Разработка методики создания цифровой пространственной модели наземного покрова крупной территории на основе мультиспектральной космической съёмки высокого разрешения (на примере Лоухского района Республики Карелия)

В. В. Тарасенко, Б. В. Раевский

Карельский научный центр РАН, Петрозаводск, 185910, Россия
E-mails: victor.tarasenko.2208@mail.ru, borisraevsky@gmail.com

Представлена методика гибридной технологии создания цифровой пространственной модели (ЦПМ) наземного покрова на примере территории Лоухского района Республики Карелия площадью более 2 млн га на основе дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли спутниковой программы Sentinel-2 и применения инструментальных средств облачного сервиса Google Earth Engine по состоянию на 2024 г. Дешифрирование мультиспектральной космосъёмки высокого разрешения (10 м) проводилось сочетанием методов управляемой (метод случайного леса (*англ.* random forest)) и неуправляемой (метод кластеризации *k*-средних (*англ. k*-means)) классификации. Учитывая значительный размер исследуемой территории и невозможность получить приемлемое безоблачное покрытие всего района в вегетационный период (июнь – сентябрь 2024 г.), была сформирована «тайловая» сеть георастрового покрытия, состоящая из 18 листов (георастров), для последующего поэтапного дешифрирования мультиспектральных «медианных» снимков. Цифровая пространственная модель наземного покрова создана с использованием на первоначальном этапе данных лесоустройства Национального парка «Паанаярви» и исходя из предположения, что в зонах перекрытия соседних георастров (15–20 % площади листов) находится фактически единый наземный покров. Результатом исследования можно считать актуальную и достоверную ЦПМ наземного покрова крупной территории, входящей в Арктическую зону Российской Федерации, с точностью масштаба М 1:50 000. Созданная ЦПМ наземного покрова может быть использована для выполнения комплексного мониторинга этой Арктической территории как основа регулярного наблюдения за состоянием наземных экосистем и с целью выработки управленческих решений органами государственной власти всех уровней.

Ключевые слова: Арктическая зона России, наземный покров, цифровая пространственная модель, программа Sentinel-2, мультиспектральные космические снимки, облачный сервис Google Earth Engine, машинное обучение, технологии геоинформационных систем, ГИС

Одобрена к печати: 08.07.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-50-68

Введение

Первая четверть XXI в., особенно последнее десятилетие, ознаменовались взрывным ростом использования цифровых технологий во всех отраслях мировой экономики, включая, естественно, научные исследования. Учитывая возрастающее и всё более заметное применение облачных технологий и искусственного интеллекта в решении задач мониторинга наземных экосистем крупных территорий, актуальным становится запрос на методические разработки формирования цифровых пространственных моделей наземного покрова на основе данных дистанционного зондирования Земли высокого разрешения с точностью крупномасштабных карт, например, М 1:50 000. Комплексный мониторинг наземных экосистем представляет собой систематическое наблюдение и оценку состояния и изменений различных наземных природных комплексов, проводимых с целью выявления и анализа воздействия природных и антропогенных факторов, а также разработки мер по их сохранению и рациональному использованию (Груммо и др., 2018). Цифровая пространственная модель (ЦПМ) наземного покрова — это компьютерное представление совокупности цифровых векторных слоёв объектов наземного покрова в непрерывном «плоском» географическом простран-

стве с атрибутивной (описательной) информацией. Такая модель наземного покрова может служить цифровой основой для анализа, моделирования и управления территорией, аналогично геоинформационной модели, интегрируя растровые, векторные и пространственные отношения (Ганиева и др., 2018). Как отмечалось в многочисленных публикациях (Барталев и др., 2016; Дмитриев и др., 2024; Дрыгваль и др., 2024; Ершов и др., 2015; Комарова и др., 2016; Лабутина, Балдина, 2011; Раевский, Тарасенко, 2024; Рязанов, Кулагина, 2024), мультиспектральные космические снимки (КС) с пространственным разрешением 10 м целесообразно применять для оценки состояния наземного покрова на региональном и локальном уровне (Никитина, 2024). Но для выполнения даже общих мониторинговых задач (наблюдение за состоянием, анализ данных, оценка воздействия) необходимо иметь периодически обновляемую (актуальную) и достоверную ЦПМ наземного покрова территории с точностью довольно крупного масштаба (М 1:50 000), которая может быть получена дешифрированием некоммерческих (открытых) данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) высокого разрешения.

Цель данного исследования заключается в разработке методики и создании цифровой пространственной модели наземного покрова значительной территории на уровне района субъекта РФ с точностью крупного масштаба (М 1:50 000) по состоянию на вегетационный период 2024 г. с использованием данных ДЗЗ, облачных технологий и машинного обучения. В процессе работы был применён метод поэтапного («потайлового») дешифрирования «медианных» КС программы Sentinel-2, имеющих пространственное перекрытие порядка 15–20 % соседних листов, с целью обеспечить формирование наборов эталонов управляемой классификации (метод случайного леса (*англ.* random forest)) каждого листа/георастра (георастр — растровое мультиспектральное изображение в формате GeoTiff, имеющее пространственное позиционирование) с последующей кластеризацией (метод *k*-средних (*англ.* *k*-means)) масок основных классов наземного покрова.

Материалы и методы исследований

Арктическая зона Российской Федерации — это северные территории России, простирающиеся вдоль побережья Северного Ледовитого океана. Она включает в себя как части регионов, так и полностью северные субъекты, такие как Ямало-Ненецкий, Ненецкий и Чукотский автономные округа. Арктическая зона РФ отличается экстремальными климатическими условиями, низкой плотностью населения и имеет особое экономическое значение для России (Павленко, 2013). В северо-западную часть Арктической зоны РФ входят следующие административно-территориальные субъекты РФ (*рис. 1*):

- Ненецкий автономный округ; Архангельская область (Архангельск, Новодвинск, Северодвинск, Мезенский район, Приморский район, Онежский район, Лешуконский район, Пинежский район, городской округ «Новая Земля»);
- Республика Карелия (Беломорский район, Калевальский район, Кемский район, Костомукшский район, Лоухский район, Сегежский район);
- Мурманская область.

Лоухский район — территория исследования (см. *рис. 1*) площадью 2,255 млн га, расположен на севере Республики Карелия. Граничит: на западе с Финляндией (протяжённость участка границы 120 км); на севере с Кандалакшским районом Мурманской области; на юге с Кемским и Калевальским районами Карелии. На востоке район имеет выход к Белому морю, протяжённость морского побережья около 150 км. Небольшая часть района находится севернее полярного круга. Территория Лоухского района самая большая среди районов Республики Карелия. Это единственный район в Карелии, который простирается от Белого моря до границы с Финляндией во всю ширину Карелии. В Лоухском районе находится самая высокая гора в Карелии — Нуорунен (577 м над уровнем моря). Климат континентальный. Средняя температура января –12,6 °С, июля +14,2 °С. Более 75 % территории района

покрыто лесом, преимущественно хвойными насаждениями. Выбор Лоухского района в качестве объекта исследования был обусловлен поступательной логикой формирования цифровых пространственных моделей наземного покрова территорий Арктической зоны РФ, разработанных в Карельском научном центре РАН с 2019 по 2023 г. (*рис. 2*).



Рис. 1. Арктическая зона РФ и Лоухский район Республики Карелия

Современный этап развития цифровых технологий в различных сферах деятельности характеризуется расширяющимся привлечением облачных сервисов, инструментов искусственного интеллекта, в частности методов машинного обучения. Машинное обучение (*англ.* machine learning — ML) — это направление искусственного интеллекта, в котором компьютеры учатся выполнять задачи, анализируя данные и выявляя в них закономерности, вместо того чтобы следовать чётко заданным инструкциям (Газимагомадова, 2021). Решение задач мониторинговых исследований значительных по площади территорий невозможно без использования данных ДЗЗ, которые представляют собой растровые изображения в цифровой форме, чья обработка и интерпретация тесно связана с цифровой обработкой изображений (Воробьев и др., 2015). В работе были применены данные ДЗЗ высокого разрешения (10 м) проекта Sentinel-2 Европейского космического агентства (*англ.* European Space Agency) (https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser). Дешифрирование мультиспектральных КС проводилось с использованием облачного сервиса GEE (*англ.* Google Earth Engine). Google Earth Engine — это облачная платформа для геопространственного анализа, которая предоставляет доступ к огромным массивам спутниковых снимков и других пространственных данных для их анализа и визуализации (Богданов и др., 2018; Тутубалина и др., 2020; Янец и др., 2022; Uzhinskiy et al., 2022). Сервис GEE предназначен для анализа данных на планетарном уровне с помощью таких инструментов, как веб-редактор кода, основанный на JavaScript (https://code.earthengine.google.com/). В качестве вычислительной платформы были использованы исполняемые приложения (Java-скрипты) в GEE. Фрагменты КС Sentinel-2 в облачном сер-

висе GEE автоматически проходят процедуры радиометрической калибровки и атмосферной коррекции и представлены в качестве «медианных» мультиспектральных геопространственных растров (георастров) — 8-канальных изображений в GeoTiff-формате за вегетационный период (июнь–сентябрь) 2024 г. (Pflumm et al., 2025). Перечень характеристик каналов съёмки, используемых для дешифрирования георастров, представлен в *табл. 1*.

