

Использование псевдоповерхностей для мониторинга наземного покрова на примере Западной Карелии

В. В. Тарасенко, Б. В. Раевский

Карельский научный центр РАН, Петрозаводск, 185000, Россия
E-mails: victor.tarasenko.2208@mail.ru, borisraevsky@gmail.com

Рассмотрены вопросы мониторинга наземного покрова северо-таёжной зоны западной части Республики Карелии с применением метода генерации псевдоповерхностей на основе результатов дешифрирования разновременных снимков Landsat. Исследуемая область общей площадью около 800 000 га располагалась в Костомукшском городском округе, Калевальском и Муезерском районах Республики Карелии. Дешифрирование разновременных космических снимков проекта Landsat-5 (TM, *англ.* Thematic Mapper) 1988 г. съёмки и Landsat-8 (OLI, *англ.* Operational Land Imager) 2021 г. съёмки выполнено классическим методом минимального расстояния с использованием эталонов обучающей и валидационной выборки (392 объекта), которые были разбиты на 29 классов и в дальнейшем объединены в 9 групп. Верификация результатов классификации по общей точности (71–77 %) и коэффициенту каппа Коэна (0,62–0,65) продемонстрировала приемлемую достоверность дешифрирования. Оригинальная методика создания псевдоповерхностей базировалась на формировании «погектарной» регулярной сети (100×100 м), в центроидах которой содержалась информация о процентных долях объектов, относящихся к той или иной группе классов. В частности, были построены псевдоповерхности различных типов растительных сообществ государственного природного заповедника «Костомукшский». Представлены и обсуждены аспекты использования псевдоповерхностей природного растительного покрова и антропогенно изменённых областей для решения задач мониторинга территории, сочетающей глубоко антропогенно изменённые и малонарушенные северотаёжные ландшафты. Полученные результаты могут быть использованы для формирования актуальных и достоверных тематических картографических продуктов с использованием геоинформационных систем, также в виде интерактивных карт и публикации их в интернете.

Ключевые слова: мониторинг растительного покрова, псевдоповерхности, дистанционное зондирование Земли, классификация, особо охраняемая природная территория, геоинформационные системы, тематическое картирование, интерактивные карты

Одобрена к печати: 23.03.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-97-112

Введение

Экологический мониторинг как система наблюдений за состоянием окружающей среды, оценки и прогноза её изменений под воздействием природных и антропогенных факторов (Скрипко, Головина, 2016; Стишов, Троицкая, 2017) представляет собой одну из основных форм государственной природоохранной деятельности. Мониторинговые наблюдения, как правило, реализуются на базе сети стационарных пунктов, которые, однако, не всегда способны в полной мере отразить пространственные изменения (Громцев, 2008; Скрипко, Головина, 2016). Поэтому сегодня подавляющее большинство программ мониторинга осуществляются с использованием данных дистанционного зондирования (ДЗ), в структуре которых преобладает информация, получаемая с аппаратов космического базирования.

Методы дешифрирования космических снимков подробно описаны в многочисленных публикациях (Бараталев, Лупян, 2013; Бараталев и др., 2012; Воробьев, Курбанов, 2013; Воробьев и др., 2015; Комарова и др., 2016; Курбанов и др., 2011; Лабутина, Балдина, 2011; Лупян, Саворский, 2012; Никитина (Шевчук), Олзоев, 2014; Никитина и др., 2019; Соромотин, Бродт, 2018). Применение тех или иных методов дешифрирования зависит от ряда аспектов и специфики изучаемых объектов, однако практически все они дают двухмерную оценку динамики наземного покрова в виде «плоских» тематических карт и сводных таблиц распределения классов.

Ранее (Раевский и др., 2022) нами было выполнено дешифрирование территории государственного природного заповедника (ГПЗ) «Костомукшский» с использованием ряда методов управляемой классификации, а именно: минимального расстояния, максимального правдоподобия и дистанции Махаланобиса. На основании полученных результатов был сделан вывод о близких значениях точности дешифрирования классическими методами, имеющими статистическую природу (общая точность в пределах 86–87 % и коэффициент каппа Коэна 0,71–0,74). Тем не менее интегральная оценка тематического и пространственного аспекта достоверности дешифрирования позволила заключить, что в отношении исследуемого объекта метод минимального расстояния дал наилучшие результаты.

Оценка пространственного изменения площадных объектов растительных сообществ по результатам мониторинга с использованием ДДЗ и выявление причин этих изменений представляют собой непростую задачу. В настоящее время значительное внимание уделяется построению различных поверхностей (цифровая модель рельефа, цифровая модель поверхности, трёхмерные модели зданий, сооружений и т. п.) на основе количественных показателей (наземные высотные отметки, глубина водных объектов, высота и полнота лесного полога и т. д.). Для создания цифровых моделей поверхности широко используются современные виды (Шокин и др., 2016) дистанционного зондирования, а именно: радиолокационная съёмка, лазерное сканирование и т. д. Однако в решении задач мониторинга наземного покрова на макроуровне построение этих моделей сопровождается существенными финансовыми затратами и требованием наличия соответствующих аппаратно-программных средств (Шокин и др., 2016).

Оригинальность представляемой методики заключается в использовании результатов дешифрирования данных космической съёмки для формирования непрерывных поверхностей или псевдоповерхностей групп классов наземного покрова исследуемой территории. Поверхность как трёхмерная модель вообще выступает четвёртым типом описания пространственных объектов, которые могут быть описаны как точка, линия/полилиния, полигон/площадной объект. Причём поверхность состоит из этих элементарных компонентов (Vertical..., 2009). Данные псевдоповерхностей становятся одним из способов представления явлений, которые непрерывно изменяются в пространстве. Псевдоповерхность может использоваться для эффективной визуализации тенденций географической информации в границах значительной территории исследований. Псевдоповерхности на основе регулярных (GRID) и нерегулярных (TIN) сеток позволяют математически сравнивать и запрашивать слои информации, создавать новые производные сетки или анализировать слои сетки (Vertical..., 2009).

Цель настоящей работы заключалась в формировании псевдоповерхностей групп классов растительного покрова территории, частично покрывающей Костомукшский городской округ (ГО), Калевальский и Муезерский районы, и в оценке динамики этих групп классов за период 1988–2021 гг.

Материалы и методы

Исследуемая территория общей площадью 794 000 га расположена в северотаёжной подзоне западной области Республики Карелии и охватывает часть Костомукшского ГО, части Муезерского и Калевальского районов (рис. 1, см. с. 99). Здесь до сегодняшнего дня сохранились малонарушенные таёжные ландшафты. В их границах существует крупная особо охраняемая природная территория (ООПТ) федерального значения — ГПЗ «Костомукшский». Широко представлены антропогенно трансформированные лесные ландшафты (производные леса и вырубки на различных стадиях облесения). Имеются также крупные объекты горнодобывающей промышленности (Костомукшский горно-обогатительный комбинат) и зоны компактного проживания населения в г. Костомукша.

С учётом опыта многочисленных публикаций по тематике обработки данных дистанционного зондирования (Барталев, Лупян, 2013; Барталев и др., 2016; Курбанов, Воробьев, 2020; Курбанов и др., 2014; Лабутина, Балдина, 2011; Хадыева и др., 2015) предпочтение было отдано спектрально-зональным снимкам системы Landsat среднего разрешения (30 м).

