

П.Ю. Литинский<sup>1</sup>

**АНАЛИЗ ДИНАМИКИ АНТРОПОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЭКОСИСТЕМ  
ВОДОСБОРА р. КЕМЬ (БАССЕЙН БЕЛОГО МОРЯ)  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ GLOBAL FOREST CHANGE**

**АННОТАЦИЯ**

Проведён анализ изменений растительного покрова водосбора в результате промышленного освоения его территории, прежде всего рубки лесов. При обработке снимков Landsat (покрытие GFC) использовался метод моделирования спектрального пространства, обеспечивающий более высокую достоверность результатов классификации по сравнению с традиционными методами. Наиболее существенные изменения на водосборе произошли с 1930-х гг. — начала масштабных рубок, до конца 1990-х. Значительно, более чем на 60 %, уменьшились площади старовозрастных лесов, крупные их массивы остались лишь в охраняемых природных территориях, а также вокруг крупных озёр и вдоль крупных рек благодаря наличию водоохраных зон. В период с 2000 до 2018 гг. за счёт вырубок ещё более уменьшилась площадь продуктивных лесов; они сохранились в основном в пределах охраняемых природных территорий. К 2018 г. отмечается возникновение на значительных (до 70 %) площадях вырубок вторичных (производных) лесов, что свидетельствует о достаточно высоком регенерационном потенциале экосистем водосбора. Для восстановления пространственной структуры лесного покрова в период до начала сканерной съёмки Landsat использовался метод отслеживания траекторий лесовозобновительных сукцессий в спектральном пространстве. Сравнение результатов с данными GFC loss/gain 2000–2018 показало почти полное совпадение по рубкам, но по возобновлению леса метод отслеживания траекторий показал многократно более высокие результаты, поскольку он выявляет возобновление на значительно более ранней стадии. Отработанная методика будет применяться на водосборах других притоков Белого моря, а результаты использованы в качестве входных данных эколого-социо-экономической когнитивной модели, прогнозирующей состояние экосистем при изменениях климата и приоритетов экономики.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** таёжные экосистемы, антропогенные изменения, водосбор Белого моря, данные Global Forest Change

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

**ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF ANTHROPOGENIC CHANGES  
IN ECOSYSTEMS OF THE KEM RIVER CATCHMENT (WHITE SEA BASIN)  
USING GLOBAL FOREST CHANGE DATA**

**ABSTRACT**

The analysis of changes in the catchment vegetation cover as a result of industrial development of its territory, primarily deforestation, was carried out. For processing Landsat

<sup>1</sup> Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», пр. А. Невского, 50, 185030, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия; *e-mail*: [litinsky@sampo.ru](mailto:litinsky@sampo.ru)

<sup>2</sup> Northern Water Problems Institute, KRC RAS (Karelian Research Center of RAS), A. Nevsky Ave, 50, 183030, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia; *e-mail*: [litinsky@sampo.ru](mailto:litinsky@sampo.ru)

images, the spectral space modeling method was used, which provides higher reliability of the classification results compared to traditional methods. The most significant changes in the catchment occurred from the 1930<sup>s</sup> (the beginning of large-scale logging), until the end of the 1990<sup>s</sup>. Significantly, by more than 60 %, the area of old-growth forests decreased, their large fragments remained only in nature protected areas, as well as around large lakes and along large rivers, due to the presence of water protection zones. In the period from 2000 to 2018 due to deforestation, the area of productive forests decreased even more. Nevertheless, by 2019 the occurrence of secondary reforestation on significant areas (up to 70 %) is noted, which indicates a sufficiently high regeneration potential of the catchment ecosystems. To restore the spatial structure of the forest cover in the period before the start of the Landsat 5 operation, the method of tracking the trajectories of reforestation successions in the spectral space was used. A comparison with the results of the Global Forest Change 2000–2018 data (loss/gain) showed almost complete coincidence in cuttings (loss), but the method of reforestation trajectories showed many times higher results in forest gain, since it reveals forest regeneration at a much earlier stage. The developed methodology will be applied on the catchments of other tributaries of the White Sea, and the results will be used as input to an environmental-socio-economic cognitive model that predicts the state of ecosystems under climate changes and economic priorities.

**KEYWORDS:** boreal ecosystems, anthropogenic changes, White Sea basin, Global Forest Change data

## ВВЕДЕНИЕ

Беломорье (Белое море и его водосбор) занимает почти 10 % территории Арктической зоны России; площадь водосбора > 710 000 км<sup>2</sup>. Регион имеет большое практическое значение в рамках освоения ресурсов Арктики, в связи с чем в настоящее время Карельский НЦ РАН проводит системные исследования происходящих здесь социо-эколого-экономических процессов. Разрабатываются когнитивные модели этих процессов с целью прогноза влияния климатических и антропогенных изменений на экосистемы и планирования хозяйственной деятельности. Для их информационного обеспечения создаются различные базы данных и электронные атласы [Филатов и др., 2019]. До последнего времени картографические данные имели лишь обзорный характер (м-б 1: 1 000 000 и менее); актуальная геоинформация о структуре и состоянии экосистем имела лишь для отдельных фрагментов территории.