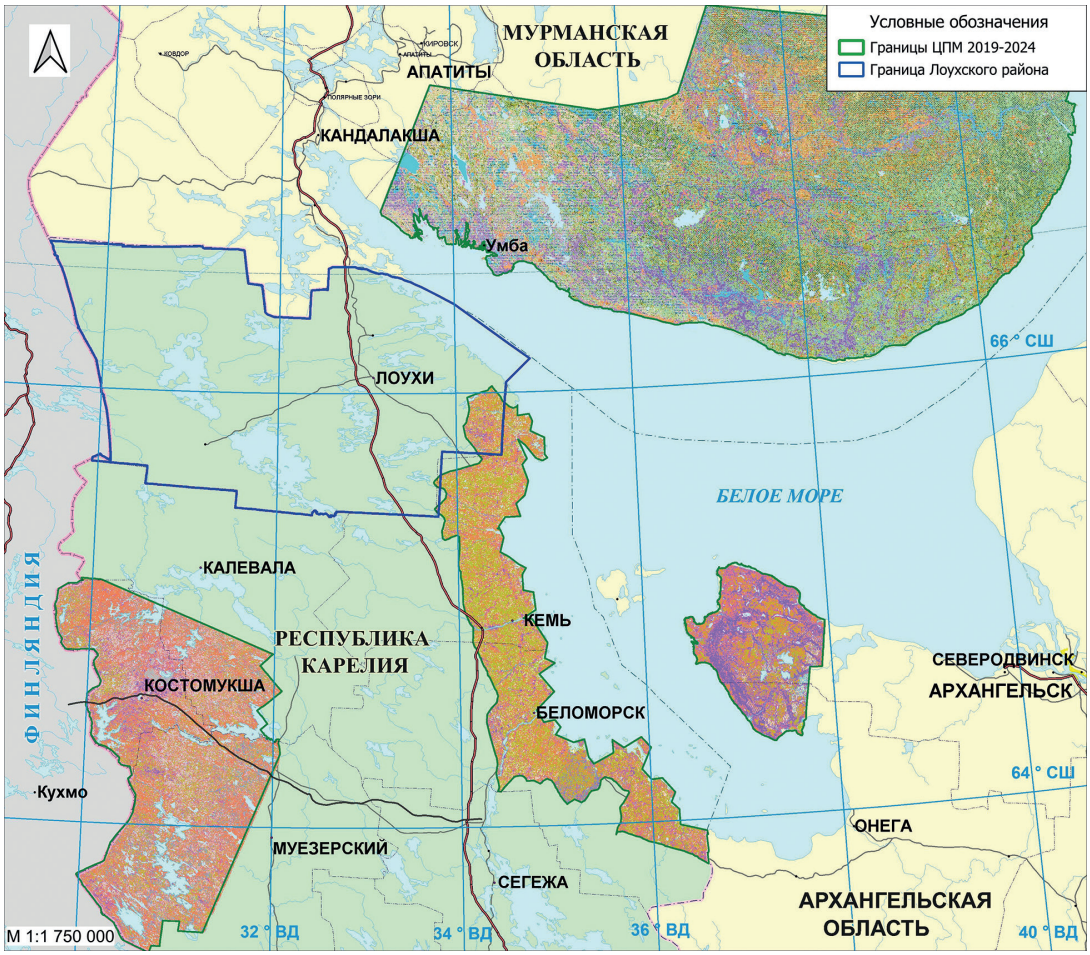


Рис. 2. Цифровые пространственные модели наземного покрова Восточной Фенноскандии (2019–2023)

С учётом ограничений, которые накладываются некоммерческим применение облачного сервиса GEE (максимальный размер дешифрируемого георастра ~2 Гб, максимальное время решения задачи в веб-редакторе GEE ~40 мин.), было принято методическое решение разбить исследуемую территорию (ИТ) на неравномерные области (тайлы/листы) с перекрытием соседних листов в размере 15–20 % (*рис. 3*) для формирования набора георастров (фрагментов КС Sentinel-2) по каждому тайлу/листу. Следует отметить, что наличие цифровых векторных данных по материалам лесоустройства 1995–1996 гг. в Национальном парке (НП) «Паанаярви» явилось отправной/исходной точкой для создания ЦПМ наземного покрова Лоухского района Республики Карелия.

Достижение поставленной цели в отношении ИТ выполнялось с использованием так называемой гибридной методики, подразумевающей комбинацию управляемой и неуправляемой классификации (кластеризации) мультиспектральных георастров, а именно:

- метод случайного леса, автор Л. Брейман (Breiman, 2001) — управляемая классификация КС (Картиев, Курейчик, 2016; Малышева, 2012);
- метод *k*-средних (кластерный анализ) (*англ. k*-means clustering for grids) — неуправляемая классификация КС (Курбанов, Воробьев, 2020).

Таблица 1. Технические характеристики мультиспектральных каналов Sentinel-2 (https://gis-lab.info/forum/viewtopic.php?t=24340)

Режим съёмки	VNIR						SWIR	
Спектральные каналы	2 Blue	3 Green	4 Red	5 Red Edge1	8 NIR	8A Red Edge4	11 SWIR1	12 SWIR2
Спектральный диапазон, мкм	0,49	0,56	0,66	0,70	0,84	0,86	1,61	2,19
Пространственное разрешение (в надире), м	10	10	10	20	10	20	20	20
Ширина полосы съёмки, км	290							
Периодичность съёмки, сут.	от 5 (на экваторе) до 2–3 (в средних широтах)							

Примечание: NIR (*англ.* near-infrared), VNIR (*англ.* visible and near-infrared), SWIR (*англ.* short wave infrared).

Представляется важным привести подробное описание этапов выполнения разработанной методики формирования ЦПМ наземного покрова ИТ, которая включает решение следующих задач:

- Изучение и адаптация архивных материалов НП «Паанаярви» в цифровом виде.
- Разработка исполняемых JavaScript-кодов для выполнения работ по формированию георастров, осуществлению классификации КС и экспорту результатов в формат геоинформационных систем (ГИС).
- Определение состава основных групп тематических классов, характеризующих наземный покров ИТ (Барталев и др., 2016; Коберниченко и др., 2013; Курбанов, Воробьев, 2020; Малышева, 2012):
  - Сосновые насаждения.
  - Еловые насаждения.
  - Лиственные насаждения.
  - Водные объекты.
  - Болотные экосистемы.
  - Прочие земли (нелесные и непокрытые лесом земли).
- Получение медианного георастра начального/исходного тайла (полное покрытие территории НП «Паанаярви») в вегетационный период (01.06–30.09.2024 (Раменская, 1983)).
- Построение тайловой сети покрытия ИТ (набор перекрывающихся прямоугольных площадных листов разной площади, определяемой экспериментальным путём).
- Формирование комплекта эталонов тематических классов пилотной территории (НП «Паанаярви»).
- Управляемая классификация КС начального георастра (тайла № 1).
- Анализ параметров точности и достоверности классификации КС.
- Формирование цифровой пространственной модели начального тайла.
- Дешифрирование георастров тайловой сети покрытия ИТ (начиная со второго):
  - получение медианного георастра тайла вегетационного периода;
  - формирование комплекта эталонов тайла;
  - управляемая классификация георастра тайла;
  - анализ параметров точности и достоверности классификации георастра тайла;
  - кластеризация георастровых масок тематических слоёв (выделение подклассов древесных насаждений и болотных экосистем).
- Построение ЦПМ наземного покрова тайла (единый цифровой векторный слой с идентификацией по классу наземного покрова, включая водные объекты).
- Формирование единой ЦПМ наземного покрова ИТ (в виде совокупности территорий НП «Паанаярви» и участковых лесничеств Лоухского района) посредством сборки цифровых пространственных моделей наземного покрова тайлов.

