

## ЦИФРОВОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ НАЗЕМНОГО ПОКРОВА АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ ВОСТОЧНОЙ ФЕННОСКАНДИИ (НА ПРИМЕРЕ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА)

Б. В. Раевский, В. В. Тарасенко

Отдел комплексных научных исследований Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)

### Для цитирования

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.

Статья поступила в редакцию 22 мая 2024 г.

Проведенные исследования показали, что дешифрирование мультиспектральных снимков среднего разрешения спутниковой программы Landsat методами управляемой классификации позволило с приемлемой точностью сформировать пространственную модель наземного покрова юго-восточной части Кольского полуострова. На основании оценки тематического и позиционного аспектов достоверности дешифрирования сделан вывод, что такой алгоритм контролируемой классификации, как метод «минимального расстояния», показал хорошую достоверность результатов дешифрирования, особенно в отношении древесной растительности. С использованием данного алгоритма для площади более 4 млн га была разработана пространственная модель наземного/растительного покрова, которая может быть информативной в широком диапазоне масштабов изображения. Анализ пространственной информации выявил, что юго-западнее северной границы редкоостровного распространения многолетнемерзлых пород представлены типичные северотаежные хвойные и лиственные насаждения. Восточнее этого рубежа древесная растительность существует в виде отдельных массивов предтундровых редкостойных лесов и вдоль водотоков. В районе же массивно-островного распространения мерзлоты древесной растительности практически нет или она обнаруживается только по долинам крупных рек.

**Ключевые слова:** многозональные космические снимки, управляемая классификация, программа Landsat, наземный покров, данные дистанционного зондирования, дешифрирование.

### Введение

Выявление актуального состояния и организация в последующем мониторинга природной и антропогенной динамики наземного покрова в границах отдельных регионов и России в целом имеет исключительно значение для решения широкого круга задач практического и теоретического характера, связанных с достижением целей устойчивого развития территорий.

Фенноскандия — это физико-географическая страна на северо-западе Европы общей площадью около 1,88 млн км<sup>2</sup> (площадь суши — свыше 1,5 млн км<sup>2</sup>). Выделена финским геологом Вильгельмом Рамзаем в 1898 г. в составе Норвегии, Швеции, Финляндии и западной части бывших Олонецкой и Архангельской губерний России [1]. В границах России территорию Восточной Фенноскандии формируют преимущественно такие ее субъекты, как Мурманская область и Республика Карелия, занимающие восточную часть Балтийского кристалли-

ческого щита (325,4 тыс. км<sup>2</sup>). В настоящее время в соответствии с Федеральным законом № 193-ФЗ [2] Арктическую зону восточной Фенноскандии составляют все районы Мурманской области и 6 муниципалитетов Республики Карелия общей площадью 216,2 тыс. км<sup>2</sup>. Таким образом, доля Арктической зоны составляет 66,4% площади российской части Восточной Фенноскандии.

Под наземным покровом понимается совокупность всех элементов природных и антропогенно измененных ландшафтов, включая растительность, водные тела, участки поверхности без растительного покрова и объекты антропогенной инфраструктуры. Поскольку на исследуемой территории растительные сообщества представляют собой ключевой элемент материковых ландшафтов, далее по тексту термины «наземный покров» и «растительный покров» употребляются как синонимы.

Картографирование растительного покрова Арктической зоны Восточной Фенноскандии играет ключевую роль в оценке биоразнообразия и ресурсного потенциала европейской части Арктической зоны России. Традиционно картографирование растительного покрова было связано в первую очередь с геоботаническими исследованиями и являлось одним из результатов их проведения. Хотя исследования флоры и растительности Кольского полуострова ведутся со второй половины XIX в., с позиций геоботаники его территория изучена неравномерно [3]. Первыми крупномасштабными карто-схемами растительности для Мурманской области, по всей вероятности, были карты растительности Хибин [4] и Монче-тундры [5]. Е. Г. Чернов [6] с 1935 г. проводил геоботаническое изучение Кольского полуострова, результатом которого стала карта растительности Кольского полуострова в масштабе 1:1 000 000. Также следует упомянуть карту растительности Кольского полуострова в масштабе 1:2 000 000, изданную в «Атласе Мурманской области» [7]. Анализ литературы [3; 8—10] показывает, что средне- и крупномасштабное геоботаническое картирование в разное время осуществлялось преимущественно в западной и центральной частях Мурманской области. Наиболее труднодоступная восточная часть Кольского полуострова, по всей видимости, до сих пор не имеет пространственных моделей наземного покрова на среднемасштабном уровне (1:150—200 000).