Создание детальной геоинформационной модели экосистем всего бассейна Белого моря начато с водосбора р. Кемь — одного из крупных западных притоков. Водосбор площадью 27 000 км<sup>2</sup> расположен к востоку от Беломорско-Балтийского водораздела (высоты на данном участке — 300–350 м н.у.м.), по которому проходит российско-финляндская граница. Около 400 км<sup>2</sup> водосбора находится на территории Финляндии. Территория малонаселённая, однако подвержена значительной антропогенной трансформации. Здесь расположен относительно крупный промышленный центр — введённый в эксплуатацию в 1980 г. Костомукшский горно-обогатительный комбинат (ныне АО «Карельский окатыш») — ведущий комбинат по добыче и переработке железной руды в России. Важнейшая отрасль экономики — лесозаготовительная промышленность; масштабные рубки ведутся с 1930-х гг. и ещё более интенсивные — с конца 1950-х гг., поэтому более 2/3 лесов в настоящее время моложе 60–70 лет. Крупные фрагменты старовозрастных лесов остались только вдоль финско-российской границы. Сельскохозяйственные угодья (в основном луга) занимают менее 1 % площади.

Регион хорошо изучен учёными Карельского НЦ РАН [Biotic..., 2003]; одним из результатов этой работы стало создание значительных по площади охраняемых природных территорий, входящих в систему «Зелёного пояса Фенноскандии». Таким

образом, на водосборе представлен весь спектр состояний экосистем — от практически девственного до глубоко антропогенно трансформированного. Территория водосбора служила модельным полигоном для разработки нового метода извлечения информации из сканерных снимков [Литинский, 2018], который и применялся в данном исследовании.

Результаты исследований динамики лесного покрова необходимы для прогнозирования как экологических, так и экономических и социальных процессов. Наземные экосистемы поддерживают важнейшие биогеохимические циклы, формируют основной объём потоков парниковых газов между поверхностью Земли и атмосферой и определяют водный, радиационный, температурный режим суши и систему атмосферной циркуляции над континентами [Pavlov, Bukvareva, 2012]. Антропогенная деятельность — рубки леса, увеличение числа пожаров — смещает сложившийся углеродный баланс. Рубки, особенно сплошные, помимо изъятия древесной биомассы и прекращения фотосинтеза, оказывают и другое воздействие на баланс углерода — идёт разложение порубочных остатков, а повреждение почвы приводит к вымыванию запасённого в ней углерода в водоёмы, что в свою очередь изменяет их углеродный баланс [Замолодчиков и др., 2015].

Территория относится к гумидной зоне, где вклад наземных экосистем в глобальный углеродный баланс увеличивается в связи с тем, что они являются источниками поступления терригенного углерода в водные экосистемы. В последнее время меняется оценка масштабов трансформации углерода во внутренних водах. Исследования показывают, что внутренние водоёмы вносят значительный вклад в углеродный цикл: глобальные годовые выбросы углекислого газа из внутренних вод в атмосферу сходны по величине с его поглощением океанами, а глобальное захоронение органического углерода в донных отложениях озёр превышает накопление органического углерода на дне океана [Tranvik et al., 2009].

Целью исследования является анализ изменения растительного покрова водосбора с целью оценки его экологической роли и ресурсного потенциала, а также отработка методики, которая будет применяться на других территориях Беломорья. Одновременно проводилась предварительная оценка степени пригодности для оценки динамики растительности конкретных территорий глобальных данных Global Forest Change [Hansen et al., 2013].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Природные условия территории

Территория водосбора (рис. 1) представляет собой типичный образец континентального оледенения. Четвертичный покров сформирован ледниковыми (моренными), флювиогляциальными песчаными и песчано-глинистыми озёрными отложениями. Значительны площади обнажений коренных пород Балтийского щита. Это обуславливает сложность гидрологических условий и высокую мозаичность растительного покрова. Территория относится к северотаёжной подзоне; около 60 % площади занято лесами; преобладающие породы — сосна обыкновенная (*Pinus silvestris* L.) и ель европейская (*Picea abies* (L.) Karst). Берёза пушистая (*Betula pubescens* Ehrh.) присутствует в составе хвойных лесов и доминирует во вторичных лесах на ранних стадиях восстановления. Более 80 % лесных угодий покрыто сосновыми лесами, которые встречаются практически во всех типах местообитаний [Волков и др., 1995]. Ельники (12 % лесных площадей) произрастают в основном на склонах моренных холмов.

Средняя годовая температура составляет около 0° С, осадки — 500–550 мм. Из-за высокого увлажнения и малого испарения открытые торфяные болота в целом занимают более трети территории: в западной возвышенной части — около 20 %, в восточной — на Прибеломорской низменности — более половины. Они представлены двумя основными типами: олиготрофными сфагновыми и мезотрофными осоково-сфагновыми. Крупнейшие

болотные системы расположены на морских и озёрных равнинах. Озёрность водосбора — более 10 % [Biotic..., 2003].