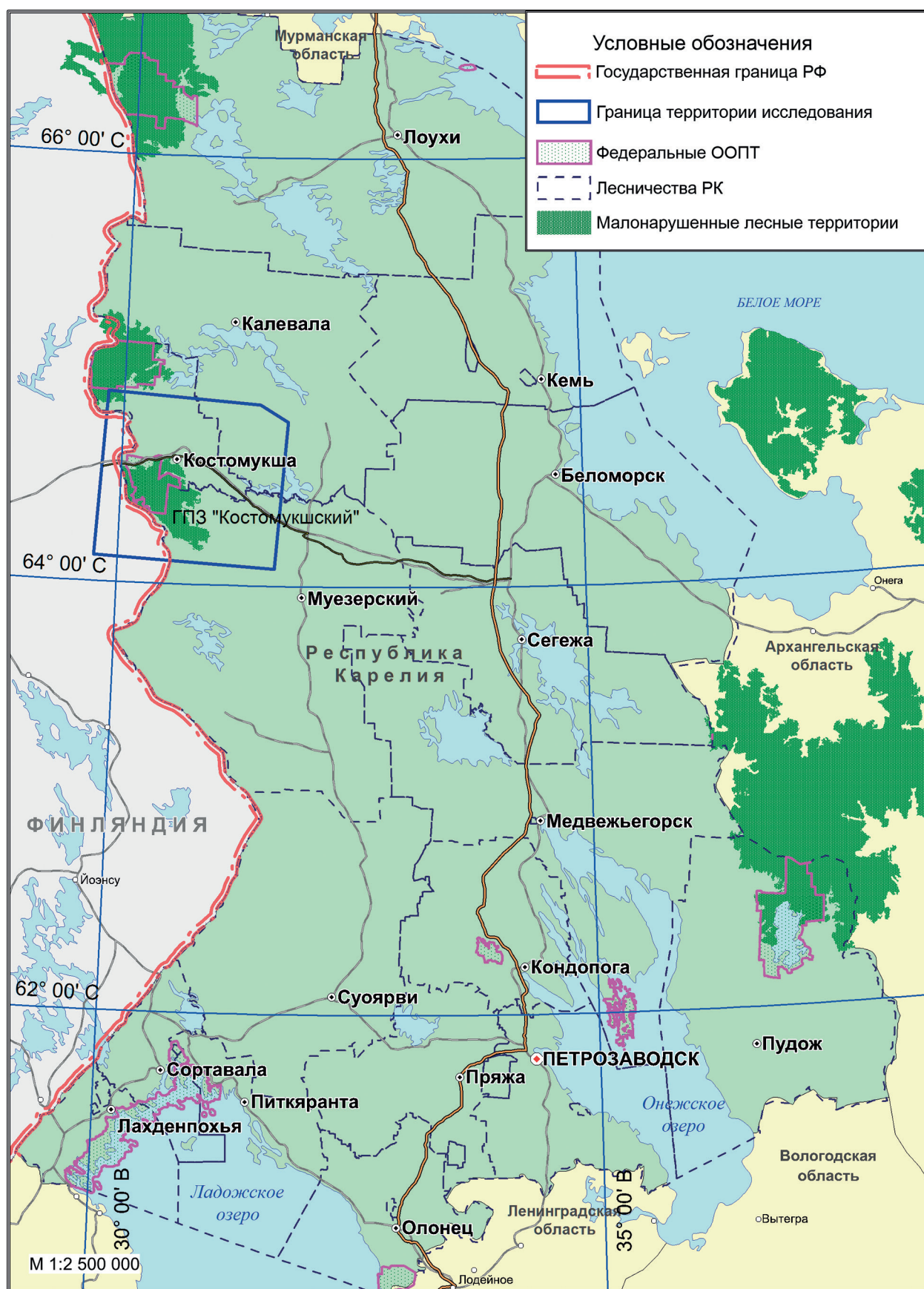


Рис. 1. Расположение исследуемой территории

Также при выборе снимков учитывались требования сезонности (вегетационный период июнь—сентябрь) и отсутствие облачности (от 0 до 5 %). В результате анализа имеющихся в свободном доступе архивных материалов проекта Landsat (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) были выбраны следующие космические снимки:

- сенсор TM (*англ.* Thematic Mapper), спутник Landsat-5, дата съёмки 06.08.1988;
- сенсор OLI (*англ.* Operational Land Imager), спутник Landsat-8, дата съёмки 03.06.2021.

Обработка данных дистанционного зондирования проводилась по стандартной методологии с использованием открытого программного обеспечения (ПО) QGIS v7. С помощью модуля Semi-Automatic Classification (SAC-Plugin) ПО QGIS для ДЗЗ, полученных с сервера USGS (*англ.* United States Geological Survey, Геологическая служба США), была проведена атмосферная коррекция (DOS1) многоканальных сцен и сформированы цветные RGB-композиции (R — *англ.* red, красный; G — *англ.* green, зелёный; B — *англ.* blue, синий) в соответствующих комбинациях каналов (*рис. 2*):

- Landsat-5 (TM) (космический спутник (КС) 1988):
 - 5-й — коротковолновый инфракрасный (SWIR1, *англ.* short wave infrared),
 - 4-й — ближний инфракрасный (NIR, *англ.* near infrared),
 - 3-й — красный (Red);
- Landsat-8 (OLI) (КС 2021):
 - 6-й — коротковолновый инфракрасный (SWIR1),
 - 5-й — ближний инфракрасный (NIR),
 - 4-й — красный (Red).

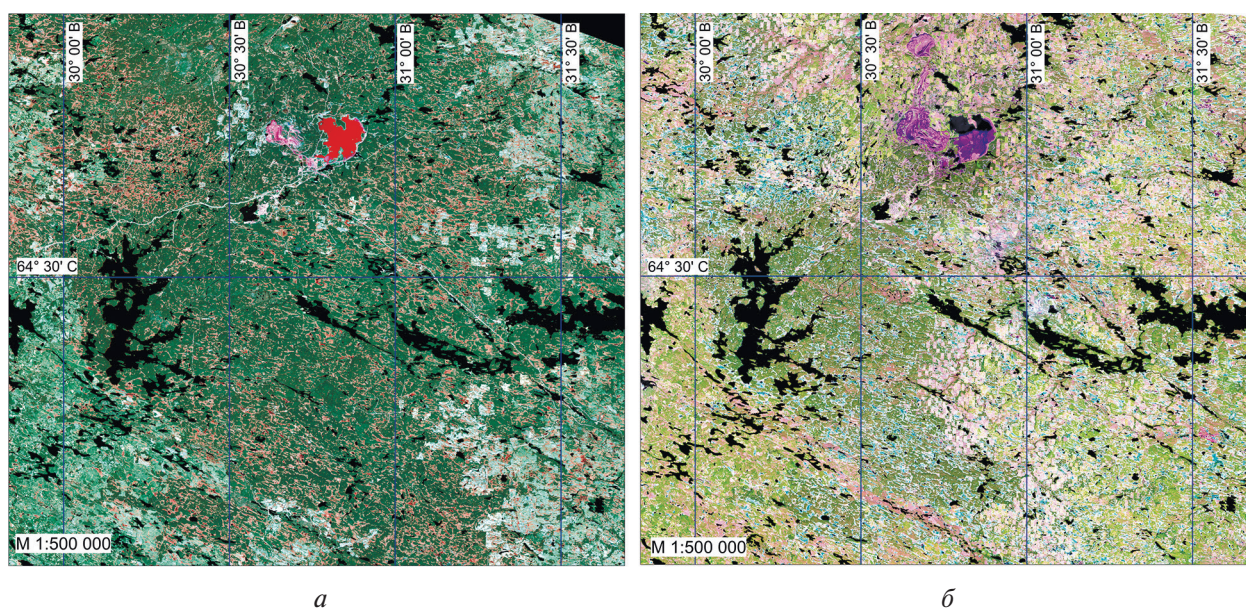


Рис. 2. Фрагменты спектрозональных снимков: *а* — Landsat-5, комбинация спектральных каналов 5—4—3; *б* — Landsat-8, комбинация спектральных каналов 6—5—4

Комбинация каналов 6—5—4 цветного RGB-композиции удобна для изучения растительного покрова и широко используется для анализа состояния лесных сообществ (Евдокимов, Михалат, 2015). Известно, что для обеспечения надёжности и сравнимости результатов тематической обработки спутниковых данных предпочтение отдаётся разновременным композитным изображениям (сезонным, годовым, многолетним). В нашем случае были использованы одиночные снимки, что было отчасти обусловлено отсутствием достаточного количества малооблачных снимков на исследуемую территорию по годам мониторинга (1988—2021).