Сегодня при организации мониторинга растительного покрова на обширных территориях цифровое картографирование с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗ) является обычной практикой. Прежде всего следует отметить созданную на базе обработки снимков системы Landsat группой сотрудников Мэрилендского университета и ряда других организаций в 2013 г. карту изменений лесного покрова мира в XXI в. (Global Forest Change, <https://glad.earthengine.app/view/global-forest-change>). Также разработаны цифровые карты растительности Северной Евразии

на континентальном и субконтинентальном уровнях [11—13]. Однако мелкомасштабные цифровые карты растительности характеризуются, как правило, высокой степенью генерализации информации и имеют ряд ограничений фундаментального характера в отношении точности вследствие географической изменчивости спектрально-отражательных характеристик земного покрова [11].

Для решения широкого круга теоретических и практических вопросов, связанных с выявлением тенденций природной динамики и антропогенной трансформации растительного покрова, назрела необходимость выполнить среднемасштабное картографирование растительности всей Восточной Фенноскандии и в первую очередь ее части, входящей в состав Арктической зоны России. При решении такой масштабной задачи одной из серьезных проблем становится обеспечение разработчиков необходимым объемом наземных подспутниковых данных, которые всегда в дефиците, но совершенно необходимы для выполнения контролируемой классификации космических снимков и проведения последующей верификации результатов дешифрирования. Анализ литературы свидетельствует, что картографирование растительного покрова Мурманской области всегда базировалось на многолетних геоботанических исследованиях, но, как отмечают некоторые авторы [9], результаты многих из них недоступны для широкого круга исследователей. Иными словами, в настоящее время для Кольского полуострова и других регионов России нет общедоступных баз данных биотопов и геоботанических описаний с точной пространственной привязкой.

Один из путей решения проблемы заключается в том, что при картографировании растительного покрова с использованием ДДЗ кроме собственно материалов полевых геоботанических исследований могут быть использованы таксационные описания и плано-картографические материалы, создаваемые в рамках работ по лесоустройству. Безусловно, такая информация существует только в границах лесного фонда и зачастую бывает довольно устаревшей. Она лишена детальности геоботанических описаний напочвенного покрова, но содержит сведения о преобладающей породе, составе и структуре древостоя, а также о типе леса, что, в свою очередь, позволяет косвенно оценивать почвенное плодородие и гидрологические условия данного местообитания. Самое важное — эти данные имеют массовый характер, т. е. охватывают огромные территории и во многих случаях являются единственно доступными.

В соответствии с лесорастительным районированием [14; 15] 76,7% суши Восточной Фенноскандии отнесены к таежной лесорастительной зоне и зоне притундровых лесов и редкостойной тайги. Для арктической ее части эта величина составляет 77,2%. При этом 15 486,5 тыс. га (92,8%) лесов арктической части Восточной Фенноскандии отнесены к северо-таежному лесному району и только 1203,7 тыс. га