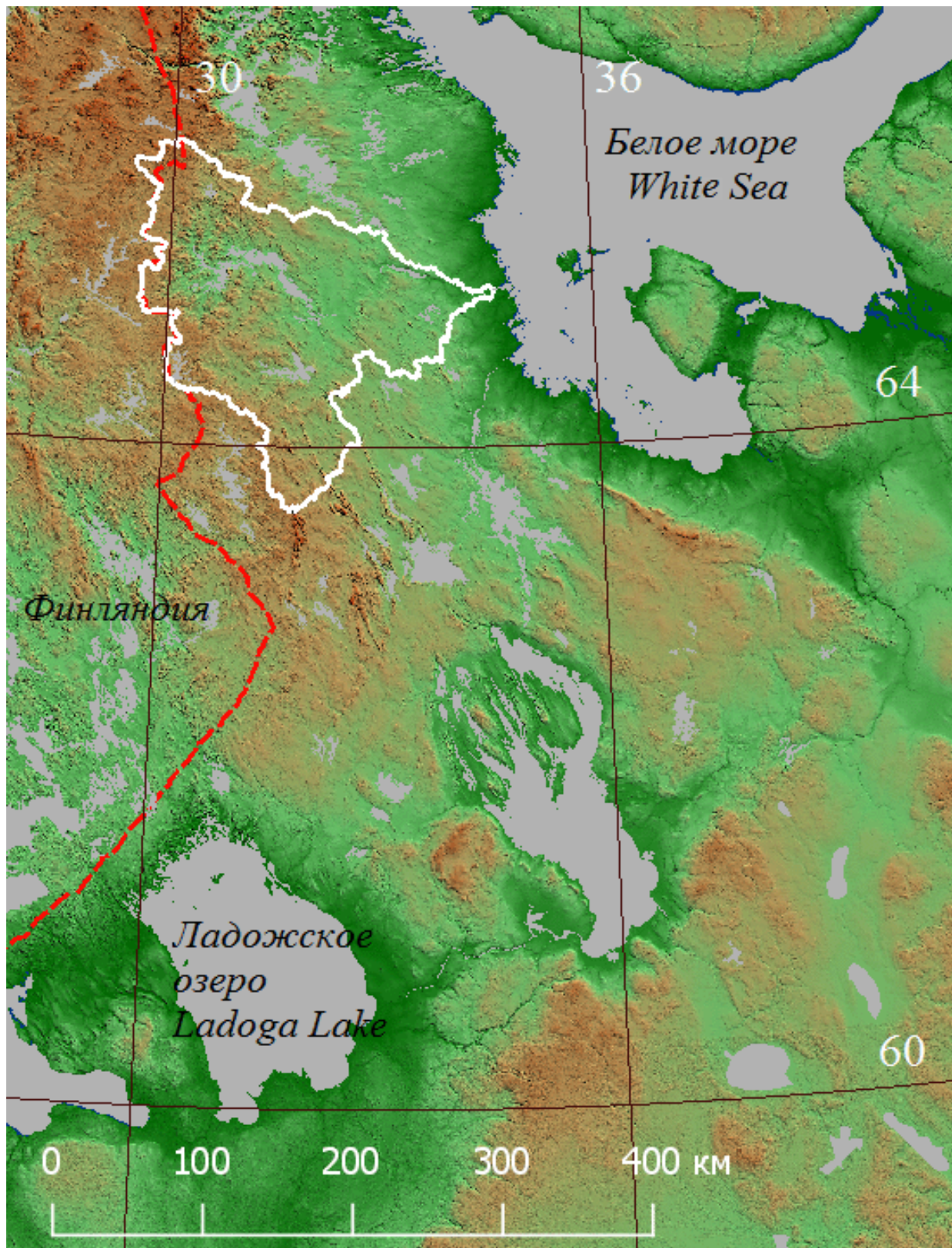


Рис. 1. Границы водосбора р. Кемь  
Fig. 1. Location of the Kem River catchment

**Исходные данные и программное обеспечение.** Для выявления динамики растительного покрова использовались данные Global Forest Change (<http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest>), которые представляют собой геометрически и радиометрически целостное глобальное покрытие, созданное из безоблачных сцен Landsat 7 и 8. Покрытие включает два основных массива информации: а) исходные спектральные данные (наиболее информативные каналы R, NIR, SWIR1, SWIR2) для 2000 г. (first) и 2018 г. (last) и б) сформированные на их основе слои: данные о лесном покрове на 2000 г. (treecover), потерях лесного покрова в последующие годы от пожаров и вырубок (lossyear) и восстановлении лесов (gain). Все данные представлены в виде растров размером 10 на 10° с разрешением 0.00025°, что обеспечивает практически полное сохранение информативности исходного разрешения 30 м. Формат файлов — Byte GeoTiff. Для получения данных до 2000 г. использовались снимки Landsat TM 1988–1994 гг. paths 184–188, rows 14–15, взятые на сайте USGS <https://earthexplorer.usgs.gov>.

Для моделирования рельефа с целью определения границ водосбора использовалась цифровая модель высот (DEM) с пространственным разрешением 3" (приблизительно 50×90 м) и 1 м по высоте (<http://viewfinderpanoramas.org>). Стандартные операции пре- и постпроцессорной обработки снимков, формирование модели высот и гидрологическое моделирование рельефа (структура водосборов) проводилось с использованием ГИС-пакетов QGIS, GRASS, SAGA ([www.qgis.org](http://www.qgis.org)).

