов ассоциаций добавляется ось времени (стадии лесовосстановления). Всего с момента формирования древесного яруса выделяются пять основных стадий: молодняки, средневозрастные, спелые, субклимаксовые и климаксовые сообщества [Крышень, 2010].

*Геоинформационная модель* наземных экосистем Восточной Фенноскандии создается как структурная основа для интеграции результатов биогеографических исследований в целях построения комплексной структурно-функциональной модели взаимодействия таежных экосистем с атмо-, гидро- и литосферой. Она формируется на основе информации сканеров Landsat TM/ETM+ методом моделирования

спектрального пространства снимка [Литинский, 2011]. Модель строится в 3D-осях **PC1-PC2-MSI** (соответственно первая и вторая главные компоненты логарифмированной матрицы снимка и индекс стресса влажности MSI). Результаты применения данного метода показали, что для лесных экосистем в значительной части случаев локализация спектральных классов модели прямо соответствует их положению в осях эдафифитоценологических координат, причем идентифицируются биогеоценологические комплексы (четвертичные отложения + растительность). Декомпозиция неоднозначных спектральных классов производится по геоморфометрической модели и по разновременным снимкам. В результате выделяются все основные классы первичных (климаксовых) экосистем, а также различные варианты и стадии их естественных и антропогенных нарушений, в общей сложности несколько десятков категорий [Литинский, 2012].

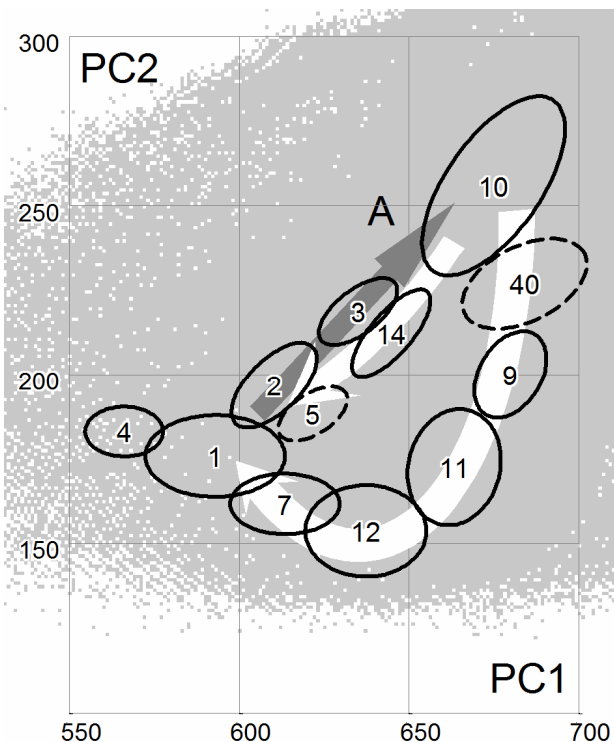


Рис. 1. Спектральные классы наземных экосистем (названия приводятся в тексте). Черной стрелкой обозначено направление оси А эдафифитоценологической схемы, двумя белыми стрелками – траектории лесовосстановления

Каждая категория земной поверхности представляется в модели в виде призматической области спектрального пространства. «Содержимое» области (спектрального класса) определяется, с одной стороны, отражательными характеристиками растительного покро-

ва, с другой – пространственным и спектральным разрешением сканера. На рис. 1 приведен фрагмент модели спектрального пространства снимка северотаежной территории. Показана только проекция призм на плоскость осей PC1 и PC2, поскольку значение третьей размерности – индекса влажности – в данном случае (для автоморфных экосистем) не существенно для дифференциации категорий (подробно эти данные приводятся в вышеуказанной статье).

Модель включает категории спелых и перестойных лесов в естественном состоянии или на поздних стадиях восстановления до состояния, близкого к естественному (стадии субклимакса и климакса, классы 1–5 и 7), и лесные экосистемы на начальных стадиях восстановления (молодняки и средневозрастные, классы 9–12 и 14).

