

УДК 630*587.2 (470.22)

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА АРХИПЕЛАГА ТУЛОЛАНСААРИ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПАРК «ЛАДОЖСКИЕ ШХЕРЫ») НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Н. В. Петров*, Б. В. Раевский, В. В. Тарасенко

Отдел комплексных научных исследований КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910),
*nvpetrov@krc.karelia.ru

Ладожские шхеры – это природный район прибрежной полосы акватории Ладожского озера, представляющий собой совокупность архипелагов скалистых островов, отделенных друг от друга и от берега узкими проливами. Комплексный мониторинг состояния крупных островов района Ладожских шхер является актуальным направлением исследования уникальных наземных экосистем (растительного покрова) с использованием современных методов и данных дистанционного зондирования (ДДЗ). Создание цифровых картографических материалов растительного покрова на основе дешифрирования ДДЗ имеет большое значение с точки зрения исследования природной и антропогенной динамики растительных сообществ. В результате исследований выявлено, что за последние 30 лет не менее 33,3 % от общей площади сосняков вересково-лишайниковой группы на островах архипелага Тулолансаари были пройдены низовыми пожарами различной интенсивности. Вероятнее всего, причина выявленных эпизодов катастрофической динамики связана с влиянием человека, а именно с активной рекреационной деятельностью. Происходит быстрое зарастание бывших сельскохозяйственных земель древесной и кустарниковой растительностью. За последние десятилетия общая площадь лугов на исследованной территории сократилась на 37,4 %.

Ключевые слова: мультиспектральные космические снимки; картографическая платформа облачных вычислений; пространственная динамика; растительные сообщества; классификация; дешифрирование; вегетационные индексы

Для цитирования: Петров Н. В., Раевский Б. В., Тарасенко В. В. Исследование динамики растительного покрова архипелага Тулолансаари (национальный парк «Ладожские шхеры») на основе спутниковых данных // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 8. С. 73–85. doi: 10.17076/eco2125

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (FMEN-2022-0014).

N. V. Petrov*, B. V. Raevsky, V. V. Tarasenko. INVESTIGATION OF VEGETATION COVER DYNAMICS ON TULOLANSAARI ARCHIPELAGO (LADOGA SKERRIES NATIONAL PARK) BASED ON REMOTE SENSING DATA

*Department for Multidisciplinary Research, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *nvpetrov@krc.karelia.ru*

The Ladoga skerries region encompasses the lake's north-western littoral strip composed of a number of rocky island archipelagoes and half-islands separated by narrow straits. Comprehensive monitoring and digital mapping of this region using geoinformation technologies and remotely sensed data are of great importance for investigating the natural and anthropogenic dynamics of its ecosystems. It was revealed, for instance, that at least 33.3 % of lichen and ericetal pine forests on Tulolansaari Archipelago islands had endured surface fires of various intensity during the last 30 years. They were most probably caused by human activities, particularly recreation. Also, abandoned farmlands are getting actively overgrown with trees and shrubs. Over the said time span, the total area of grasslands within the investigated area shrank by 37.4 %.

Keywords: multispectral satellite imagery; cloud-based geospatial analysis platform; spatial dynamics; plant communities; classification; interpretation; vegetation indices

For citation: Petrov N. V., Raevsky B. V., Tarasenko V. V. Investigation of vegetation cover dynamics on Tulolansaari Archipelago (Ladoga Skerries National Park) based on remote sensing data. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 8. P. 73–85. doi: 10.17076/eco2125

Funding. The study was carried out under state assignment to the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (FMEN-2022-0014).

Введение

Комплексный мониторинг окружающей среды с использованием данных дистанционного зондирования (ДДЗ) и геоинформационных технологий является одним из актуальных направлений развития комплекса наук о Земле и современного природопользования [Курбанов и др., 2011]. В частности, разработка цифровых векторных карт растительного покрова на основе дешифрирования ДДЗ имеет исключительное значение с точки зрения организации мониторинга природной и антропогенной динамики растительных сообществ. Современный этап в развитии технологий спутникового картографирования (с начала 2000-х гг.) характеризуется нарастающим уровнем открытости доступа к спутниковым данным, а также использованием web-сервисов online-предоставления информационных продуктов и инструментов их анализа (USGS, ECA-Sentinel). Одним из таких сервисов является платформа облачных вычислений Google Earth Engine (GEE) (<https://earthengine.google.com/>). Данная платформа предоставляет некоммерческим пользователям свободный доступ к огромному объему космических снимков, сделанных в процессе реализации множества спутниковых программ (Landsat, Sentinel). Платформа позволяет легко сортировать и

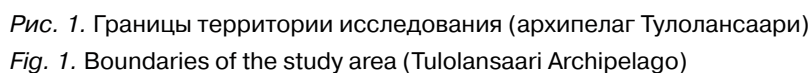
фильтровать ДДЗ для конкретного космического аппарата в различных пространственных и временных масштабах. GEE также предоставляет различные вычислительные алгоритмы контролируемой и неконтролируемой классификации, а также алгоритмы вычисления множества вегетационных и прочих индексов.

Платформа GEE официально впервые была представлена на Международной конференции ООН по изменению климата в 2010 году. Интерес широкой аудитории к ее возможному применению стал неуклонно расти после появления ряда изданий как для научной, так и для массовой аудитории. В частности, отправной точкой серии публикаций, связанных с прикладным применением GEE, является публикация 2017 года от разработчиков платформы [Gorelick et al., 2017].

