

УДК 556 + 528.8 + 681.3:574.4

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ МОДЕЛЬ НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ ВОДОСБОРА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

П. Ю. Литинский

Петрозаводск, Россия

Геоинформационная модель создается для комплексного анализа функционирования гетеротрофной экосистемы Онежского озера и отражает структуру и динамику наземных экосистем водосбора с 1950-х годов. Используется оригинальная методика моделирования спектрального пространства снимков Landsat TM/ETM+. Спектральная модель представляет собой математически формализованный объект, описывающий количественные и качественные характеристики биогеоценозов водосбора. Будучи «развернутой» в географическом пространстве, она превращается в оптимальную структурную основу для интеграции результатов дискретных натурных наблюдений в единый пространственно-временной континуум.

Ключевые слова: Онежское озеро; геоинформационное моделирование; наземные экосистемы; водосбор; органический углерод.

P. Yu. Litinsky. SPATIAL-TEMPORAL MODEL OF TERRESTRIAL ECOSYSTEMS IN LAKE ONEGO CATCHMENT

The geographical information model of the catchment area of Lake Onega is created for an integrated analysis of the functioning of the lake's heterotrophic ecosystem and reflects the structure and dynamics of terrestrial ecosystems since the 1950s. The original technique for modeling the spectral space of Landsat TM / ETM + images is used. The spectral model is a mathematically formalized object that describes the quantitative and qualitative characteristics of the biogeocoenoses of the catchment. Being deployed in geographical space, it turns into an optimal structural frame for integrating the results of discrete field observations into a single space-time continuum.

Keywords: Lake Onego; geoinformation modeling; terrestrial ecosystems; catchment; organic carbon.

Введение

Расположение Онежского озера в бореальной зоне в условиях гумидного климата определяет гетеротрофный тип метаболизма его экосистемы. Вследствие интенсивного поступления органического растворенного углерода (DOC) с водосборной площади содержание аллохтонного органического вещества в воде

озера существенно выше, чем автохтонного [Сабылина и др., 2010; Зобкова и др., 2017].

Знание точного объема этого поступления необходимо для понимания закономерностей функционирования экосистемы озера. Оценка по гидрохимическим данным [Сабылина, 2016] базируется на расчетах водного баланса озера периода 1960–90-х годов, но в последнее десятилетие годовое количество атмосферных

осадков на территории водосбора возросло на 20–70 мм. Эти изменения сказываются на величине водного стока в озеро и, как следствие, на величине поступления DOC. Кроме того, гидрохимические данные неизбежно фрагментированы и не могут дать полную информацию о количестве DOC, поступающего с водосборной территории и, главное, не раскрывают механизм его образования.

Экспорт DOC – часть глобального цикла углерода. В бореальной зоне, в автоморфных условиях 1–2 % чистой продукции экосистем (NEP) поступает в гидросферу, в гидроморфных местообитаниях эта величина достигает 10–20 % [Canham et al., 2004]. Основным источником образования DOC в лесных экосистемах – органическое вещество, накапливаемое на поверхности почвы – в подстилке [Hongve et al., 2000; Lofts, 2001]; меньшие потоки дают смывы с крон [Mchalzik, Matzner, 2001]. Образование, деструкция и транспорт DOC в органогенных горизонтах почв зависят от типов растительности, почв и гидротермических условий [Berg, 2000; Neff, Asner, 2001]. Все эти факторы определяются типом биогеоценоза. Экспорт DOC из болотных экосистем зависит от продуктивности растительности и уровня грунтовых вод [Belyea, Clymo, 2001]. Таким образом, суммарный экспорт DOC в озеро – функция пространственного представления типов экосистем в пределах водосбора.

С другой стороны, экосистемы водосбора влияют и на приходную часть водного баланса. Вырубка леса приводит к снижению испарения с территории на 50–60 % [Крестовский, 1986; Карпечко, Мясникова, 2014] и, соответственно, к увеличению стока до 90 % [Bosch, Hewlett, 1982]. Затем, по мере возобновления леса, сток уменьшается до определенного минимума в период наибольшей транспирации в молодом древостое и далее несколько увеличивается к возрасту спелости [Карпечко, 2016]. Таким образом, в течение продолжительного времени на водосборе меняются условия формирования элементов водного баланса и химического состава стекающей воды [Карпечко, Бондарик, 2010; Ide et al., 2013].

До настоящего времени в качестве информации о лесах водосбора использовались генерализованные до уровня лесничеств (площадь в несколько тыс. га) данные учета лесного фонда [Карпечко, 2016]. Однако эта информация предназначена для обеспечения хозяйственной деятельности, цель которой – получение древесины, поэтому она соответствующим образом структурирована. При этом важные биогеоценозические характеристики становятся

весьма размытыми, что не позволяет выявить пространственные закономерности образования DOC в различных типах экосистем.

При изучении связей между гумусностью воды и характеристиками водосборной территории в работе М. Б. Зобкова [2017] рассчитывалась общая лесистость – разность между площадью суши и площадью болот, полученной путем оцифровки топокарт масштаба 1:200 000. Очевидно, что это крайне приблизительная характеристика, поскольку при этом не учитывается принципиально важная в данном случае породная и возрастная структура лесов, а также площадь вырубок и других нелесных категорий. Кроме того, и сами контуры болот на карте такого масштаба нанесены весьма неточно – в этом легко убедиться, сопоставив их с космическими снимками с любого геоинформационного сайта.

Принципиально более точный и детальный расчет экспорта DOC в озеро можно провести с использованием геоинформационной (геоматической) модели экосистем водосбора, созданной на основе космических снимков Landsat. Работы были начаты в 2016 г., по оригинальной методике, апробированной на территории, примыкающей к водосбору с севера [Литинский, 2012, 2013, 2016]. Она разработана как альтернатива традиционной «классификации с обучением» и ориентирована именно на выявление биогеоценозических комплексов. В статье приводится краткое описание методики и первых результатов создания модели, намечаются пути ее использования и направления развития.

Объекты и методика

Природные условия территории

Водосбор Онежского озера расположен на границе Восточной Фенноскандии и Русской равнины. Отметки высот – от 33 до 240 м. Территория 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 обуславливает сложность гидрологических условий и высокую мозаичность растительного покрова. Состояние экосистем также весьма различно – от практически девственного до глубоко антропогенно трансформированного.

По лесорастительному районированию территория водосбора относится к среднетаежной

подзоне. Среднегодовая температура около 3 °С, количество осадков – 500–550 мм. Около 65 % площади занято лесами, преобладающие породы – сосна обыкновенная (*Pinus silvestris* L.) и ель финская (*Picea x fennica* (Regel) Kom.). Береза пушистая (*Betula pubescens* Ehrh.) доминирует во вторичных лесах на ранних стадиях восстановления. Торфяные болота, занимающие до четверти территории, представлены двумя основными типами: олиготрофными сфагновыми и мезотрофными осоково-сфагновыми [Biotic..., 2003].

Исходные данные

Геоматическая модель создается на основе трех основных массивов информации. Первый представляет собой мозаику разновременных сканерных снимков, на основе которых строится модель растительного покрова, второй – данные наземных исследований структуры и динамики биогеоценозов. Эти два массива можно назвать биотической частью модели. Их интеграция – то есть дешифрирование сканерных снимков – проводится по описываемой ниже оригинальной методике.