Для дешифрирования RGB-композиций был использован апробированный ранее (Раевский и др., 2022) метод контролируемой классификации — метод минимального расстояния (*англ.* Minimum Distance). Смысл метода заключается в отнесении пикселя к тому эталонному классу, евклидово расстояние до центра которого в пространстве признаков минимально. Для разработки классификатора использовались цифровые картографо-атрибутивные повыведельные базы данных лесоустройства ГПЗ «Костомукшский», Костомукшского и Муезерского лесничеств, данные ландшафтных профилей и космические снимки высокого разрешения (*англ.* Bird's Eye). По каждому тематическому классу формировался основной (рабочий) набор эталонов, использовавшийся для классификации, а также валидационный набор контрольных участков для оценки точности и надёжности дешифрирования (*табл. 1*). По некоторым растительным формациям, например такой как «сосновая», выделялся целый ряд классов, с тем чтобы максимально полно представить весь диапазон спектральных характеристик данного типа растительного покрова. Известно, что сосна обыкновенная обладает очень широким экологическим диапазоном, поэтому её насаждения, произрастающие в экстремально сухих или, наоборот, переувлажнённых местообитаниях существенно отличаются своими спектральными сигнатурами от сосняков черничных и брусничных.

Таблица 1. Распределение числа эталонов по тематическим классам

Класс	Число эталонов	
	общее	в том числе контрольных
1. «Березняки»	2	1
2. «Берёзово-еловые насаждения»	4	1
3. «Берёзово-осиновые насаждения»	4	1
4. «Болота»	35	8
5. «Вырубки свежие» (не старше 5 лет)	9	2
6. «Вырубки средневозрастные» (6–10 лет)	8	2
7. «Вырубки старые» (старше 10 лет)	9	2
8. «Гари»	5	1
9. «Водные объекты»	8	2
10. «Дороги»	5	2
11. «Елово-сосновые насаждения»	15	3
12. «Ельники черничные»	11	3
13. «Карьеры»	8	2
14. «Лесные культуры»	34	5
15. «Луга»	2	1
16. «Населённые пункты»	6	2
17. «Открытые места»	3	1
18. «Сосна по болоту»	3	1
19. «Сосново-елово-берёзовые молодняки»	19	4
20. «Сосново-еловые насаждения»	82	17
21. «Сосново-еловые молодняки»	3	1
22. «Сосняки багульниковые»	13	3
23. «Сосняки лишайниковые»	5	1
24. «Сосняки брусничные»	44	12
25. «Сосняки брусничные скальные»	5	1
26. «Сосняки осоково-сфагновые»	6	2
27. «Сосняки скальные»	6	2
28. «Сосняки черничные»	37	9
29. «Сосняки средневозрастные»	33	10
Итого:	424	102

Такой методический подход повышает достоверность классификации, однако для улучшения зрительного восприятия тематической картограммы результаты классификации по 29 классам на заключительных этапах дешифрирования и построения векторной тематики были агрегированы в 9 групп классов:

- «сосняки» (классы 18–29);
- «ельники» (классы 11, 12);
- «лиственные породы» (классы 1–3);
- «болота» (класс 4);
- «луговая растительность» (класс 15);
- «необлесившиеся вырубki» (класс 5);
- «облесившиеся вырубki» (классы 6, 7, 14);
- «прочие земли» (классы 8, 10, 13, 16, 17);
- «водные объекты» (класс 9).

Чтобы по возможности исключить эффект одновременности на процесс дешифрирования спектрзональных снимков, эталонные и валидационные выборки 1988 и 2021 гг. формировались в близких локациях с учётом изменения состояния исследуемой территории. Процедуры классификации, а также расчёт оценок её точности и надёжности выполнены с использованием специализированных модулей программного обеспечения ENVI 5.3 (Ялдыгина, 2011).

Предлагаемый метод мониторинга базировался на построении псевдоповерхностей групп классов растительного покрова по результатам дешифрирования предварительно обработанных RGB-композиций 1988 и 2021 гг. В итоге формировалась регулярная сеть элементарных полигональных объектов (размер ячейки 100×100 м), содержащая информацию о составе и процентной доле площади участков групп классов мониторинга, находящихся в границах каждой ячейки сети. Выбор размера элементарной ячейки 100×100 м был сделан с учётом ряда факторов. В частности, средняя площадь лесохозяйственного выдела в заповеднике «Костомукшский» по результатам лесоустройства 2015 г. (II разряд) составила 5,7 га, и для выявления наблюдаемой мозаичности лесных экосистем исследуемой территории пространственную детализацию структуры лесного ландшафта с дробностью площади в 1 га следует оценивать как минимально необходимую. Дальнейшее повышение детализации усложнило бы вычислительные процессы и затруднило интерпретацию результатов с учётом пространственного разрешения спутниковых данных 30 м/пиксель. Псевдоповерхности каждой группы классов (кроме группы «водные объекты») формировались по Z-координате, которая представляла собой процент площади участка от общей площади элементарной ячейки. Пространственные координаты (долгота, широта) определялись в центроиде ячейки.

Результаты и обсуждение

Результаты контролируемой классификации КС исследуемой территории в границах ГПЗ «Костомукшский» в 1988 и 2021 гг. методом минимального расстояния по группам классов приведены в *табл. 2*.

Оценка точности полученных результатов дешифрирования проведена модулем Confusion matrix ПО ENVI v5.3 с построением так называемой матрицы неточностей, на основании которой определены такие показатели, как общая точность (достоверность) классификации и коэффициент каппа Коэна (*табл. 3*).

Показатели достоверности результатов дешифрирования находятся на нижней границе диапазона «значительного» уровня согласованности значений (Курбанов, Воробьев, 2020), поэтому полученные данные были использованы для построения псевдоповерхностей выделенных групп классов. С помощью модулей программного обеспечения Mapinfo v12.0.2 сформированы следующие пространственные слои (система координат UTM (*англ.* Universal Transverse Mercator, универсальная поперечная проекция Меркатора) зона 35N):

- «сосняки»;
- «ельники»;
- «лиственные породы»;
- «болота»;
- «луговая растительность»;
- «необлесившиеся вырубки»;
- «облесившиеся вырубки»;
- «прочие земли»;
- «водные объекты».

Таблица 2. Результаты контролируемой классификации ГПЗ «Костомукшский» (га)

Группа классов*	КС 1988	КС 2021
1. «Сосняки»	22 189,8	18 999,7
2. «Ельники»	11 065,5	12 280,9
3. «Лиственные породы»	571,4	124,1
4. «Болота»	1 923,8	3 001,6
5. «Луговая растительность»	89,1	50,3
6. «Прочие земли»	848,4	1 970,6
7. «Водные объекты»**	11 096,8	11 357,6
Итого:	47 784,8	47 784,8

* По территории ГПЗ «Костомукшский» объекты групп классов «необлесившиеся вырубки» и «облесившиеся вырубки» не выявлены.

** Результаты по группе классов «водные объекты» приведены для баланса общей площади дешифрирования КС 1988 и КС 2021 ГПЗ «Костомукшский».

Таблица 3. Достоверность результатов классификации снимков Landsat-5 и Landsat-8

Параметры оценки	Спектрональные снимки	
	КС 1988	КС 2021
Общая точность, %	77,00	71,40
Коэффициент каппа Коэна	0,65	0,62

Также был создан слой «регулярная сетка» с параметрами 100×100 м. Затем выполнена стандартная операция ПО Mapinfo «разрезать», для того чтобы разрезать слой каждой группы классов слоем регулярной сетки (Никитина (Шевчук), Олзоев, 2014). В итоге каждая ячейка регулярной сетки содержала части групп классов, пространственно принадлежащие этой ячейке (рис. 3, см. с. 105). После выполнения стандартных запросов на принадлежность частей каждой группы классов элементарной ячейке регулярной сетки окончательно формируется информация, необходимая для построения псевдоповерхностей групп классов. Фрагмент данных слоя «регулярная сетка» представлен в табл. 4 (названия полей таблицы даны в расшифровке). Таким образом, слой «регулярная сетка» содержит погектарную информацию о составе и количественном содержании каждой ячейки групп классов наземного покрова по данным классификации КС 2021 и частично по данным классификации КС 1988 всей территории исследования. Формирование исходных данных для создания псевдоповерхностей групп классов выполняется построением специальных запросов, которые включают координаты центроидов ячеек (X -долгота/ Y -широта) и Z -координату, в качестве которой выступают доли соответствующих групп классов. Фрагмент выполненного запроса на формирование псевдоповерхности «сосняки» приведён в табл. 5, долгота и широта зафиксированы в центроиде ячейки, а 3-я координата содержит долю сосняков от общей площади ячейки (1 га).