Краткий обзор имеющейся литературы в отношении возможного применения платформы для научно-исследовательских целей указывает на успешность в решении целого ряда задач, связанных с анализом Big Data со спутниковых снимков. Наибольшую применимость GEE находит в сфере мониторинга изменений наземных и водных экосистем [Сидоренков и др., 2022; Иванов и др., 2024]. В частности, целый ряд исследований на базе платформы [Богданов и др., 2018; Тутубалина и др., 2020;

Цель настоящего исследования заключалась в оценке современного состояния и выявлении динамики растительного покрова исследуемой территории (ИТ) путем обработки разновременных многозональных космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения в среде GEE. Проведение подобного

Объекты и методы исследований



Постановлению от 28 декабря 2017 г. № 1684, составляет 122 008 га. Для НП характерен денудационно-тектонический скальный слабозаболоченный с преобладанием сосновых местообитаний тип ландшафта [Волков и др., 1990]. Данный тип представлен в Карелии только на северо-западном побережье Ладожского озера и на о. Валаам и занимает всего лишь 1,7 % территории республики. Почвенный покров включает 9 типов, существенно различающихся между собой: от примитивных почв на скалах до сравнительно плодородных подбуров на террасированных склонах. Рельеф представлен сложным комплексом форм, обусловленных проявлением как эндогенных, так и экзогенных процессов, и относится к Приладожской морфоструктуре. В структуре ландшафта выделено 16 типов леса – 10 коренных и 6 производных. В современном лесном покрове ландшафта в значительной степени преобладают сосновые леса (70 % покрытых лесом земель). На втором месте по представленности лиственные леса – занимают около 25 % покрытой лесом площади. Незначительно представлены ельники. Существенное участие сосняков в сухих местообитаниях указывает на высокий риск возникновения низовых пожаров, что стало особенно актуально при использовании территории в рекреационных целях.

Выбор данного полигона (рис. 1) был определен в контексте перспективных планов по исследованию территории НП. Комплексные исследования, сосредоточенные на сравнительно небольших по площади полигонах, дают возможность получить более детальную информацию, позволяющую оценить динамику наземного покрова в целом. В дальнейшем предполагается, что исследования будут расширяться в направлении Ленинградской области и постепенно охватят весь национальный парк.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Формирование современной и ретро-перспективной пространственных моделей состояния наземного покрова объекта исследования и оценка их достоверности.
2. Выявление природной и антропогенной динамики изменений растительного покрова с использованием нормализованного индекса гарей (Normalized Burnt Ratio – NBR).
3. Оценка структурных изменений растительного покрова как итога протекания природных сукцессионных процессов в лесных и луговых экосистемах.

Для разработки пространственных моделей исследуемой территории использованы

космические снимки (КС) спутниковых программ Sentinel-2 и Landsat-5 и -8. Визуализация цветных RGB-композиций растров осуществлялась в комбинации каналов:

- Sentinel-2: B11 – SWIR1 (20 м/пиксель), B6 – Vegetation Red Edge 1 (20 м/пиксель), B3 – Green (10 м/пиксель);
- Landsat-5: SR_B5 – SWIR1 (30 м/пиксель), SR_B4 – NIR (30 м/пиксель), SR_B3 – Red (30 м/пиксель).

Большинство современных спутниковых сенсоров одновременно фиксируют мульти-спектральные и панхроматические диапазоны данных. Для повышения детализации спутниковых данных обычно используют метод «паншарпенинг» (англ. *panchromatic sharpening*), который позволяет повысить качество изображения с низким пространственным разрешением за счет снимков с более высоким. Многочисленные методы слияния (объединения КС) различаются видом преобразования спектральных изображений, способом замены одной из компонент изображением высокого разрешения, а также алгоритмом интерполяции [Коберниченко и др., 2013].

Так как пространственное разрешение используемых для классификации каналов съемки MSI различно и варьируется от 10 до 20 м/пиксель (Red/Green/Blue/Nir – 10 м/пиксель, Red Edge1-4, SWIR1, SWIR2 – 20 м/пиксель), классификация КС проводилась с применением процедуры паншарпенинга [Palsson et al., 2012; Курбанов, Воробьев, 2020] для «подтягивания» изображения Sentinel-2 до единого уровня высокого разрешения (10 м/пиксель). Фрагмент программного кода GEE, который раскрывает суть процедуры паншарпенинга в данной работе:

```
// Convert the RGB bands to the HSV color space.
var hsv = image.select(['B11', 'B6', 'B3']).
  rgbToHsv();
// Swap in the panchromatic band and convert
back to RGB.
var sharpened = ee.Image.cat([
  hsv.select('hue'), hsv.select('saturation'), image.
  select('B3')]).hsvToRgb();
var image = sharpened;
```

В нашем случае для выполнения операций по формированию RGB-композиций, паншарпенинга комбинации каналов Sentinel-2 по каналу B3, классификации полученных изображений и экспорту результатов (shape-формат) использовался компилятор облачной платформы вычислений и машинного обучения GEE (<https://code.earthengine.google.com/>).

Разработка классификатора осуществлялась на основе плана лесонасаждений Ладожского участкового лесничества Сортавальского лесничества, раскрашенного по преобладающим породам, часть территории которого ныне относится к НП, таксационных описаний выделов (лесоустройство 2003 г.), данных государственного лесного реестра (ГЛР) по состоянию на 01.01.2018 г. и мозаики космических снимков высокого разрешения, доступных на картографическом сервисе Bing Maps (<https://www.bing.com/maps?cp=61.674741%7E30.926067&lvl=12.3>). Сводные данные по набору эталонов для выделенных тематических классов представлены в табл. 1.

Управляемая классификация космических снимков (Median-синтез) проекта Landsat-5 (вегетационный период 01.06–30.09.1987) и космоснимков проекта Sentinel-2 (вегетационный период 01.06–30.09.2024) осуществлялась с использованием алгоритма классификации с обучением Random Forest (RF) – «метод случайного леса», реализованного на платформе облачных вычислений GEE.

В качестве основы для обнаружения пожаров использованы результаты классификации Median-синтеза космических снимков проекта

Landsat-5 в вегетационный период 01.06–30.09.1987. Оценка изменений растительного покрова осуществлялась путем вычисления разностных величин нормализованного индекса гарей (NBR – Normalized Burnt Ratio) [Key, Benson, 2006] за последние 37 лет с использованием временной серии снимков спутниковых миссий Landsat-5 и -8 и Sentinel-2. Индекс гарей [Alcaras et al., 2022] рассчитывался как разность спектральных отражений в ближнем (NIR) и 2-м (SWIR2) коротковолновом инфракрасных каналах, нормализованная на их сумму: $NBR = (NIR - SWIR2) / (NIR + SWIR2)$.