Третий массив – данные о рельефе территории, цифровая модель высот (DEM). На ее основе определяются характеристики и формы рельефа и проводится гидрологическое моделирование – построение сети водотоков и структуры водосборов. Этот массив является абиотической (физико-географической) частью модели, и ее создание проводится с использованием стандартных операций, реализованных в пакете GRASS. Построение геоматической модели представляет собой интеграцию всех трех массивов в единое целое.

При создании модели растительного покрова используются снимки мультиспектральных сканеров Landsat TM и ETM+, разрешение которых (30 м) сопоставимо с минимальными размерами растительного сообщества [Pignatti et al., 2002], а спектральные диапазоны спроектированы именно для выделения различных типов растительности. Исходя из территориального охвата и наличия облачности подобраны сцены витков 180–185, рядов 16–18, снятые в 1987–2011 годах. Все снимки находятся в открытом доступе на сайте GLCF <ftp://ftp.glcg.umd.edu/glcg/Landsat/WRS2> (табл. 1; рис. 1). Каждая сцена состоит из шести растров, по числу каналов сканера – B, G, R, NIR, SWIR1, SWIR2, в формате GeoTiff.

Цифровая модель высот территории сформирована из растров размером 1×1 градус, доступных на сайте www.viewfinderpanoramas.org

Таблица 1. Список сцен Landsat TM/ETM+
Table 1. List of the Landsat TM/ETM+ scenes

TM	ETM+
p180r017_5dt19890728*	p181r016_7dt20000607
p181r018_5dt19880529	p181r017_7dp20020528
p182r016_5dt19940708	p181r018_7dt20020528
p182r017_5dt19860718	p183r016_7dt20010624
p184r016_5dt19870719	p183r017_7dt19990907
p184r017_5dt19950607	p185r016_7dt20020711
p185r016_5dt20110610	

Примечание. *p (path) – виток, r (row) – ряд в системе WRS2, последние 8 цифр – дата в формате ггггммдд.

Note. *p – path, r – row in the WRS2 system, last 8 numbers – date (yyyymmdd).

(блоки P36 и P37 на врезке внизу рис. 1). Пространственное разрешение – три угловых секунды, что приблизительно соответствует детальности топокарты М 1:50 000. Для блока P36 имеются также данные с разрешением 1 секунда. Растры импортируются в GRASS модулем **r.in.gdal** и затем собираются в целостное покрытие модулем **r.patch**.

Наземные данные – материалы ландшафтных исследований [Волков и др., 1990] и инвентаризаций природных комплексов [Материалы..., 2007], данные лесоустройства, архивные аэрофотоснимки, снимки сканеров сверхвысокого разрешения с геоинформационных сайтов (Google и т. д.).

Программное обеспечение. Стандартные операции пре- и постпроцессорной обработки сканерных снимков осуществляются с использованием ГИС-пакетов QGIS, GRASS, SAGA (www.qgis.org). Создание модели спектрального пространства снимков и их классификация проводится с использованием модифицированной версии оригинальной программы [Литинский, 2011b], позволяющей с минимальным уровнем неопределенности извлечь информацию снимка. Для 3D-визуализации применяется пакет **gnuplot** (www.gnuplot.info). Все используемые данные и программы находятся в свободном доступе.

Методика обработки снимков

Традиционный подход к извлечению информации из сканерных снимков основан на формальной математической экстраполяции спектральных характеристик наземных ключевых участков на всю охваченную снимком территорию – это так называемая классификация «с обучением», или «управляемая классификация» [Richards, Xiuping, 1999]. Ключевые участки закладываются в соответствии с некоей априорной типологией земной поверхности, определяемой конкретными задачами исследователей.

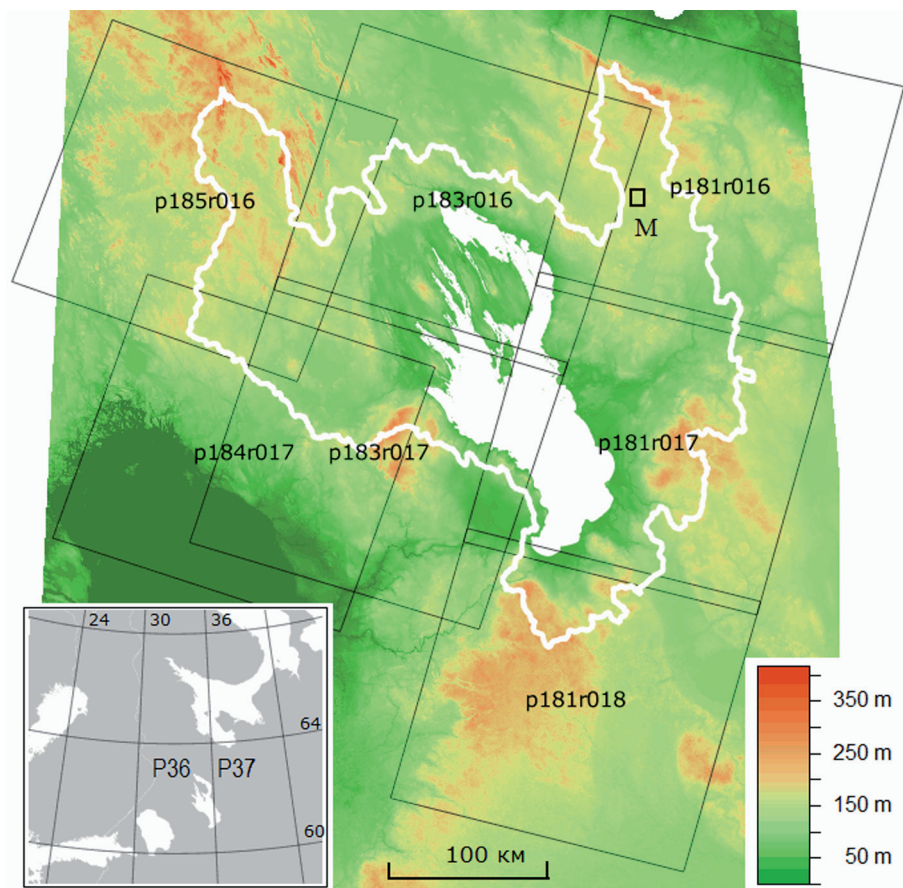


Рис. 1. Локализация сцен сканерных снимков в системе WRS2 (path/row), используемых для создания модели. Белая линия – границы водосбора. Прямоугольник, обозначенный буквой М, – модельный водосбор, показанный на рис. 6

Fig. 1. Localization of the scenes of scanner images in the WRS2 system (path/row) used for the model creation. The white line is the catchment boundary. The rectangle, denoted by the letter M, is the model catchment shown in Fig. 6

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, – учитывается лишь в неявном виде, опосредованно, через характеристики ключевых участков.

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 наземных исследований.

Описываемый подход сформировался в процессе создания геоматической модели наземных экосистем северотаежной подзоны Восточной Фенноскандии. Использовалась оригинальная методика моделирования спектрального пространства сканерного снимка [Литинский, 2011а]. Было установлено, что спектральная модель четко отражает естественную структуру растительного покрова, определяемую типом четвертичных отложений и условиями водно-минерального питания [Литинский, 2012].

