

УДК 528.8+681.3:574.4

ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ ПРИБЕЛОМОРСКОЙ НИЗМЕННОСТИ

П. Ю. Литинский

Институт леса Карельского научного центра РАН

Приводятся результаты создания геоинформационной модели наземных экосистем прибалтийской низменности методом моделирования спектрального пространства снимков Landsat. Установлено, что спектральная модель четко отражает естественную структуру растительного покрова, определяемую типом четвертичных отложений и условиями водно-минерального питания. Применена усовершенствованная методика 3D-визуализации спектральной модели, которая позволила выявить несколько классов заболоченных сосняков и типов болот низменности. Описываемый фрагмент завершает первый этап создания геоинформационной модели наземных экосистем северотаежной подзоны Восточной Фенноскандии. Принципиальное отличие данной модели от созданных традиционными методами «классификации с обучением» заключается в том, что результат определяется в первую очередь не количеством наземных ключевых участков, выбор которых в той или иной степени субъективен, а от объективного, *измеряемого* биофизического параметра – положения экосистемы в спектральном пространстве сканерного снимка.

Ключевые слова: геоинформационное моделирование; таежные экосистемы; дистанционное зондирование; четвертичные отложения.

P. Yu. Litinsky. GEOGRAPHICAL INFORMATION MODEL OF TERRESTRIAL ECOSYSTEMS OF THE WHITE SEA LOWLAND

The results of building the geoinformation model of terrestrial ecosystems by Landsat spectral space modeling are reported. The spectral space model accurately reflects the natural structure of the forest and mire cover, which is related to the type of Quaternary deposits and the type of water and mineral nutrition. An enhanced technique for 3D visualization of the spectral model was applied, allowing to identify several classes of paludified pine forests and types of mires in the lowland. The fragment described in the paper completes the first phase of building the geoinformation model of terrestrial ecosystems of the north-taiga subzone of Eastern Fennoscandia. The fundamental difference of this model from the traditional ones, generated by methods of “supervised classification”, is that instead of the number of key sites on the ground, chosen more or less subjectively, the result here depends on an objective, measurable biophysical parameter, i. e. the position of the ecosystem in the spectral space of the scanner image.

Keywords: geographical information modeling; boreal ecosystems; remote sensing; Quaternary deposits.

Введение

Создание геоинформационной модели наземных экосистем северотаежной подзоны Восточной Фенноскандии на основе космических снимков **Landsat** началось с центральной части Карелии, от границы со среднетаежной подзоной до Северного полярного круга. Использовалась оригинальная методика моделирования спектрального пространства сканерного снимка [Литинский, 2011], разработанная как альтернатива традиционному подходу «классификации с обучением» [Richards, Xiuping, 1999; Замятин, 2006; Шаталов и др., 2007; Hirata, Takahashi, 2011]. Было установлено, что спектральная модель четко отражает естественную структуру растительного покрова, определяемую типом четвертичных отложений и условиями водно-минерального питания [Литинский, 2012]. Затем по той же методике был создан фрагмент модели, включающий низкогорья хребта Маанселькя, где были выявлены спектральные траектории высотной зональности экосистем [Литинский, 2013]. Верификация модели проводилась путем сопоставления с независимо создаваемой базой данных экотопов. С учетом степени генерализации соответствие оказалось почти стопроцентным [Крышень, Литинский, 2013].