Достоверность полученной пространственной модели определялась путем использования метода матрицы неточностей (англ. *confusion matrix*) и расчета комплекса связанных с ней параметров: общей точности, коэффициента Каппа, точности пользователя и точности производителя [Малышева, 2012; Курбанов, Воробьев, 2020]. Верификация результатов дешифрирования космоснимков осуществлялась с использованием картографических и атрибутивных лесоустроительных данных, а также на основе данных натурных описаний растительного покрова. В период полевых работ на восьми маршрутах была заложена 21 круговая

Таблица 1. Сводные данные по набору эталонов для управляемой классификации

Table 1. Summary data on the set of training areas for supervised classification

Номер класса Class number	Имя класса Class name	Число эталонов, шт. Number of training areas, pcs.	Суммарная площадь, га Total area, ha
1	Ельники Spruce forests	13	9,61
2	Березняки Birch forests	35	15,85
3	Сосняки брусничные Cowberry pine forests	5	3,59
4	Площади, пройденные пожаром Areas affected by fire	22	16,29
5	Прибрежная зона Coastal zone	42	20,77
6	Луга Meadows	19	10,46
7	Скалы Rocks	12	3,41
8	Сосняки скальные Rocky pine forests	15	8,14
9	Сосняки кисличные Sour pine forests	38	21,14
10	Сосняки черничные Blueberry pine forests	5	3,08
11	Осинники Aspen forests	17	8,21
12	Озеро Lake	9	236,29
Итого Total		226	120,55

пробная площадь (КПП) радиусом 10 м. Пробные площади закладывались в наиболее типичных участках лесных выделов и имели точную географическую привязку. В процессе работ на КПП производился сплошной пересчет деревьев с инструментальным измерением диаметров, высот и возраста по элементам леса. На каждой пробной площади сделано геоботаническое описание напочвенного покрова и заложен почвенный разрез. Поскольку количества заложенных КПП пока недостаточно для получения достоверных средних таксационных показателей в разрезе тематических классов, при верификации результатов дешифрирования вышеупомянутые пробные площади выполняли роль контрольных точек только по признаку преобладающей породы.

Результаты и обсуждение

Обсуждая особенности площадной структуры архипелага, выявленной по результатам классификации КС, необходимо отметить ряд принципиальных моментов. Во-первых, доступные пространственные и атрибутивные данные по лесному фонду рассматриваемой территории в значительной степени устарели и не в полной мере соответствуют современ-

ной ситуации. Однако никакой другой подобной информации в ее отношении не существует. Во-вторых, сравнение результатов классификации снимков различных спутниковых платформ, существенно различающихся по параметрам радиометрического, пространственного разрешения и другим аппаратным характеристикам, достаточно затруднительно. Вследствие того, что программа Landsat характеризуется наибольшей продолжительностью миссии, для построения ретроспективных моделей наземного покрова использование ее изображений во многих случаях является единственно доступной альтернативой. Сравнение тематических карт разного пространственного разрешения (на основе КС Landsat и Sentinel) проводилось путем оценки суммарных площадей классификации по группам тематических классов.

Результаты дешифрирования по тематическим классам разновременных снимков архипелага Тулолансаари представлены в виде карты на рис. 2 и в табл. 2 относительно (%) данных лесоустройства ИТ (2003 г.).

Приступая к анализу площадной структуры ИТ, необходимо отметить ряд ее ландшафтно-экологических особенностей и своеобразие истории природопользования данной зоны.

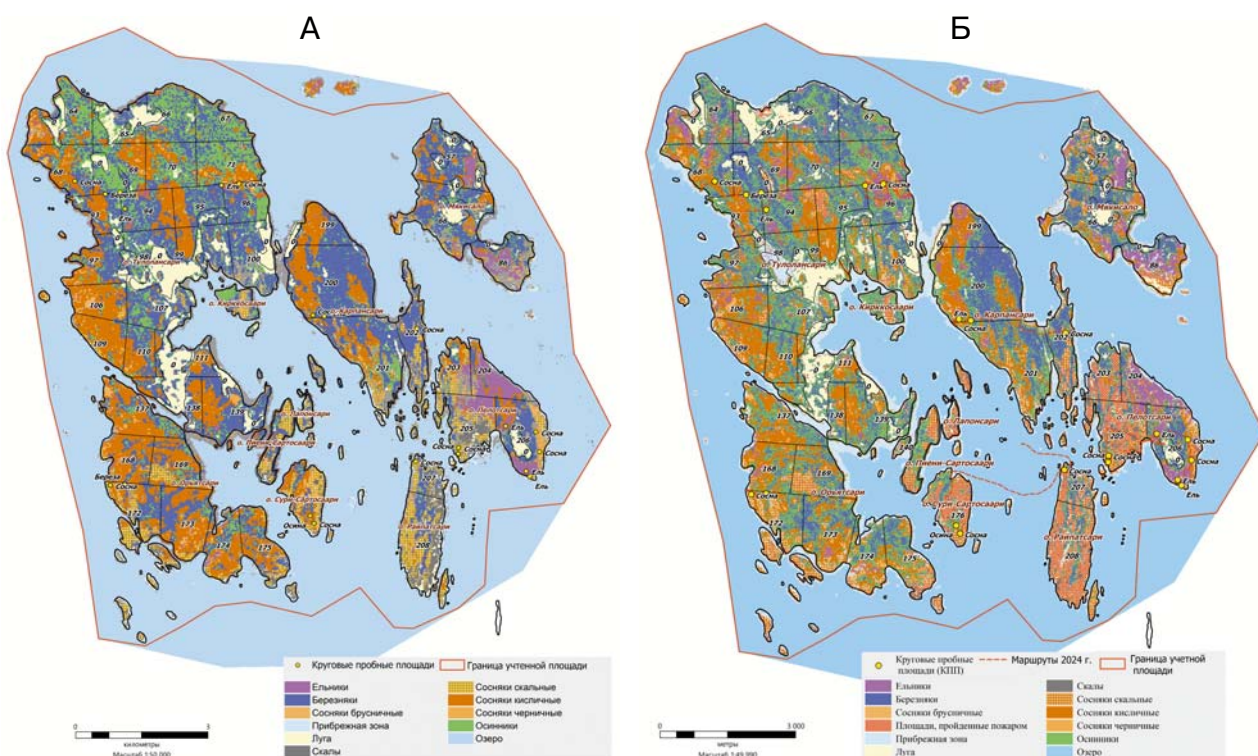


Рис. 2. Тематические карты наземного покрова: А – Landsat-5 1987 г.; Б – Sentinel-2 2024 г.

Fig. 2. Land cover (thematic maps) interpretation results: A – Landsat-5 1987; Б – Sentinel-2 2024

Таблица 2. Распределение классов наземного покрова территории архипелага Тулолансаари по результатам дешифрирования КС Landsat-5 1987 г. и Sentinel-2 2024 г.