**Методика создания модели растительного покрова** разработана автором в результате многолетнего изучения структуры и динамики экосистем северотаёжной подзоны Карелии дистанционными методами. Она основана на создании по данным наземных ключевых участков 3D-модели определённым образом трансформированного спектрального пространства сканерного снимка и её сопоставления с биогеоценотической схемой территории [Литинский, 2018; Litinsky, 2018]. Созданная таким образом модель чётко отражает естественную структуру растительного покрова, определяемую типом четвертичных отложений и условиями водно-минерального питания, и обеспечивает достоверное выделение различных типов и стадий антропогенных нарушений экосистем. Создание модели спектрального пространства снимков и их классификация проводилось с использованием оригинального программного модуля (свид. о гос. регистрации № 2019662057).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

К настоящему времени модель спектрального пространства включает все основные типы лесных и болотных экосистем данной территории (табл. 1). Для выявления самых существенных особенностей динамики растительного покрова была осуществлена генерализация классифицированных снимков до пяти наиболее контрастных по экологическим и экономическим параметрам категорий:

- озёра;
- спелые леса;
- возникающие на месте вырубок вторичные (производные) леса;
- лишённые растительности категории — карьеры, дороги, застройка;
- открытые болота.

Положение этих категорий в спектральном пространстве показано на рис. 2. Оси координат — LC1 и LC2 — соответственно первая и вторая главные компоненты логарифмированной матрицы снимка (каналы R, NIR, SWIR2), MSI — индекс стресса влажности (отношение каналов SWIR1 и NIR).

Табл. 1. Основные классы экосистем  
Table 1. Main ecosystem classes

Спектральные классы (номера соответствуют рис. 2) Spectral classes (numbers as in fig. 2)		Четвертичные отложения, рельеф Quaternary deposits, relief
1	сосняки зеленомошные mixed pine/spruce stands on moraine	моренные холмы moraine hill
2	низкополотные хвойные sparse conifer stands	lacustrine planes – spruce холмы денудационно-тектонические (тонкий слой морены) — сосняки denudation-tectonic hills (thin moraine) – pine
3	сосняки брусничные pine stands on sand	флювиогляциальные дельты fluvioglacial deltas
4	сосняки скальные pine stands on rock	скальные обнажения no deposits
5	сосняки багульниковые pine stands on shallow peat (ledum type)	озёрные равнины lacustrine planes
6	сосняки сфагновые pine stands (sphagnum type)	озёрные равнины, локальные депрессии lacustrine planes, local depressions
7	сосняки осоково-сфагновые pine stands (carex-sphagnum type)	
8	высокополотные ельники dense spruce stands	моренные холмы moraine hill
10	свежая вырубка new clearcut	озёрные равнины, локальные депрессии lacustrine planes, local depressions
11–15	возобновление сосны pine regeneration	
21–24	болота мезотрофные mesotrophic bogs	
41–44	болота олиготрофные oligotrophic bogs	
81–85	нерастительные категории non-vegetation (rocks, sands)	

Для восстановления пространственной структуры лесного покрова в период до начала сканерной съёмки Landsat 5 в 1985–1986 гг. использовался метод отслеживания траекторий лесовосстановительных сукцессий в спектральном пространстве (рис. 3). Линия, аппроксимирующая положение категории в 3D-пространстве, описывается системой двух уравнений вида:

$$y = f_1(x);$$

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

где  $x, y, z$  — оси LC1, LC2, MSI соответственно;  
 $f_1, f_2$  – полиномиальная регрессия 1-3 степени.

Категории, положение которых в спектральном пространстве на снимках 1986–2018-х гг. соответствует показанной на рис. 3 траектории на определённом возрастном отрезке, ранее являлись спелыми лесами (показаны зелёным цветом на рис. 2).

Итоговые данные изменений растительного покрова водосбора за последние 100 лет приведены на рис. 4. Цветовая палитра рис. 2 и 4 одинакова, чтобы подчеркнуть тот факт, что в основе схемы классификации заложены объективные, измеряемые сканером параметры, определяющие положение той или иной категории земной поверхности

в спектральном пространстве снимка. Это обеспечивает максимальную достоверность результатов обработки снимка.