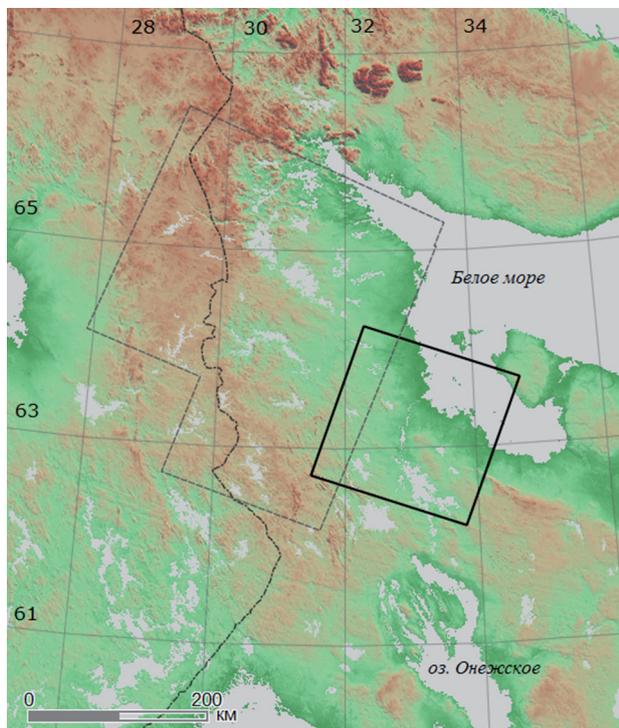


Рис. 1. Локализация сцен сканерных снимков. Сплошной линией показан описываемый фрагмент геоинформационной модели, пунктиром – ранее созданные участки

В данной статье приводятся результаты моделирования прилегающей к центральной части с востока Прибеломорской низменности, и, таким образом, завершается описание первого этапа создания геоинформационной модели северотаежной подзоны.

На двух первых фрагментах основное внимание уделялось лесным экосистемам. Основную же часть Прибеломорской низменности занимают болота, спектральные сегменты которых имеют значительно более сложную конфигурацию и большие размеры. Используемая ранее сегментация спектрального пространства методом призм [Литинский, 2011] достаточно эффективна при классификации лесных экосистем, но не обеспечивает приемлемой точности передачи контуров болот, поэтому была разработана методика, основанная на 3D-визуализации спектральной модели и классификации стандартным методом минимального расстояния. Ее применение существенно повышает и точность выделения контуров лесных экосистем.

Объекты и методика

Территория расположена в юго-восточной части северотаежной подзоны, у границы со средней тайгой (рис. 1).

Для создания первых фрагментов модели использовались снимки Landsat 7 (сенсор ETM+). Для Прибеломорской низменности не удалось найти безоблачные сцены этого сканера, поэтому модель формировалась на основе снимка сканера Landsat TM от 19.07.1987, path 184 row 15. Перекрывающаяся область снимков использовалась для переноса спектральной модели – классифицированный фрагмент первого снимка использовался как файл ключевых участков для второго. Все снимки приведены к проекции utm36/wgs84, однако для более точного переноса модели файл ключевых участков был ректифицирован по контрольным точкам.

Программная реализация

Использовались свободно доступные в интернете ГИС-пакеты **QGIS**, **GRASS**, **SAGA** и пакет создания графиков **gnuplot**. Синтез обзорного RGB-изображения снимка и создание полигонов ключевых участков осуществлялись в **QGIS**. Трехмерная модель спектрального пространства строится в осях x , y , z , где x и y – две первые главные компоненты (LC1 и LC2) логарифмированной матрицы минимально взаимно коррелирующих каналов снимка – R, NIR и SWIR2; z – индекс стресса влажности