Класс 1 представлен сосняками зеленомошной группы – черничными и брусничными, произрастающими в наиболее благоприятных условиях – на моренных холмах и грядах. По оси недостаточного водно-минерального питания (стрелка А) соседний сегмент занимают сосняки брусничные и лишайниковые флювиогляциальных дельт (класс 2). Далее по оси расположен класс 3 – сосняки скальные, а также сосняки каменистые и лишайниковые на наименее плодородных и сухих участках задровых равнин. 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. Для ельников соответствие эдафифитоценологической схеме менее выражено. Четко определенное положение в спектральном пространстве занимают лишь монодоминантные высокополнотные ельники (класс 4). 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.

В редкостойных древостоях пространственного разрешения сканера недостаточно для определения преобладающей породы, поэтому «содержимое» класса 5 обозначается как «низкополнотные хвойные» – сосняки и ельники с различной долей участия обеих пород, в неэкстремально неблагоприятных условиях местообитания. Декомпозиция этого спектрального класса проводится с учетом приуроченности типов леса к формам рельефа и типам ландшафта с использованием геоморфометрической модели.

Траектории лесовосстановительного процесса в спектральном пространстве от свежей вырубki (класс 10) различны в разных эдафических условиях. Более длинная траектория – на моренных отложениях. Здесь четко выделяются несколько стадий: появление растительности (9), затем два класса молодняков (11, 12) и припевающие (7). На флювиогляциальных отложениях траектория почти прямая, классы возраста молодняков практически не выражены, они объединены в класс 14.

Как видим, описание моделей показывает определенную степень их сходства в принципах выделения типов лесных экосистем и их динамики. Для взаимной верификации моделей использовался наиболее детально разработанный к настоящему времени фрагмент геоинформационной модели северотаежной подзоны, в пределах которого расположены 54 точки базы данных биотопов (рис. 2). При создании вокруг каждой точки буферной зоны радиусом 2 км формируются 13 кластеров точек. Снимок классифицировался согласно модели спектрального пространства, показанной на рис. 1. Векторизация классифицированного раstra проводилась в пределах буферных зон кластеров. Координаты точек были трансформированы в рабочую проекцию модели UTM36N/WGS84, затем определялось, в границах какого полигона расположена каждая точка.

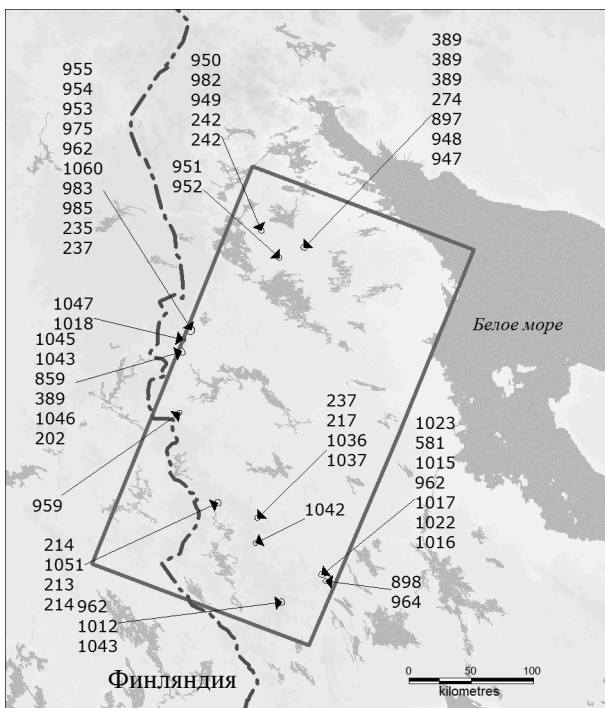


Рис. 2. Локализация точек базы данных биотопов (наземных описаний лесных растительных сообществ) в прямоугольном фрагменте геоинформационной модели