Комплексный метод включает три основных составляющих:

- трансформация исходного многомерного спектрального пространства в визуализируемое трехмерное;
- выделение областей (сегментация) спектрального пространства;

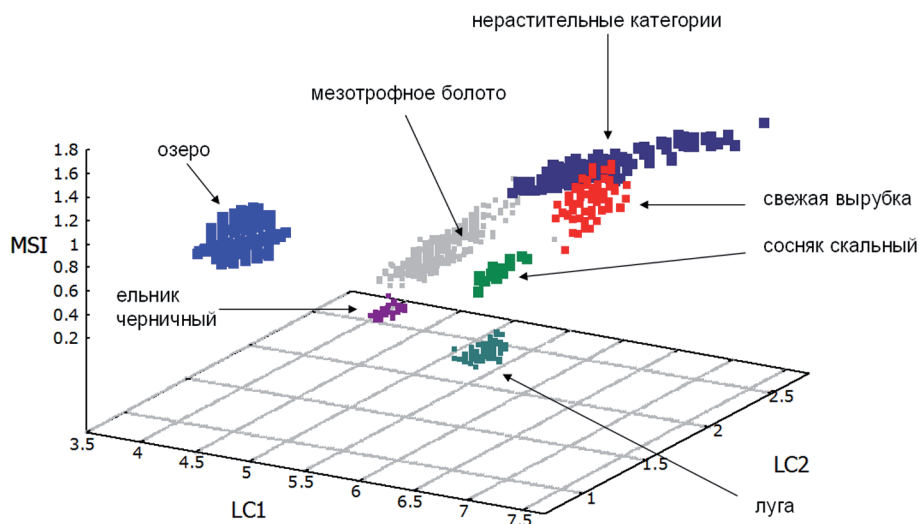


Рис. 2. Локализация сигнатур некоторых категорий земной поверхности в пространстве LC1-LC2-MSI

Fig. 2. Signature clouds of some categories of the earth's surface in the LC1-LC2-MSI space

- сопоставление модели спектрального пространства с эколого-биогеоценотической схемой экосистем территории.

Трансформация спектрального пространства

Исходная 6-мерная матрица снимка (каналы B, G, R, NIR, SWIR1, SWIR2) преобразуется в трехмерную LC1-LC2-MSI, где LC1 и LC2 – соответственно первая и вторая главные компоненты логарифмированной матрицы снимка (каналы R, NIR, SWIR2), а MSI – индекс стресса влажности (отношение каналов SWIR1 и NIR). Способ трансформации был найден эмпирическим путем [Литинский, 2011а]. Оказалось, что при такой трансформации спектральное пространство более «компактно» и проще организовано, чем в классической Tasseled Cap (brightness-greenness-wetness) и поэтому более удобно для визуального и математического анализа [Litinsky, 2017, fig. 3]. Ось LC1 характеризует общую яркость, с увеличением LC2 количество фотосинтезирующей биомассы снижается, MSI растет с увеличением дефицита влажности.

Для снимков Landsat ETM+ оси координат рассчитываются по формулам:

$$LC1 = 0.2793 \cdot \ln(b3) + 0.7786 \cdot \ln(b4) + 0.5619 \cdot \ln(b7)$$

$$LC2 = 0.5887 \cdot \ln(b3) - 0.6012 \cdot \ln(b4) + 0.5404 \cdot \ln(b7)$$

$$MSI = b5/b4,$$

где b3–b7 – имена файлов соответствующих каналов Landsat; ln – натуральный логарифм.

Общая организация спектрального пространства

Облака точек (сигнатуры) относительно однородных по отражательным свойствам участков земной поверхности образуют в спектральном пространстве фигуры, близкие к эллипсоиду, центральная плоскость которого расположена под определенным углом к плоскости LC1-LC2 (рис. 2). Область с минимальными значениями LC1 занимают поверхности озер. Наиболее темные из наземных экосистем – высокосомкнутые ельники. Это объясняется структурой полога (наличие теней) и малой листовой поверхностью (LAI) ели. Сосняк скальный находится правее и выше, поскольку его более ровный полог поглощает меньшее количество излучения, а в сухих местообитаниях возрастает стресс влажности. Область с максимальными значениями LC1 и минимальными LC2 занимают луга и сельхозкультуры, ввиду ровной (по сравнению с лесным пологом) отражающей поверхности и большого количества зеленой биомассы. Нерастительные категории (карьеры, свежие вырубки) занимают область с максимальными значениями LC2 и MSI.

Сегментация спектрального пространства

Для определения положения и размеров эллипсоидного сегмента каждой категории облако точек проецируется на плоскость LC1-LC2 (x и y соответственно), и направление главной оси эллипса рассчитывается по линии регрессии $y = ax + b$. «Габаритные размеры» эллипса

Таблица 2. Параметры, определяющие положение эллипсоида в пространстве LC1-LC2-MSI ($x-y-z$)

Table 2. Parameters determining the position of the ellipsoid in the space LC1-LC2-MSI ($x-y-z$)

Положение эллипса в проекции на плоскость $x-y$ Position of the ellipse in the projection onto the $x-y$ plane					Положение точек центральной плоскости эллипсоида в размерности z Position of the points of the central plane of the ellipsoid in dimension z		
Координаты центра Coordinates of the center		Направление главной оси* Direction of the main axis*	Размер осей Axes size		Коэффициенты уравнения регрессии $z = cx + dy + e$ Coefficients of the regression equation $z = cx + dy + e$		
1	2	3	4	5	6	7	8
x	y	a	l	h	c	d	e

Примечание. *Коэффициент a в уравнении линии регрессии $y = ax + b$.

Note. *Coefficient a in the equation of the regression line $y = ax + b$.

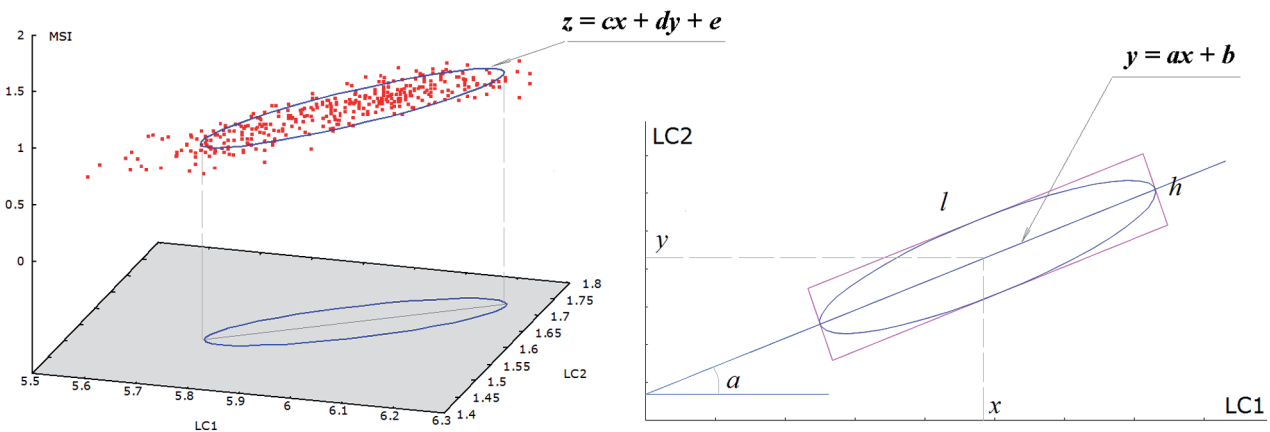


Рис. 3. Слева – проекция облака точек на плоскость LC1-LC2; справа – схема вычисления параметров 1–5 в табл. 2

Fig. 3. The projection of the points cloud on the plane LC1-LC2 is shown on the left; the calculation scheme of the parameters 1–5 in Table 2 – on the right

определяются по координатам максимально удаленных от центра облака точек в системе координат, ось абсцисс которой параллельна линии регрессии (рис. 3). Положение центральной плоскости эллипсоида в размерности MSI (z) рассчитывается по уравнению регрессии от двух переменных $z = cx + dy + e$. Все восемь параметров сегментации приведены в табл. 2.