Таблица 4. Фрагмент данных слоя «регулярная сетка» (процент содержания группы классов)

Идентификатор ячейки	Долгота, м	Широта, м	Сосняки		Ельники		Лиственные породы		Болога		Вырубки необлесившиеся	Вырубки облесившиеся	Прочие земли	Луговая растительность	Всё остальное
			КС 1988	КС 2021	КС 1988	КС 2021	КС 1988	КС 2021	КС 1988	КС 2021					
AA100	634650,0	7195050,0	93,75	86,00	0,00	9,00	0,00	0,00	3,25	3,50	0,00	1,50	0,00	0,00	КС 1988
AA101		7194950,0	79,75	73,25	20,25	25,50			0,00	1,25		0,00			3,0
AA102		7194850,0	80,00	85,25	18,75	5,75			1,25	9,00					0,0
AA103		7194750,0	77,00	78,75	0,00	0,00			10,70	10,50					12,3
AA104		7194650,0	83,75	90,50		0,00	4,50	8,75	0,00	0,75					11,75
AA105		7194550,0	76,00	68,00	18,00	22,20		0,00	1,50	9,80					0,0
aA100	717850,0	7195050,0	53,75	7,50	0,00	0,00	0,00		19,2	0,00			16,25		27,05
aA101		7194950,0	60,25	38,25			7,50		9,00	9,00			2,25		23,25
aA102		7194850,0	100,0	8,25			0,00		0,00	0,00		3,75	29,50		0,0
aA103		7194750,0		94,25								0,75	1,25		
aA104		7194650,0	32,50	21,25								7,50	13,50		67,5
aA105		7194550,0	85,00	37,00					9,00			9,00	4,50		15,0
aA106		7194450,0	50,50	77,50	49,50	9,00			0,00	0,00		1,50	12,00		0,0

Примечание: выделены столбцы данных, соответствующие результатам дешифрирования КС 1988 (только основные группы классов «сосняки», «ельники», «лиственные породы», «болота»).

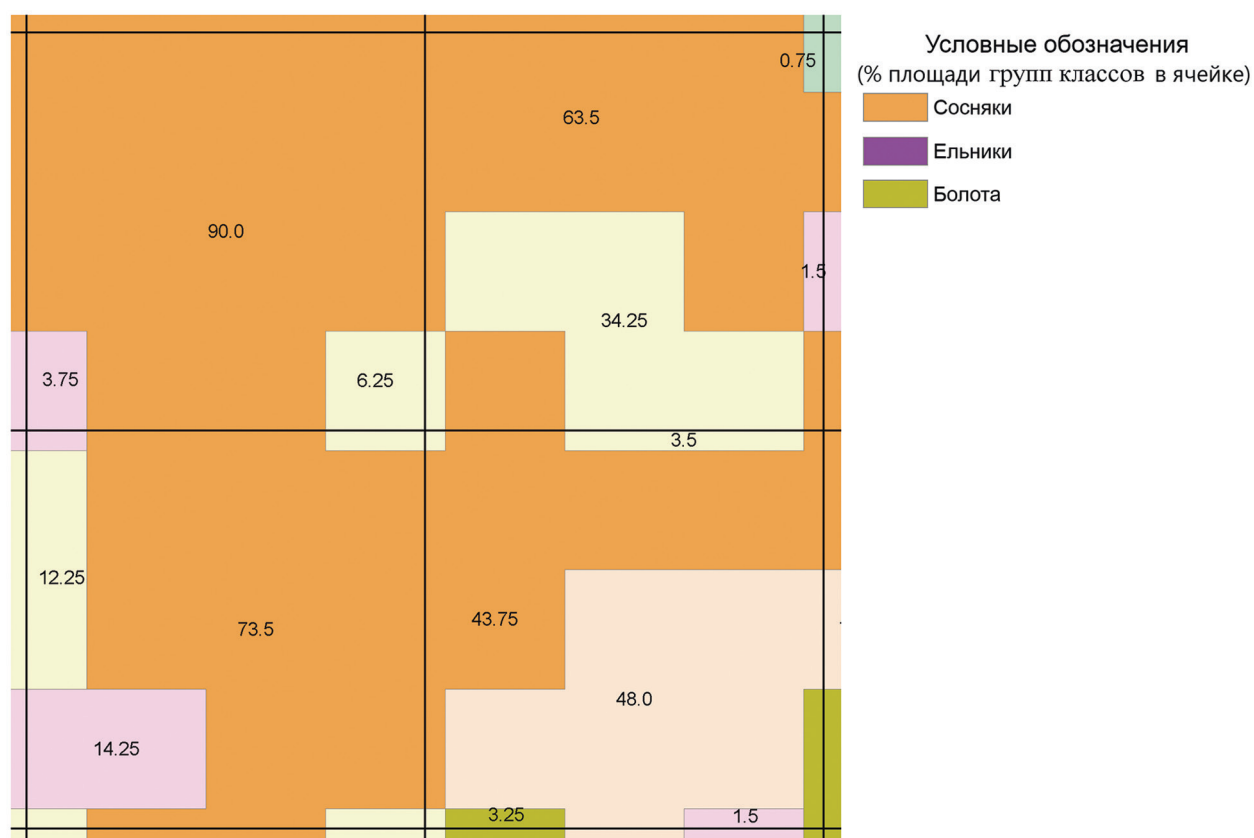


Рис. 3. Фрагмент пространственного заполнения ячеек слоя «регулярная сетка»

Таблица 5. Фрагмент исходных данных псевдоповерхности «сосняки» КС 2021

Долгота, м	Широта, м	Сосняки, %
633950,0	7198650,0	1,25
	7198550,0	43,00
	7198450,0	36,75
	7198350,0	52,25
	7198250,0	17,50
	7198150,0	20,25
	7198050,0	0,00

Рассмотрим построение псевдоповерхности на примере группы классов «сосняки» по информации дешифрирования спектрозонального снимка Landsat-8. С использованием программного модуля Vertical Mapper ПО Mapinfo, строится псевдоповерхность (GRID), которая представляет собой растровый слой и векторный слой полигональных объектов с распределением доли сосняков по всей территории исследования (фрагмент растра на рис. 4, см. с. 106).

Аналогичным образом формируются псевдоповерхности всех остальных групп классов по данным КС Landsat-8, включая основные группы классов по данным дешифрирования КС Landsat-5 («сосняки», «ельники», «лиственные породы» и «болота»). На основе псевдоповерхностей групп классов (растровая форма) можно создавать векторные объекты, например псевдоизолинии групп классов аналогично топографическим горизонтам рельефа. Представленный фрагмент карты (рис. 5, см. с. 106) наложения слоя псевдоизолиний (по данным КС 2021) на слой полигональных объектов (по данным КС 1988) даёт информацию об изменении объектов группы классов «сосняки». Анализ природы этих изменений выявил необходимость исследования результатов дешифрирования по КС 1988 и КС 2021 всех

классов (12 классов), входящих в группу «сосняки». Благодаря проведённому анализу появляется возможность добавлять новые эталоны в обучающую и валидационную выборки для выполнения повторной классификации данных как по КС 1988, так и по КС 2021. Таким образом, использование псевдоповерхностей уточняет и дополняет набор обучающей и валидационной выборок.