Table 2. The areal structure of the Tulolansaari Archipelago based on the results of Landsat-5 1987 and Sentinel-2 2024 satellite interpretation

Группы классов Class groups	Площадь классификации Classified area, ha				Данные л/у (2003 г.), га Forest assessment data (2003), ha
	Landsat 1987, га Landsat 1987, ha	Landsat 1987, %	Sentinel 2024, га Sentinel 2024, ha	Sentinel 2024, %	
Сосняки Pine forests	2031,0	–17,9	2404,5	–2,8	2473,6
Ельники Spruce forests	196,9	–28,8	257,8	–6,8	276,5
Березняки Birch forests	1938,5	54,9	1614,4	29,0	1251,1
Осинники Aspen forests	788,3	28,6	706,0	15,1	613,2
Луга Meadows	438,0	–8,0	298,1	–37,4	476,0
Скалы Rocks	149,8	96,3	131,3	72,1	76,3
Площади, пройденные пожаром Areas affected by fire	–	–	258,6	–	–
Итого Total	5542,5	7,3	5670,6	9,8	5166,7
Всего хвойных Total coniferous forests	2227,9	–19,0	2662,3	–3,2	2750,1
Всего лиственных Total deciduous forests	2726,8	46,3	2320,4	24,5	1864,3
Итого покрытой лесом площади Total forested area	4954,7	7,4	4982,7	8,0	4614,4
Прибрежная зона Coastal zone	1193,7	–	1162,0	–	–
оз. Ладожское Lake Ladoga	8037,8	–	7286,8	–	–
Площадь классификации, га Classified area, ha	14774	–	14494,9	–	–

В отличие от внутриматериковых участков суши островные архипелаги крупных водоемов характеризуются существенным изменением своей площади вследствие многолетних и вековых колебаний уровня воды. Поэтому при классификации был выделен тематический класс «прибрежная зона», который представлял собой достаточно узкую экотонную область мелководья, занятую водной и полуводной растительностью. Растительный покров Северного Приладожья в течение многих столетий подвергался тотальной антропогенной трансформации. Исторически здесь, вероятно, можно выделить множество периодов, но по существу рассматриваемых нами проблем наибольшее значение имеют процессы и тенденции, характерные для XIX и XX столетий. На рубеже указанных веков Северное Приладожье представляло собой край высоко-развитого хуторского земледелия и горнорудной промышленности. Вплоть до 40-х годов XX века леса активно вырубались при сплошнолесосечной форме хозяйствования, а все доступные

к обработке земли распахивались. Во второй половине XX столетия хуторская форма земледелия практически исчезла. Леса всего Северного Приладожья были отнесены к различным категориям защитности, подразумевающим запрет сплошных рубок. В шхерной зоне побережья любая лесозаготовительная деятельность прекратилась. В период экономического кризиса в России в 90-х годах XX века характерное для этой зоны мелкоконтурное сельское хозяйство также практически перестало функционировать.

В соответствии с отмеченными тенденциями следовало предположить, что на ИТ в ретроспективе последних десятилетий площади хвойных насаждений не должны были сокращаться кардинально. При этом на землях запаса (бывших сельскохозяйственных) активно идут процессы зарастания древесной и кустарниковой растительностью. Результаты классификации изображения Sentinel-2 (табл. 2) в полной мере подтверждают высказанную гипотезу в отношении сукцессионных процессов, протекающих в растительном покрове ИТ.

Достоверность дешифрирования в значительной мере подтверждается данными лесоустройства, хотя последние и следует считать устаревшими. Основная часть суши ИТ занята лесами (93 %). Преобладающая часть покрытой лесом площади находится под хвойными насаждениями (46,9 %), в т. ч. на долю сосняков приходится 42,4 % площади суши и 90,3 % площади хвойных насаждений. Доля сосняков скальных составляет 32,2 %. Это, как правило, разновозрастные древостои, где старшее поколение сформировано деревьями VII–VIII классов возраста (121–160 лет). Высокопродуктивные сосняки кисличные и черничные занимают 66,2 % от всей площади сосняков и представлены в основном условно одновозрастными древостоями V–VI классов возраста (81–120 лет). В силу их сравнительно молодого возраста процессы формирования елового яруса и тенденция смены сосны елью в них еще не выражены. Общая площадь сосняков вересково-лишайниковой группы (скальных, лишайниковых и вересковых) составила 773,7 га, что на 11,2 % больше, чем по данным лесоустройства (695,5 га). При этом площадь сосняков зеленомошно-кисличной группы (брусничных, черничных и кисличных) составила 1630,8 га, что на 8,2 % меньше, чем по лесостроительным данным (1776,8 га). Указанные сравнительно небольшие отклонения свидетельствуют об успешной классификации сосновых насаждений по группам типов леса. Площадь луговых систем сократилась, то есть происхо-

дит их активное зарастание, что закономерно ведет к увеличению площади березняков и осинников.

Показатели точности, автоматически рассчитанные в приложении GEE и приведенные в табл. 3, свидетельствуют о высокой достоверности результатов классификации. Высокая степень сходства тематических карт, приведенных на рис. 3, также говорит в пользу хорошего уровня позиционной точности, достигнутой по результатам дешифрирования.

Верификация результатов дешифрирования с использованием контрольных точек показала, что в варианте Landsat-5 85,7 %, а в варианте Sentinel-2 90,5 % контрольных точек были дешифрированы правильно по указанному признаку.