Согласно приведенным в табл. 2 параметрам в пределах эллипса задаются несколько точек (например, две в центрах эллипса и 4–8 по его периметру), 3D-координаты которых служат центрами классов для классификации снимка методом минимального расстояния.

Таким образом, в отличие от традиционных методов, где для определения положения категории в некоем абстрактном многомерном спектральном пространстве используются лишь статистические показатели – средние, максимальные и минимальные значения по каждой размерности и (в некоторых случаях) ковариационная матрица, в описываемом методе задается четко определенное положение, форма и размеры каждой категории в видимом трехмерном

пространстве. Это кардинальным образом улучшает разделение категорий. Для реализации данного алгоритма разработана специальная программа (exe-модуль), в настоящее время готовится заявка для ее регистрации.

Модель спектрального пространства экосистем водосбора

Экосистемы спелых лесов формируют V-образную структуру, в основании которой располагаются зеленомошные сосняки (1) и ельники (8) моренных гряд. Здесь обеспечиваются оптимальные условия по увлажнению и наличию минеральных питательных веществ (рис. 4).

По оси автоморфных местообитаний (1–3–4–9) 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 различной мощности и далее – скальные пустоши с редкой сосной (9).

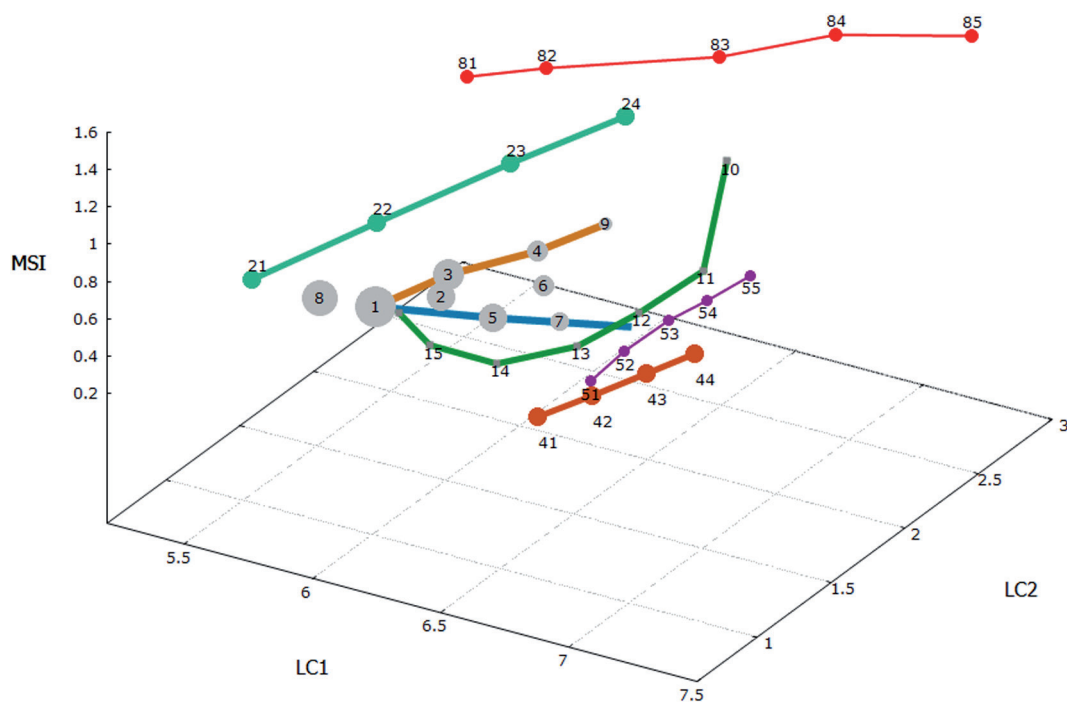


Рис. 4. Модель спектрального пространства снимка Landsat (номера классов экосистем приведены в тексте), для упрощения показаны лишь центры эллипсоидов категорий

Fig. 4. Model of the spectral space of the Landsat image (the numbers of ecosystem classes are given in the text), only centers of category ellipsoids are shown for simplification

На оси гидроморфных местообитаний (1–5–7) 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 (10) лесах четко вырисовывается траектория восстановительной динамики от появления растительности (11) до молодняков (12, 13), средневозрастных (14) и припевающих (15) лесов.

Для болотных экосистем положение спектральных сегментов 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 (81–85).

Таким образом, выделяются все основные типы биогеоценозов, каждый из которых характеризуется определенными величинами биомассы, NEP, составом древостоя, трофностью и влажностью почвы, типом напочвенного покрова, мощностью лесной подстилки – всех факторов, определяющих величину экспорта

DOC, транспирации и другие экологические параметры.

Геоматическая модель экосистем

Модель спектрального пространства представляет собой математически формализованный объект, описывающий количественные и качественные характеристики биогеоценозов. Будучи «развернутой» в географическом пространстве стандартным методом минимального расстояния в евклидовом пространстве, спектральная модель превращается в карту (рис. 5), 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. С учетом того, что в каждом классе, показанном на рис. 4, возможно выделение нескольких подклассов в каждом эллипсоидном сегменте, в общей сложности получается несколько десятков категорий. Отметим, что созданные традиционными методами на основе снимков Landsat карты данной территории существенно менее информативны, обычно включают до 10–15 категорий [Кобыakov, Jakovlev, 2013].

По детализации и структуре информации геоматическая модель близка к планам лесонасаждений, которые являются первичной основой