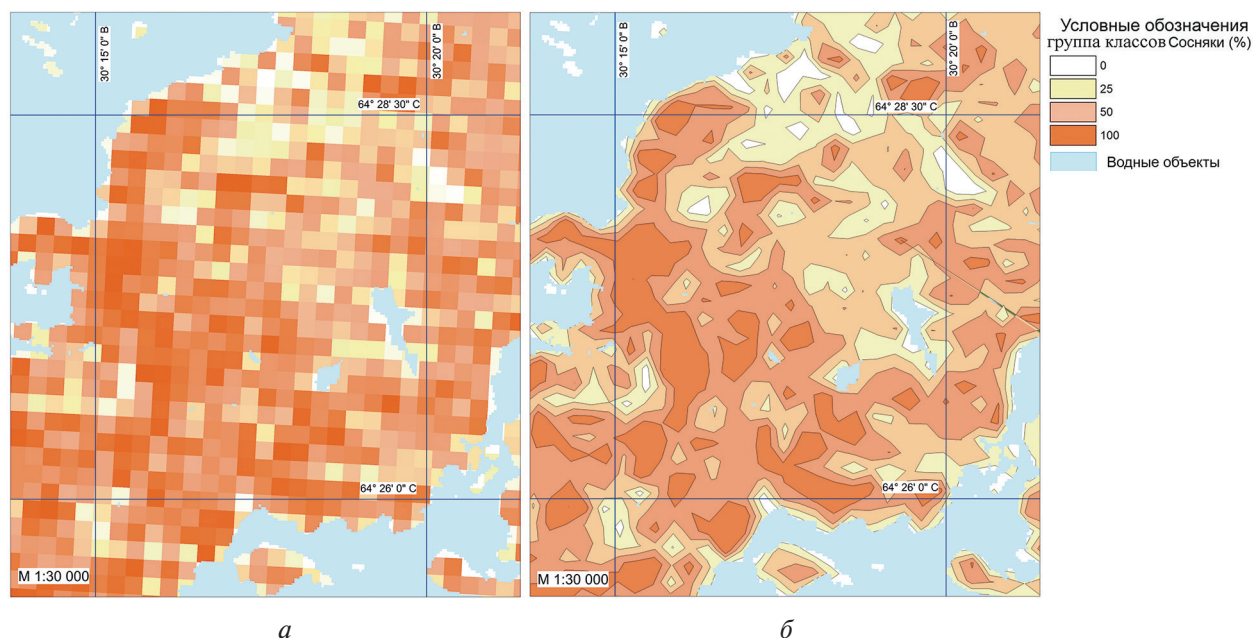


Рис. 4. Фрагмент псевдоповерхности в виде растра (а) и в виде полигональных объектов (б) группы классов «сосняки» по данным КС Landsat-8

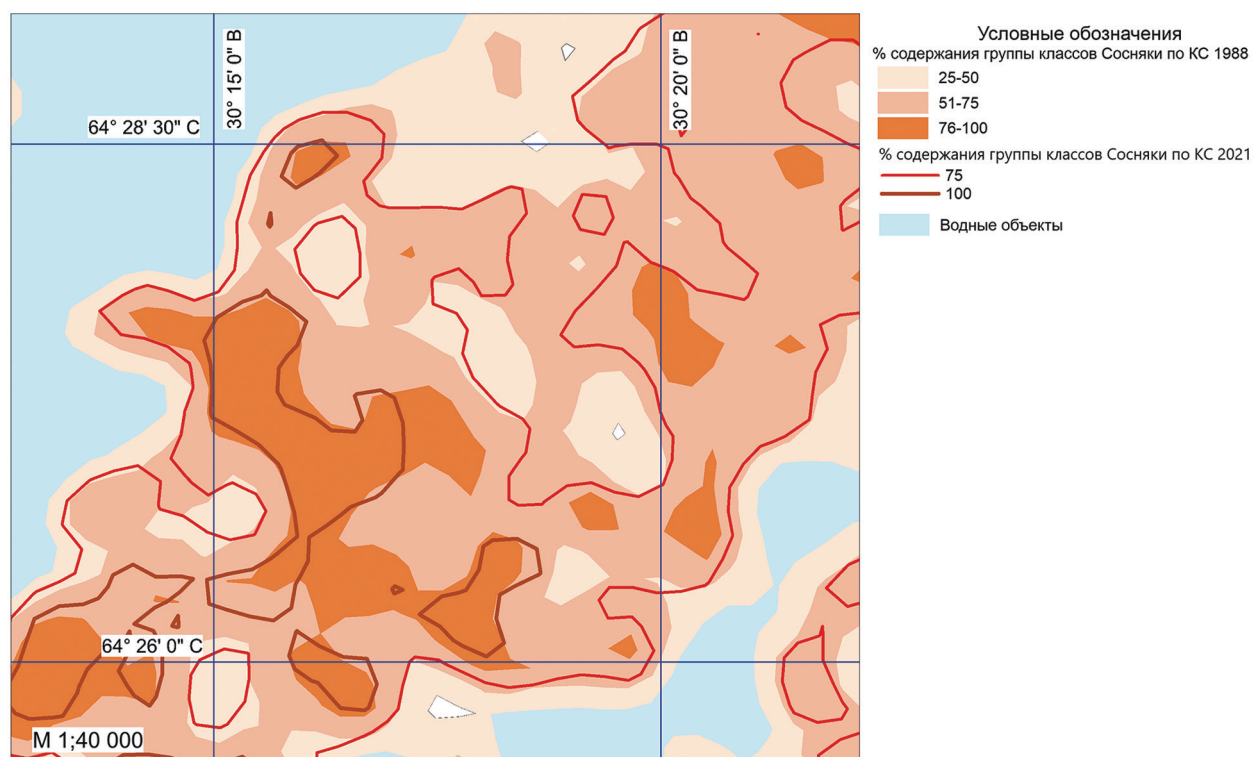


Рис. 5. Фрагмент псевдоповерхности (по данным КС 1988) и псевдоизолиний группы классов «сосняки» (по данным КС 2021)

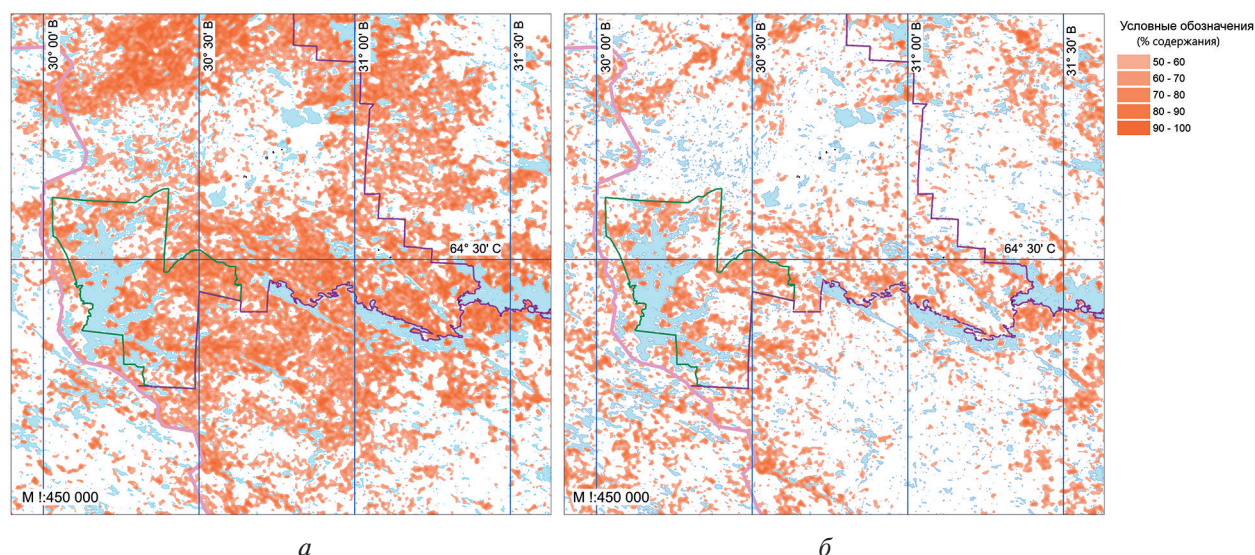


Рис. 6. Псевдоповерхности группы классов «сосняки» (содержание более 50 %) исследуемой территории: а — Landsat-5; б — Landsat-8