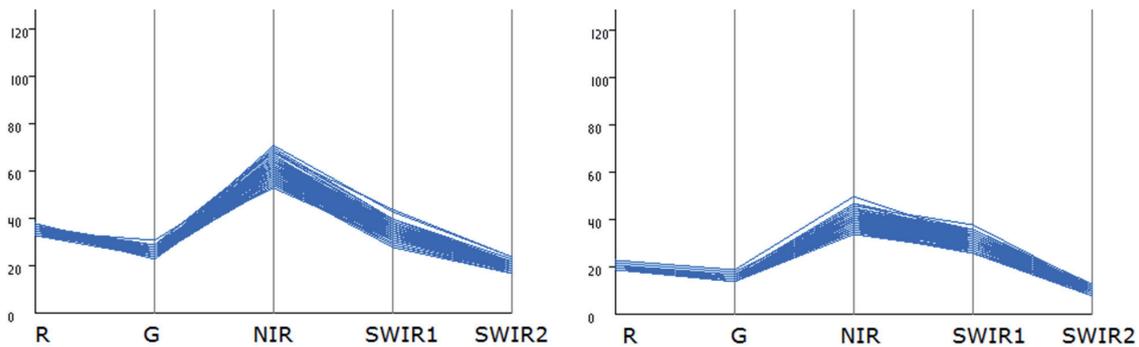


Рис. 2. Сигнатуры одного и того же участка сосняка зеленомошного, полученного сенсорами ETM+ (слева) и TM (справа).

Ось x – каналы сканера, y – DN – digital number (значение байта канала снимка)

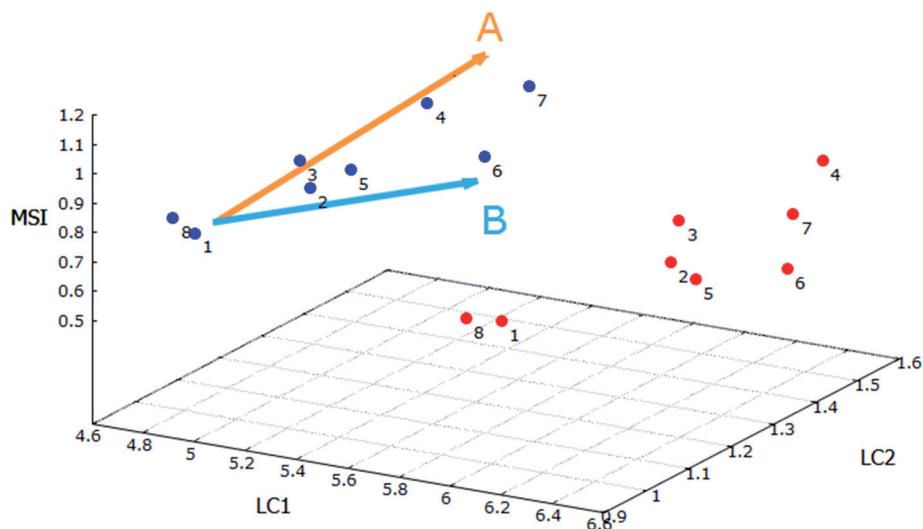


Рис. 3. Локализация центров основных классов лесных экосистем в спектральном пространстве сканеров ETM+ (красные точки) и TM (синие). Стрелками А и В показаны оси эдафо-фитоценотической схемы типов леса. Номера классов:

Автоморфные (А) в порядке увеличения дефицита влаги и элементов питания:

1. Сосняки зеленомошные (черничные, брусничные) моренных гряд.
2. Низкополнотные сосняки и ельники с различной долей участия обеих пород.
3. Сосняки брусничные/лишайниковые флювиогляциальных равнин.
4. Сосняки скальные/каменистые.

К автоморфной оси относится также класс 8 – высокополнотные монодоминантные ельники, приуроченные к склонам и подножиям моренных гряд.

Гидроморфные (В) в порядке увеличения степени заболоченности:

5. Сосняки багульниковые/кустарничковые.
6. Сосняки осоково-сфагновые (окрайки мезотрофных болот).
7. Сосняки сфагновые (окрайки олиготрофных болот).

MSI. При такой трансформации спектральное пространство представляется более просто организованным и удобным для анализа таежных экосистем, чем при использовании универсальной Tasseled Cap-трансформации [Литинский, 2011; Litinsky, 2014].