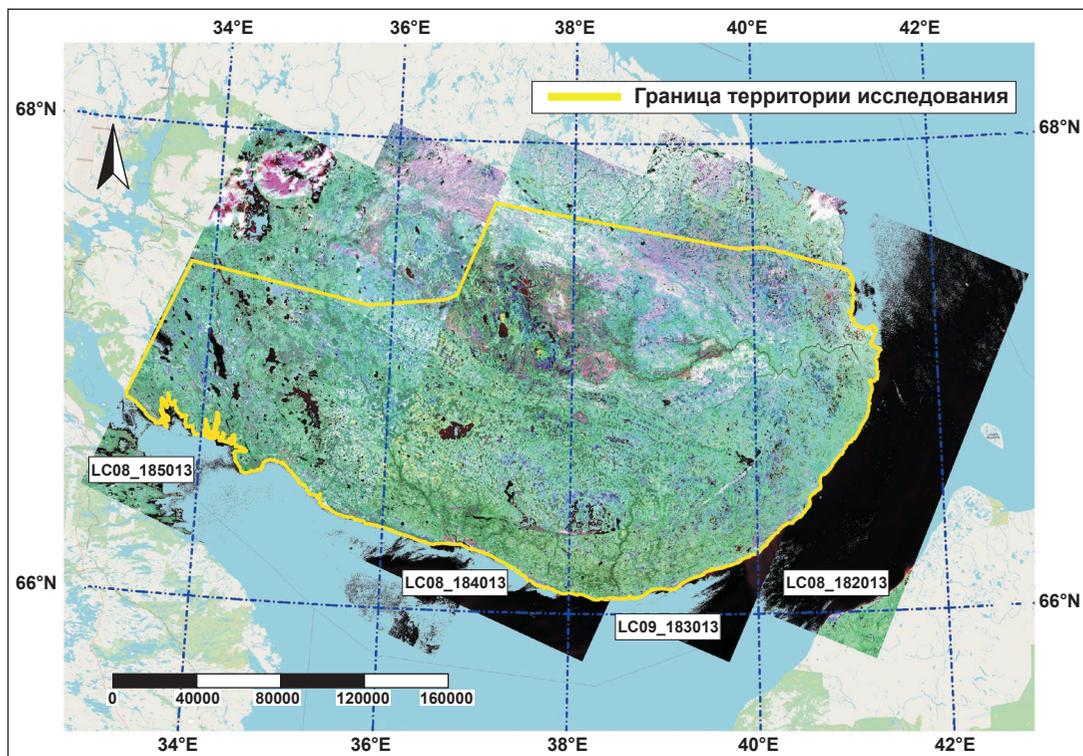


Рис. 1. Расположение исследуемой территории  
Fig. 1. Location of the area under study

(7,2%) — к району притундровых лесов и редкостойной тайги.

В настоящей статье на примере юго-восточной части Кольского полуострова и территории расположенного здесь Терского лесничества (бывшего лесхоза) показана возможность использования планово-картографических и атрибутивных материалов лесоустройства и данных Государственного лесного реестра (ГЛР) для создания пространственной модели растительного покрова и оценок ее достоверности.

### Объекты и методика исследований

Исследуемая территория (ИТ) общей площадью 4 279 059 га находится в юго-восточной части Кольского полуострова (рис. 1). Как уже упоминалось, разработка векторных цифровых карт, отражающих актуальное состояние растительного покрова, в подавляющем большинстве случаев предполагает стремление с одной стороны организовать исследование его будущей природной и антропогенной динамики, а с другой — оценить эти процессы в возможно более длительной ретроспективе. Для этого необходимы космические снимки, выполненные однотипными съемочными системами (спутниковыми платформами) с интервалом в десятилетия. Кроме того, аппаратура должна обеспечивать съемку в оптимальном спектральном диапазоне и с пространственным разрешением, позволяющим при дешифрировании получить картографический продукт требуемой линейки картографических мас-

штабов. Из имеющегося фонда свободно доступных космических снимков (КС) к таковым можно отнести снимки спутниковой системы Landsat [16].

При выборе снимков учитывались требования сезонности (вегетационный период: июнь-сентябрь) и отсутствие облачности (в пределах от 0% до 5%). По результатам анализа имеющихся в свободном доступе архивных материалов проекта Landsat (Геологическая служба США, <https://earthexplorer.usgs.gov/>) были выбраны следующие космические снимки, покрывающие территорию исследования:

- сенсор Operational Land Imager (OLI), спутник Landsat-8, дата съемки 31.07.2018;
- сенсор OLI, спутник Landsat-8, дата съемки 10.09.2018;
- сенсор OLI, спутник Landsat-8, дата съемки 02.07.2021;
- сенсор OLI-2, спутник Landsat-9, дата съемки 20.07.2022.

Обработка спектральных снимков проводилась с использованием открытого программного обеспечения (ПО) QGIS v7. В программном модуле Semi-Automatic Classification (SAC-Plugin) ПО QGIS для данных ДЗЗ, полученных с сервера USGS, была проведена атмосферная коррекция (DOS1) многоканальных сцен и сформированы цветные RGB-композиции в комбинации каналов «6-5-4»: 6 — коротковолновый инфракрасный — SWIR1, 5 — ближний инфракрасный NIR (Near Infrared), 4 — красный — Red [17].

