## Литинский П.Ю.<sup>1</sup>

# **ЗD-МОДЕЛЬ СПЕКТРАЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВА СНИМКОВ LANDSAT** КАК ОСНОВА ГЕОМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ БОРЕАЛЬНЫХ ЭКОСИСТЕМ

### АННОТАЦИЯ

Описывается новый подход к использованию снимков Landsat, основанный на создании 3D-модели их спектрального пространства. Модель строится в осях *x-y-z*, где *x* и *y* – две первые главные компоненты логарифмированной матрицы снимка (каналы R, NIR, SWIR2), и z – индекс влажности MSI (отношение SWIR1 / NIR). Эмпирическим путем найденная трансформация более пригодна для бореальных экосистем, чем классическая Tasseled Cap. Сегментация спектрального пространства методом эллипсоидов обеспечивает более точное, по сравнению. с традиционными методами, выявление контуров экосистем. Показано, что в спектральном пространстве снимков северотаежной подзоны Восточной Фенноскандии представлены все основные типы биогеоценозов (комплексов четвертичные отложения + растительность), и их локализация соответствует экологической типологии. Четко просматриваются экологические ряды лесных автоморфных и гидроморфных экосистем, а также траектории процесса лесовосстановления после рубки, от появления растительности до молодняков, средневозрастных и спелых лесов. Для открытых болот локализация спектральных сегментов соответствует типу водно-минерального питания (олиготрофное или мезотрофное), и степени увлажнения поверхности. Принципиальное отличие данной модели от созданных традиционными методами в том, что результат определяется не схемой закладки ключевых участков, а объективным биофизическим параметром - положением экосистемы в спектральном пространстве. Спектральная модель представляет собой математически формализованный объект, описывающий количественные и качественные характеристики экосистем. Будучи развернутой в географическом пространстве, она превращается в оптимальную картографическую основу для планирования экологически сбалансированного природопользования для обеспечения устойчивого развития территории.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** геоматическое моделирование, таежные экосистемы, классификация снимков Landsat.

## Peter Yu. Litinsky<sup>2</sup>

# 3D MODEL OF THE SPECTRAL SPACE OF LANDSAT IMAGES AS THE BASIS OF THE BOREAL ECOSYSTEMS GEOMATIC MODEL

### ABSTRACT

A new approach to the use of the Landsat images based on 3D modeling of their spectral space is described. The model is built in the *x*-*y*-*z* axes, where *x* and *y* are the two first principal components of the image matrix (bands R, NIR, SWIR2) in logarithmic form and *z* is moisture stress index MSI (SWIR1 / NIR). Empirically found transformation is more suitable for boreal

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук», ул. Пушкинская, д. 11, 185910, Петрозаводск, Россия, *e-mail:* litinsky@sampo.ru

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Pushkinskaya str., 11, 185910, Petrozavodsk, Russia, *e-mail:* litinsky@sampo.ru

ecosystems than Tasseled Cap. Segmentation of the spectral space by the method of ellipsoids provides more accurate, in comparison with traditional methods, the delineation of the ecosystem contours. It is shown that in the spectral space of images of the northern taiga subzone of Eastern Fennoscandia all the main types of biogeocenoses (complexes of Quaternary deposits + vegetation) are represented, and their localization corresponds to ecological typology. The ecological series of forest automorphic and hydromorphic ecosystems are clearly visible, as well as the trajectories of reforestation after cutting, from the appearance of vegetation to young growth, middle-aged and mature forests. For mires, the localization of spectral segments corresponds to the type of water and mineral nutrition (oligotrophic or mesotrophic). The fundamental difference between this model and those created by traditional methods is that the result is determined not by the layout of training sites, but by an objective biophysical parameter, i.e. the position of the ecosystem in the spectral space. The spectral model is a mathematically formalized object which describes the quantitative and qualitative characteristics of the ecosystems. Being deployed in geographic space, it becomes an optimal cartographic basis for planning ecologically balanced nature management for sustainable development.