LC1 характеризует общую яркость снимка, LC2 обратно коррелирует с количеством фотосинтезирующей биомассы. Индекс MSI представляет собой отношение каналов SWIR1 и NIR, с его увеличением растет дефицит влаги фотосинтезирующих клеток. Расчет

осей проводился модулем GRASS **r. mapcalc** по формулам (*expression*):

«LC1=.1699*ln (R)+.7591*ln (NIR)+.6283*ln (SWIR2)»
 «LC2=.6383*ln (R)-.5705*ln (NIR)+.5166*ln (SWIR2)»
 «MSI=SWIR1/NIR»

где R, NIR, SWIR1, SWIR2 – имена файлов каналов 3, 4, 5, 7 Landsat ETM+ соответственно; ln – натуральный логарифм.

Коэффициенты компонент рассчитаны модулем компонентного анализа **r. pca**, сигнатуры ключевых участков (массивы координат

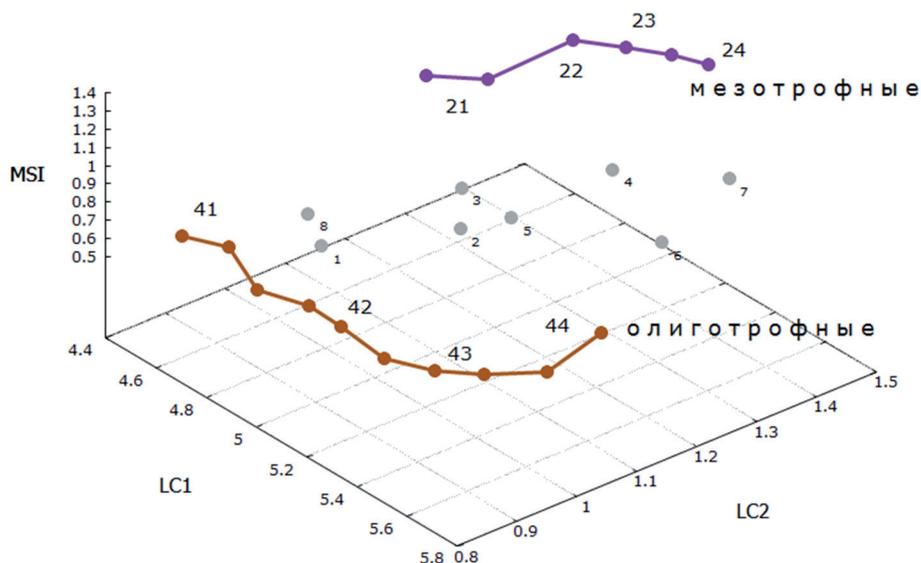


Рис. 4. Спектральные сегменты открытых болот (21–24 и 41–44). 1–8 – классы лесных экосистем

LC1-LC2-MSI) получены модулем **r. what**. Модель спектрального пространства представляет собой таблицу с четырьмя полями: LC1-LC2-MSI-категория. Для ее 3D-визуализации и назначения центров классов категорий применялся пакет **gnuplot**. Классификация снимка осуществлялась модулем **imagery_classification** пакета SAGA (метод *Minimum Distance*, режим *Get statistics from table*). Это позволяет корректировать положение центров классов путем редактирования таблицы, назначать промежуточные классы, т. е. делает классификацию в действительном смысле «управляемой».

Наземные данные

В качестве ключевых участков использовались архивные материалы Института леса КарНЦ РАН – ландшафтные профили, аэрофотоснимки, данные маршрутных исследований, а также планы лесонасаждений и снимки сканеров сверхвысокого разрешения с сайтов Google, Yandex, Bing, Wikimapia.

Результаты

Сенсоры TM и ETM+ имеют одинаковые спектральные диапазоны, но разную чувствительность в каждом из них, поэтому сигнатуры одних и тех же участков заметно различаются, особенно в 5 канале (SWIR1), от которого зависит значение MSI (рис. 2).

Разница в значениях MSI обуславливает смещение спектральной модели TM вверх относительно ETM+, несколько отличаются и конфигурации моделей, однако в том и другом случае четко просматриваются две выявленные на

ранее созданных фрагментах эдафо-фитоценоотические оси автоморфных (А) и гидроморфных (В) местообитаний (рис. 3).