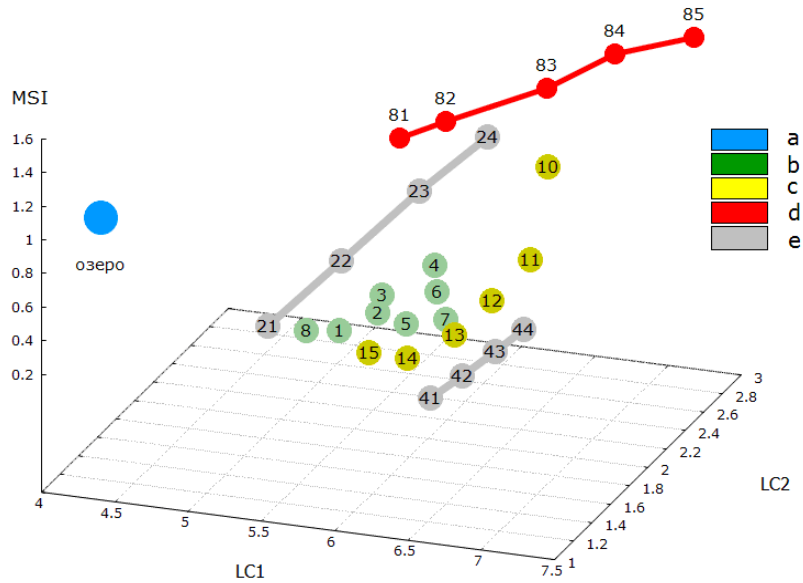


Рис. 2. Модель спектрального пространства снимка Landsat.  
 Цветовая схема: а — озёра; б — спелые леса; с — возобновление леса;  
 d — нерастительные категории; e — открытые болота.

Номера классов приведены в табл. 1

Fig. 2. Landsat timage spectral space model.

Colors: a — lakes; b — old growth forests; c — forest regeneration; d — non-vegetation;  
 e — peatlands. Numbers of classes are given in table 1

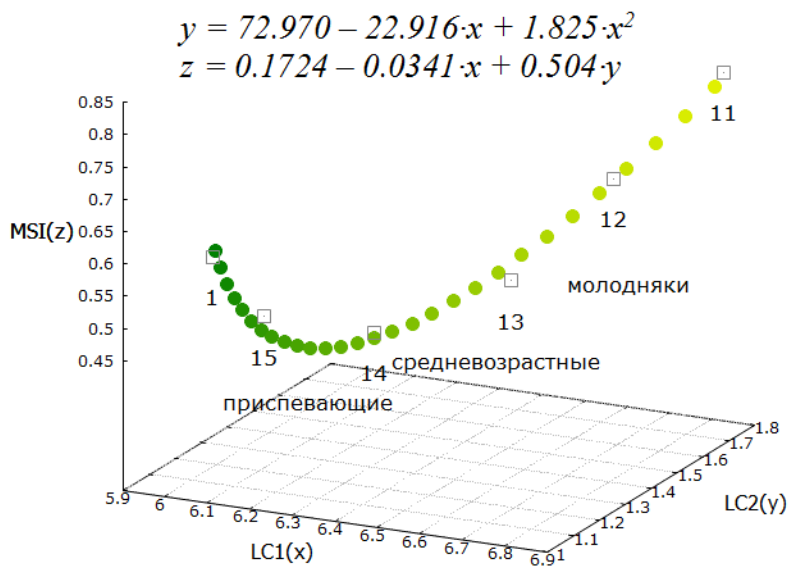


Рис. 3. Траектория лесовосстановления в спектральном пространстве.

Номера классов те же, что и на рис. 2 и табл. 1

Fig. 3. Forest regeneration trajectory in the spectral space.