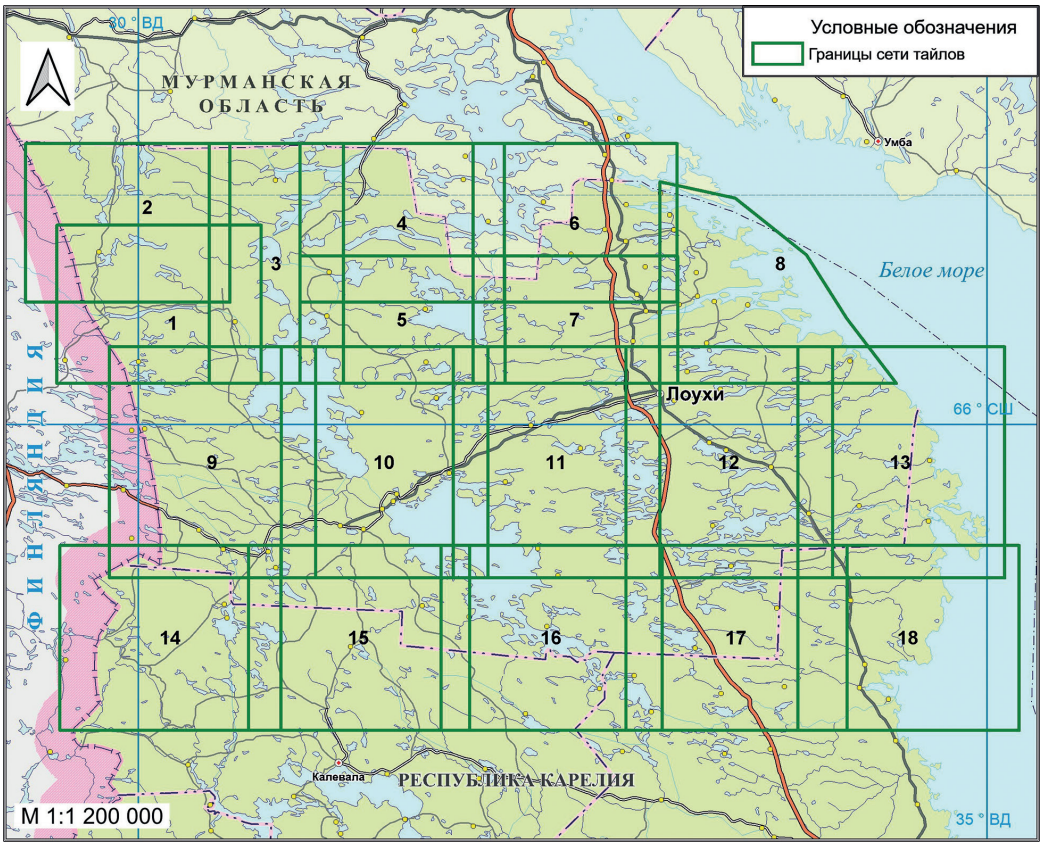


Рис. 3. Тайловое покрытие Лоухского района Республики Карелия

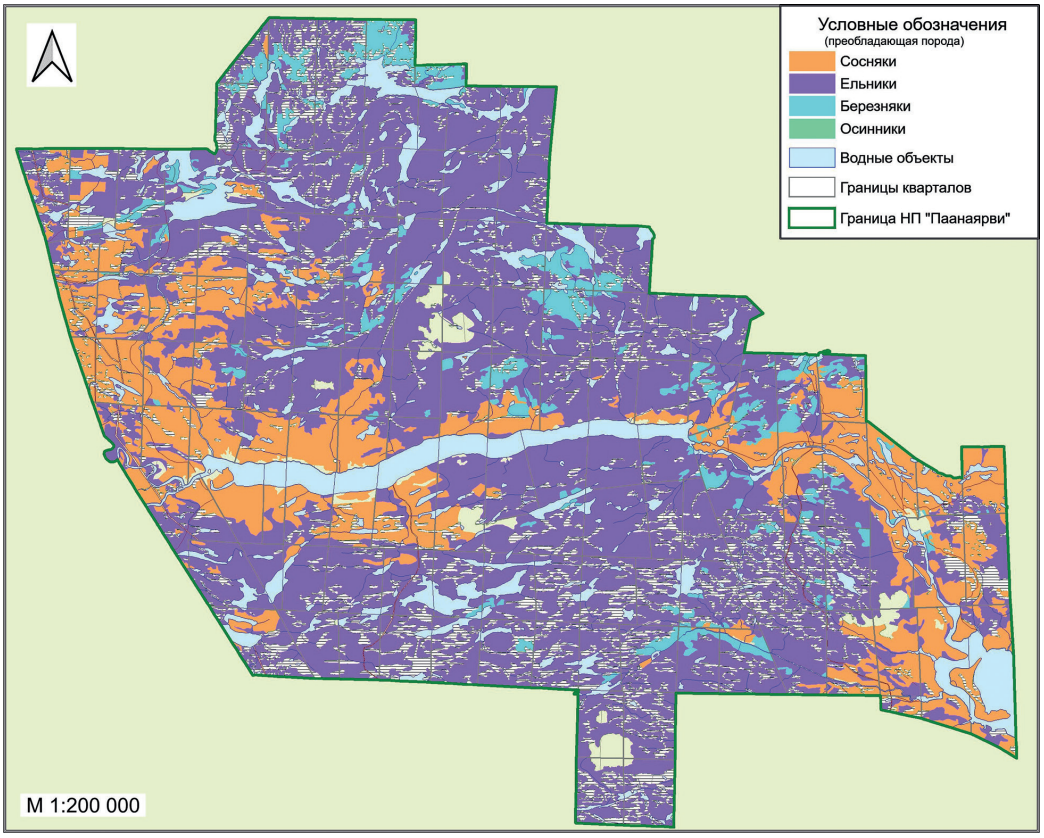


Рис. 4. Тематическая карта (повыдельный уровень) НП «Паанаярви»

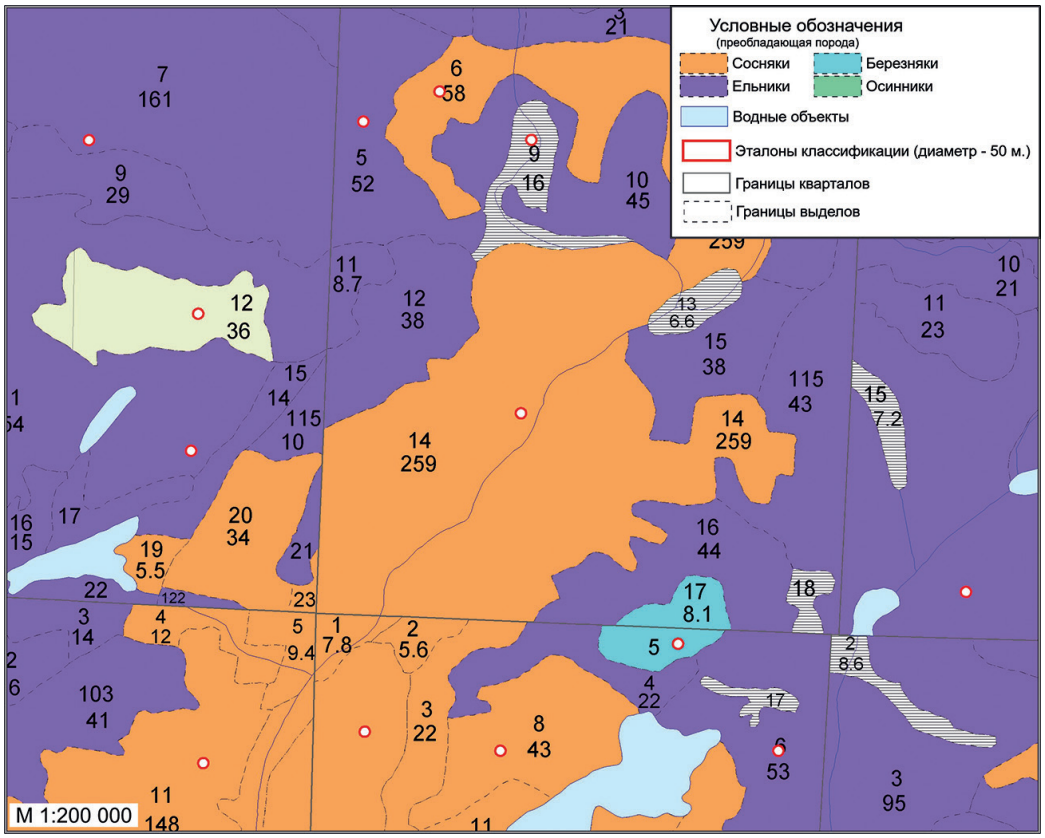


Рис. 5. Условно однородные участки наземного покрова (фрагмент плана лесонасаждений)

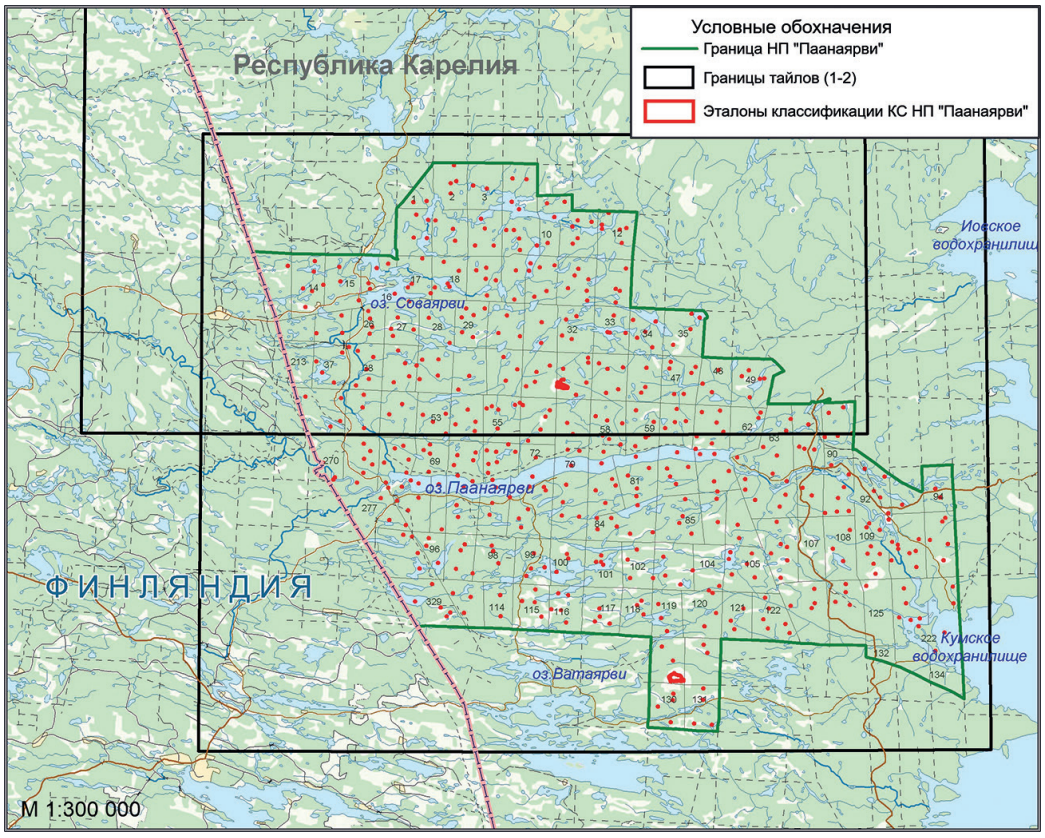


Рис. 6. Распределение тематических эталонов по территории НП «Паанаярви» (в наборе тайловых листов покрытия Лоухского района)

Особую значимость для решения задачи построения ЦМП наземного покрова ИТ имеют данные лесоустройства НП «Паанаярви» в ГИС-формате, представляющие собой совокупность цифровых картографо-атрибутивных данных повыдельной информации. Тематическая карта на повыдельном уровне по материалам лесоустройства представлена на *рис. 4*. Разработка исполняемых JavaScript-кодов на основе открытых источников (https://spatialthoughts.com/2020/04/13/extracting-time-series-ee/) для выполнения работ по формированию георастров, осуществлению классификации и кластеризации КС и экспорту результатов выполнялась на зарегистрированном GEE-ресурсе — Earth Engine Default Project Cloud Project: ee-victortarasenko22081 Manage Cloud Project Organization: Academia and Research (https://code.earthengine.google.com/).

Для формирования тематических слоёв эталонов классификации (набор классификаторов) были использованы векторные повыдельные слои ГИС «НП «Паанаярви». Сначала были рассчитаны координаты центроидов лесотаксационных выделов, которые затем стали основой для создания полигональных окружностей радиусом 25 м однородных участков наземного покрова (*рис. 5*). Сводные данные по всем группам классов начального тайла (по территории НП «Паанаярви») приведены в *табл. 2*. С целью повышения достоверности и оптимального выполнения исследования все полигональны объекты комплекта классификаторов были проверены в ручном режиме с использованием мультиспектрального космоснимка Sentinel-2 на территорию НП «Паанаярви» и данных облачного сервиса Bing Maps. Итоговое распределение эталонов по территории НП «Паанаярви» приведено на *рис. 6*.