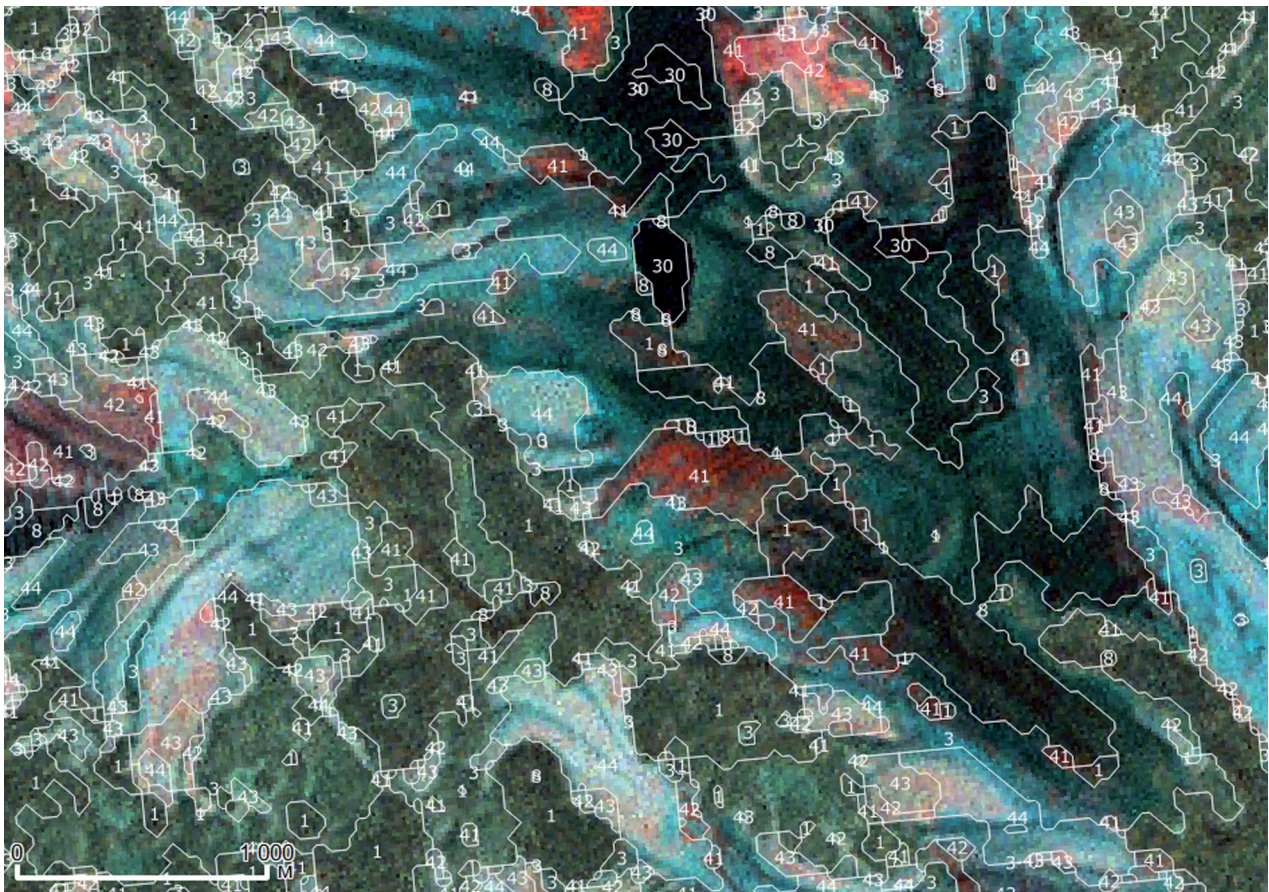


Рис. 5. Фрагмент векторного слоя геоматической модели в пределах водосбора М на рис. 1. Номера категорий соответствуют рис. 4. Растровая подложка – RGB-синтез из инфракрасных каналов (NIR, SWIR1 и SWIR2)
 Fig. 5. Fragment of the vector layer of the geomatic model within the catchment area M shown in Fig. 1. The category numbers correspond to Fig. 4. Raster background – RGB-synthesis from NIR, SWIR1 and SWIR2 bands

для данных учета лесного фонда, – то есть к тем данным, которые до настоящего времени использовались для описания лесов водосбора. 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 водосбора. И разумеется, еще существеннее отличие описываемой модели в биологическом аспекте от топокарт любого масштаба.

Создание элементарных модельных водосборов

С использованием геоматической модели можно рассчитать общий объем поступления DOC в озеро, если известны удельные объемы его экспорта из каждого типа экосистем. До настоящего времени в пределах водосбора

таких измерений не проводилось, определялась лишь концентрация DOC в различных водоемах [Зобков, 2017; Зобкова и др., 2017].

Гидрохимические данные отдельных модельных водосборов с известной площадью всех представленных на нем экосистем позволят рассчитать величины экспорта из каждого типа (рис. 6). Пространственная модель позволит оптимальным образом спланировать положение модельных водосборов, исходя из соотношения площадей экосистем и с учетом транспортной доступности для обеспечения сбора проб воды в течение года.

Растры направлений **dr** и линий аккумуляции стока **acc** создаются с использованием раstra модели высот **dem** командой GRASS:

```
r.watershed elev=dem acc=acc drainage=dr
```

По растру **dr** создаются растры контуров водосборов **wtrs** для любой точки на линии аккумуляции стока с координатами E, N, командой:

```
r.water.outlet input=dr output=wtrs coordinates=E, N
```

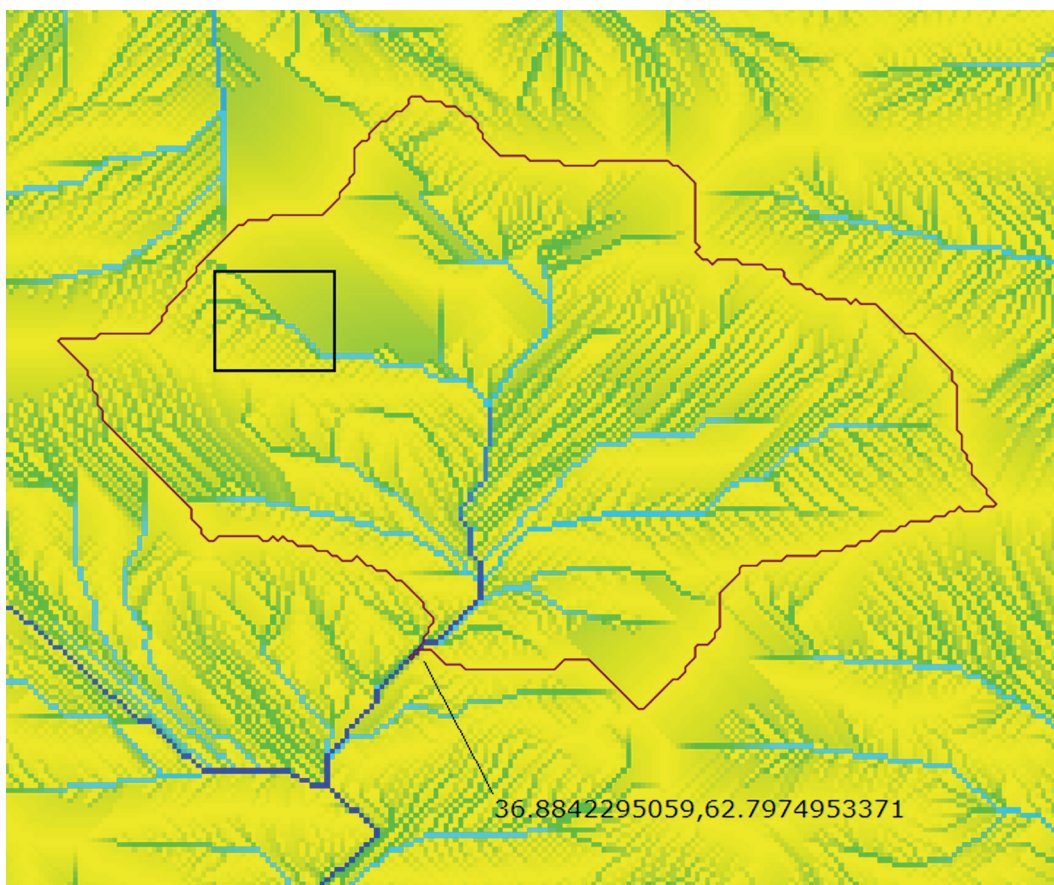



Рис. 6. Пример модельного водосбора: растр линий аккумуляции стока и полигон водосбора для точки с указанными координатами E, N. Прямоугольник соответствует фрагменту на рис. 5.