Numbers of classes are given in fig. 2 and table 1

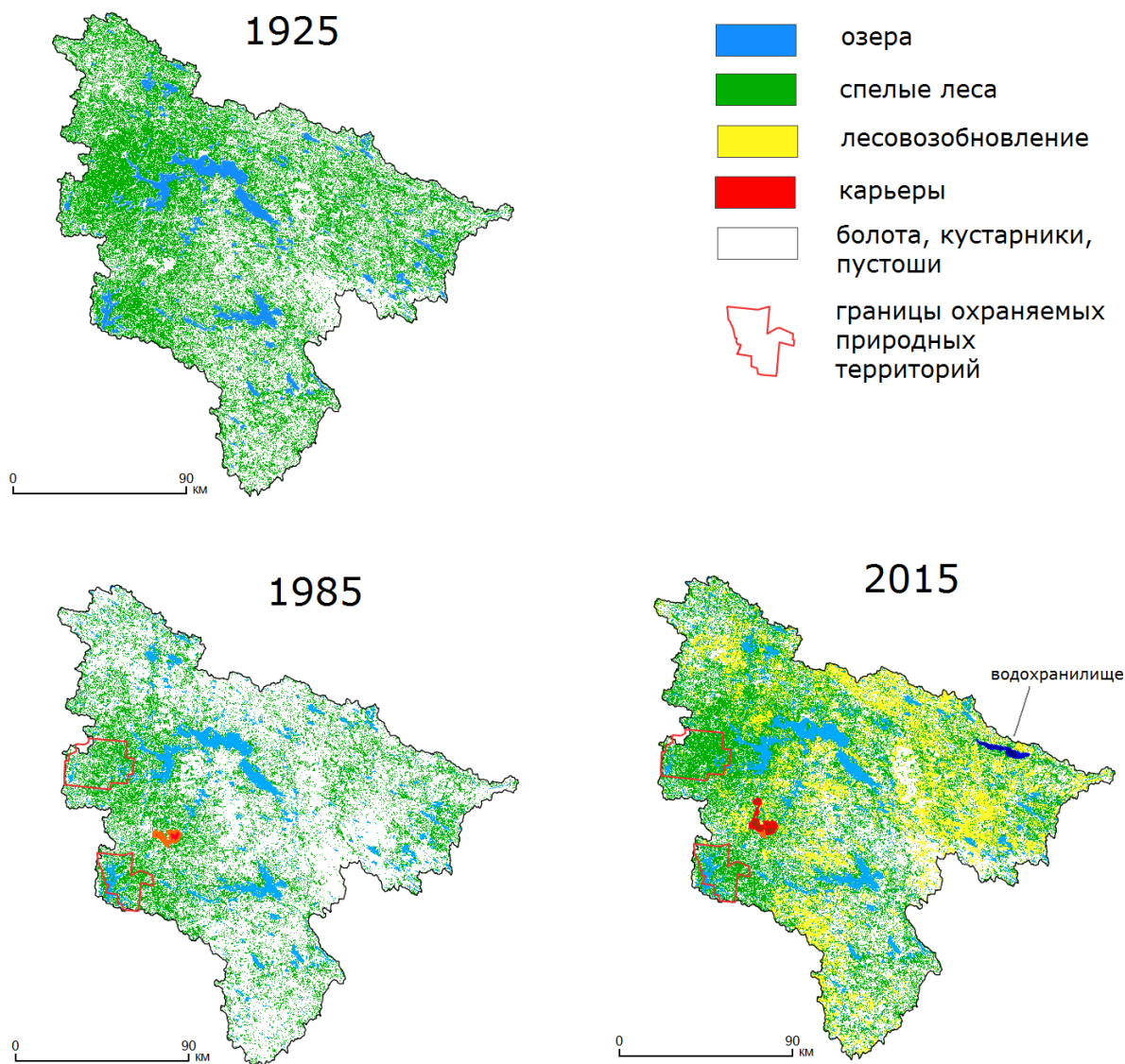


Рис. 4. Динамика лесного покрова водосбора в период 1925–2015 гг.

Цветовая схема та же, что и на рис. 2

Fig. 4. Forest cover dynamics in 1925–2015.

Color palette is the same as in fig. 2

Наиболее существенные изменения произошли с 1930-х гг. (начала концентрированных рубок) до конца 1990-х. Значительно, более чем на 60 %, уменьшились площади старовозрастных лесов; крупные их массивы остались лишь в охраняемых природных территориях, а также вокруг крупных озёр и вдоль крупных рек благодаря наличию водоохранных зон. Рубки проводились в наиболее продуктивных лесах (категории 1, 2 и 8 в табл. 1 и на рис. 2). В период с 2000 до 2018 гг. за счёт вырубок ещё более уменьшилась площадь продуктивных лесов вблизи охраняемых территорий, но к 2018 г. отмечается существенное увеличение площадей вторичных, возникших на местах рубок лесов (категории 13–14 на рис. 2).



Произошедшие в этот период изменения, вызванные другими видами антропогенного воздействия, незначительны и в сумме не превышают 1 % площади водосбора. Несколько увеличилось площади карьеров Костомукшского ГОКа и г. Костомукша; ныне они составляют 0.26 % водосбора. Площадь лесных пожаров в любом периоде времени не превышает десятой доли процента. Площадь водохранилища Кривопорожской ГЭС, введённой в эксплуатацию в конце 1980-х гг. — менее 0.1 % водосбора. Изменений в пространственной структуре болот за изучаемый период (которые могли бы быть достоверно выявлены дистанционными методами) не отмечено.

Сравнение полученных результатов с данными *treecover*, *lossyear* и *gain* покрытия Global Forest Change показало следующее. Используемый при создании слоя *treecover* алгоритм выявляет участки, на которых сформировался сомкнутый полог деревьев выше 5 м. На данной территории к ним были отнесены классы 1 и 8 (табл. 1, рис. 2) с практически полным совпадением результатов. Однако классы 2 и 3, представляющие собой сосновые древостои с сомкнутостью выше 0.5 и высотой более 15 м, данный алгоритм не относит к лесному покрову. Вероятно, причина эта в более ажурном, «прозрачном» пологе сосны, произрастающей в условиях недостаточного увлажнения, и универсальный алгоритм не может учитывать все локальные особенности растительности.

Результаты по вырубкам (*forest loss*) практически совпадают, поскольку выявление вырубок не представляет методической проблемы ввиду резкого изменения спектральной сигнатуры. Данный слой предоставляет погодичную динамику уменьшения лесного покрова (рис. 5). Ежегодные потери от вырубок в последнее десятилетие составляют не более 0.2 % площади водосбора. Пик 2013 г. вызван относительно крупным пожаром в южной части водосбора.