Таблица 2. Сводные данные наборов эталонов по тематическим классам «начального» тайла

Номер класса	Наименование класса	Количество эталонов	Общая площадь, га
1	Сосновые насаждения	92	18,06
2	Еловые насаждения	287	56,34
3	Лиственные насаждения	22	4,32
4	Водные объекты	88	17,27
5	Болотные экосистемы	40	7,85
6	Прочие земли	20	3,93
	Итого:	549	107,77

Результаты исследований

Исходные данные для классификации тайла № 1 (набор эталонов в ГИС-формате shape и соответствующий георастр) были загружены в набор Assets исполняемого приложения и проведена управляемая классификация методом random forest. Результаты классификации исследуемого тайла № 1, включая данные о достоверности, приведены на *рис. 7* и в *табл. 3* и *4* (в границах НП «Паанаярви»). *Таблица 4* содержит показатели достоверности классификации тайла № 1 по разному набору каналов КС Sentinel-2: SWIR1-NIR-Red и Blue-Green-Red-Red Edge1-Red Edge4-NIR-SWIR1-SWIR2, которые не имеют существенного различия, но следует отметить несколько лучшие расчётные значения точности классификации комплекта SWIR1-NIR-Red. Валидация полученных результатов проведена по имеющимся данным пробных площадей и выявлено одно несоответствие значению преобладающей породы натурных исследований из четырёх пробных площадей.

На следующем этапе, согласно разработанной методике, проводится кластеризация (Богданов и др., 2018) методом *k*-средних тематических данных, полученных в результате управляемой классификации по приведённым выше классам. По итогам экспертной оценки, базирующейся на исследованиях заболоченности НП «Паанаярви» (Коломыцев, 2003; Раевский и др., 2022), результаты кластеризации маски класса Болотные экосистемы были идентифицированы как аапа-комплексы, представляющие собой грядово-мочажинные

сильнообводнённые участки в центральной части открытых болот, а также различные варианты травяно-сфагнового и пушицево-кустарничково-сфагнового растительного покрова. Аналогично была проведена кластеризация маски класса Сосновые насаждения (классы Еловые насаждения и Лиственные насаждения по отдельности в пространстве спектральных признаков слабо различимы) и в итоге выявлены следующие кластеры/подклассы:

- сосняки брусничные (лишайниковые и вересково-лишайниковые);
- сосняки черничные и кисличные (черничные и кустарничково-зеленомошные);
- сосняки переувлажнённые (багульниковые, осоко-сфагновые);
- аапа-комплексы;
- травяно- и кустарничково-сфагновый покров.

Таблица 3. Сводные данные по результатам классификации георастра № 1

Категории земель	НП «Паанаярви» (материалы лесоустройства 1995–1996 гг.)	Классификация Sentinel-2 2024 г.
Общая площадь, га	103 314	102 979,43
Покрытые лесом, га	77 486	79 579,2
Нелесные земли, га	25 279,4	21 302,72
Водные объекты, га	10 894,5	10 496,25
Болотные экосистемы, га	12 951,4	4896,27
Прочие земли, га	1433,5+548,6 = 1982,1	5910,2
Категории насаждений	НП «Паанаярви»	Классификация Sentinel-2 2024 г.
Сосняки, га	20 227,4	24 995,62
Ельники, га	52 511,2	45 180,51
Березняки, га	4745,9	9403,59
Осинники, га	1,5	–
Итого (покрытые лесом), га	77 486	79 579,72

В результате гибридной классификации георастра № 1 была сформирована цифровая пространственная модель наземного покрова начального тайла (*рис. 8*).

Таблица 4. Показатели достоверности классификации тайла № 1 различного набора спектральных каналов КС Sentinel-2

Показатели точности классификации	SWIR1-NIR-Red	Blue-Green-Red-Red Edge1-Red Edge4-NIR-SWIR1-SWIR2
Общая точность	0,884	0,877
Коэффициент каппа Коэна	0,828	0,809

Важный этап разработанной методики формирования ЦПМ Лоухского района — создание набора эталонов для гибридной классификации соседнего георастра, который имеет общую часть территории с предыдущим георастром (например, георастр № 1 и № 2, см. *рис. 3*). Используя геоинформационные инструменты программного обеспечения MapInfo, был сформирован набор эталонов для выполнения гибридной классификации георастра № 2 (*рис. 9*), сводные данные приведены в *табл. 5.* Каждый эталон представляет собой полигональную (геометрическую) фигуру, близкую по форме к окружности, радиус которой составляет 25 м, и имеющую однородность базового класса больше 75 %.

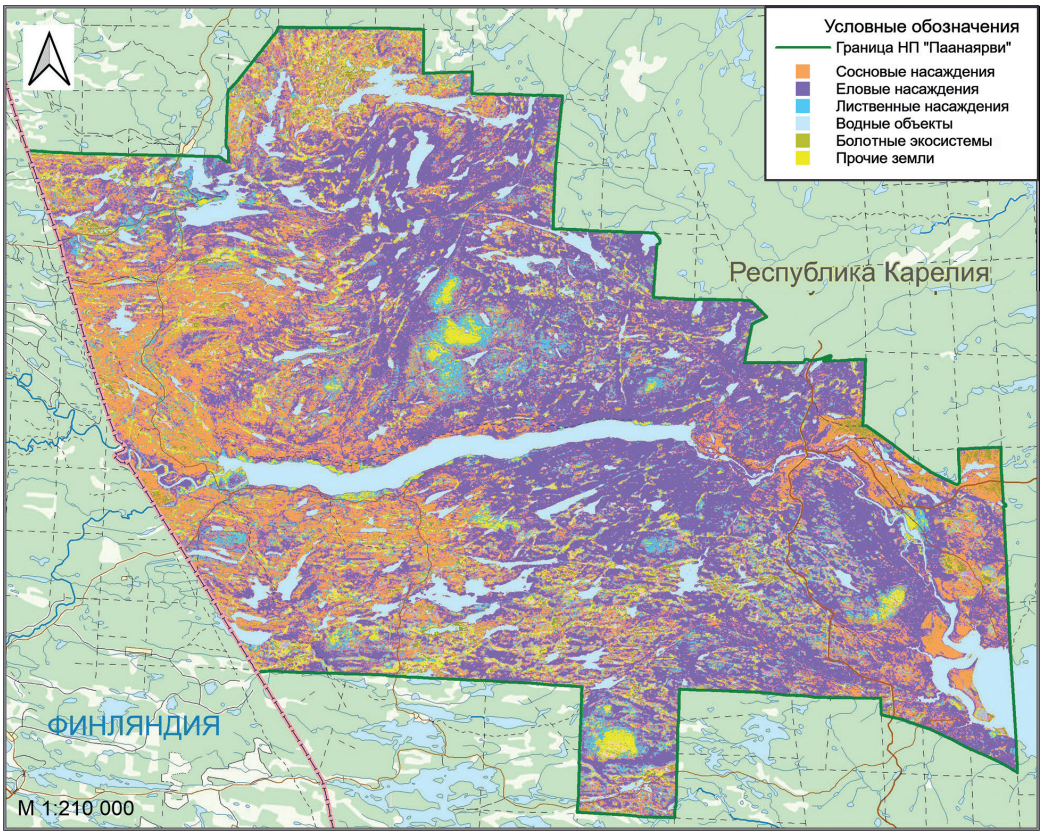


Рис. 7. Результаты классификации георастра тайла № 1 в границах НП «Паанаярви»