На рисунке для наглядности показаны только центры сигнатур (облаков точек) категорий. В действительности сигнатура однородного участка растительного покрова образует в спектральном пространстве сплюснутый в вертикальном направлении эллипсоид, наклоненный к плоскости LC1-LC2 («сплюснутый» означает, что обычно вариация значений MSI значительно меньше, чем LC1 и LC2).

Для классов 6 и 7, представляющих собой экотоны между лесными и болотными экосистемами, возможно выделение нескольких градаций по полноте древостоя – участки с большей полнотой располагаются слева от центра класса, с меньшей, соответственно, справа.

Для открытых болот положение спектральных сегментов определяется типом водно-минерального питания (олиготрофное/мезотрофное) и степенью увлажнения поверхности. Принципиально различный характер растительного покрова данных типов болот определяет их положение в спектральном пространстве с противоположных сторон от сегмента лесных экосистем (рис. 4). С увеличением влажности поверхности общая яркость уменьшается, поэтому топи (классы 21 и 41) расположены в левой (с минимальными значениями LC1), а наиболее сухие – в правой части болотных сегментов (классы 24 и 44). Соответственно, справа налево снижаются и значения MSI.

Четко обособленное от лесных и болотных экосистем положение занимают сегменты травянистой растительности, карьеры и другие лишённые растительности категории. Частично