## Результаты верификации

После первого «механического» этапа сопоставления описания биотопа и спектрального класса геоинформационной модели локализация явно не совпадающих точек была уточнена с использованием полевых материалов и топокарт. В результате точки разделились на десять классов (рис. 1): 1 – сосняки зеленомошные на морене (8 описаний); 2 – сосняки брусничные/лишайниковые на флювиогляциальных отложениях (13); 3 – сосняки каменистые/скальные (1); 4 – сомкнутые ельники (6); 5 – низкополнотные хвойные леса (9); 6 – сосняки кустарничковые/багульниковые (1); 7 – припевающие сосняки зеленомошные (3); 11 – молодняки сосны на морене (1); 14 – молодняки сосны на флювиогляциальных отложениях (3); 40 – кустарниковая/низкоствольная древесная растительность (14).

Необходимо отметить, что рамки типа местообитаний, выделенных по эколого-динамическим характеристикам, достаточно узки и соответствуют рангу субассоциации, тогда как классы растительного покрова геоинформационной модели из-за неизбежных технических ограничений приборов дистанционного зондирования значительно более генерализованы. Можно условно принять, что спектральный класс приблизительно соответствует группе ассоциаций. После декомпозиции по разновременным данным и геоморфометрической модели ранг может снижаться до ассоциации.

В наибольшей степени на нынешнем этапе развития модели генерализован класс 40, о чем свидетельствует и наибольшее количество находящихся в нем точек биотопов. В этом классе оказываются самые различные типы кустарниковой растительности (в том числе на заболоченных почвах), а также молодняки с разного вида нарушениями, которые придают им мозаичную пространственную структуру, не выявляемую сканерами с разрешением в несколько десятков метров. Для детализации этого класса необходимо наличие ряда разновременных снимков, а также данные систем дистанционного зондирования более высокого разрешения (в первую очередь, цифровая модель высот).

С учетом вышесказанного для 51 точки из 54 (~96 %) обнаружилось совпадение модельных классов. Что касается трех оставшихся точек, то в одном случае сосняк багульниковый (класс 6) в действительности оказался елово-березовым молодняком на примитивных подзолах на скальном основании. В спектральном пространстве эти классы практически соприкасаются экотонными зонами. Кроме того, для данной террито-

рии в нашем распоряжении не было детальной геоморфометрической модели, наличие которой позволило бы избежать этой ошибки, поскольку сосняки багульниковые формируются на равнинных участках. Две точки, отнесенные к классам 1 и 2, фактически располагаются на холме, образованном озерными отложениями. Это нельзя считать «ошибкой», поскольку в условиях проточного увлажнения на озерных отложениях качество водно-минерального питания близко к таковому на морене, и здесь формируются высокополнотные сосняки, располагающиеся в спектральном пространстве в классе 1. Следует отметить, что в настоящее время этот класс также весьма генерализован (рис. 1), и, скорее всего, при более детальном изучении (накоплении данных) окажется возможным выделить такие сосняки в отдельный спектральный класс. Также не исключено, что сходные условия могут создаваться как на флювиогляциальных, так и на озерных песчаных отложениях, и расположенные в этих условиях сосняки будут отнесены к классу 2, декомпозиция здесь менее вероятна. В целом совпадение данных моделей оказалось значительно выше ожидаемого.

## Заключение

Завершая статью, мы хотим особо подчеркнуть тот факт, что проведена взаимная верификация моделей, создаваемых независимо друг от друга и принципиально различными методами, которая показала высокую степень их соответствия. Одним из наиболее существенных, на наш взгляд, результатов является то, что обе модели приводят к очень важному выводу – необходимости разделения сообществ, произрастающих на различных геологических образованиях (коренные основания, морена, флювиогляциальные и озерные отложения). Этот, казалось бы, очевидный момент игнорируется многими исследователями, о чем мы подробно писали ранее [Крышень, 2010]. Второе очень важное совпадение моделей – в отражении восстановительной динамики. Как эколого-динамическая, так и спектральная модель четко определяют два направления развития лесных сообществ после рубки – через смену пород и без таковой.