## Проблемы регионов

В итоге были сформированы следующие RGB-композиции (растровые образы), при этом доля площади снимков, использованных для создания итоговой тематической карты, составила следующие величины:

- LC08\_182013\_20210702\_B654.  
TIF — 5338 га — 15,60%;
- LC09\_183013\_20220720\_B654.  
TIF — 33 010 га — 96,45%;
- LC08\_184013\_20180910\_B654.  
TIF — 682 га — 1,99%;
- LC08\_185013\_20180731\_B654.  
TIF — 22 450 га — 65,60%.

Далее по тексту снимки будут именоваться по фрагменту идентификатора, выделенному полужирным шрифтом. Для выполнения классификации КС было использовано следующее программное обеспечение:

- System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v8.5.1;
- Scanex IMAGE Processor (SIP) v5.1.55;
- Environment Visualization (ENVI) v5.1;

Методы дешифрирования космических снимков подробно описаны в многочисленных публикациях [18—23]. В наших предшествующих работах [24; 25] изложены результаты исследования растительного покрова Онежского полуострова (Архангельская область) и государственного природного заповедника «Костомукшский» (Республика Карелия) с использованием ряда классических методов управляемой классификации, а именно: минимального расстояния (MD), максимального правдоподобия (ML) и дистанции Махаланобиса (MhD). Оценка тематического и позиционного аспектов достоверности дешифрирования позволили заключить, что в отношении исследуемых объектов метод минимального расстояния (MD, ПО ENVI) дал наилучшие результаты. В настоящем исследовании были использованы и более современные методы управляемой классификации ДДЗ, а именно:

- Random Forest Classification (RF) — ПО SAGA;
- Support Vector Machine Classification (SVM) — ПО SAGA;
- K-nearest neighbor (K-nn) — ПО SIP;
- Normal Bayes (NB) — ПО SIP;
- Random Trees (RT) — ПО SIP;

Все указанные алгоритмы, а также алгоритм Minimum distance (MD) были реализованы на примере «основного» по площади КС (LC09\_183013\_20220720\_B654).

Выделение эталонных полигонов классификатора (обучающая и валидационная выборки) в соотношении 3:1 по числу эталонов осуществлялась согласно методическим рекомендациям [26—28]. Поскольку территория исследования покрывалась 4 космическими снимками, набор эталонов формировался для каждого КС. Всего было сформировано 17 групп тематических классов, а именно: 1) Белое море, 2) внутренние водоемы, 3) насаждения с преобладанием березы (березняки брусничные, вороничные, чернич-

но-сфагновые, березово-еловые и березово-сосновые насаждения вороничные, чернично-сфагновые и лишайниковые), 4) березовое криволесье, 5) тундра (кустарничковая, кустарничково-лишайниковая, заболоченная, с зарослями ивы, бугристые болота), 6) песчано-гравийные поверхности без растительного покрова (дороги, населенные пункты, участки голого грунта), 7) каменистые россыпи и обломочный материал без растительного покрова (гольцы, каменистые россыпи), 8) болота (участки сфагнового покрова, грядово-мочажинные комплексы, грядово-озерковые комплексы, заболоченные депрессии кристаллического фундамента), 9) насаждения с преобладанием ели (ельники лишайниковые, чернично-сфагновые, долгомошные, елово-березовые и елово-сосновые сфагновые и чернично-сфагновые насаждения), 10) зона морского отлива и отмели, 11) пески и песчано-гравийные поверхности (песчаные дюны, песчано-гравийные поверхности и откосы), 12) лишайниково-кустарничковые сухие местообитания с редкой сосной (горельники и гари, пожарища), 13) кустарничково- и кустарничково-лишайниковая растительность (прогалины, береговая полоса вдоль моря без древесной растительности), 14) редкостойная сосна (редины, сосна по болоту), 15) кустарничково-лишайниковая тундра со скальными обнажениями, 16) насаждения с преобладанием сосны (сосняки лишайниковые, вересковые, чернично-сфагновые, сосново-еловые чернично-сфагновые и долгомошные, сосново-березовые чернично-сфагновые насаждения), 17) лишайниково-кустарничковая растительность с редкостойной сосной и березой.

Для разработки классификаторов использовались планы лесонасаждений Умбского, Индельского и Варзугского участков лесничеств (Терское лесничество), раскрашенные по преобладающим породам, таксационные описания выделов, а также мозаика космических снимков высокого разрешения, доступная на картографическом сервисе Bing Maps. Также для разработки классификаторов и верификации результатов дешифрирования (позиционной точности) использовались результаты полевых обследований территории. Всего в течение экспедиций 2021—2022 гг. на 11 маршрутных ходах было выполнено 101 описание наземного покрова с использованием общепринятых методов.