Fig. 6. An example of a model catchment area: a raster of flow accumulation lines and a catchment area for a point with the specified coordinates E, N. The rectangle corresponds to the fragment in Fig. 5.

Ретроспективная экстраполяция геоматической модели

Модель спектрального пространства дает возможность строгого математического описания траекторий как типов местообитаний (структуры), так и различных сукцессионных стадий (рис. 7). Линия в 3D-пространстве описывается системой двух уравнений вида:

$$\begin{aligned} y &= f_1(x); \\ z &= f_2(x, y); \end{aligned}$$

где x, y, z – LC1, LC2, MSI соответственно; f_1, 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.

На снимках четко идентифицируются леса, возникшие на вырубках 40–50-летней давности.

Соответственно, на самых ранних снимках Landsat 1980-х годов можно проследить динамику естественных и антропогенных изменений (пожаров, ветровалов, вырубок) с момента, предшествующего началу массовых заготовок леса в 1950-х годах, и проявления изменений климата, то есть увидеть леса в состоянии, близком к естественному, «фоновому». Таким образом, данная модель является исходной точкой мониторинга на будущие времена. С другой стороны, для всего этого периода (с 1940-х годов) существуют базы данных (БД) по морфометрии, гидрологии, гидрохимии и гидробиологии для большого количества озер [Меншуткин, Филатов, 2008]. Сопоставление данных о наземных экосистемах может привести к лучшему пониманию процессов динамики озерных систем.

Заключение

Принципиальное отличие описываемой модели экосистем от созданных традиционными

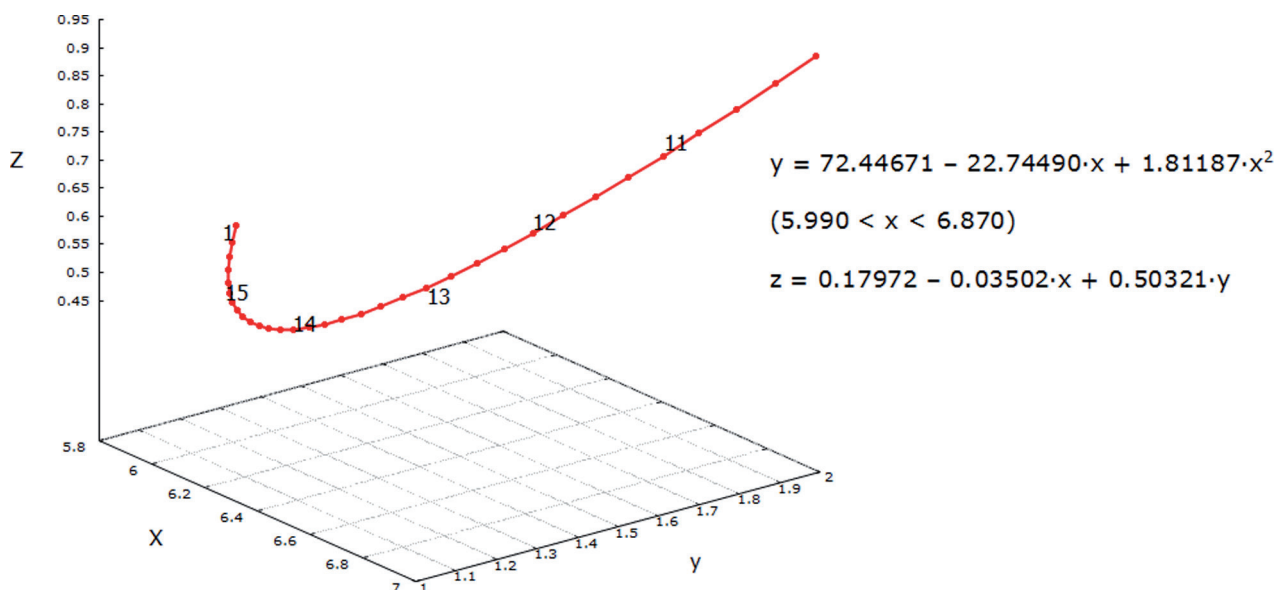


Рис. 7. Траектория лесовозобновления в спектральном пространстве. Номера классов те же, что и на рис. 4.
 Fig. 7. Trajectory of reforestation in the spectral space. The class numbers are the same as in Fig. 4.

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. Сегментация спектрального пространства методом эллипсоидов обеспечивает более точное, по сравнению с традиционными методами, выявление пространственной конфигурации контуров экосистем. Это имеет большое значение для обеспечения максимально точного совмещения модели растительного покрова с цифровой моделью рельефа, принципиально важного при гидрологическом моделировании.

На данном этапе спектральная модель представляет собой основной «каркас», состоящий из относительно небольшого количества генерализованных классов экосистем, достоверность выделения которых практически стопроцентная. По данным наземных наблюдений и снимкам сверхвысокого разрешения проводится постоянная корректировка модели – уточнение количественных характеристик (калибровка) и декомпозиция генерализованных классов.

Онежское озеро как один из крупнейших водоемов гумидной зоны является реципиентом земного углерода и играет важную роль в его глобальном балансе. Знание механизмов функционирования экосистемы озера необходимо для оценки степени ее устойчивости к действию возмущающих факторов, определения ее биоресурсного потенциала. Однако эти механизмы остаются относительно малоизученными, в том

числе и вследствие большой неопределенности данных о поступлении DOC с водосборной территории. Особенно актуальными эти исследования становятся в условиях изменения климата. Первичная продукция лесных и болотных экосистем является климатически обусловленной, и, соответственно, повышение температуры приводит к увеличению экспорта DOC. Кроме того, исследованиями установлено увеличение зимнего стока с болот в связи с увеличением безморозного периода [Калужный, Лавров, 2017].

Нельзя рассматривать экосистему озера отдельно от его водосбора, необходимы как комплексные исследования внутриводоемных процессов, так и оценка поступления терригенного углерода. Оптимальный инструмент для решения этой задачи – геоматическая модель наземных экосистем в комплексе с регулярными гидрохимическими наблюдениями на модельных водосборах. Это позволит не только уточнить величины поступления DOC, но и смоделировать функционирование системы «водосбор – озеро» при различных сценариях изменения климата и состояния экосистем водосбора.

Возможности модели наземных экосистем выходят как за географические границы водосбора Онежского озера, так и за рамки ее применения лишь для оценки экспорта DOC. Можно предположить, что включение данных о наземных экосистемах водосборов озер в качестве дополнительных параметров в экспертную систему «Озера Карелии» [Меншуткин, Филатов, 2008] улучшит ее прогностические качества. Поскольку модель спектрального

пространства практически однозначно выделяет основные типы четвертичных отложений – морену, флювиогляциальные, озерные отложения и скалы, информация геоматической модели дополняет как биотические, так и абиотические характеристики системы «водосбор – озеро».