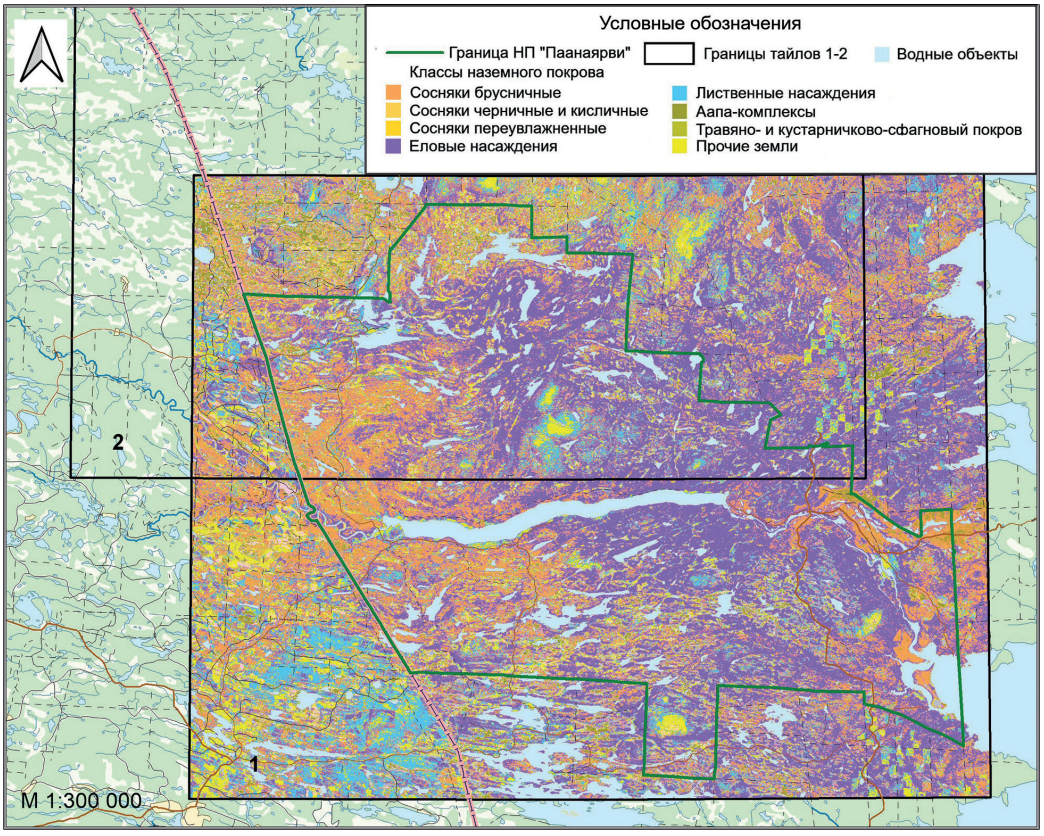


Рис. 8. Цифровая пространственная модель начального тайла

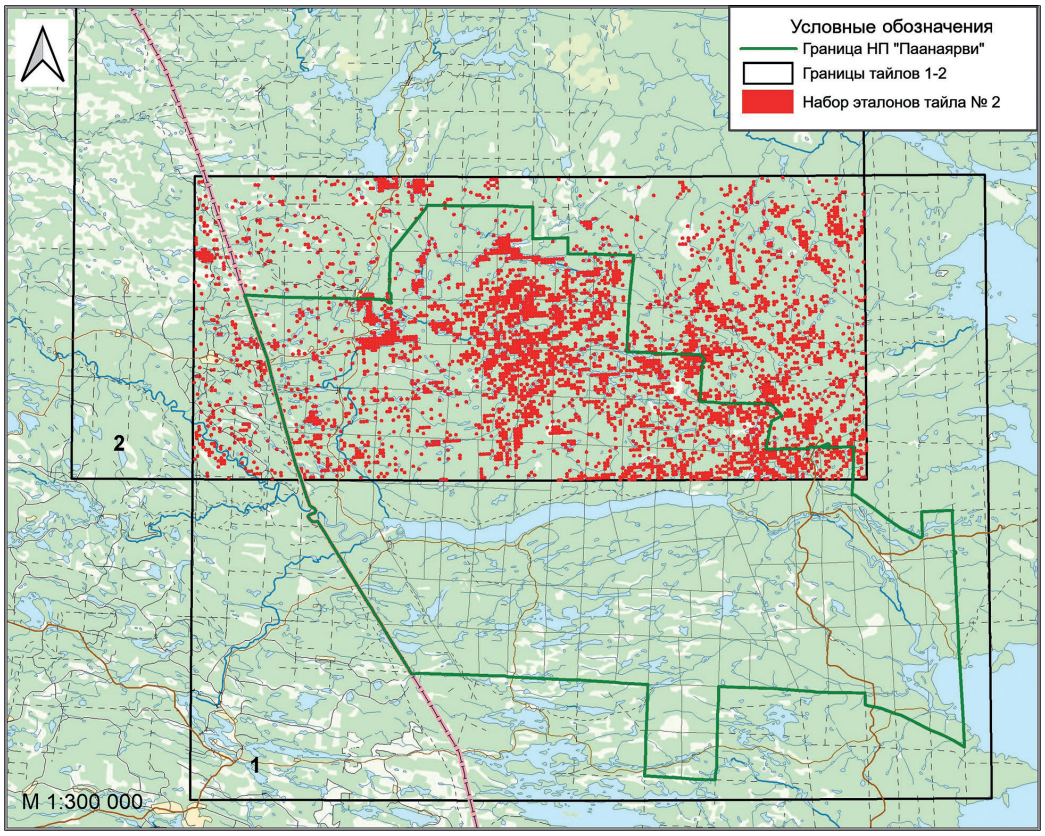


Рис. 9. Расположение эталонов (круговые полигональные объекты, площадь ~0,187 га)

Таблица 5. Сводные данные набора эталонов георастра № 2

Наименование класса	Количество объектов	Общая площадь (га)
Сосняки	284	53,2484
Ельники	3062	574,114
Березняки	52	9,74934
Водные объекты	849	159,185
Болота	166	31,1235
Прочие объекты	82	15,3742
Итого:	4495	842,79444

На *рис. 10* дано объяснение формирования тайловой модели Лоухского района в виде частично перекрывающихся тайлов. Главная идея заключается в возможности создания комплекта эталонов для гибридной классификации соседних георастров и дальнейшего формирования ЦПМ исследуемой территории. Последовательное выполнение процедур классификации георастра № 2 по разработанной методике позволило получить ЦПМ тайла № 2, результат общей ЦПМ наземного покрова георастров № 1 и 2 представлен на *рис. 10.*

Анализируя открытые данные о лесном фонде Лоухского лесничества (в границах Лоухского района), можно подтвердить достаточно высокий уровень достоверности созданной ЦПМ наземного покрова Лоухского района (*табл. 6*), например, различие в общей площади лесных земель составляет меньше 1 % (Лесохозяйственный..., 2020).

Таким образом, по технологии «тайл-за-тайлом» сформирована цифровая пространственная модель Лоухского района (*рис. 11*).

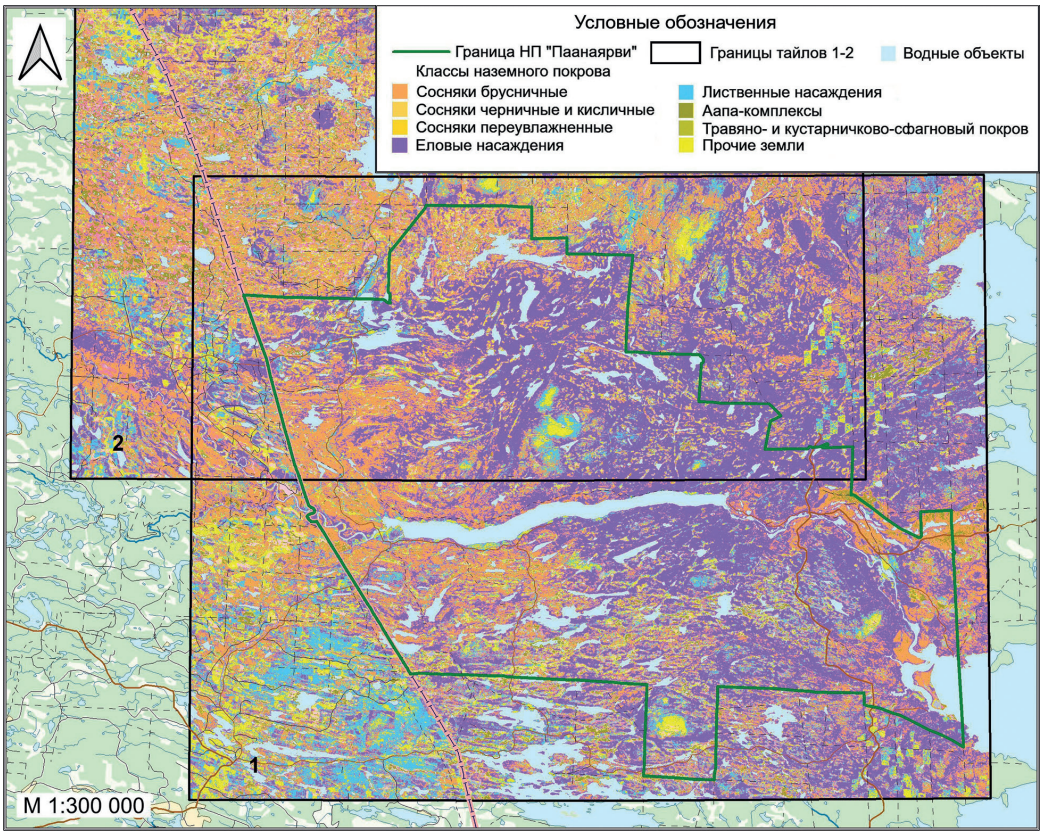


Рис. 10. Цифровая пространственная модель совокупности георастров № 1 и 2

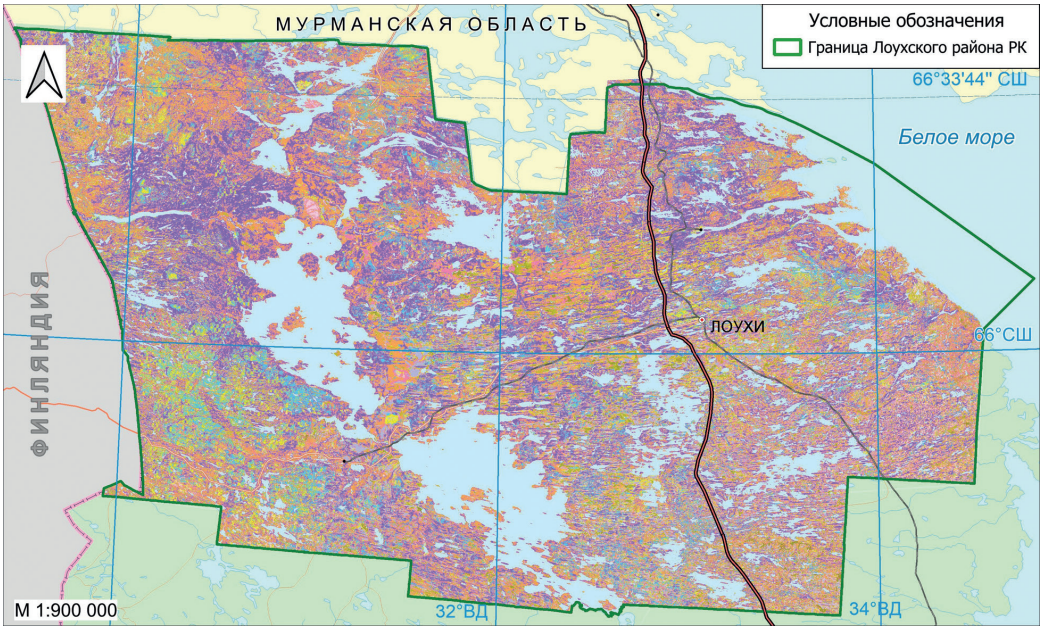


Рис. 11. Цифровая пространственная модель наземного покрова Лоухского района с точностью М 1:50 000

Таблица 6. Распределение суммарных площадей наземных экосистем Лоухского лесничества

Тип экосистемы	Сводные данные ЦПМ Лоухского лесничества, га	Данные по лесному фонду Лоухского лесничества, га	Относительная разность, %
Лесные земли	1 164 798,9	1 175 932	0,95
Водные объекты	468 080	431 971	–8,36
Нелесные земли	1 004 035	948 343	–5,87
Болота	420 236,6	500 171	15,98
	2 168 833,9	2 124 275	–2,10

Обсуждение

Особый интерес вызывает проведение валидации полученной ЦПМ наземного покрова ИТ по данным морской экспедиции Отдела комплексных научных исследований Карельского научного центра РАН (ОКНИ КарНЦ РАН) в 2023 г., в частности, сравнение информации о пробных площадях в скальном среднезаболоченном ландшафте с преобладанием сосновых местообитаний (Громцев, 2008). Результаты валидации представлены на *рис. 12* и в *табл. 7* и показывают высокий уровень достоверности лесных насаждений ЦПМ Лоухского района.