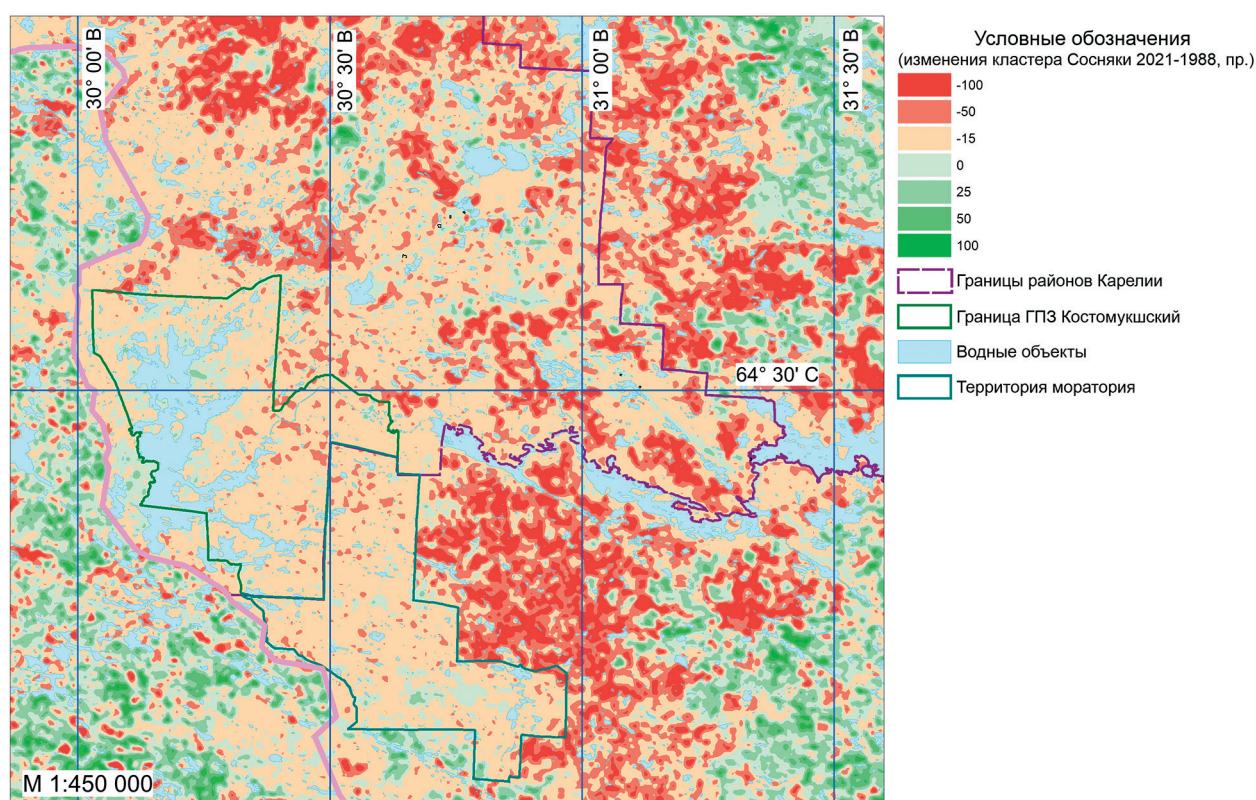


Рис. 7. Тематическая карта изменения группы классов «сосняки» по результатам дешифрирования КС 2021— КС 1988

Анализ всей исследуемой территории с помощью псевдоповерхностей показывает видимые изменения растительности за период 1988–2021 гг. (32 года), особенно в отношении сосновых насаждений (рис. 6). Возможные причины указанных изменений требуют более углублённого исследования и могут быть разбиты на две группы: реальные изменения и все остальные ошибки. С точки зрения лесного хозяйства и в целом природопользования первая

группа представляет особый интерес. Как известно (Раевский, 2017), в возрастном аспекте площадная структура малонарушенных таёжных лесных массивов имеет ярко выраженную положительную асимметрию в сторону преобладания высоковозрастных древостоев (спелых и перестойных, по хозяйственной терминологии). В условиях экстенсивной модели лесопользования именно такие естественные леса выступают основным объектом промышленной эксплуатации. Тематическая карта, приведённая на *рис. 7* (см. с. 107), отчётливо показывает концентрацию площадей сплошных вырубок по периферии и не только самого западного, но и, вероятно, последнего на Европейском Севере России крупного массива малонарушенной сосновой тайги. По результатам дешифрирования исследуемой территории выявлено, что за 32-летний период площадь хвойных насаждений сократилась на 90 019 га. За этот же период площадь вырубок увеличилась на 92 718 га, а лиственных насаждений — на 12 870 га.

Полученные данные хорошо согласуются с имеющимися представлениями о направлении растительных сукцессий в варианте лесопользования с абсолютным преобладанием сплошнолесосечной формы хозяйства. Можно с уверенностью утверждать, что, если не произойдёт переход от существующей экстенсивной к интенсивной модели лесопользования, выявленные тенденции трансформации лесного покрова сохранятся и в перспективе ближайших десятилетий. Особый интерес, с нашей точки зрения, вызывает возможность формирования комплекта слоёв псевдоповерхностей группы классов наземного покрова на региональном уровне для публикации в качестве интерактивной карты (*рис. 8*).

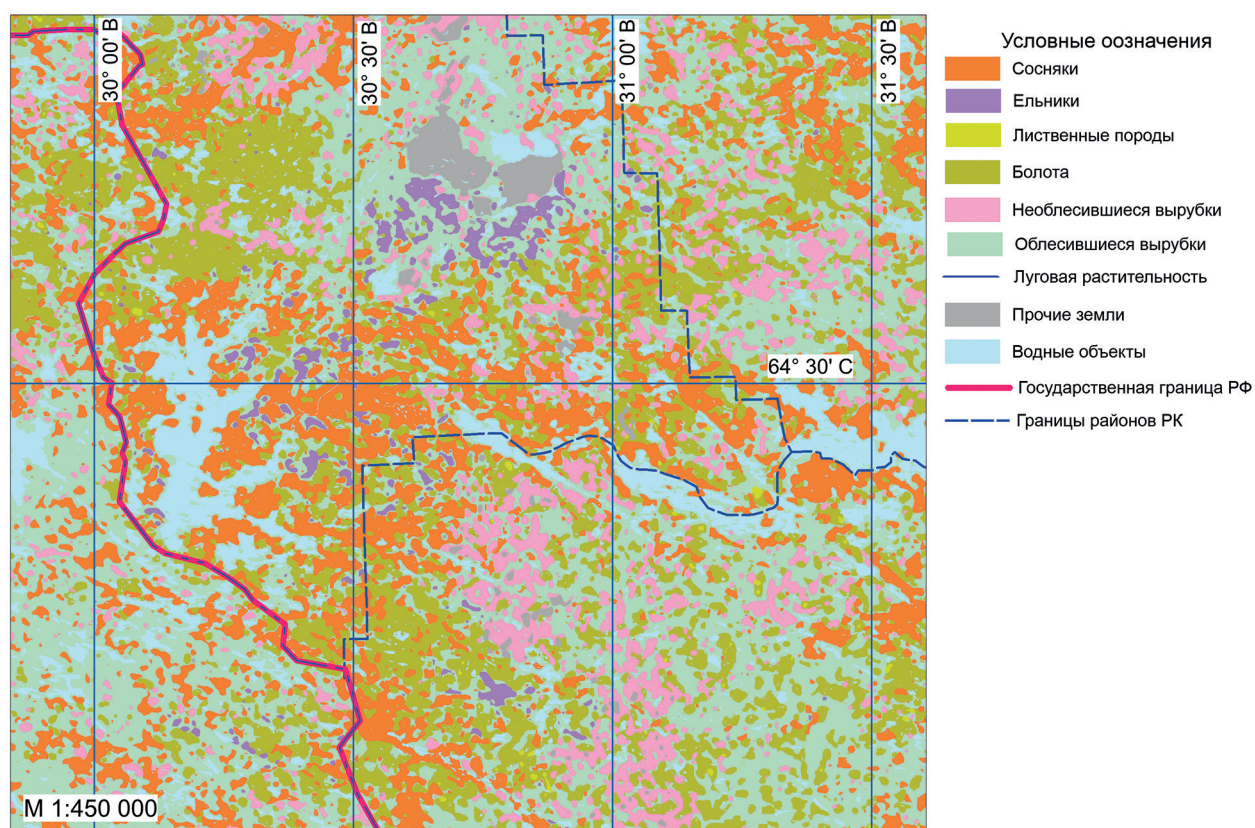


Рис. 8. Тематическая карта исследуемой территории по результатам дешифрирования КС 2021 в виде группировки псевдоповерхностей группы классов КС 2021 (полигональные объекты)

Такого рода тематическая карта способна наглядно показать всю масштабность антропогенных изменений лесного покрова в течение последних 30 лет, когда значительные площади, ранее занятые первозданной тайгой, превращаются в массивы вырубок различной давности и производные леса с растущей долей лиственных пород в них.