Существенно также, что все необходимые для создания геоматической модели сканерные снимки, модели высот и программные средства общедоступны и бесплатны. Это позволяет ученым, аспирантам и студентам не только использовать модель в своих исследованиях, но и создавать свои версии, ориентированные на конкретные задачи, и способствовать тем самым повышению информативности модели, расширению области ее применения и круга решаемых проблем.

Работа выполнена в рамках госзадания КарНЦ РАН (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН).

Литература

- Волков А. Д., Громцев А. Н., Еруков Г. В., Караваев В. Н., Коломыцев В. А., Курхинен Ю. П., Лак Г. Ц., Пыжин А. Ф., Сазонов С. В., Шелехов А. М. Экосистемы ландшафтов северо-запада средней тайги (структура, динамика). Петрозаводск: Карелия, 1990. 284 с.
- Зобков М. Б. Прогнозирование гумусности природной воды на основе ГИС-моделирования // Труды КарНЦ РАН. 2017. № 3. С. 103–110. doi: 10.17076/lim306
- Зобкова М. В., Ефремова Т. А., Лозовик П. А., Сабылина А. В. Баланс органического вещества в озерах Карелии // Озера Евразии: проблемы и пути их решения. Материалы 1-й Межд. конф. (11–15 сентября 2017 г.). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2017. С. 358–364.
- Калюжный И. Л., Лавров С. А. Механизм влияния глубины промерзания почв речных бассейнов на зимний сток // Водные ресурсы. 2017. Т. 44, вып. 4. С. 442–451.
- Карпечко Ю. В. Влияние рубок на сток с лесопокрытой части водосбора Онежского озера // Труды КарНЦ РАН. 2016. № 5. С. 13–20. doi: 10.17076/lim285
- Карпечко Ю. В., Бондарик Н. Л. Гидрологическая роль лесохозяйственных и лесопромышленных работ в таежной зоне Европейского Севера России. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 225 с.
- Карпечко Ю. В., Мясникова Н. А. Оценка изменения элементов водного баланса в первый год после рубок в таежной зоне Европейского Севера России // Уч. зап. Рос. гидромет. ун-та. 2014. № 33. С. 31–44.
- Крестовский О. И. Влияние вырубок и восстановления лесов на водность рек. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 118 с.
- Литинский П. Ю. Классификация сканерных снимков методом моделирования спектрального пространства // Труды КарНЦ РАН. 2011. № 5. С. 45–54.
- Литинский П. Ю. Программа для классификации сканерных снимков методом моделирования спектрального пространства (св-во о гос. регистрации № 2011613929) // Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем». 2011.
- Литинский П. Ю. Геоинформационная модель наземных экосистем северотаежной подзоны Восточной Фенноскандии // Труды КарНЦ РАН. 2012. С. 3–15.
- Литинский П. Ю. Геоинформационная модель наземных экосистем хребта Маанселькя (район оз. Панаярви) // Труды КарНЦ РАН. 2013. № 2. С. 97–100.
- Литинский П. Ю. Геоинформационная модель наземных экосистем Прибеломорской низменности // Труды КарНЦ РАН. 2016. № 3. С. 3–9. doi: 10.17076/bg221
- Материалы инвентаризации природных комплексов и природоохранная оценка территории «Чукозеро». Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 137 с.
- Меншуткин В. В., Филатов Н. Н. Разработка экспертной системы «Озера Карелии» // Водная среда: комплексный подход к изучению, охране и использованию. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. С. 18–26.
- Сабылина А. В. Поступление в Онежское озеро органического углерода, общего фосфора и общего азота с речным стоком и вынос с водами р. Свири в 1965–2008 годах // Труды КарНЦ РАН. 2016. № 9. С. 68–77. doi: 10.17076/lim307
- Belyea L. R., Clymo R. S. Feedback control of the rate of peat formation // Proc. R. Soc. B. 2001. Vol. 268, iss. 1473. P. 1315–1321.
- Berg B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils // For. Ecol. Manag. 2000. No. 133. P. 13–22.
- Biotic diversity of Karelia: conditions of formation, communities and species. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2003. 244 p.
- Bosch J. M., Hewlett J. D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration // J. of Hydrology. 1982. Vol. 55. P. 3–23.
- Canham C. D., Pace M. L., Papaik M. J., Primack A. G. B., Roy K. M., Maranger R. J., Curran R. P. and Spada D. M. A spatially explicit watershed-scale analysis of dissolved organic carbon in Adirondack lakes // Ecological applications. 2004. Vol. 14. P. 839–854. doi: 10.1890/02-5271
- Hongve D., Van Hees P. A. W., Lunstrom U. S. Dissolved components in precipitation water percolated through forest litter // Europ. J. Soil. Sci. 2000. No. 51. P. 667–677.
- Ide J., Finer L., Lauren A., Piirainen S., Launainen S. Effects of clear-cutting on annual and seasonal runoff from a boreal forest catchment in eastern Finland // Forest Ecology and Management. 2013. Vol. 304. P. 482–491.
- Kobyakov K. and Jakovlev J. (eds.). Atlas of high conservation value areas, and analysis of gaps

and representativeness of the protected area network in northwest Russia: Arkhangelsk, Vologda, Leningrad, and Murmansk Regions, Republic of Karelia, and City of St. Petersburg. Finnish Environment Institute. Helsinki. 2013. 517 p.

Litinsky P. Structure and dynamics of boreal ecosystems: another approach to Landsat imagery classification // *Geography, environment, sustainability*. 2017. Vol. 10, no. 3. P. 20–30. doi: 10.24057/2071-9388-2017-10-3-20-30

Lofts S., Simon B. M., Tipping E., Woof C. Modeling the solid-solution partitioning of organic matter in European forest soils // *Europ. J. Soil Sci.* 2001. No. 52. P. 215–226.

References

Kalyuzhnyi I. L., Lavrov S. A. Mekhanizm vliyaniya glubiny promerzaniya pochv rechnykh basseinov na zimnii stok [Mechanism of the influence of soil freezing depth in river basins on winter runoff]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2017. Vol. 44, no. 4. P. 442–451.

Karpechko Yu. V. Vliyaniye rubok na stok s lesopokrytoi chasti vodosbora Onezhskogo ozera [Logging effects on runoff from the forested part of the catchment of Lake Onego]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2016. No. 5. P. 13–20. doi: 10.17076/lim285

Karpechko Yu. V., Bondarik N. L. Hidrologicheskaya rol' lesokhozyaystvennykh i lesopromyshlennykh rabot v taezhnoi zone Evropeiskogo Severa Rossii [Hydrological role of forestry and forest-industrial works in the taiga zone of the European North of Russia]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2010. 225 p.

Karpechko Yu. V., Myasnikova N. A. Otsenka izmeneniya elementov vodnogo balansa v pervyi god posle rubok v taezhnoi zone Evropeiskogo Severa Rossii [Assessment of changes in water balance elements in the first year after cuttings in the taiga zone of the European North of Russia]. *Uch. zap. Ros. gidromet. un-ta* [Trans. Russ. St. Hydrometeorological Univ.]. 2014. No. 33. P. 31–44.

Krestovskii O. I. Vliyaniye vyrubok i vosstanovleniya lesov na vodnost' rek [Influence of logging and restoration of forests on the water content of rivers]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986. 118 p.