Таблица 3. Показатели достоверности классификации методом RF

Table 3. Accuracy indicators of classification by the RF method

Космические снимки Satellite images	Показатели достоверности Accuracy indicators	
	общая точность, % overall accuracy, %	коэффициент Каппа Kappa coefficient
Landsat-5 1987	99,0	0,99
Sentinel-2 2024	93,2	0,92

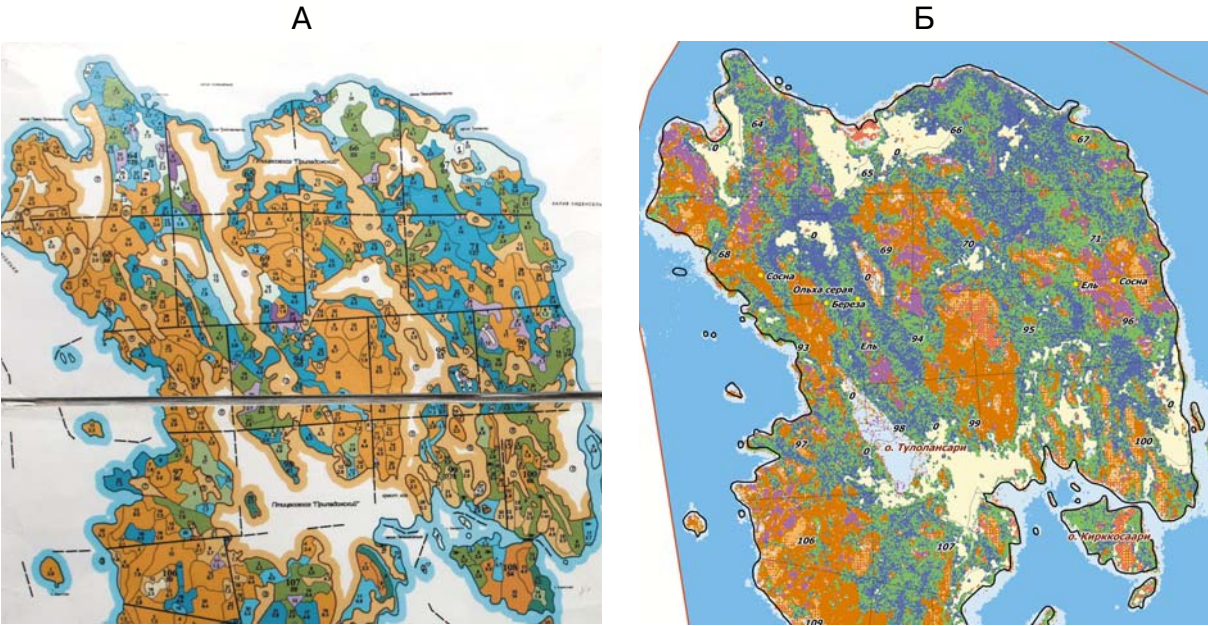


Рис. 3. Фрагменты тематических карт: А – план лесонасаждений 2003 г.; Б – Sentinel-2 2024 г.

Fig. 3. Fragments of the thematic maps: А – forest plan in 2003; Б – Sentinel-2 2024

Как показали полевые маршрутные обследования, за последние несколько десятилетий значительные участки преимущественно сосняков скальных были пройдены низовыми пожарами. После пожара в подобного рода местообитаниях в течение первых двух-трех лет происходил постепенный вывал крупных деревьев и начинались процессы естественного возобновления сосны. В натуре такие площади выглядят достаточно своеобразно. На ровных и слабопологих участках скального основания, перекрытых слабо развитым почвенным покровом (петроземами), образуются сосновые редины. В депрессиях и скальных разломах, где скапливается растительный опад, развивается лиственная растительность. В материалах лесоустройства 2003 г. такие участки показаны как сосновые молодняки.

Облачная платформа GEE была использована для вычисления разности NBR-индекса с периодичностью один год начиная с 1987 по 2011 г. (Landsat-5), далее в 2013–2015 гг. (Landsat-8) и завершающий период – с 2015 по 2024 г. (Sentinel-2). Несмотря на то что классы пожарной опасности местообитаний с еловыми и сосновыми насаждениями существенно различаются, был сформирован единый цифровой векторный слой (рис. 4, А) «хвойные насаждения», который объединил следующие слои (классы):

сосняки скальные; сосняки брусничные; сосняки черничные, сосняки кисличные; ельники (все типы леса). Далее с использованием геоинформационного программного обеспечения MapInfo v17.03 были созданы цифровые векторные слои вероятных пожаров на островах архипелага по выбранным периодам путем «извлечения» объектов, площадь которых превышает 1 га, из слоя «хвойные насаждения». После обработки результатов вычислений и формирования векторных данных обнаруженных площадей, пройденных пожарами, выявлены наибольшие по суммарной площади временные периоды потерь растительного покрова, а именно: 1994–1995; 1996–1997; 1999–2001; 2002–2003; 2005–2006; 2006–2007; 2022–2023 гг. Результаты представлены в табл. 4 и на рис. 4.

Анализ динамики покрытых лесом площадей, пройденных пожарами, показывает, что за исследованный период более половины их (56,4 %) образовалось в течение восьми лет – с 1996 по 2003 г. Сами горельники локализуются преимущественно на средних по размерам скалистых островах, образующих, как правило, внешнюю границу шхерной зоны, то есть в местах, наиболее привлекательных для рекреации. Начинаясь обычно от берега, пожар распространяется вверх по скалистому склону, поросшему сосной, но в дальнейшем может заходить и в еловые выделы.