**KEYWORDS:** geomatic modeling, boreal ecosystems, Landsat images classification.

# введение

Устойчивое развитие территории может быть обеспечено лишь при понимании принципов функционирования ее природных систем. Прежде всего, необходима актуальная и достоверная информация об их структуре и динамике. В лесной зоне в качестве такой информации обычно используются данные учета лесного фонда. Однако эта информация предназначена для обеспечения хозяйственной деятельности, цель которой – получение древесины, поэтому она соответствующим образом структурирована, и важные экологические характеристики становятся весьма размытыми.

Актуальную информацию могут дать данные дистанционного зондирования – космические сканерные снимки. Наиболее распространенный подход к извлечению информации из снимков – так называемая классификация «с обучением», или «управляемая классификация», представляет собой формальную математическую экстраполяцию характеристик наземных ключевых участков на всю охваченную снимком территорию. Ключевые участки закладываются в соответствии со схемой классификации – некоей априорной типологией земной поверхности, определяемой конкретными задачами исследователей. Данный подход универсален, он может применяться для любых, как биотических, так и абиотических объектов. Снимок рассматривается как многомерная матрица, и для ее анализа применяются стандартные статистические методы. При этом биологическая информация – уровни сигнала в различных диапазонах спектра, определяемые типом и состоянием растительного покрова, практически не учитывается.

В экологических исследованиях более целесообразным представляется иной подход, позволяющий извлечь из снимка значительно большее количество информации. Предлагается идти к созданию модели растительного покрова не от априорной типологии, а от информации снимка – создать видимую трехмерную модель спектрального пространства, понять закономерности его организации, а затем интегрировать спектральную модель с данными о биогеоценотической структуре территории, полученными в результате детальных наземных исследований.

Описываемый подход сформировался в процессе создания геоматической модели наземных экосистем северотаежной подзоны Восточной Фенноскандии. Использовалась оригинальная методика моделирования спектрального пространства сканерных снимков

Landsat [Литинский, 2011]. Было установлено, что спектральная модель четко отражает естественную структуру растительного покрова, определяемую типом четвертичных отложений и условиями водно-минерального питания [Литинский, 2012, 2016]. В данной статье обобщаются методические аспекты, изложенные в указанных публикациях, а также описывается новый метод сегментации спектрального пространства.

# МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

## Природные условия территории

Территория (рис. 1) представляет собой типичный образец континентального оледенения. Четвертичный покров сформирован ледниковыми (моренными), флювиогляциальными песчаными, и песчано-глинистыми озерными отложениями. Значительны площади обнажений коренных пород Балтийского щита. Это обусловливает сложность гидрологических условий и высокую мозаичность растительного покрова. Состояние экосистем также весьма различно – от практически девственного до глубоко антропогенно трансформированного.

По лесорастительному районированию территория относится к среднетаежной подзоне. Около 65 % площади занято лесами, преобладающие породы – сосна обыкновенная и ель европейская. Береза пушистая доминирует во вторичных лесах на ранних стадиях восстановления. Торфяные болота, занимающие до четверти территории, представлены двумя основными типами: олиготрофными сфагновыми и мезотрофными осоково-сфагновыми [Волков и др., 1995; Biotic..., 2003].



Рис. 1. Локализация сцен сканерных снимков (path 184–188, row 13–15), используемых для создания модели Fig 1. Localization of the scenes of scanner images (path 184–188, row 13–15)

used for the model creation



Рис. 2. Упрощенная биогеоценотическая схема сосновых лесов территории: Цифрами 1–7 показаны экосистемы, положение которых в спектральном пространстве снимка приведено на рис. 5

Fig. 2. The biogeocenotic scheme of pine forests: Digits 1–7 are the reference points for comparison with the spectral space model shown in Fig. 5

#### Данные сканирования и программное обеспечение

Использовались снимки Landsat TM и ETM + 1988–2001 гг., взятые на сайте GLCF ftp://ftp.glcf.umd.edu/glcf/Landsat/WRS2. Стандартные операции пре- и постпроцессорной обработки снимков осуществляются с использованием ГИС-пакетов QGIS, GRASS, SAGA [www.qgis.org]. Создание модели спектрального пространства снимков и их классификация проводится с использованием описанного ниже программного модуля. Для 3D-визуализации применяется пакет gnuplot [www.gnuplot.info].