### Результаты и обсуждение

Результаты дешифрирования площадной структуры ИТ в границах основного КС (183013) с использованием ряда алгоритмов управляемой классификации представлены в табл. 1. Анализ ее данных показывает, что в результате классификации КС с использованием алгоритмов RF, K-nn и RT не все тематические классы были классифицированы. Весьма существенным является и тот факт, что по некоторым тематическим группам классов (кластерам) итоговые площади различались в разы, а иногда и на порядок.

Таблица 1. Сводная таблица результатов дешифрирования основного КС (183013) в разрезе площадей (га) групп классов

Table 1. Summary table of the main CS (183013) interpretation results given by class group areas (ha)

№	Группа классов	Minimum distance (ENVI)	Random Forest (SAGA)	Support Vector Machine (SAGA)	K-nearest neighbor (SIP)	Random Trees (SIP)	Normal Bayes (SIP)
1-2	Водные объекты	330 194,0	295 384,1	317 951,5	150 998,9	154 234,4	158 848,3
3	Насаждения с преобладанием березы	79 410,1	6 503,7	9 828,5	—	—	131 537,3
4	Березовое криволесье	207 749,5	368 056,1	1 234 505,7	298 771,4	291 662,5	199 462,2
5	Тундра	967 707,3	101 912,6	79 513,4	129,4	—	737 674,1
6	Песчано-гравийные поверхности без растительного покрова	6 897,2	3 493,8	11 388,9	—	—	21 530,0
8	Болота	570 786,5	1 725 193,3	1 121 240,3	1 794 331,8	1 780 043,0	890 514,3
9	Насаждения с преобладанием ели	398 867,4	258 521,2	105 712,1	282 447,5	265 287,8	216 055,5
11	Пески и песчано-гравийные поверхности	24 875,5	2 088,5	2 255,8	—	—	132 708,2
12	Лишайниковые и лишайниково-кустарничковые сухие местообитания с редкой сосной	92 123,6	67 174,2	63 142,2	—	—	49 731,8
13	Кустарничковая и кустарничково-лишайниковая растительность	74 437,7	19 939,3	24 429,1	—	—	83 643,1
15	Кустарничково-лишайниковая тундра со скальным обнажениями	41 939,7	—	3 752,9	—	—	6 664,2
16	Насаждения с преобладанием сосны	269 244,3	47 819,3	40 547,6	—	—	202 693,4
17	Лишайниково-кустарничковая растительность с редкой сосной и березой	242 438,7	410 745,5	289 850,1	657 422,4	692 847,6	323 313,5
	<i>Итого</i>	3 306 671,5	3 306 831,5	3 304 118,2	3 184 101,3	3 184 075,2	3 154 375,9

Итоговая оценка тематического и позиционного аспектов достоверности дешифрирования основного КС (183013) выполнялась с учетом величин статистических показателей точности, а также на основании соответствия созданной пространственной

модели имеющемуся плану лесонасаждений, а также карте растительности Кольского полуострова [7]. По результатам такой оценки был сделан вывод, что в отношении исследуемой территории метод минимального расстояния (MD) дал наилучшие резуль-

Таблица 2. Оценка точности классификации отдельных КС с использованием алгоритма MD

Table 2. Classification accuracy metrics for individual CS using the MD algorithm

Идентификатор снимка	Общая точность, %	Коэффициент Каппа	Доля площади КС в структуре карты ИТ, %
182013	80,2	0,72	15,6
183013	83,5	0,70	96,45
184013	60,0	0,52	1,99
185013	96,3	0,81	65,59
Средневзвешенное значение	<b>87,6</b>	<b>0,74</b>	—

таты. Поэтому другие RGB-композиции были также классифицированы методом MD (ПО ENVI) по наборам эталонов, сформированных для каждого КС.