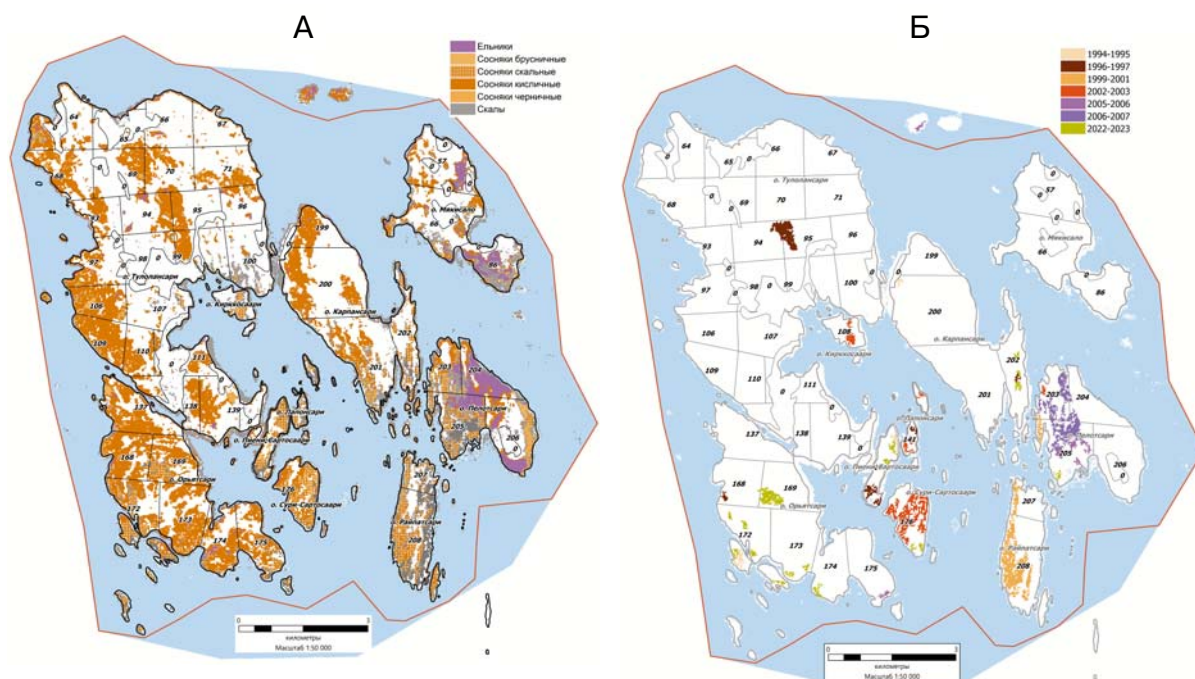


Рис. 4. Тематические карты: А – «хвойные насаждения» по результатам классификации КС Landsat-5 1987 г.; Б – вероятные пожары 1987–2024 гг. по периодам обнаружения

Fig. 4. Thematic maps: А – “coniferous stands” based on the results of the Landsat-5 classification of 1987; Б – probable fire areas of 1987–2024 by the investigated time spans

Таблица 4. Площади наиболее вероятных пожаров на ИТ по временным периодам

Table 4. Areas of the most probable fires in IT by time spans

Период исследования, годы Time spans, years	Площадь пожаров, га Fire area, ha
1994–1995	13,8
1996–1997	31,1
1999–2001	61,8
2002–2003	52,9
2005–2006	12,6
2006–2007	49,4
2022–2023	37,1
Общая площадь, га Total area, ha	258,6

Внутри острова его распространение завершается зачастую по неотектоническим смещениям с характерными вертикальными стенками.

Заключение

Исследование на базе платформы облачных вычислений GEE структуры наземного и растительного покрова архипелага Тулолансаари, который можно считать вполне типичным участком скалистого шхерного побережья Ладожского озера, и НП «Ладожские шхеры» позволило выявить основные закономерности строения и особенности его антропогенной и естественной природной динамики. В соответствии с основными тенденциями динамики глубоко антропогенно трансформированного ландшафта национального парка площадь луговых систем сокращается, то есть происходит их зарастание, что закономерно ведет к увеличению площади березняков и осинников. Выявлено, что за последние 30 лет на островах исследованного архипелага не менее 33,3 % от общей площади сосняков вересково-лишайниковой группы пройдены низовыми пожарами различной интенсивности. По всей видимости, причина всех эпизодов катастрофической динамики связана с влиянием человека, а именно с активной рекреационной деятельностью. Использование платформы облачных вычислений Google Earth Engine позволило кратно сократить машинное время на обработку «больших данных» и выполнить классификацию космоснимков с высокими показателями общей точности и достоверности. Разработанные в процессе исследования алгоритмы и программные коды могут служить основой для создания современного и оперативного комплекса средств мониторинга растительного покрова территорий как Республики Карелия, так и других регионов России.

Литература

- Богданов А. П., Карпов А. А., Демина Н. А., Алешко Р. А. Совершенствование мониторинга лесов путем использования облачных технологий как элемента устойчивого лесопользования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 1. С. 89–100. doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-89-100
- Волков А. Д., Громцев А. Н., Еруков Г. В., Караваев В. Н., Коломыцев В. А., Курхинен Ю. П., Лак Г. Ц., Пыжин А. Ф., Сазонов С. В., Шелехов А. М. Экосистемы ландшафтов запада средней тайги (структура и динамика) // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. Петрозаводск: Карелия, 1990. С. 284.
- Гумеров А. Ф. Выявление региональных особенностей глобальных изменений природной среды на основе данных дистанционного зондирования Земли // Геосфера. Современные проблемы естественных наук: Сб. статей, посвященных профессиональным праздникам факультета наук о Земле и туризма. Уфа: БашГУ, 2022. Т. 1, вып. 15. Ч. 1. С. 198–208.
- Иванов С. В., Сидоренков В. М., Ачиколова Ю. С., Астапов Д. О., Тищенко П. А., Буряк Л. В., Рыбкин А. С. Возможности использования данных группировки спутников ДЗЗ стран БРИКС для решения тематических задач получения информации о лесных экосистемах // Геоинформационные технологии. Лесохозяйственная информация. 2024. № 4. С. 42–55. doi: 10.24419/LNI.2304-3083.2024.4.05
- 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 // Вестник МарГТУ. Сер. Лес. Экология. Природопользование. 2011. № 3. С. 17–24.
- Курбанов Э. А., Воробьев О. Н. Дистанционные методы в лесном хозяйстве: учеб. пособие. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2020. 268 с.
- Коберниченко В. Г., Иванов О. Ю., Зраенко С. М., Сосновский А. В., Тренихин В. А. Обработка данных дистанционного зондирования Земли: практические аспекты: учебное пособие. Екатеринбург: УрФУ, 2013. 168 с.
- Малышева Н. В. Автоматизированное дешифрирование аэрокосмических изображений лесных насаждений: учеб. пособие. М.: МГУЛ, 2012. 154 с.
- Рахимов Г. Б., Жанибек А. Ж., Игемберлина М. Б., Батыршаева Ж. М. Мониторинг изменения площади озера Балхаш с помощью геопространственной платформы Google Earth Engine // Горный журнал Казахстана. 2025. № 4. С. 25–30. doi: 10.48498/minmag.2025.240.4.008
- Сидоренков В. М., Астапов Л. О., Перфильева О. В., Рябцев О. В., Рыбкин А. С. Определение таксационных показателей чистых насаждений сосны по данным спутника «Канопус-В» // Ракетно-космическое приборостроение и информационные

системы. 2022. Т. 9, № 2. С. 36–43. doi: 10.30894/issn2409-0239.2022.9.2.36.43

Тутубалина О. В., Голубева Е. И., Зимин М. В., Кравцова В. И., Михайлов Н. В., Железный О. М. Картографирование состояния растительного покрова в окрестностях г. Норильска с помощью Google Earth Engine // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Материалы 18-й Всерос. откр. конф. (Москва, 16–20 нояб. 2020 г.). М., 2020. С. 373.