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

#### Традиционные методы классификации

Процесс управляемой классификации включает следующие стадии:

- составление схемы классификации (списка целевых категорий земной поверхности);
- закладка наземных ключевых участков в выбранных категориях;
- компьютерная обработка снимка (собственно классификация);
- оценка достоверности классификации.

Проблема в составлении схемы классификации состоит в том, что информация, содержащаяся в снимках, ввиду технических характеристик сканера лишь частично согласуется с представлениями, заложенными в типологии растительности [Пузаченко и др., 1998]. Особенно трудно составить адекватную схему классификации для лесов – наиболее сложно организованных наземных экосистем. Характеристика каждого ключевого участка содержит значительное количество основных параметров – породный состав, возраст, полнота, высота древостоя. Поэтому результаты обработки одного и того же снимка будут существенно различаться в зависимости от набора целевых категорий и локализации ключевых участков.

Закладка ключевых участков подразумевает определенную дискретность, тогда как растительный покров – целостная, континуальная, самоорганизующаяся физико-химическая система [Pignatti et al., 2002]. Выявить какие-либо закономерности континуальной системы, представленные в виде дискретных статистических показателей, таких как средняя величина, среднеквадратическое отклонение и т. д., практически невозможно. Представляется более целесообразным составлять схему классификации не априори, а исходя из объективных и графически визуализированных данных сканирования.

Наиболее часто для экстраполяции данных ключевых участков используется метод максимального правдоподобия, MLC [Richards, Xiuping, 1999]. Метод требует нормального распределения данных ключевых участков, поэтому приемлемые результаты достигаются только при значительном их количестве [Замятин, 2006; Шаталов и др., 2007]. Применяется также метод гиперпараллелепипедов, метод наименьшего расстояния (minimum distance) и ряд других. С конца XX в. получил распространение метод искусственных нейронных сетей, ANN [Kanellopoulos, Wilkinson, 1997; Zhou, Yang, 2008].

Для оценки достоверности полученных результатов проводится выборочная проверка на местности, которая по сути дела показывает, какой процент площади каждой категории соответствует категории ключевого участка. Насколько при этом соответствует действительности реальная форма объектов, остается неизвестным. Но в экологии важное значение имеет характер территориальной сопряженности экосистем, определяющий межэкосистемные связи, а в гидрологическом моделировании поверхностного стока необходимо совмещение контуров растительности с рельефом. Следовательно, требуется как можно более точное отображение пространственной структуры. Крайне важно это и при совмещении в единое покрытие мозаики разновременных снимков.

Принципиальный недостаток традиционного подхода в том, что при любом математическом методе обработки абстрактное многомерное спектральное пространство снимка остается «черным ящиком». Оно рассматривается как числовая информация, не имеющая биологического смысла. Исследователь не может оценить реальные размеры и расположение категорий, их пространственную сопряженность, то есть в прямом смысле слова действует вслепую, особенно при использовании методов MLC и ANN.

Между тем, спектральное пространство снимка Landsat достаточно просто визуализировать. Установлено, что информация шести спектральных каналов сканера о растительном покрове почти без потерь может быть сведена к трем основным компонентам (синтезированным каналам), характеризующим: 1) общую яркость; 2) количество фотосинтезирующей биомассы и 3) влагообеспеченность растительных клеток, соответственно brightness, greenness, wetness [Kauth, Thomas, 1976; Huang et al., 2002] (так называемая Tasseled Cap-трансформация). Для визуализации трехмерного пространства разработано множество программных средств, однако синтезированные каналы Tasseled Cap используются в основном лишь как исходная информация для той же управляемой классификации, или же для демонстрации тех или иных частных закономерностей в виде двух двухмерных графиков bightness/greenness и brightness/wetness [Cohen et al., 1995; Krankina et al., 2008].