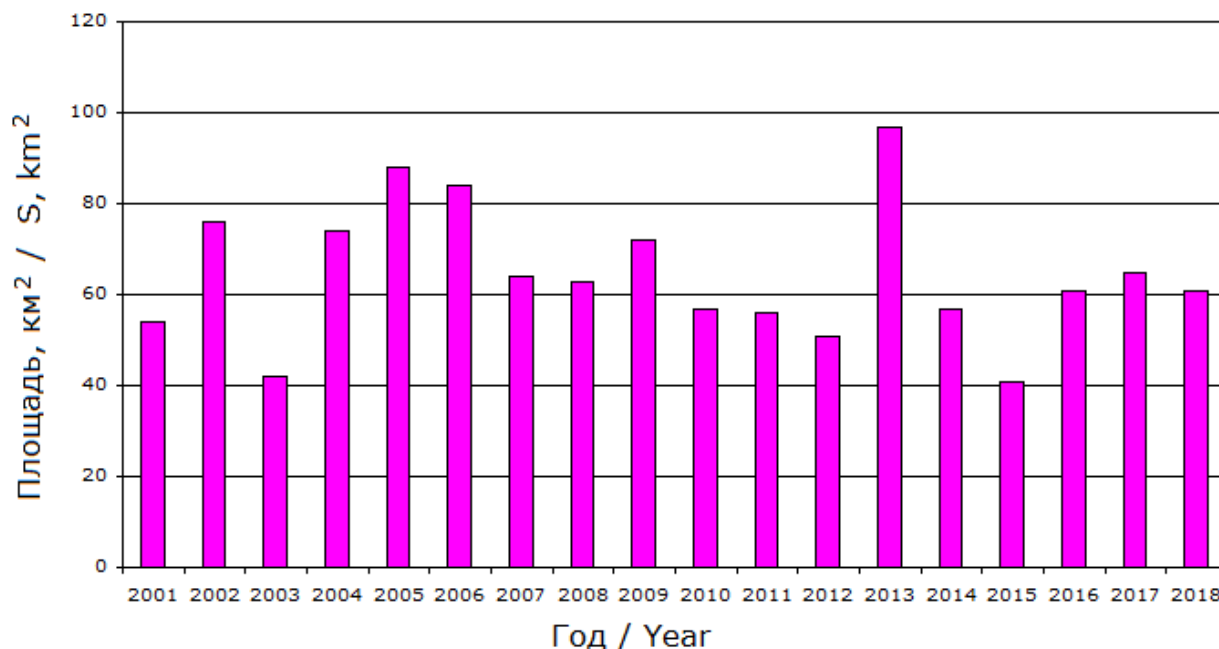


Рис. 5. Динамика потерь лесного покрова по данным GFC  
Fig. 5. Forest loss dynamics by GFC data

Данные по возобновлению (*gain*) многократно ниже приведённых на рис. 4; опять же по причине используемого в GFC алгоритма основная часть производных лесов в настоящее время находится в стадии средневозрастных, где средняя высота превышает

5 м, но доля хвойных пород ещё невелика. Таким образом, метод отслеживания траекторий в спектральном пространстве выявляет возобновление на значительно более ранней стадии.

## ВЫВОДЫ

В результате исследований впервые с высокой степенью детальности и достоверности выявлены пространственная структура экосистем водосбора р. Кемь и динамика их антропогенных изменений с 1-ой половины XX в. Благодаря использованию метода моделирования спектрального пространства восстановлено состояние растительного покрова до начала массовых вырубок леса в 1930–1950-х гг. и проявления изменений климата, т.е. в состоянии, близком к естественному, «фоновому». С тех пор на территории водосбора произошло существенное, более чем на 60 %, уменьшение площадей продуктивных старовозрастных лесов, однако к настоящему времени наблюдается повсеместное возникновение на месте вырубок вторичных (производных) лесов, что свидетельствует о достаточно высоком восстановительном потенциале экосистем водосбора. Отработанная методика будет применяться на водосборах др. притоков Белого моря с ориентацией на связь с моделью экосистемы Белого моря [Толстиков и др., 2018]. Полученные результаты будут использованы в качестве входных данных эколого-социо-экономической когнитивной модели, прогнозирующей состояние экосистем при изменениях климата и приоритетов экономики.

Использование данных GFC многократно снижает трудоёмкость извлечения информации из снимков Landsat, поскольку практически исключается большинство операций препроцессорной обработки (выбор безоблачных сцен, геометрическая коррекция, выравнивание гистограмм). В совокупности с применением для обработки данных метода моделирования спектрального пространства это даёт возможность создания по единой методике моделей растительного покрова больших территорий.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена по гранту РФФИ «Арктика» № 18-05-60296.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The work was carried out in accordance with the RFBR project “Arctic” № 18-05-60296.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков А.Д., Громцев А.Н., Еруков Г.В., Караваев В.Н., Коломыцев В.А., Курхинен Ю.П., Рукосуев С.И., Сазонов С.В., Шелехов А.М. Экосистемы ландшафтов запада северной тайги (структура, динамика). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1995. 194 с.
2. Замолодчиков Д.Г., Кобяков К.К., Кокорин А.О., Алейников А.А., Шматков Н.М. Лес и климат. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2015. 40 с.
3. Литинский П.Ю. 3D-модель спектрального пространства снимков Landsat как основа геоматической модели бореальных экосистем. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. Т. 24. Ч. 2. С. 116–128. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-116-128.
4. Толстиков А.В., Чернов И.А., Мартынова Д.М. Решение проблемы необходимых данных для численного моделирования процессов в Белом море в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации. Арктика: экология и экономика, 2018. С. 45–55. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-2-45-55.
5. Филатов Н.Н., Дружинин П.В., Менишуткин В.В. Информационное обеспечение комплексных исследований природной среды и социо-экономических условий Белого моря и водосбора. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого

- развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Издательство Московского университета, 2019. Т. 25. Ч. 1. P. 122–137. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-1-25-122-137.
6. Biotic diversity of Karelia: conditions of formation, communities and species. Petrozavodsk: Karelian Research Centre of RAS, 2003. 244 p.
7. Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V. Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G. High-resolution global maps of 21<sup>st</sup> century forest cover change. *Science*, 2013. V. 342. Iss. 6160. P. 850–853. DOI: 10.1126/science.1244693.
8. Litinsky P. Visualization of Landsat image spectral space as a method of boreal ecosystems geomatic modeling (on the example of Eastern Fennoscandia). *Geoinformatics & Geostatistics: An Overview*, 2018. V. 6. Iss. 3. DOI: 10.4172/2327-4581.1000183.
9. Pavlov D.S., Bukvareva E.N. Climate-regulating functions of terrestrial ecosystems and “environmentally friendly” concept of nature management. *Biology Bulletin Reviews*, 2012. No 2. P. 105–123. DOI: 10.1134/S2079086412020053.
10. Tranvik L.J., Downing J.A., Cotner J.B., Loiselle S.A., Striegl R.G., Ballatore T.J., Dillon P., Finlay K., Fortino K., Knoll L.B., Kortelainen P.L., Kutser T., Larsen S., Laurion I., Leech D.M., McCallister S.L., McKnight D.M., Melack J.M., Overholt E., Porter J.A., Prairie Y., Renwick W.H., Roland F., Sherman B.S., Schindler D.W., Sobek S., Tremblay A., Vanni M.J., Verchoor A.M., Wachenfeldt E., Weyhenmeyer G.A. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnology and oceanography*, 2009. V. 54. Iss. 6. Part 2. P. 2298–2314. DOI: 10.4319/lo.2009.54.6\_part\_2.2298.

## REFERENCES

1. Biotic diversity of Karelia: conditions of formation, communities and species. Petrozavodsk: Karelian Research Centre of RAS. 2003. 244 p.
2. Filatov N.N., Druzhinin P.V., Menshutkin V.V. Information support of investigations of environment and socio-economic conditions of White Sea and watershed. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: Moscow University Press, 2019. V. 25. Part 1. P. 122–137. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-1-25-122-137 (in Russian, abs English).
3. Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V. Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G. High-resolution global maps of 21<sup>st</sup> century forest cover change. *Science*, 2013. V. 342. Iss. 6160. P. 850–853. DOI: 10.1126/science.1244693.
4. Litinsky P.Yu. 3D model of the spectral space of Landsat images as the basis of the boreal ecosystems geomatic model. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Petrozavodsk: KRC RAS, 2018. V. 24. Part 2. P. 116–128. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-116-128 (in Russian, abs English).
5. Litinsky P. Visualization of Landsat image spectral space as a method of boreal ecosystems geomatic modeling (on the example of Eastern Fennoscandia). *Geoinformatics & Geostatistics: An Overview*, 2018. V. 6. Iss. 3. DOI: 10.4172/2327-4581.1000183.
6. Pavlov D.S., Bukvareva E.N. Climate-regulating functions of terrestrial ecosystems and “environmentally friendly” concept of nature management. *Biology Bulletin Reviews*, 2012. No 2. P. 105–123. DOI: 10.1134/S2079086412020053.
7. Tolstikov A.V., Chernov I.A., Martynova D.M. Solution of the problem of necessary data for numerical modeling of processes in the White Sea in the interests of the development of the Arctic zone of the Russian Federation. *Arctic: ecology and economics*, 2018. P. 45–55. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-2-45-55 (in Russian).
8. Tranvik L.J., Downing J.A., Cotner J.B., Loiselle S.A., Striegl R.G., Ballatore T.J., Dillon P., Finlay K., Fortino K., Knoll L.B., Kortelainen P.L., Kutser T., Larsen S., Laurion I., Leech D.M., McCallister S.L., McKnight D.M., Melack J.M., Overholt E., Porter J.A., Prairie Y., Renwick

*W.H., Roland F., Sherman B.S., Schindler D.W., Sobek S., Tremblay A., Vanni M.J., Verchoor A.M., Wachenfeldt E., Weyhenmeyer G.A.* Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnology and oceanography*, 2009. V. 54. Iss. 6. Part 2. P. 2298–2314. DOI: 10.4319/lo.2009.54.6\_part\_2.2298.

9. *Volkov A.D., Gromtzev A.N., Erukov G.V. Karavaev V.N., Kolomytsev V.A., Kurhinen Y.P., Rukosuev S.I., Sazonov S.V., Shelehov A.M.* Ecosystems of north-west taiga landscapes (structure, dynamics). Petrozavodsk: KarRC RAS, 1995. 194 p. (in Russian).

10. *Zamolodchikov D.G., Kobayakov K.K., Kokorin A.O., Aleinikov A.A., Shmatkov N.M.* Forest and climate. Moscow: World Wide Fund for Nature (WWF), 2015. 40 p. (in Russian).

---