Заключение

Созданные с помощью методов трёхмерной генерации псевдоповерхности групп классов наземного покрова по результатам дешифрирования спектральнональных снимков среднего разрешения проекта Landsat позволяют выполнить ряд важных мониторинговых задач, в том числе:

- выявить изменение состояния растительности по классам и группам классов (с точностью дешифрирования КС);
- определить количественные параметры изменения растительного покрова;
- создавать актуальные и достоверные цифровые тематические карты состояния растительных сообществ;
- учитывать изменение растительности, происходящее по естественным причинам и в результате антропогенного воздействия.

На примере модельной территории площадью около 800 тыс. га, расположенной в подзоне северной тайги Западной Карелии, выполнено решение ряда вышеперечисленных задач, позволившее количественно оценить и визуализировать те изменения, которые происходили в растительном (лесном) покрове за истекшие 32 года. Есть все основания ожидать, что предлагаемый методический подход найдёт широкое применение при организации мониторинга состояния природной среды и природопользования на региональном уровне. Одним из ключевых условий этого представляется решение проблемы повышения достоверности дешифрирования посредством применения современных методов классификации (Random Forest, Neural Net, Support Vector Machine и т. п.) и увеличения числа используемых каналов космической съёмки.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания Карельского научного центра РАН (№ FMEN-2022-0014, номер государственной регистрации 122031000071-3).

Литература

1. Барталев С. А., Луян Е. А. Исследования и разработки ИКИ РАН по развитию методов спутникового мониторинга растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 197–214.
2. Барталев С. А., Ершов Д. В., Луян Е. А., Толпин В. А. Возможности использования спутникового сервиса ВЕГА для решения различных задач мониторинга наземных экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса 2012. Т. 9. № 1. С. 49–56.
3. Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Луян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
4. Воробьев О. Н., Курбанов Э. А. Мониторинг состояния растительного покрова на территории Республики Марий Эл с использованием Envisat MERIS // Вестн. Московского гос. ун-та леса — Лесной вестн. 2013. № 7. С. 42–45.
5. Воробьев О. Н., Курбанов Э. А., Губаев А. В., Демишева Е. Н. Методика пошаговой классификации спутниковых снимков для тематического картирования лесов // Вестн. Поволжского гос. технолог. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2015. № 4(28). С. 57–72.
6. Громцев А. Н. Основы ландшафтной экологии европейских таежных лесов России. Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН, 2008. 238 с.
7. Евдокимов С. И., Михалат С. Г. Определение физического смысла комбинации каналов снимков Landsat для мониторинга состояния наземных и водных экосистем // Вестн. Псковского гос. ун-та. Сер.: Естеств. и мат. науки. 2015. № 7. С. 21–32.
8. Комарова А. Ф., Журавлева И. В., Яблоков В. М. Открытые мультиспектральные данные и основные методы дистанционного зондирования в изучении растительного покрова // Принципы экологии. Петрозаводск: Петрозаводский гос. ун-т, 2016. № 1. С. 40–74. DOI: 10.15393/j1.art.2016.4922.
9. Курбанов Э. А., Воробьев О. Н. Дистанционные методы в лесном хозяйстве: учеб. пособие. Йошкар-Ола: Поволжский гос. технолог. ун-т, 2020. 266 с.

10. Курбанов Э. А., Нуреева Т. В., Воробьев О. Н., Губаев А. В., Лежнин С. А., Мифтахов Т. Ф., Незамаев С. А., Полевщикова Ю. А. Дистанционный мониторинг динамики нарушений лесного покрова, лесовозобновления и лесовосстановления в Марийском Заволжье // Вест. Марийского гос. технолог. ун-та. 2011. № 3. С. 17–24.
11. Курбанов Э. А., Воробьев О. Н., Губаев А. В., Лежнин С. А., Полевщикова Ю. А., Демишева Е. Н. Четыре десятилетия исследований лесов по снимкам Landsat // Вестн. Поволжского гос. технолог. ун-та. 2014. № 1(21). С. 18–32.
12. Лабутина И. А., Балдина Е. А. Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга экосистем ООПТ: метод. пособие. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF России), 2011. 88 с.
13. Луян Е. А., Саворский В. П. Базовые продукты обработки данных дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 87–96.
14. Никитина (Шевчук) Ю. Г., Олзоев Б. Н. Изучение антропогенной трансформации ландшафтов Прибайкалья по космическим снимкам на примере острова Ольхон // Вестн. Иркутского гос. техн. ун-та. 2014. № 2(85). С. 67–74.
15. Никитина А. Д., Князева С. В., Гаврилюк Е. А., Тихонова Е. В., Эйшлин С. П., Королева Н. В. Картографирование динамики растительного покрова территории Национального парка «Куршская Коса» по материалам космической съемки Alos и Sentinel-2 // Вопросы лесной науки. Вып.: Аэрокосм. методы и ГИС-технологии в лесоведении, лесном хозяйстве и экологии. 2019. Т. 2(3). С. 1–21. DOI: 10.31509/2658-607x-2019-2-3-1-21.
16. Раевский Б. В. Сравнительный анализ структурных особенностей лесного фонда заповедника «Костомукшский» и национального парка «Калевальский» // Тр. Карельского науч. центра РАН. 2017. № 4. С. 3–14. DOI: 10.17076/them532.
17. Раевский Б. В., Тарасенко В. В., Петров Н. В. Оценка современного состояния растительных сообществ заповедника «Костомукшский» по спутниковым снимкам системы Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 47–61. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-47-61.
18. Скрипко В. В., Головина А. А. Геоинформационное обеспечение экологического мониторинга особо охраняемых природных территорий // Вестн. современной науки. 2016. № 1. С. 149–152.
19. Соромотин А. В., Бродт Л. В. Мониторинг растительного покрова при освоении нефтегазовых месторождений по данным многозональной съемки Landsat // Вестн. Тюменского гос. ун-та. Экология и природопользование. 2018. Т. 4. № 1. С. 37–49. DOI: 10.21684/2411-7927-2018-4-1-37-49.
20. Стишов М. С., Троицкая Н. И. Организация экологического мониторинга на особо охраняемых природных территориях: метод. рекомендации. М.: Заповедная Россия, WWF, 2017. 138 с.
21. Хадыева В. С., Губин В. Н., Шалькевич Ф. Е., Богдасаров М. А. Методы дистанционных исследований в геологии и географии / Репозиторий БГУ. 2015. 210 с. <https://rep.brsu.by/handle/123456789/4548>.
22. Шокин Ю. И., Потапов В. П., Попов С. Е., Гиниятуллина О. Л. Спутниковая радарная интерферометрия: информационно-вычислительные аспекты // Вычисл. технологии. 2016. Т. 21. № 1. С. 141–151.
23. Ялдыгина Н. Б. Использование программного комплекса ENVI для решения задач лесного хозяйства // Геоматика. 2011. № 3. С. 34–39.
24. Vertical Mapper: User Guide. Version 3.7. Pitney Bowes Software Inc., 2009. 213 с.