#### Трансформация спектрального пространства

Таsseled Сар-трансформация обеспечивает оптимальное представление всех растительных экосистем, т. е. она пригодна, в том числе, и для создания модели спектрального пространства снимков таежных территорий. Однако здесь основной объект изучения – леса, имеющие средний уровень яркости, а основную часть спектрального пространства занимают наиболее яркие болота и вырубки. Сделать пространство более «компактным», одновременно расширив «лесную» область, можно путем логарифмирования матрицы снимка с последующим расчетом двух первых главных компонент (далее обозначаются LC1 и LC2 соответственно). Трансформация найдена эмпирическим путем [Литинский, 2011].

Ось LC1 практически идентична brightness, LC2 обратна greenness, т. е. с ее увеличением количество фотосинтезирующей биомассы снижается. В качестве третьей оси используется индекс стресса влажности MSI (отношение каналов SWIR1 и NIR), его величина обратна wetness – с его увеличением растет дефицит влаги фотосинтезирующих клеток. При такой трансформации спектральное пространство более просто организовано (описывается более простыми математическими уравнениями) и удобно для визуального анализа, чем при использовании Tasseled Cap (рис. 3). Для снимков Landsat ETM+ оси координат рассчитываются по формулам (*expressions* модуля GRASS r.mapcalc):

$$LC1 = 0,2793*\ln(b3) + 0,7786*\ln(b4) + 0,5619*\ln(b7)$$
  

$$LC2 = 0,5887*\ln(b3) - 0,6012*\ln(b4) + 0,5404*\ln(b7)$$
  

$$MSI = b5/b4,$$

где b3-b7 – файлы соответствующих каналов снимка; ln – натуральный логарифм.



Рис. 3. Сравнение Tasseled Cap (слева) и LC1-LC2-MSI трансформаций: облака точек одинаковых болотных (1 и 4) и лесных (2 и 3) участков Fig. 3. The comparison of Tasseled Cap (left) and LC1-LC2-MSI transformations: signature clouds of the same mire (1 and 4) and forest (2 and 3) plots

#### Сегментация спектрального пространства

Для определения положения и размеров эллипсоидного сегмента каждой категории облако точек проецируется на плоскость LC1-LC2 (x и y, соответственно). Направление главной оси эллипса рассчитывается по линии регрессии y = ax + b (рис. 4, справа). Размеры эллипса **l**, **h** определяются по координатам максимально удаленных от центра облака точек в системе координат, ось абсцисс которой параллельна линии регрессии. Положение центральной плоскости эллипсоида в размерности MSI (z) рассчитывается по уравнению регрессии от двух переменных z = cx + dy + e (рис. 4, слева).

Таким образом, при данном способе сегментации точно фиксируется форма категории, ее размеры и положение в пространстве. В традиционных методах задаются лишь координаты центра категории и ее некие габаритные размеры, а форма принимается соответствующей параллелепипеду или шару, в зависимости от метода (parallelepiped, minimum distance, MLC).



Рис. 4. Схема вычисления параметров сегментации Fig. 4. The scheme for calculating segmentation parameters

Для обработки снимка согласно приведенным на рис. 4 параметрам в пределах эллипса задаются несколько точек (например, две в центрах эллипса и 4–8 по его периметру), 3D-координаты которых служат параметрами для классификации методом минимального расстояния. Для реализации этого алгоритма был разработан специальный программный модуль. На вход подается текстовый файл LC1-LC2-MSI (облако красных точек на рис. 4 слева); на выходе – текстовые файлы, содержащие: 1) параметры *x*, *y*, *a*, *l*, *h*, *c*, *d*, *e*; 2) массив 3D-координат огибающей эллипсоида (синяя линия на рис. 4 слева); 3) 3D-координаты точек для классификации снимка. Исходные облака для каждой категории могут быть получены, например, с использованием модуля GRASS r.what.

### Модель спектрального пространства таежных экосистем

Экосистемы спелых лесов формируют в спектральном пространстве V-образную структуру (рис. 5, оси A и B), почти полностью совпадающую по форме с биогеоценотической схемой, представленной выше на рис. 2. В основании располагаются зеленомошные сосняки (1) и ельники (8) моренных гряд. Здесь обеспечиваются оптимальные условия по увлажнению и наличию минеральных питательных веществ. Для упрощения показаны лишь центры эллипсоидов категорий.