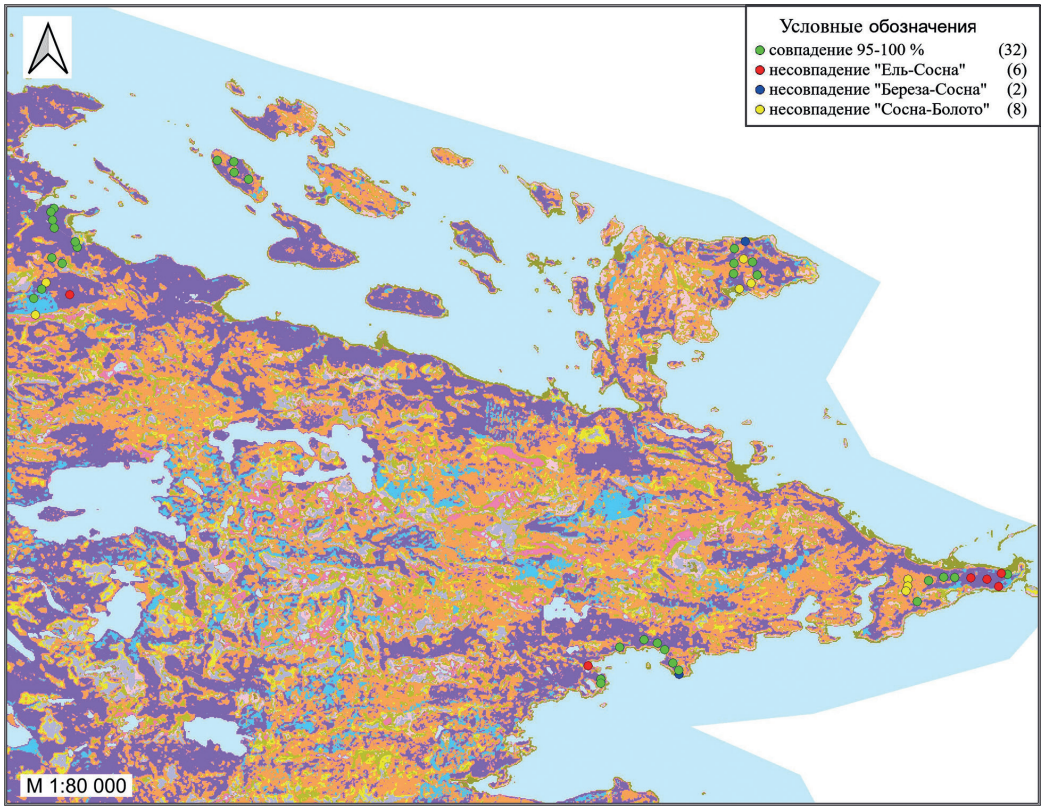


Рис. 12. Карта фиксации пробных площадей морской экспедиции КарНЦ РАН в 2023 г. на ЦПМ Лоухского района

Важный результат выполненной работы — формирование набора георастров Sentinel-2 ИТ по состоянию на 2018 г. (JavaScript-приложение GEE-PICX), так как, используя эти данные ДЗЗ и комплект данных ДЗЗ 2024 г., можно выявить изменения, которые произошли в наземных экосистемах НП «Паанаярви» за шесть лет (2018–2024).

Таблица 7. Результаты валидации ЦПМ Лоухского района по преобладающей породе (ПрП) пробных площадей морской экспедиции КарНЦ РАН 2023 г.

№	Параметр валидации	Количество пробных площадей
1	Совпадение по ПрП 100 %	21
2	Совпадение по ПрП 95 %	11
3	Несовпадение по ПрП (Сосна – Болото)	8
4	Несовпадение по ПрП 100 %	8
	Общее количество пробных площадей	48
	Соответствие по пп. 1-2-3, %	83,3
	Соответствие по пп. 1-2, %	66,7
	Соответствие по п. 1	43,8

Для решения этой мониторинговой задачи было разработано исполняемое приложение в облачном сервисе GEE, применяющее вычисление нормализованного индекса горимости NBR (*англ.* Normalized Burn Ratio) (Петров и др., 2025). В первую очередь было вычислено изменение NBR-индекса по территории георастра № 1, который включает территорию НП «Паанаярви» (*рис. 13*), чтобы отработать методику получения достоверных данных по показателям «прирост – убыль» объектов растительного покрова.

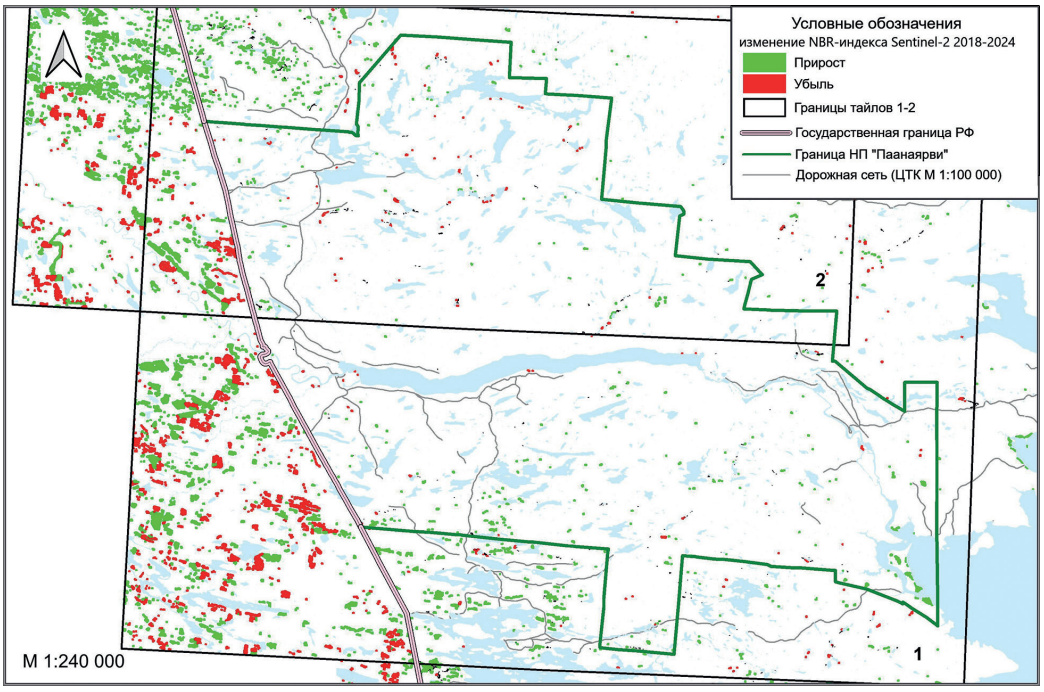


Рис. 13. Тематическая карта изменения NBR-индекса по территории НП «Паанаярви». ЦТК — цифровая топографическая карта

Анализ изменения NBR-индекса показал, что каких-либо значительных нарушений наземного покрова на территории НП «Паанаярви» не зафиксировано. Исключение составляют небольшие по площади объекты (до 3,5 га), которые находятся в буферной зоне (прибрежной полосе) гидрографической сети озёр и рек. Его можно объяснить влиянием различия уровня прибрежной полосы в 2018 г. и, соответственно, в 2024 г. В итоге выполненного исследования можно представить обновлённый набор существующих ЦПМ наземного покрова Восточной Фенноскандии и части Архангельской области (Онежский полуостров),

находящихся в Арктической зоне РФ по состоянию на 2024 г. (*рис. 14*). Общее покрытие ЦПМ этих территорий с точностью М 1:50 000 ~ 150 000 составляет 8,604 млн га.