Litinskii P. Yu. Klassifikatsiya skanernykh snimkov metodom modelirovaniya spektral'nogo prostranstva [Multispectral imagery classification method based on spectral space modeling]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2011. No. 5. P. 45–54.

Litinskii P. Yu. Programma dlya klassifikatsii skanernykh snimkov metodom modelirovaniya spektral'nogo prostranstva (sv-vo o gos. registratsii № 2011613929) [Program for scanner images classification by the method of spectral space modeling (certificate No. 2011613929)]. *Ofitsial'nyi byulleten' "Programmy dlya EVM. Bazy dannykh. Topologii integral'nykh mikroskhem"* [Official Bull. Software. Data Bases. Chip topology]. 2011.

Litinskii P. Yu. Geoinformatsionnaya model' nazemnykh ekosistem severotaezhnoi podzony vostochnoi Fennoskandii [Geoinformation model of Eastern Fennoscandia northern taiga ecosystems]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2012. No. 1. P. 3–15.

Mchalzik B., Matzner E. Dynamics of dissolved organic nitrogen and carbon in a Central European Norway spruce ecosystem // *Europ. J. Soil Sci.* No. 50(4). 2001. P. 579–590.

Neff J. C., Asner G. P. Dissolved organic carbon in terrestrial ecosystems: synthesis and model // *Ecosystems*. 2001. No. 4. P. 29–48.

Pignatti S., Box E. O., Fujiwara K. A new paradigm for the XXIth century // *Ann. Bot.* 2002. Vol. 2. P. 30–57.

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

Поступила в редакцию 06.12.2017

Litinskii P. Yu. Geoinformatsionnaya model' nazemnykh ekosistem khrebta Maansel'kya (rayon oz. Paanayarvi) [A geoinformation model of the Maanselka ridge terrestrial ecosystems (Lake Paanajarvi region)]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2013. No. 2. P. 97–100.

Litinskii P. Yu. Geoinformatsionnaya model' nazemnykh ekosistem Pribelomorskoj nizmennosti [Geographical information model of terrestrial ecosystems of the White Sea lowland]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2016. No. 3. P. 3–9. doi: 10.17076/bg221

Materialy inventarizatsii prirodnykh kompleksov i prirodookhrannaya otsenka territorii "Chukozero" [Inventory materials of natural complexes and environmental assessment of the Chukozero territory]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2007. 137 p.

Menshutkin V. V., Filatov N. N. Razrabotka ekspertnoi sistemy "Ozera Karelii" [Development of the expert system *Lakes of Karelia*]. *Vodnaya sreda: kompleksnyi podkhod k izucheniyu, okhrane i ispol'zovaniyu* [Water Environment: an Integrated Approach to the Study, Protection, and Use]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2008. P. 18–26.

Sabylina A. V. Postuplenie v Onezhskoe ozero organicheskogo ugleroda, obshchego fosfora i obshchego azota s rechnym stokom i vynos s vodami r. Sviri v 1965–2008 godakh [Organic carbon, total phosphorus and total nitrogen inflow to Lake Onego with stream runoff, and their removal by Svir river waters in 1965–2008]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2016. No. 9. P. 68–77. doi: 10.17076/lim307

Volkov A. D., Gromtsev A. N., Erukov G. V., Karavaev V. N., Kolomytsev V. A., Kurkhinen Yu. P., Lak G. Ts., Pyzhin A. F., Sazonov S. V., Shelekhov A. M. Ekosistemy landshaftov severo-zapada srednei taigi (struktura, dinamika) [Landscapes ecosystems of the northwest of the middle taiga (structure, dynamics)]. Petrozavodsk: Karelia, 1990. 284 p.

Zobkov M. B. Prognozirovaniye gumusnosti prirodnoi vody na osnove GIS-modelirovaniya [Predicting the humus content of natural waters through GIS-modelling]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2017. No. 3. P. 103–110. doi: 10.17076/lim306

Zobkova M. V., Efremova T. A., Lozovik P. A., Sabylina A. V. Balans organicheskogo veshchestva v ozerakh Karelii [Balance of organic matter in the lakes of Karelia].

Ozera Evrazii: problemy i puti ikh resheniya. Mat. 1 Mezhd. konf. (11–15 sent. 2017) [Lakes of Eurasia: Problems and Solutions. Proceed. 1st Int. Conf. (September 11–15, 2017)]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2017. P. 358–364.

Belyea L. R., Clymo R. S. Feedback control of the rate of peat formation. *Proc. R. Soc. B.* 2001. Vol. 268, iss. 1473. P. 1315–1321.

Berg B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. *For. Ecol. Manag.* 2000. No. 133. P. 13–22.

Biotic diversity of Karelia: conditions of formation, communities and species. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2003. 244 p.

Bosch J. M., Hewlett J. D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *J. of Hydrology.* 1982. Vol. 55. P. 3–23.

Canham C. D., Pace M. L., Papaik M. J., Primack A. G. B., Roy K. M., Maranger R. J., Curran R. P., Spada D. M. A spatially explicit watershed-scale analysis of dissolved organic carbon in Adirondack lakes. *Ecological applications.* 2004. Vol. 14. P. 839–854. doi: 10.1890/02-5271

Hongve D., Van Hees P. A. W., Lunstrom U. S. Dissolved components in precipitation water percolated through forest litter. *Europ. J. Soil. Sci.* 2000. No. 51. P. 667–677.

Ide J., Finer L., Lauren A., Piirainen S., Launainen S. Effects of clear-cutting on annual and seasonal runoff

from a boreal forest catchment in eastern Finland. *Forest Ecology and Management.* 2013. Vol. 304. P. 482–491.

Kobyakov K., Jakovlev J. (eds.) Atlas of high conservation value areas, and analysis of gaps and representativeness of the protected area network in northwest Russia: Arkhangelsk, Vologda, Leningrad, and Murmansk Regions, Republic of Karelia, and City of St. Petersburg. Finnish Environment Institute. Helsinki. 2013. 517 p.

Litinsky P. Structure and dynamics of boreal ecosystems: another approach to Landsat imagery classification. *Geography, environment, sustainability.* 2017. Vol. 10, no. 3. P. 20–30. doi: 10.24057/2071-9388-2017-10-3-20-30

Lofts S., Simon B. M., Tiping E., Woof C. Modeling the solid-solution partitioning of organic matter in European forest soils. *Europ. J. Soil Sci.* 2001. No. 52. P. 215–226.

Mchalzik B., Matzner E. Dynamics of dissolved organic nitrogen and carbon in a Central European Norway spruce ecosystem. *Europ. J. Soil Sci.* No. 50(4). 2001. P. 579–590.

Neff J. C., Asner G. P. Dissolved organic carbon in terrestrial ecosystems: synthesis and model. *Ecosystems.* 2001. No. 4. P. 29–48.

Pignatti S., Box E. O., Fujiwara K. A new paradigm for the XXIth century. *Ann. Bot.* 2002. Vol. 2. P. 30–57.

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

Received December 06, 2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Литинский Петр Юрьевич

к. с.-х. н.

Петрозаводск, Республика Карелия, Россия

эл. почта: litinsky@sampo.ru

CONTRIBUTOR:

Litinsky, Pyotr

Petrozavodsk, Karelia, Russia

e-mail: litinsky@sampo.ru