По оси А сухих местообитаний (1–3–4) с недостаточным увлажнением и минеральным питанием выстраиваются сосняки брусничные (3) флювиогляциальных равнин, затем идут сосняки каменистые / скальные (4) на выходах кристаллических пород, с моренным чехлом небольшой мощности. Класс 2 можно рассматривать как правую часть сегмента 1 – смешанные сосново-еловые леса с низкой сомкнутостью полога, занимающие более бедные по сравнению с классом 1 местообитания.

На оси В гидроморфных местообитаний (1–5–6–7) с избыточным застойным увлажнением располагаются сосняки багульниковые (5), затем сосняки сфагновые (7) и – несколько в стороне – осоково-сфагновые (6). Крупные массивы таких лесов обычно располагаются на озерных равнинах, небольшие фрагменты – в любых недостаточно дренированных депрессиях.

В возникающих на местах вырубок лесах четко вырисовываются траектория восстановительной динамики от появления растительности (11) до молодняков (12–13), средневозрастных (14) и приспевающих (15) лесов.

Для болотных экосистем положение спектральных сегментов также определяется типом водно-минерального питания – олиготрофное (21–24) или мезотрофное (41–44), и степенью увлажнения поверхности (номер класса уменьшается с ее повышением). Четко обособленное положение от лесных и болотных экосистем занимают сегменты травянистой растительности (51–55), дороги, карьеры и другие лишенные растительности категории (81–84).

Таким образом, выделяются все основные типы биогеоценозов, каждый из которых характеризуются определенными величинами биомассы, пулом углерода, составом древостоя, трофностью и влажностью почвы, типом напочвенного покрова и т. д.



Рис. 5. Модель спектрального пространства снимка Landsat (номера классов экосистем приведены в тексте)Fig. 5. The model of the spectral space of the Landsat image (the numbers of ecosystem classes are given in the text)

Модель спектрального пространства дает возможность строгого математического описания траекторий, как типов местообитаний (структуры), так и различных сукцессионных стадий (рис. 6). Линия в 3D-пространстве описывается системой двух уравнений вида:

$$y = f_1(x);$$
  
 $z = f_2(x, y);$ 

где *х*, *y*, *z* – LC1, LC2, MSI, соответственно;  $f_p f_2$  – полиномиальная регрессия 1–3 степени.

Принцип описания траектории тот же, что и для построения огибающей эллипсоидов отдельных категорий: первое уравнение описывает линию проекции траектории на плоскость LC1–LC2, второе – положение траектории в третьем измерении – MSI. Эти уравнения могут использоваться как передаточные функции для расчета различных экосистемных параметров – биомасса, пул углерода и т. д.



Рис. 6. Траектория лесовозобновления в спектральном пространстве. Номера классов те же, что и на рис. 5 Fig. 6. Trajectory of reforestation in the spectral space. The class numbers are the same as in Fig. 5.

Рис. 5 и 6 показывают, что спектральное пространство снимка Landsat представляет собой сложную систему областей и траекторий, которые могут быть достаточно адекватно интерпретированы в экологическом смысле. Возможность трехмерной визуализации пространства, рассмотрения его с любой желаемой стороны позволяет выявить закономерности, которые невозможно обнаружить традиционными методами. Это позволяет выявить категории, разделение которых невозможно вследствие технических ограничений сканера. Модель спектрального пространства может также наглядно показать причины ошибочных результатов управляемой классификации. Теоретически, управляемая классификация может дать достаточно достоверную карту растительного покрова – но лишь при наличии ключевых участков, представляющих все категории земной поверхности, плотно заполняющие все спектральное пространство, в количестве, обеспечивающем статистическую достоверность для каждой категории. Очевидно, что эта задача практически неразрешима, в том числе и потому, что разработать столь полную схему закладки ключевых участков без модели спектрального пространства невозможно.