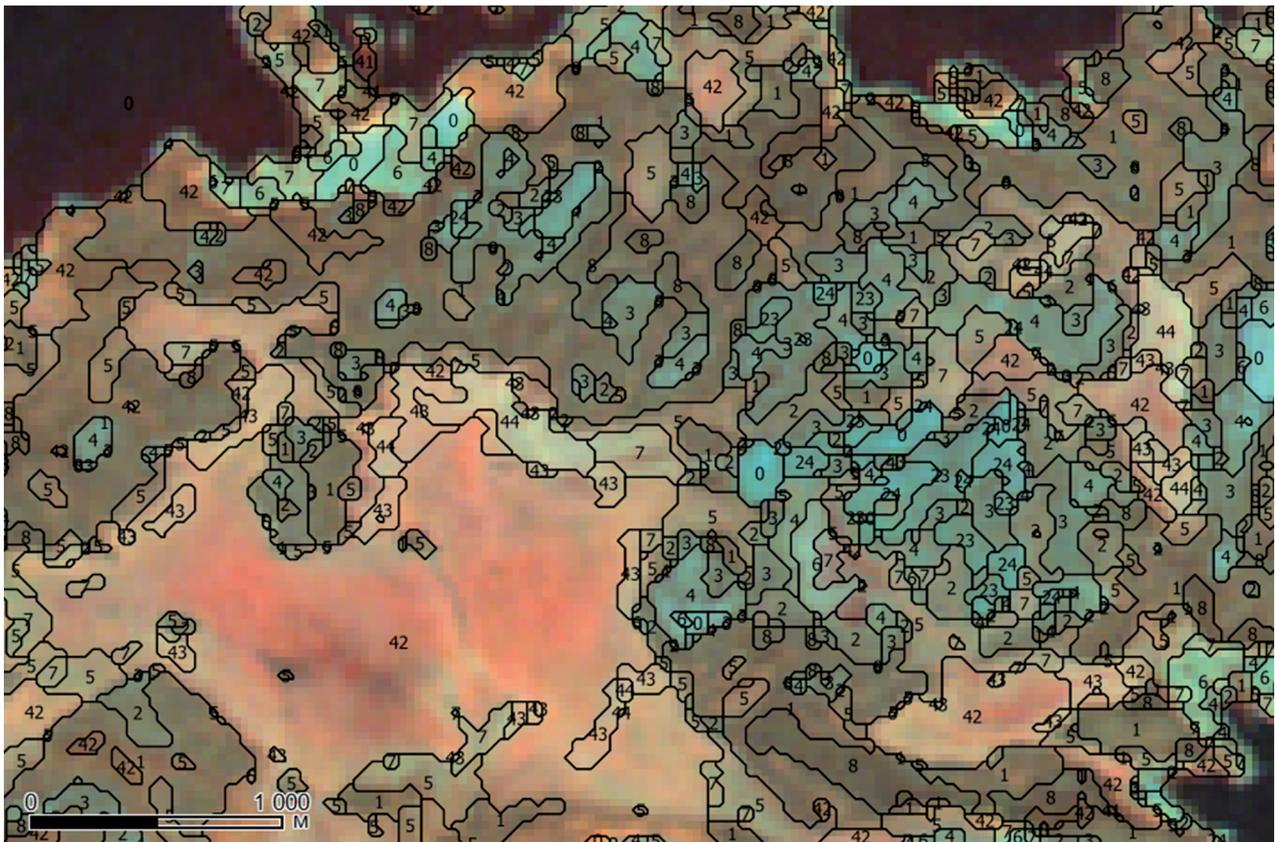


Рис. 5. Фрагмент векторного слоя геоинформационной модели. Номера классов экосистем соответствуют таковым на рис. 3 и 4. Растровая подложка – RGB-синтез из инфракрасных каналов снимка (NIR, SWIR1 и SWIR2). Координаты центра – 64.704N, 34.9229E

пересекаются спектральные сегменты вырубок и гарей различной давности, с одной стороны, и некоторых сухих участков мезотрофных болот (класс 24), с другой, но вырубки и гари в любом случае нужно выявлять по разновременным снимкам.

Область между сухими (с максимальными значениями LC1) сегментами олиготрофных и мезотрофных болот занимает различная растительность кустарникового типа: низкоствольные осинники, ивняки и т. п., произрастающие в основном на антропогенно нарушенных землях. Общая площадь их невелика, до двух процентов территории.

Приведенные на рис. 3 и 4 категории занимают более 95 процентов площади описываемой территории. Классификация снимка по этим категориям позволяет получить карту (геоинформационную модель) с детализацией масштаба примерно 1 : 25000 (рис. 5).

Заключение

В процессе создания геоинформационной модели описываемой территории определены спектральные характеристики основных

классов лесных и болотных экосистем морских равнин, в результате чего получена цифровая карта, не имеющая аналогов по детальности и геометрической точности. Разработана методика 3D-визуализации спектральной модели, которая позволяет выделять не только отдельные типы экосистем, а континуальные экологические ряды лесных и болотных биоценозов в связи с типами четвертичных отложений и условиями водно-минерального питания, с различной степенью дискретности. С ее помощью выявлены несколько классов низкополнотных сфагновых и осоково-сфагновых сосняков. Установлено, что модели спектрального пространства снимков сканеров TM и ETM+ имеют сходную конфигурацию, что позволяет создавать целостную модель больших территорий с использованием снимков разных типов сенсоров и дат съемки. Работа над моделью данного фрагмента позволила скорректировать методику и уточнить ранее полученные результаты для всей северотаежной подзоны.

Таким образом, завершен первый этап формирования по единой методике целостной в качественном и пространственном отношении модели наземных экосистем Восточной

Фенноскандии. Принципиальное отличие данной модели от созданных традиционными методами «классификации с обучением» заключается в том, что результат зависит в первую очередь не от количества и качества наземных ключевых участков, выбор которых в той или иной степени субъективен, а от объективного, *измеряемого* биофизического параметра – положения экосистемы в спектральном пространстве сканерного снимка.

Спектральная модель на данном этапе представляет собой основной «каркас», состоящий из относительно небольшого количества генерализованных классов экосистем, достоверность выделения которых практически стопроцентная. Наземные данные необходимы для калибровки модели – определения количественных характеристик, а в дальнейшем – и для ее детализации (декомпозиции генерализованных классов).

В практическом плане весьма существенно, что создание модели возможно с использованием свободно доступных в интернете сканерных снимков и программного обеспечения. Это создает все условия для использования и совершенствования модели самым широким кругом специалистов и студентов экологического и биогеографического профиля.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института леса КарНЦ РАН (№ 0220–2014–0002).