Development of pseudo-surfaces for ground cover monitoring: the case of western Russian Karelia

V. V. Tarasenko, B. V. Raevsky

*Karelian Research Centre RAS, Petrozavodsk 185000, Russia
E-mails: victor.tarasenko.2208@mail.ru, borisraevsky@gmail.com*

The results of supervised classification of temporary alternate Landsat images (Landsat ET 1988 and Landsat OLI 2021) were treated by generating a number of pseudo-surfaces. Decoding of multispectral space images was carried out by means of the classic minimum distance method based on

pecially selected training sample (392 regions of interest), which was subdivided into 28 classes and 9 groups of them. This classification gave the results with a comparatively high level of reliability with 71–77 % of overall accuracy and 0.62–0.65 of Cohen's kappa. A method for generating pseudo-surfaces by groups of vegetation cover and man-made zones classes was developed and applied to the parts of Kostomuksha municipality, Kalevalsky and Muezersky regions' territories (totally about 800 thousand hectares). The original method for creating pseudo-surfaces was realized by forming regular grid (100×100 m) where each cell centroid contains information about the percentage of objects' area belonging to various groups. Particularly a number of pseudo-surfaces have been created for various types of vegetation communities of the Kostomukshsky Strict Nature Reserve. The results of applying pseudo-surfaces for native vegetation types and human transformed areas were discussed addressing the problems of monitoring the territory which combines deeply transformed zones and natural boreal landscapes. The obtained results can be used to form actual and reliable thematic cartographic products using GIS technologies, including interactive maps and publishing data in the Internet.

Keywords: ground cover monitoring, pseudo-surfaces, remote sensing data, special protected area, GIS technologies, thematic mapping, interactive maps

Accepted: 23.03.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-97-112

References

1. Baratalev S. A., Loupian E. A., Research and development of the IKI RAS on the development of methods of satellite monitoring of vegetation cover, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 1, pp. 197–214 (in Russian).
2. Bartalev S. A., Ershov D. V., Loupian E. A., Tolpin V. A., Possibilities of using the VEGA satellite service to solve various problems of monitoring terrestrial ecosystems, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 49–56 (in Russian).
3. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data. Moscow), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p. (in Russian).
4. Vorobyov O. N., Kurbanov E. A., Monitoring of the state of vegetation cover in the territory of the Republic of Mari El using Envisat MERIS, *Vestnik moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa — Lesnoi vestnik*, 2013, No. 7, pp. 42–45 (in Russian).
5. Vorobiev O. N., Kurbanov E. A., Gubaev A. V., Demisheva E. N., Method of stepwise classification of satellite images for thematic mapping of forests, *Annals of the Volga State Technical University. Ser.: Forest Ecology. Nature management*, 2015, No. 4(28), pp. 57–72 (in Russian).
6. Gromtsev A. N., *Osnovy landshaftnoi ekologii evropeiskikh taezhnykh lesov Rossii* (Fundamentals of landscape ecology of the European taiga forests of Russia), Petrozavodsk: Karelian Research Centre RAS, 2008, 238 p. (in Russian).
7. Evdokimov S. I., Mikhlat S. G., Determining of the physical meaning of band combinations of Landsat images for monitoring terrestrial and aquatic ecosystems, *Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta, Ser.: Estestvennye i matematicheskie nauki*, 2015, No. 7, pp. 21–32 (in Russian).
8. Komarova A. F., Zhuravleva I. V., Yablokov V. M., Open-source multispectral remote sensing data for the investigation of plant communities, *Principles of ecology*, Petrozavodsk: Petrozavodsk State University, 2016, No. 1, pp. 40–74 (in Russian), DOI: 10.15393/j1.art.2016.4922.
9. Kurbanov E. A., Vorobyov O. N., *Distantsionnye metody v lesnom khozyaistve* (Remote methods in forestry), Yoshkar-Ola: Volga State Technical Univ., 2020, 266 p. (in Russian).
10. Kurbanov E. A., Nureeva T. V., Vorobyov O. N., Gubayev A. V., Lezhnin S. A., Miftakhov T. F., Nezamayev S. A., Polevshchikova Yu. A., Remote monitoring of disturbances in forest cover, reforestation and afforestation of Mari Zavolzhje, *Annals of Mari El State Technological University*, 2011, No. 3, pp. 17–24 (in Russian).
11. Kurbanov E. A., Vorobyov O. N., Gubayev A. V., Lezhnin S. A., Polevshchikova Yu. A., Demisheva E. N., Four decades of forest research with the use of Landsat images, *Annals of Permskiy State Technical University*, 2014, No. 1(21), pp. 18–32 (in Russian).
12. Labutina I. A., Baldina E. A., *Ispol'zovanie dannykh distantsionnogo zondirovaniya dlya monitoringa ekosistem OOPT: metodicheskoe posobie* (Using remote sensing data to monitor protected areas ecosystems: a methodological guidebook), Moscow: Vsemirnyi fond dikoi prirody (WWF of Russia), 2011, 88 p. (in Russian).
13. Loupian E. A., Savorskiy V. P., Basic products of Earth remote sensing data processing, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 87–96 (in Russian).

14. Nikitina (Shevchuk) Yu. G., Olzoev B. N., Space image-based study of baikal region landscape anthropogenic transformation (by example of olkhon island) (by example of Olkhon Island), *Annals of Irkutsk State Technical University*, 2014, No. 2(85), pp. 67–74 (in Russian).
15. Nikitina A. D., Knyazeva S. V., Gavriluk E. A., Tikhonova E. V., Eidlina S. P., Koroleva N. V., Mapping the dynamics of the vegetation cover of the Kursha Kosa National Park based on the materials of the space survey Alos and Sentinel-2, *Forest science issues, Issue "Aerospace methods and GIS technologies in forestry, forestry and ecology"*, 2019, Vol. 2(3), pp. 1–21 (in Russian), DOI: 10.31509/2658-607x-2019-2-3-1-21.
16. Raevsky B. V., The structure of forest land and forest stands of the kostomukshsky strict nature reserve compared to kalevalsky national park, *Proc. Karelian Research Centre RAS*, 2017, No. 4, pp. 3–14 (in Russian), DOI: 10.17076/them532.
17. Raevsky B. V., Tarasenko V. V., Petrov N. V., Inventory of the kostomukshskiy strict nature reserve vegetation using landsat images, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 3, pp. 47–61 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-47-61.
18. Skripko V. V., Golovina A. A., Geo-information support of ecological monitoring of specially protected natural areas, *Annals of modern science*, 2016, No. 1, pp. 149–152 (in Russian).
19. Soromotin A. V., Brodt L. V., Monitoring of vegetation cover during the development of oil and gas fields according to the Landsat multispectral survey data, *Annals of Tyumen State University, Ecology and environmental management*, 2018, Vol. 4, No. 1, pp. 37–49 (in Russian), DOI: 10.21684/2411-7927-2018-4-1-37-49.
20. Styshov M. S., Troitskaya N. I., *Organizatsiya ekologicheskogo monitoringa na osobo okhranyaemykh prirodnnykh territoriyakh* (Organization of ecological monitoring within special protected areas), Moscow: Zapovednaya Rossiya, WWF, 2017, 138 p. (in Russian).
21. Khadyeva V. S., Gubin V. N., Shalkevich F. E., Bogdasarov M. A., *Metody distantsionnykh issledovaniy v geologii i geografii* (Methods of remote research in geology and geography), 2015, 210 p. (in Russian), <https://rep.brsu.by/handle/123456789/4548>.
22. Shokin Yu. I., Potapov V. P., Popov S. E., Giniyatullina O. L., Satellite radar interferometry: information computer aspects, *Computing technologies*, 2016, Vol. 21, No. 1, pp. 141–151 (in Russian).
23. Yaldygina N. B., Use of ENVI software for solving forest management issues, *Geomatic*, 2011, No. 3, pp. 34–39 (in Russian).
24. *Vertical Mapper: User Guide, Version 3.7*, Pitney Bowes Software Inc., 2009, 213 p.