Однако даже если бы она была каким-то образом решена, полученная карта была бы дискретна в соответствии с заданной схемой классификации. При наличии же модели спектрального пространства становится возможной интерполяция промежуточных характеристик: логично предположить, что в промежутке спектрального пространства между сегментами с известными свойствами будут располагаться области переходных зон (экотонов). Промежуточный класс можно получить путем простого добавления нескольких строк с координатами LC1–LC2–MSI в таблицу статистик для *minimum distance classifica-tion*. Таким образом, классификация становится действительно *управляемой*.

Традиционная методика классификации однонаправлена – от ключевых участков ко всему снимку. Спектральная модель обеспечивает позиционированную взаимосвязь между географическим и спектральным пространствами, т. е. при отсутствии наземных данных появляется возможность установить, где на местности находятся экосистемы, соответствующие данной области спектрального пространства.

Эти возможности определяют и методику создания геоматической модели растительного покрова. Из разовой акции она превращается в постепенный исследовательский процесс выяснения соответствия между областями спектральной модели и наземными данными. Схема классификации перестает быть наперед заданной, а формируется и уточняется в процессе моделирования спектрального пространства, иными словами, спектральная модель и представляет собой основу схемы классификации. Выборочная оценка достоверности становится не конечным, а промежуточным этапом формирования модели.

Основное, принципиальное отличие описываемой модели экосистем от созданных традиционными методами в том, что результат определяется не выбором наземных ключевых участков, который в той или иной степени субъективен, а объективным, *измеряемым* биофизическим параметром – положением экосистемы в спектральном пространстве снимка. Модель спектрального пространства представляет собой математически формализованный объект, описывающий количественные и качественные характеристики биогеоценозов. Будучи «развернутой» в географическом пространстве, она превращается в карту, которая включает все основные классы первичных экосистем, а также различные варианты и стадии их естественных и антропогенных нарушений, с детализацией, примерно соответствующей масштабу 1 : 25 000 (рис. 7). По структуре информации геоматическая модель близка к планам лесонасаждений, которые являются первичной основой для данных учета лесного фонда – т. е. тем данным, которые до настоящего времени использовались для описания лесов территории. Таким образом, в распоряжении исследователей оказывается не прошедшая несколько уровней генерализации хозяйственно-

ориентированная, а исходная биологическая информация. Кроме того, геоматическая модель обеспечивает значительно более детальную, по сравнению с планами лесонасаждений, информацию о болотах, занимающих большую часть (до 30 %) территории.

Верификация геоматической модели проводилась путем сопоставления с независимо создаваемой базой данных экотопов с координатной привязкой, и с учетом различной степени генерализации соответствие оказалось почти стопроцентным [Крышень, Литинский, 2013].



Рис. 7. Фрагмент векторного слоя геоматической модели. Координаты центра 64.5491 N, 30.6295 E. Номера категорий те же, что и на рис. 5 Fig. 7. A fragment of the vector layer of vegetation model. Coordinates of the center 64.5491 N, 30.6295 E. The numbers of classes are the same as in Fig. 5

### выводы

Описанный подход к обработке сканерных снимков представляет собой интеграцию двух массивов информации:

1 – графически выраженного представления о биогеоценотической структуре территории, сформированного в результате наземных исследований;

2 – трехмерной модели спектрального пространства, созданной на основе измеренных сканером биофизических характеристик экосистем.

Для создания модели спектрального пространства используется трансформация LC1–LC2–MSI, более подходящая для бореальных экосистем, чем Tasseled Cap. Сегментация спектрального пространства методом эллипсоидов обеспечивает более точное, по сравнению с традиционными методами, выявление пространственной конфигурации контуров экосистем.

В северотаежной подзоне Восточной Фенноскандии локализация сегментов лесных экосистем в спектральном пространстве почти полностью совпадает с биогеоценотической схемой лесов. Тип биогеоценоза определяет все его характеристики: тип почвы, типы леса, его породный состав и продуктивность и т. д. На разновременных снимках по положению в спектральном пространстве выявляется объективная возрастная структура лесов. Таким образом, созданная на основе модели спектрального пространства геоматическая модель представляет собой наиболее адекватную картографическую основу для планирования экологически сбалансированного природопользования для обеспечения устойчивого развития. В практическом смысле очень важно, что необходимые для реализации этих задач сканерные снимки и программные средства общедоступны и бесплатны.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках Государственного задания Института водных проблем Севера КарНЦ РАН.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The work was carried out within the framework of the State task of the Northern Water Problems Institute KarRC RAS.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. *Замятин А.В.* Анализ динамики ландшафтного покрова на основе данных дистанционного зондирования Земли // Исследование Земли из космоса. 2006. № 6. С. 50–64.