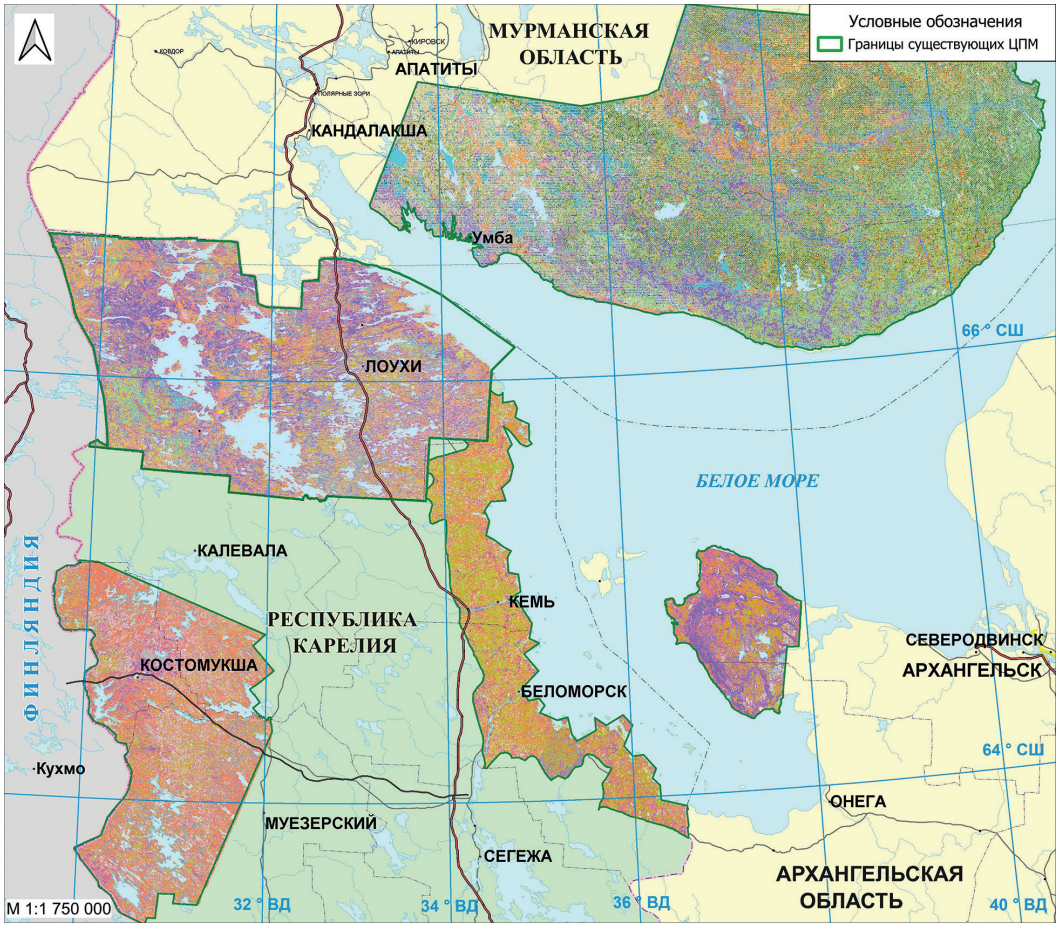


Рис. 14. Цифровые пространственные модели Восточной Фенноскандии и Онежского полуострова Архангельской области по состоянию на 2024 г.

Выводы

В рамках выполнения настоящего исследования разработана оригинальная методика создания цифровой пространственной модели наземных экосистем крупной территории (площадь более 2 млн га) с использованием данных дистанционного зондирования Земли высокого разрешения, облачных технологий и машинного обучения; создана актуальная и достоверная цифровая пространственная модель наземных экосистем Лоухского района Республики Карелия с точностью М 1:50 000; получена информация о динамике растительного покрова пилотного участка (Национальный парк «Паанаярви») Лоухского района Республики Карелия, входящего в Арктическую зону РФ, за период 2018–2024 гг. Учитывая высокие оценки точности и достоверности сформированной цифровой пространственной модели наземного покрова крупной территории, можно предложить применение разработанной методики для создания ЦПМ прочих крупных территорий (районов) Республики Карелия, входящих в Арктическую зону РФ для поэтапного построения единой актуальной и достоверной ЦПМ всей Арктической зоны Северо-Запада РФ, чтобы на современном технологическом уровне решать насущные и неотложные задачи комплексного мониторинга Арктических территорий РФ. Основная, как научная, так и практическая ценность наличия точной и достоверной ЦПМ наземного покрова значительной территории (например, административного района субъекта РФ) крупного масштаба заключается в регулярном (ежегод-

ном) получении данных об изменениях конкретных объектов (классов) наземного покрова посредством обработки индексов состояния природных экосистем на основе данных ДЗЗ высокого разрешения с использованием облачных сервисов и технологий искусственного интеллекта (машинное обучение). Представляется важным выработать конкретные предложения для уполномоченных органов государственной власти РФ по построению непрерывно действующей системы комплексного мониторинга как природных, так и антропогенных процессов, постоянно происходящих в «хрупкой» Арктической зоне РФ.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств Федерального бюджета на выполнение государственного задания Карельского научного центра РАН (FMEN-2022-0014).

Литература

1. *Барталев С. А.*, *Егоров В. А.*, *Жарко В. О.*, *Лупян Е. А.*, *Плотников Д. Е.*, *Хвостиков С. А.*, *Шабанов Н. В.* Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
2. *Богданов А. П.*, *Карпов А. А.*, *Демина Н. А.*, *Алешко Р. А.* Совершенствование мониторинга лесов путем использования облачных технологий как элемента устойчивого лесоуправления // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 89–100. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-89-100.
3. *Воробьев О. Н.*, *Курбанов Э. А.*, *Губаев А. А.*, *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.
4. *Газимагомадова Д. М.* Машинное обучение // Сб. ст. 3-й Международ. научно-практич. конф. Петрозаводск, 2021. С. 45–50.
5. *Ганиева Ш. Н.*, *Абдурасулова Д. Б.*, *Меликузиева С. Ф.* Использование геоинформационной модели // Теория и практика современной науки. 2018. № 6 (36). С. 184–187.
6. *Громцев А. Н.* Основы ландшафтной экологии европейских таежных лесов России. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2008. 238 с.
7. *Груммо Д. Г.*, *Коробушин Д. В.*, *Малашенкова Е.* Мониторинг особо охраняемых природных территорий // Наука и инновации. 2018. № 10 (188). С. 63–69.
8. *Дмитриев Е. В.*, *Кондранин Т. В.*, *Мельник П. Г.*, *Донской С. А.* Определение видового состава смешанного леса на основе совместной обработки публичных спутниковых карт и многовременных изображений Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 1. С. 31–50. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-31-50.
9. *Дрыгваль А. В.*, *Дрыгваль П. В.*, *Табунщик В. А.*, *Горбунова Т. Ю.* Пространственно-временная динамика типов наземного покрова с использованием различных баз спутниковых данных на примере юго-восточного Крыма // Биоразнообразие и устойчивое развитие. 2024. Т. 9. № 3. С. 32–49. DOI: 10.21072/eco.2024.09.3.04.
10. *Ершов Д. В.*, *Гаврилюк Е. А.*, *Карпухина Д. А.*, *Ковганко К. А.* Новая карта растительности центральной части Европейской России по спутниковым данным высокой детальности // Докл. Акад. наук. 2015. Т. 464. № 5. С. 639–641. DOI: 10.7868/S0869565215290289.
11. *Картиев С. Б.*, *Курейчик В. М.* Алгоритм классификации, основанный на принципах случайного леса, для решения задачи прогнозирования // Программные продукты и системы. 2016. № 2 (114). С. 11–15. DOI: 10.15827/0236-235X.114.011-015.
12. *Коберниченко В. Г.*, *Иванов О. Ю.*, *Зраенко С. М.*, *Сосновский А. В.*, *Тренихин В. А.* Обработка данных дистанционного зондирования Земли: практические аспекты: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2013. 168 с.
13. *Коломыцев В. А.* Структура заболоченности национального парка «Паанаярви» (по данным дистанционного зондирования и наземных исследований) // Тр. Карельского науч. центра РАН. 2003. Вып. 3. С. 64–67.
14. *Комарова А. Ф.*, *Журавлева И. В.*, *Яблоков В. М.* Открытые мультиспектральные данные и основные методы дистанционного зондирования в изучении растительного покрова // Принципы экологии. 2016. № 1. С. 40–74. DOI: 10.15393/j1.art.2016.4922.
15. *Курбанов Э. А.*, *Воробьев О. Н.* Дистанционные методы в лесном хозяйстве: учеб. пособие. Йошкар-Ола: Поволжский гос. технолог. ун-т, 2020. 268 с.

16. *Лабутина И. А.*, *Балдина Е. А.* Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга экосистем ООПТ. Метод. пособие. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2011. 88 с.
17. Лесохозяйственный регламент Лоухского лесничества Республики Карелия на 2021–2030 гг. Петрозаводск, 2020. 210 с.
18. *Малышева Н. В.* Автоматизированное дешифрирование аэрокосмических изображений лесных насаждений: метод. пособие. М.: Изд-во Московского гос. ун-та леса, 2012. 154 с.
19. *Никитина А. Д.* Автоматическая сегментация крон сосновых древостоев с использованием MASK R-CNN на RGB-ортофотопланах БПЛА // Вопросы лесной науки. 2024. Т. 7. № 2. 21 с. DOI: 10.31509/2658-607x-202372-146.
20. *Раевский Б. В.*, *Тарасенко В. В.* Картографирование наземного покрова Арктической зоны Восточной Фенноскандии (на примере юго-восточной части Кольского полуострова) // Арктика: экология и экономика. 2024. Т. 14. № 4. С. 617–629. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-4-617-629.
21. *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.
22. *Раменская М. Л.* Анализ флоры Мурманской области и Карелии. Л.: Наука, 1983. 216 с.
23. *Рязанов С. С.*, *Кулагина В. И.* Обзор российских и иностранных источников мультиспектральных снимков для создания систем агроэкологического мониторинга // Российский журн. приклад. экологии. 2024. № 2. С. 4–18. DOI: 10.24852/2411-7374.2024.2.04.18.
24. *Павленко В. И.* Арктическая зона РФ в системе обеспечения национальных интересов страны // Арктика: экология и экономика. 2013. № 4 (12). С. 16–25.
25. *Петров Н. В.*, *Раевский Б. В.*, *Тарасенко В. В.* Исследование динамики растительного покрова архипелага Тулолансаари (национальный парк «Ладожские шхеры») на основе спутниковых данных // Тр. Карельского науч. центра РАН. Сер. «Экологические исследования». 2025. № 8. 2025. С. 73–85. DOI: 10.17076/eco2125.
26. *Тутубалина О. В.*, *Голубева Е. И.*, *Зимин М. В. и др.* Картографирование состояния растительного покрова в окрестностях г. Норильска с помощью Google Earth Engine // Материалы 18-й Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2020. С. 373. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
27. *Янец П. К.*, *Иванова С. А.*, *Данилов Ю. Г.* Использование Google Earth Engine (GEE) и спутниковых снимков Landsat для определения характеристик лесных пожаров // Вестн. Северо-Восточного федер. ун-та им. М. К. Аммосова. Сер.: Науки о Земле. 2022. № 2(26). С. 22–31. DOI: 10.25587/SVFU.2022.26.2.003.
28. *Breiman L.* Random Forests // Machine Learning. 2001. V. 45. P. 5–32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.
29. *Pflumm L.*, *Kang H.*, *Wilting A.*, *Niedballa J.* GEE-PICX: Generating cloud-free Sentinel-2 and Landsat image composites and spectral indices for custom areas and time frames — a Google Earth Engine web application // Ecography. 2025. V. 2025. Article e07358. DOI: 10.1111/ecog.07385.
30. *Uzhinskiy A.* Google Earth Engine and machine learning for Earth monitoring // 6th Intern. Workshop on Deep Learning in Computational Physics (DLCP2022). 2022. 11 p. DOI: 10.22323/1.429.0021.