Достоверность управляемой (контролируемой) классификации оценивается через построение так называемой матрицы ошибок [29] или матрицы неточностей [26], которая в англоязычной литературе определяется термином «confusion matrix». Суть данной матрицы заключается в распределении пикселей контрольных эталонов, представляющих каждый тематический класс по результатам их фактической классификации. Таким образом, общая достоверность (overall accuracy) классификации определяется как частное от деления числа правильно классифицированных пикселей (главная диагональ матрицы) на общее число всех пикселей во всех контрольных

эталонах. Кроме того, рассчитываются ряд важнейших формальных показателей, таких как точность производителя (producer's accuracy) и точность пользователя (user's accuracy), исчерпывающим образом характеризующих достоверность классификации. Для подтверждения того, что показатель достоверности не является случайным, используется так называемый коэффициент  $k$  — Каппа. Этот коэффициент является критерием согласованности данных классификации, т. е. оценивает, насколько хорошо выполняется классификация изображения по сравнению с просто случайным присвоением значений [26; 29].

В связи с большим размером таблицы матрица неточностей в развернутом виде в настоящей статье не приводится. Оценки общей точности классификации по каждому КС приведены в табл. 2.

Как следует из этих данных, показатели коэффициента Каппа находятся в границах (0,52—0,81) диапазона «значительного» уровня согласованности значений [26].

Принимая во внимание, что средневзвешенное значение общей точности составило 87,6% при коэффициенте Каппа, равном 0,74, следует заключить, что уровень достоверности классификации исследуемой территории является «хорошим». В табл. 3 представлены результаты оценки достоверности классификации (точности производителя и пользователя) с использованием алгоритма минималь-

Таблица 3. Показатели достоверности классификации с использованием алгоритма MD по группам тематических классов

Table 3. Reliability indicators of classification using the MD algorithm for groups of thematic classes

№	Группа классов	КС 183013		КС 185013	
		Точность производителя, %	Точность пользователя, %	Точность производителя, %	Точность пользователя, %
2	Внутренние водоемы	91,4	98,8	72,9	95,9
3	Насаждения с преобладанием березы	0,19	0,02	70,0	43,1
4	Березовое криволесье	52,4	92,3	45,4	50,3
5	Тундра	72,1	11,7	54,3	47,5
6	Песчано-гравийные поверхности без растительного покрова	96,4	20,4	73,4	73,8
7	Каменистые россыпи, обломочный материал, без растительного покрова	—	—	100,0	48,0

Окончание табл. 3

№	Группа классов	КС 183013		КС 185013	
		Точность производителя, %	Точность пользователя, %	Точность производителя, %	Точность пользователя, %
8	Болота	41,7	13,4	49,8	77,5
9	Насаждения с преобладанием ели	91,2	36,5	51,7	41,8
11	Пески и песчано-гравийные поверхности	35,3	21,9	52,4	44,2
12	Лишайниковые и лишайниково- кустарничковые сухие местообитания с редкой сосной	27,0	32,9	48,1	18,4
13	Кустарничковая и кустарничково- лишайниковая растительность	26,5	6,2	69,0	57,4
14	Редкостойная сосна	—	—	86,6	89,0
15	Кустарничково-лишайниковая тундра со скальным обнажениями	62,5	52,6	55,7	55,3
16	Насаждения с преобладанием сосны	17,5	5,7	40,1	63,6
17	Лишайниково-кустарничковая растительность с редкостойной сосной и березой	10,7	49,6	71,6	28,6
	<i>Среднее</i>	48,1	34,0	62,7	55,6
1	Белое море	100,0	98,8	100,0	100,0
10	Зона отлива, отмели	—	—	91,4	12,4

ного расстояния (MD) для двух снимков, площадь которых в наибольшей степени была использована для создания тематического изображения. Снимок 183013 охватывал крайний юго-восток Кольского полуострова, где по площади преобладали тундровые экосистемы, а снимок 185013 соответствовал территории с преобладанием низкопродуктивных северотаежных и лесотундровых сообществ. В обоих случаях с высокой достоверностью классифицировались водные поверхности, а также участки суши, лишенные растительного покрова. Классификация березняков и сосняков была успешнее на снимке 185013, березовое криволесье и еловые рожицы увереннее классифицировались на снимке 183013. Болотные массивы в силу сложной пространственной структуры и неоднородности спектральных отражательных характеристик оказались весьма проблемными объектами с точки зрения автоматизированного дешифрирования.