Янец П. К., Иванова С. А., Данилов Ю. Г. Использование Google Earth Engine (GEE) и спутниковых снимков Landsat для определения характеристик лесных пожаров // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. Сер. Науки о Земле. 2022. № 2(26). С. 22–31. doi: 10.25587/SVFU.2022.26.2.003

Alcaras E., Costantino D., Guastaferro F., Parente C., Pepe M. Normalized Burn Ratio Plus (NBR+): a new index for Sentinel-2 Imagery // Remote Sensing. 2022. Vol. 14. Art. 1727.

Aldiansyah S., Mandini Mannesa M. D. M., Supriatna S. Monitoring of vegetation cover changes with geomorphological forms using Google Earth Engine in Kendari City // Jurnal Geografi Gea. 2021. Vol. 21, no. 2. P. 159–170. doi: 10.17509/gea.v21i2.37070

Chaudhary R. K., Puri L., Acharya A. K., Aryal R. Wetland mapping and monitoring with Sentinel-1 and Sentinel-2 data on the Google Earth Engine // Journal of Forest and Natural Resource Management. 2023. Vol. 3, no. 1. P. 21. doi: 10.3126/jfnrm.v3i1.60107

Codjoe K. A., Acheampon A. A. Spatio-temporal analysis in forest cover using Google Earth Engine in Ashanti Region, Ghana // American Journal of Geographic Information System. 2022. Vol. 11, no. 2. P. 41–50. doi: 10.5923/j.ajgis.20221102.02

Daldegan G. A., Roberts D. A., Ribeiro F. Spectral mixture analysis in Google Earth Engine to model and delineate fire scars over a large extent and a long time-series in a rainforest-savanna transition zone // Remote Sens. Environ. 2019. Vol. 232. Art. 111340. doi: 10.1016/j.rse.2019.111340

Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // Remote Sens. Environ. 2017. Vol. 202. P. 18–27. doi: 10.1016/j.rse.2017.06.031

Güzel A., Biçaklı K., Biçaklı F., Kaplan G. Monitoring the regeneration process of areas destroyed by forest fires aided by Google Earth Engine // Kastamonu University Journal of Forestry Faculty. 2021. Vol. 21, no. 2. P. 122–130. doi: 10.17475/kastorman.1000369

Key C., Benson N. Landscape assessment: ground measure of severity, the Composite Burn Index; and remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio // FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System / Eds. D. C. Lutes, R. E. Keane, J. F. Caratti, C. H. Key, N. C. Benson, S. Sutherland, L. J. Gangi. Ogden, UT: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Gen. Tech. Rep., 2006. RMRS-GTR-164-CD: LA 1-51.

Long T., Zhang Z., He G., Jiao W., Tang C., Wu B., Zhang X., Wang G., Yin R. 30 m resolution global annual burned area mapping based on Landsat images and Google Earth Engine // Remote Sensing. 2019. Vol. 11(5). Art. 489. doi: 10.3390/rs11050489

Palsson F., Sveinsson J. R., Benediktsson J. A., Aanaes H. Classification of pansharpened urban satellite images // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2012. Vol. 5. P. 281–297. doi: 10.1109/JSTARS.2011.2176467

Quintero N., Viedma O., Urbieto I. R., Moreno J. M. Assessing landscape fire hazard by multitemporal automatic classification of Landsat time series using the Google Earth Engine in West-Central Spain // Forests. 2019. Vol. 10(6). Art. 518. doi: 10.3390/f10060518

Safitri D. A., Bioresita R. T., Nugroho R. T., Bepalova L. A., Ramadanings N., Sobarman F. A. Mapping and monitoring of mangrove area in Surabaya (Indonesia) in the period of 1994–2018 using Landsat satellite data and Google Earth Engine // Science in the South of Russia. 2023. Vol. 19, no. 1. P. 51–58. doi: 10.7868/25000640230106

Venkatappa M., Sasaki N., Anantsuksomsri S., Smith B. Applications of the Google Earth Engine and phenology-based threshold classification method for mapping forest cover and carbon stock changes in Siem Reap Province, Cambodia // Remote Sensing. 2020. Vol. 12. Art. 3110. doi: 10.3390/rs12183110

References

Alcaras E., Costantino D., Guastaferro F., Parente C., Pepe M. Normalized Burn Ratio Plus (NBR+): a new index for Sentinel-2 Imagery. *Remote Sensing*. 2022;14:1727.

Aldiansyah S., Mandini Mannesa M. D. M., Supriatna S. Monitoring of vegetation cover changes with geomorphological forms using Google Earth Engine in Kendari City. *Jurnal Geografi Gea*. 2021;21(2): 159–170. doi: 10.17509/gea.v21i2.37070

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 = Current problems of remote sensing of the Earth from space*. 2018;15(1):89–100. (In Russ.). doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-89-100

Chaudhary R. K., Puri L., Acharya A. K., Aryal R. Wetland mapping and monitoring with Sentinel-1 and Sentinel-2 data on the Google Earth Engine. *Journal of Forest and Natural Resource Management*. 2023;3(1):21. doi: 10.3126/jfnrm.v3i1.60107

Codjoe K. A., Acheampon A. A. Spatio-temporal analysis in forest cover using Google Earth Engine in Ashanti Region, Ghana. *American Journal of Geographic Information System*. 2022;11(2):41–50. doi: 10.5923/j.ajgis.20221102.02

Daldegan G. A., Roberts D. A., Ribeiro F. Spectral mixture analysis in Google Earth Engine to model

and delineate fire scars over a large extent and a long time-series in a rainforest-savanna transition zone. *Remote Sens. Environ.* 2019;232:111340. doi: 10.1016/j.rse.2019.111340

Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sens. Environ.* 2017;202:18–27. doi: 10.1016/j.rse.2017.06.031

Gumerov A. F. Identifying regional peculiarities of global environmental changes using Earth remote sensing data. *Geosfera. Sovremennyye problemy estestvennykh nauk: Sb. statei, posvyashchennykh professional'nykh prazdnikam fakul'teta nauk o Zemle i turizmu = Geosphere. Current problems of natural sciences: Proceedings dedicated to professional holidays of the Faculty of Earth Sciences and Tourism.* Vol. 1, iss. 15. Part 1. Ufa: BashGU; 2022. P. 198–208. (In Russ.)