Designing a methodology for constructing a digital land cover model of a large territory based on high-resolution multispectral satellite imagery (case study of Loukhsky District, Republic of Karelia, Russia)

V. V. Tarasenko, B. V. Raevsky

Karelian Research Centre RAS, Petrozavodsk 185910, Russia
E-mails: victor.tarasenko.2208@mail.ru, borisraevsky@gmail.com

The paper presents a hybrid methodology of creating a digital land cover model (DLCM) of Loukhsky District of the Republic of Karelia spanning over 20 000 km^2, based on interpretation of remote sensing data from Sentinel-2 and application of Google Earth Engine cloud service tools as of 2024. High-resolution (10 m) multispectral satellite imagery was interpreted by a combination of supervised (ran-

dom forest) and unsupervised (k-means clustering) classification. Considering extensiveness of the study area and impossibility to obtain an acceptable-quality cloudless coverage of the entire area during the growing season (June–September 2024), a grid of 18 raster tiles was formed for subsequent step-by-step decoding of multispectral "median" images. At the first stage of creating the DLCM, we used data from the forest management inventory of Paanajärvi National Park and assumed that the overlap areas (15–20 %) of the neighboring tiles are occupied on the ground by consistent land cover. The result of the research is an up-to-date and reliable DLCM of a large area within the Arctic zone of the Russian Federation, with scale accuracy of M 1:50,000. The DLCM can be used during integrated monitoring of this Arctic territory and as a basis for regular monitoring of the state of terrestrial ecosystems and for decision-making at all government levels.

Keywords: Arctic zone of Russia, land cover, digital land cover model, Sentinel-2, multispectral satellite images, Google Earth Engine cloud service, machine learning, geographic information system technologies, GIS

Accepted: 08.07.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-50-68

References

1. Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Shabanov N.V., *Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p. (in Russian).
2. Bogdanov A.P., Karpov A.A., Demina N.A., Aleshko R.A., Improving forest monitoring by using cloud technologies as an element of sustainable forest management, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 1, pp. 89–100 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-89-100.
3. Vorobyov O.N., Kurbanov E.A., Gubaev A.A., Demisheva E.N., Method of stepwise classification of satellite images for the thematic mapping of forest cover, *Bull. Volga State Technical University. Ser. Forest. Ecology. Nature Management*, 2015, No. 4 (28), pp. 57–72 (in Russian).
4. Gazimagomadova D.M., Machine learning, *Proc. 3rd Intern. Scientific and Practical Conf.*, Petrozavodsk, 2021, pp. 45–50 (in Russian).
5. Ganieva Sh.N., Abdurasulova D.B., Melikuzieva S.F., Use of the geographic information model, *Theory and Practice of Modern Science*, 2018, No. 6 (36), pp. 184–187 (in Russian).
6. Gromtsev A.N., *Osnovy landshaftnoi ehkologii evropeiskikh taezhnykh lesov Rossii* (Fundamentals of landscape ecology of European taiga forests of Russia), Petrozavodsk: Karelian Research Center RAS, 2008, 238 p. (in Russian).
7. Grummo D.G., Korobushin D.V., Malashenkova E., The system of automated monitoring of protected areas as a promising project of the Union State, *Science and Innovation*, 2018, No. 10 (188), pp. 63–69 (in Russian).
8. Dmitriev E.V., Kondranin T.V., Melnik P.G., Donskoi S.A., Determining mixed forest species composition based on joint processing of public satellite maps and multi-temporal Sentinel-2 images, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 1, pp. 31–50 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-31-50.
9. Drygval A.V., Drygval P.V., Tabunshchik V.A., Gorbunova T.Yu., Spatial and temporal dynamics of land cover types using various satellite databases: case study of southeastern Crimea, *Biodiversity and Sustainable Development*, 2024, V. 9, No. 3, pp. 32–49 (in Russian), DOI: 10.21072/eco.2024.09.3.04.
10. Ershov D.V., Gavriluk E.A., Karpukhina D.A., Kovganko K.A., A new map of the vegetation of Central European Russia based on high-resolution satellite data, *Doklady Biological Sciences*, 2015, V. 464, No. 1, pp. 251–253, DOI: 10.1134/S0012496615050105.
11. Kartiev S.B., Kureichik V.M., Classification algorithm based on random forest principles for a forecasting problem, *Software and Systems*, 2016, No. 2 (114), pp. 11–15 (in Russian), DOI: 10.15827/0236-235X.114.011-015.
12. Kobernichenko V.G., Ivanov O.Yu., Zraenko S.M., Sosnovskii A.V., Trenikhin V.A., *Obrabotka dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli: prakticheskie aspekty: uchebnoe posobie* (Earth remote sensing data processing: Practical aspects: A training manual), Ekaterinburg: Ural University, 2013, 168 p. (in Russian).
13. Kolomytsev V.A., Wetland structure of the Paanajarvi National park (satellite and fieldwork data analysis), *Trans. of KarRC RAS*, 2003, Iss. 3, pp. 64–67 (in Russian).
14. Komarova A.F., Zhuravleva I.V., Yablokov V.M., Open-source multispectral remote sensing data for the investigation of plant communities, *Principles of the Ecology*, 2016, No. 1, pp. 40–74 (in Russian), DOI: 10.15393/j1.art.2016.4922.

15. Kurbanov E. A., Vorobyov O. N., *Distantsionnye metody v lesnom khozyaistve: uchebnoe posobie* (Remote sensing in forestry: A manual), Yoshkar-Ola: Volga State Technical University, 2020, 268 p. (in Russian).
16. Labutina I. A., Baldina E. A., *Ispol'zovanie dannykh distantsionnogo zondirovaniya dlya monitoringa ehkosistem OOPT. Metodicheskoe posobie* (Using remote sensing data to monitor protected area ecosystems. Guidebook), Moscow: WWF Russia, 2011, 88 p. (in Russian).
17. *Lesokhozyaistvennyi reglament Loukhskogo lesnichestva Respubliki Kareliya na 2021–2030 gg.* (Forest Plan of Loukhskoe Lesnichestvo of the Republic of Karelia for 2020–2030), Petrozavodsk, 2020, 210 p. (in Russian).
18. Malysheva N. V., *Avtomatizirovannoe deshifrirovanie aehrokosmicheskikh izobrazhenii lesnykh nasazhdenii: Metodicheskoe posobie* (Automated decryption of aerospace images of forest plantations: Guidebook), Moscow: Izd. MGUL, 2012, 154 p. (in Russian).
19. Nikitina A. D., Automatic segmentation of tree crowns in pine forests using MASK R-CNN on RGB imagery from UAVs, *Forest Science Issues*, 2024, V. 7, No. 2, 21 p. (in Russian), DOI: 10.31509/2658-607x-202372-146.
20. Raevsky B. V., Tarasenko V. V., Digital land cover mapping of the East Fennoscandian Arctic zone: Case study of the south-eastern Kola Peninsula, *Arctic: Ecology and Economy*, 2024, V. 14, No. 4, pp. 617–629 (in Russian), DOI:10.25283/2223-4594-2024-4-617-629.
21. 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, V. 19, No. 3, pp. 47–61 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-47-61.
22. Ramenskaya M. L., *Analiz flory Murmanskoi oblasti i Karelii* (Analysis of the flora of the Murmansk Region and Karelia), Leningrad: Nauka, 1983, 216 p. (in Russian).
23. Ryazanov S. S., Kulagina V. I., Review of Russian and foreign sources of multispectral images for creating agroecological monitoring systems, *Russian J. Applied Ecology*, 2024, No. 2, pp. 4–18 (in Russian), DOI: 10.24852/2411-7374.2024.2.04.18.
24. Pavlenko V. I., Arctic zone of the Russian Federation in the system of securing the national interests, *Arctic: Ecology and Economy*, 2013, No. 4 (12), pp. 16–25 (in Russian).
25. Petrov N. V., Raevsky B. V., Tarasenko V. V., Study of the dynamics of vegetation cover of the Tulolansaari archipelago (Ladoga Skerries National Park) based on satellite data, *Trans. of KarRC RAS. Ecological Studies Series*, 2025, No. 8, pp. 73–85 (in Russian), DOI: 10.17076/eco2125.
26. Tutubalina O. V., Golubeva E. I., Zimin M. V. et al., *Mapping the state of vegetation cover in the vicinity of Norilsk using the Google Earth Engine, Materialy 18-i Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 18th All-Russia Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow: IKI RAS, 2020, pp. 373 (in Russian), DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
27. Yanets P. K., Ivanova S. A., Danilov Yu. G., Using Google Earth engine (GEE) and Landsat satellite images to detect forest fires, *Bull. North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov. Ser.: Earth Sciences*, 2022, No. 2(26), pp. 22–31 (in Russian), DOI: 10.25587/SVFU.2022.26.2.003
28. Breiman L., Random Forests, *Machine Learning*, 2001, V. 45, pp. 5–32, DOI: 10.1023/A:1010933404324
29. Pflumm L., Kang H., Wilting A., Niedballa J., GEE-PICX: Generating cloud-free Sentinel-2 and Landsat image composites and spectral indices for custom areas and time frames — a Google Earth Engine web application, *Ecography*, 2025, V. 2025, Article e07358, DOI: 10.1111/ecog.07385.
30. Uzhinskiy A., Google Earth Engine and machine learning for Earth monitoring, *6th Intern. Workshop on Deep Learning in Computational Physics* (*DLCP2022*), 2022, 11 p. (in Russian), DOI: 10.22323/1.429.0021.