Литература

Замятин А. В. Анализ динамики ландшафтного покрова на основе данных дистанционного

зондирования Земли // Исследование Земли из космоса. 2006. № 6. С. 50–64.

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>

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>

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>

Литинский П. Ю. Геоинформационная модель наземных экосистем хребта Маанселькя (район оз. Паанаярви) // Труды КарНЦ РАН. 2013. № 2. С. 97–100. <http://forestry.krc.karelia.ru/publ.php?id=10574>

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

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. 2011. Vol. 41, no. 1. P. 35–43. doi:10.1139/X10-130.

Litinsky P. Structure and dynamics of boreal ecosystems: a new sight from Landsat // Transactions of the Institute of Forestry and Rural Engineering, Estonian University of Life Sciences. 2014. Vol. 40. 117 p.

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

Поступила в редакцию 28.06.2015

References

Kryshen' A. M., Litinskii P. Yu. Sopostavlenie i vzaimnaya verifikatsiya geoinformatsionnoi i ekologo-dinamicheskoi modelei raznoobraziya lesnykh ekosistem [Comparison and mutual verification of the geoinformation and the ecological dynamics models of forest ecosystems diversity]. *Trudy KarNTs RAN [Transactions of the KarRC of RAS]*. 2013. No. 2. P. 86–91. <http://forestry.krc.karelia.ru/publ.php?id=10572>

Litinskii P. Yu. Klassifikatsiya skanernykh snimkov metodom modelirovaniya spektral'nogo prostranstva [Multispectral imagery classification method based on spectral space modeling]. *Trudy KarNTs RAN [Transactions of the KarRC of RAS]*. 2011. No. 5. P. 45–54. <http://forestry.krc.karelia.ru/publ.php?id=8809>

Litinskii P. Yu. Geoinformatsionnaya model' nazemnykh ekosistem severotaezhnoi podzony vostochnoi Fennoskandii [Geoinformation model of Eastern Fennoscandia northern taiga ecosystems]. *Trudy KarNTs*

RAN [Transactions of the KarRC of RAS]. 2012. No. 1. P. 3–15. <http://forestry.krc.karelia.ru/publ.php?id=9352>

Litinskii P. Yu. Geoinformatsionnaya model' nazemnykh ekosistem khrebta Maansel'kya (raion oz. Paanayarvi) [Geoinformation model of the Maanselka Ridge terrestrial ecosystems]. *Trudy KarNTs RAN [Transactions of the KarRC of RAS]*. 2013. No. 2. P. 97–100. <http://forestry.krc.karelia.ru/publ.php?id=10574>

Shatalov A. V., Zhirin V. M., Sukhikh V. I. et al. Analiz informativnosti kosmicheskikh snimkov vysokogo razresheniya QuickBird [Analysis of information content of space imagery of high resolution QuickBird]. Mezhdunarodnaya konferentsiya «Aerokosmicheskie metody i geoinformatsionnye tekhnologii v lesovedenii i lesnom khozyaistve» [International conference «Aerospace methods and GIS technologies in forestry and forest management»]. Moscow, 2007. P. 168–174.

Zamyatin A. V. Analiz dinamiki landshaftnogo pokrova na osnove dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Analysis of land cover dynamics based on remote sensing of the Earth]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Earth research from space]. 2006. No. 6. P. 50–64.

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.* 2011. Vol. 41, no. 1. P. 35–43. doi:10.1139/X10-130

Litinsky P. Structure and dynamics of boreal ecosystems: a new sight from Landsat. Transactions of the Institute of Forestry and Rural Engineering, Estonian University of Life Sciences. 2014. Vol. 40. 117 p.

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

Received June 28, 2015

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, 185000
эл. почта: litinsky@krc.karelia.ru
тел.: (8142) 768160

CONTRIBUTOR:

Litinsky, 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