Güzel A., Biçaklı K., Biçaklı F., Kaplan G. Monitoring the regeneration process of areas destroyed by forest fires aided by Google Earth Engine. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty.* 2021;21(2):122–130. doi: 10.17475/kastorman.1000369

Ivanov S. V., Sidorenkov V. M., Achikolova Yu. S., Astapov D. O., Tishchenko P. A., Buryak L. V., Rybkin A. S. Possibilities of using remote sensing satellite data from the BRICS countries for obtaining forest ecosystems information. *Geoinformatsionnye tekhnologii. Lesokhozyaistvennaya informatsiya = Geoinformation Technologies. Forestry Information.* 2024;4:42–55. (In Russ.). doi: 10.24419/LHI.2304-3083.2024.4.05

Key C., Benson N. Landscape assessment: ground measure of severity, the Composite Burn Index; and remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. *FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System.* Ogden: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Gen. Tech. Rep.; 2006. RMRS-GTR-164-CD: LA 1–51.

Kobernichenko V. G., Ivanov O. Yu., Zraenko S. M., Sosnovskii A. V., Trenikhin V. A. Processing of Earth remote sensing data: practical aspects: a study guide. Ekaterinburg: UrFU; 2013. 168 p.

Kurbanov E. A., Nureeva T. V., Vorob'ev O. N., Gubaev A. V., Lezhnin S. A., Miftakhov T. F., Nezamaev S. A., Polevshchikova Yu. A. Remote monitoring of forest cover disturbances, reforestation and forest restoration processes in Mari Trans-Volga region. *Vestnik MarGTU. Ser. Les. ekologiya. Prirodopol'zovanie = Bulletin of MarSTU. Series: Forest Ecology. Nature Management.* 2011;3:17–24. (In Russ.)

Kurbanov E. A., Vorob'ev O. N. Remote sensing techniques in forestry: a study guide. Joshkar-Ola: PGTU; 2020. 268 p.

Long T., Zhang Z., He G., Jiao W., Tang C., Wu B., Zhang X., Wang G., Yin R. 30 m resolution global annual burned area mapping based on Landsat images and Google Earth Engine. *Remote Sensing.* 2019;11(5):489. doi: 10.3390/rs11050489

Malysheva N. V. Automated interpretation of forest cover space images: a study guide. Moscow: MGUL; 2012. 154 p. (In Russ.)

Palsson F., Sveinsson J. R., Benediktsson J. A., Aanaes H. Classification of pansharpened urban satellite images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.* 2012;5:281–297. doi: 10.1109/JSTARS.2011.2176467

Quintero N., Viedma O., Urbieto I. R., Moreno J. M. Assessing landscape fire hazard by multitemporal automatic classification of Landsat time series using the Google Earth Engine in West-Central Spain. *Forests.* 2019;10(6):518. doi: 10.3390/f10060518

Rakhimov G. B., Janibek A. J., Igemberlina M. B., Batyrshaeva J. M. Monitoring of Lake Balkhash area using Google Earth Engine. *Gornyi zhurnal Kazakhstana = Mining Journal of Kazakhstan.* 2025;4: 25–30. (In Russ.). doi: 10.48498/minmag.2025.240.4.008

Safitri D. A., Bioresita R. T., Nugroho R. T., Bessalova L. A., Ramadanings N., Sobarman F. A. Mapping and monitoring of mangrove area in Surabaya (Indonesia) in the period of 1994–2018 using Landsat satellite data and Google Earth Engine. *Science in the South of Russia.* 2023;19(1):51–58. doi: 10.7868/25000640230106

Sidorenkov V. M., Astapov L. O., Perfil'eva O. V., Ryabtsev O. V., Rybkin A. S. Determination of taxation indicators of pure pine plantations according to the data of the Kanopus-V satellite. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy = Rocket and space instrumentation and information systems.* 2022;9(2):36–43. (In Russ.). doi: 10.30894/issn2409-0239.2022.9.2.36.43

Tutubalina O. V., Golubeva E. I., Zimin M. V., Kravtsova V. I., Mikhailov N. V., Zheleznyi O. M. Digital mapping of vegetation cover in the vicinities of Norilsk with Google Earth Engine. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa: Materialy 18-i Vseros. otkr. konf. (Moskva, 16–20 noyab. 2020 g.) = Current problems of remote sensing of the Earth from space: Proceedings of the 18th All-Russ. open conf. (Moscow, Nov. 16–20, 2020).* Moscow; 2020. 373 p. (In Russ.)

Venkatappa M., Sasaki N., Anantsuksomsri S., Smith B. Applications of the Google Earth Engine and phenology-based threshold classification method for mapping forest cover and carbon stock changes in Siem Reap Province, Cambodia. *Remote Sensing.* 2020;12:3110. doi: 10.3390/rs12183110

Volkov A. D., Gromtsev A. N., Erukov G. V., Karaev V. N., Kolomytsev V. A., Kurkhinen Yu. P., Lak G. Ts., Pyzhin A. F., Sazonov S. V., Shelekhov A. M. Ecosystems of western taiga landscapes (structure and dynamics). *Trudy lesoinzhenernogo fakul'teta PetrGU = Proceedings of the Forest Engineering Faculty of PetrSU.* Petrozavodsk: Karelia; 1990. 284 p. (In Russ.)

Yanets P. K., Ivanova S. A., Danilov Yu. G. Using Google Earth Engine (GEE) and Landsat satellite images to detect forest fires. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M. K. Ammosova. Ser. Nauki o Zemle = Vestnik of North-Eastern Federal University. Series of Earth Science.* 2022;2(26):22–31. (In Russ.). doi: 10.25587/SVFU.2022.26.2.003

Поступила в редакцию / received: 20.06.2025; принята к публикации / accepted: 01.09.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Петров Николай Владимирович

канд. с.-х. наук, научный сотрудник

e-mail: nvpetrov@krc.karelia.ru

Раевский Борис Владимирович

д-р с.-х. наук, заведующий лабораторией лесных биотехнологий

e-mail: borisraevsky@gmail.com

Тарасенко Виктор Владимирович

научный сотрудник

e-mail: victor.tarasenko.2208@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Petrov, Nikolai

Cand. Sci. (Agr.), Researcher

Raevsky, Boris

Dr. Sci. (Agr.), Head of Laboratory

Tarasenko, Victor

Researcher