В целом мы констатируем, что проделанная работа показала правильность принципов выделения модельных классов лесов на территории Восточной Фенноскандии. Кроме этого, произошло взаимное обогащение моделей – получены новые данные по «содержимому» спектральных классов, расширено понимание организации спектрального про-

странства и его соответствия биогеоэкологической структуре. Подтвердились ранее полученные данные об отражении в спектральном пространстве осей эдафифитоэкологических координат, но в то же время выяснилась меньшая степень связи спектральной модели и типа четвертичных отложений.

Стали понятными пути сближения и совместного развития моделей. Наземные наблюдения, на основе которых строится эколого-динамическая модель, дают максимально детальную информацию об эдафифитоэкологических характеристиках местообитаний и очень приблизительную – об их пространственном распределении (структуре), тогда как на основе дистанционных данных получается геометрически точная цифровая карта генерализованных классов экосистем. По мере поступления новых наземных данных и использования различных систем дистанционного зондирования степень генерализации пространственных классов будет уменьшаться, способствуя созданию все более детальной структурно-функциональной модели таежных экосистем.

Геоинформационная модель, в свою очередь, также дает новый материал для развития эколого-динамической модели. Так, очевидно, что в спектральном пространстве (т. е. по отражательным характеристикам лесного полога) выделяются несколько подтипов черничных, брусничных и скальных типов леса. В каждом из них формируются соответствующие варианты структуры и видового состава почвенного покрова, и спектральный класс дает дополнительный объективный критерий для систематизации сообщества. Кроме того, геоинформационная модель позволит более целенаправленно подойти к выбору точек описания биотопов.

Исследования выполняются при частичной финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Отделения биологических наук РАН «Биологические ресурсы России: динамика в условиях глобальных климатических и антропогенных воздействий» и РФФИ (грант 12-07-00070-а).

## Литература

- Казимиров Н. И. Ельники Карелии. Л.: Наука, 1971. 140 с.
- Казимиров Н. И. Экологическая продуктивность сосновых лесов (математическая модель). Петрозаводск: КарНЦ РАН. 1995. 132 с.
- Качинский Н. А. Физика почв. М.: Высшая школа. 1965. 321 с.

*Крышень А. М.* Типы лесорастительных условий на автоморфных почвах в Карелии // Ботан. журн. 2010. Т. 95, № 3. С. 281–297.

*Крышень А. М.* Систематизация местообитаний и вопросы динамики лесов Восточной Финноскандии // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14, № 1(4). С. 1033–1038.

*Крышень А. М., Кузнецов О. Л.* Классификация местообитаний Карелии по признакам растительности // Растительность Восточной Европы: классификация, экология и охрана: мат-лы межд. науч. конф. Брянск, 2009 г. С. 113–118.

*Крышень А. М., Полевой А. В.* Классификация местообитаний: принципы и практическое применение // Актуальные проблемы геоботаники. III Всероссийская школа-конференция. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. Ч. 1. С. 264–268.

*Крышень А. М., Полевой А. В., Гнатюк Е. П. и др.* База данных местообитаний (биотопов) Карелии // Труды КарНЦ РАН. Сер. «Биогеография». Петрозаводск, 2009. Вып. 9, № 4. С. 3–10.

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

*Литинский П. Ю.* Геоинформационная модель наземных экосистем северотаежной подзоны Восточной Финноскандии // Труды КарНЦ РАН. Сер. «Биогеография». Петрозаводск, 2012. Вып. 13, № 1. С. 3–15.

*Погребняк П. С.* Основы лесной типологии. Киев: АН УССР, 1955. 456 с.

*Сукачев В. Н.* Избранные труды. Л.: Наука. 1972. Т. 1. 418 с.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### **Крышень Александр Михайлович**

и. о. директора, д. б. н.  
Институт леса Карельского научного центра РАН  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: kryshen@krc.karelia.ru  
тел.: (8142) 769601

### **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

### **Kryshen', Alexandr**

Forest Research Institute, Karelian Research Centre, Russian  
Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: kryshen@krc.karelia.ru  
tel.: (8142) 769601

### **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