3. *Крышень А.М., Литинский П.Ю.* Сопоставление и взаимная верификация геоинформационной и эколого-динамической моделей разнообразия лесных экосистем // Труды КарНЦ РАН. 2013. № 2. С. 86–91. http://forestry.krc.karelia.ru/publ.php?id=10572

4. *Литинский П.Ю*. Классификация сканерных снимков методом моделирования спектрального пространства // Труды КарНЦ РАН. 2011. № 5. С. 45–54. http://forestry.krc.karelia. ru/publ.php?id=8809

5. *Литинский П.Ю*. Геоинформационная модель наземных экосистем северотаежной подзоны восточной Фенноскандии // Труды КарНЦ РАН. 2012. № 1. С. 3–15. http://forestry. krc.karelia.ru/publ.php?id=9352

6. *Литинский П.Ю*. Геоинформационная модель наземных экосистем Прибеломорской низменности // Труды КарНЦ РАН. 2016. № 3. С. 3–9. DOI: 10.17076/bg221.

7. Пузаченко Ю.Г., Алещенко Г.М., Молчанов Г.С., Пузаченко А.Ю. Анализ аэрофотоизображения для выделения типов территориальных структур // Материалы второго всерос. совещ. «Аэрокосмические методы и геоинформационные системы в лесоведении и лесном хозяйстве». М., 1998. С. 156–159.

8. Шаталов А.В., Жирин В.М., Сухих В.И. и др. Анализ информативности космических снимков высокого разрешения QuickBird // Междунар. конф. «Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве». М., 2007. С. 168–174.

9. Biotic diversity of Karelia: conditions of formation, communities and species. Petroza-vodsk: Karelian Research Centre of RAS, 2003. 244 p.

10. *Cohen W.B., Spies T.A., Fiorella M.* Estimating the age and structure of forests in a multi-ownership landscape of western Oregon, U.S.A. Int. J. Remote Sensing. 1995. V. 16, No 4. P. 721–746.

11. *Hirata Y., Takahashi T.* Image segmentation and classification of Landsat Thematic Mapper data using a sampling approach for forest cover assessment. Can. J. For. Res. 41(1). P. 35–43. DOI: 10.1139/X10-130.

12. *Huang C., Yang Wylie L., Homer Collin, Zylstra G.* Derivation of a Tasselled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance: USGS Staff - Published Research. 2002. Paper 621. http://digitalcommons.unl.edu/usgsstaffpub/6

13. *Kanellopoulos I., Wilkinson G.G.* Strategies and best practice for neural network image classification // International Journal of Remote Sensing. 1997. 18(4). P. 711–725.

14. *Kauth R.J., Thomas G.S.* The Tasseled Cap a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat // Proceedings on the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, 4b: 41–51, 6 June 2 July 1976 (West Lafayette, Indiana: LARS, Purdue University).

15. *Krankina O.N., Pflugmacher D., Friedl M., Cohen W.B., Nelson P., Bacini A.* Meeting the challenge of mapping peatlands with remotely sensed data, Biogeosciences Discuss. 2008. 5. P. 2075–2101. DOI: 10.5194/bgd-5-2075-2008.

16. *Pignatti S., Box E.O., Fujiwara K.* A new paradigm for the XXIth century // Ann. Bot. 2002. V. 2. P. 3057.

17. *Richards J.A., Xiuping Jia.* Remote Sensing Digital Image Analysis. Berlin, Springer, 1999. 400 p.

18. *Zhou L., Yang X.* Use of neural networks for land cover classification from remotely sensed imagery, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. V. XXXVII. Part B 7. Beijing. 2008. P. 575–578.

### REFERENCES

1. Biotic diversity of Karelia: conditions of formation, communities and species. Petrozavodsk: Karelian Research Centre of RAS. 2003. 244 p.

2. *Cohen W.B., Spies T.A., Fiorella M.* Estimating the age and structure of forests in a multiownership landscape of western Oregon, U.S.A. Int. J. Remote Sensing. 1995. V. 16, No 4. P. 721–746.

3. *Hirata Y., Takahashi T.* Image segmentation and classification of Landsat Thematic Mapper data using a sampling approach for forest cover assessment. Can. J. For. Res. 41(1). P. 35–43. DOI: 10.1139/X10-130.

4. *Huang C., Yang Wylie L., Homer Collin, Zylstra G.* Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance: USGS Staff - Published Research. 2002. Paper 621. http://digitalcommons.unl.edu/usgsstaffpub/6

5. *Kanellopoulos I., Wilkinson G.G.* Strategies and best practice for neural network image classification. International Journal of Remote Sensing. 1997. 18(4). P. 711–725.

6. *Kauth R.J., Thomas G.S.* The Tasseled Cap a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. In: Proceedings on the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, 4b: 41–51, 6 June 2 July 1976 (West Lafayette, Indiana: LARS, Purdue University).

7. *Krankina O.N., Pflugmacher D., Friedl M., Cohen W.B., Nelson P., Bacini A.* Meeting the challenge of mapping peatlands with remotely sensed data, Biogeosciences Discuss. 5. 2075–2101. DOI: 10.5194/bgd-5-2075-2008.

8. *Kryshen A., Litinsky P.* Comparison and mutual verification of the geoinformation and the ecological dynamics models of forest ecosystems diversity. Trudy KarNTS RAN. 2013. No 2. P. 86–91. http://forestry.krc.karelia.ru/publ.php?id=10572&plang=e (in Russian).

9. *Litinsky P.* Multispectral imagery classification method based on spectral space modeling. Trudy KarNTS RAN. 2011. No 5. P. 45–54. http://forestry.krc.karelia.ru/publ.php?id=8809 (in Russian).

10. *Litinsky P.* Geoinformation model of Eastern Fennoscandia northern taiga ecosystems. Trudy KarNTS RAN. 2012. No 1. P. 3–15. http://forestry.krc.karelia.ru/publ.php?id=9352&plang=e (in Russian).

11. *Litinsky P.* Geoinformation Model of Terrestrial Ecosystems of the White Sea Lowland. Trudy KarNTS RAN. 2016. No 3. C. 3–9. DOI: 10.17076/bg221 (in Russian).

12. *Pignatti S., Box E.O., Fujiwara K.* A new paradigm for the XXIth century. Ann. Bot. 2002. V. 2. P. 3057.

13. *Puzachenko Yu.G., Aleshchenko G.M., Molchanov G.S., Puzachenko A.Yu.* Analysis of aerophoto images for distinguishing the types of territorial structures. Proc of 2nd all-Russian conference "Aerospace methods and geoinformation systems in forest science and forestry economy". M., 1998. P. 156–159.

14. *Richards J.A., Xiuping Jia.* Remote Sensing Digital Image Analysis. Berlin, Springer, 1999. 400 p.

15. *Shatalov A.V., Zhirin V. M., Sukhikh V.I. et al.* Analysis of the information content of high-resolution QuickBird images. Int Conf "Aerospace methods and geoinformation technologies in forest science and forestry". M., 2007. P. 168–174.

16. *Volkov A.D., Gromtzev A.N., Erukov G.V. et al.* Ecosystems of north-west taiga landscapes (structure, dynamics). Petrozavodsk: KarNTS RAN, 1995. 194 p. (in Russian).

17. *Zamyatin A.V.* Analysis of landscape cover dynamics on the basis of data of remote sensing of the Earth. Research of the Earth from Space. 2006. No 6. P. 50–64.

18. *Zhou L., Yang X.* Use of neural networks for land cover classification from remotely sensed imagery, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. V. XXXVII, part B7. Beijing. 2008. P. 575–578.