Для оценки достоверности результатов дешифрирования ИТ использовались собственные данные полевых маршрутных исследований в виде массива из 101 контрольной точки. Анализ полевых маршрутных данных показал, что в период экспедиции 2021 г. на четырех маршрутах было сделано 31 описание растительных сообществ, из которых 23 (74,2%) совпали с результатами дешифрирования. По данным 2022 г. из 69 контрольных точек с результатами тематического дешифрирования совпали 48 позиций, что составляет 69,6% общего числа. Полученные величины близки к рассчитанному коэффициенту Каппа (0,74).

Площади лесных сообществ, определенные по результатам дешифрирования, в сравнении с материалами ГЛР в границах Терского лесничества, которое полностью входит в состав ИТ, представлены в табл. 4. Данные ГЛР по состоянию на 01.01.2021 были предоставлены по запросу Министерством

Таблица 4. Распределение площади по преобладающим породам Терского лесничества Мурманской области

Table 4. Distribution of area by predominant species of the Terskoye forestry of the Murmansk region

Порода	Площадь, га		Относительная разница, %	Δ, %
	Данные ГЛР	Дешифрирование		
Сосна	224 326	199 157	88,8	-11,2
Ель	491 289	407 404	82,9	-17,1
<i>Итого хвойных</i>	<i>715 615</i>	<i>606 561</i>	<i>84,8</i>	<i>-15,2</i>
Береза	147 126	191 132	129,9	29,9
Осина	143	0	—	—
<i>Итого лиственных</i>	<i>147 269</i>	<i>191 132</i>	<i>129,8</i>	<i>29,8</i>
<i>Всего</i>	<i>862 884</i>	<i>797 693</i>	<i>92,4</i>	<i>-7,6</i>

природных ресурсов, экологии и рыбного хозяйства Мурманской области. Расчет относительной разницы выполнен по отношению к данным ГЛР, которые взяты за 100%.

Известно, что при лесоустройстве площадная структура насаждений определяется по преобладающей по запасу породе. В то же время подавляющее большинство насаждений (таксационных выделов) характеризуется смешанным породным составом. Дешифрирование КС осуществлялось на основе пописельной классификации. Поэтому абсолютного совпадения величин площадных характеристик по представленности основных лесообразующих пород в принципе быть не может. В нашем случае соотношение величин относительной разницы показывает, что при классификации, по-видимому, иногда наблюдается перепутывание таких тематических классов, как сосняки и ельники, между собой в пределах хвойной формации. В связи с высокой долей участия березы часть насаждений с участием хвойных классифицировалась как лиственные (березняки), при этом лесоустройством они были учтены как хвойные насаждения. В итоге площадь березняков в сравнении с данными ГЛР оказалась завышенной на 29,9%. Следует учесть, что Индельское, Умбское участковые лесничества и западная часть Варзугского лесничества были устроены в 1998 г. Восточная часть Варзугского участкового лесничества обследовалась аэротаксационным способом в 1952 г. Таким образом, за истекшие десятилетия соотношение площадей основных лесообразующих пород действительно могло измениться. Однако актуальных лесочетных данных, которые могли бы подтвердить этот факт, не существует. По результатам дешифрирования площадь, покрытая древесной растительностью, оказалась на 7,6% меньше, чем по данным ГЛР. В связи с тем, что данные лесоустройства не представлены в векторном виде, определить, к каким классам были отнесены недостающие 65 191 га, не представляется возможным. Учитывая большую

площадь лесничества (2 084 874 га), столь небольшое отличие следует рассматривать скорее как свидетельство высокой достоверности выполненной классификации древесной растительности в целом.

Результаты классификации комплекта КС были объединены в единое цифровое покрытие (ГИС-формат, ПО MapInfo) в границах исследуемой территории. Цифровая тематическая карта типов наземного покрова ИТ представлена на рис. 2. Анализ приведенной там тематической информации свидетельствует, что юго-западнее границы редкостойного распространения мерзлых пород представлены типичные северотаежные хвойные и лиственные насаждения. Восточнее данного рубежа древесная растительность существует преимущественно вдоль водотоков в виде отдельных массивов предтундровых редкостойных лесов с выраженным преобладанием ели. В районе же массивно-островного распространения мерзлоты древесной растительности практически нет или она обнаруживается только по долинам крупных рек (преобладает березовое криволесье), где распространение мерзлоты прерывается. Логично предположить, что устойчивое потепление климата восточной части Кольского полуострова в перспективе ближайших столетий, по всей видимости, вызовет ускоренную деградацию многолетнемерзлых пород. В связи с этим можно ожидать изменения структуры растительного покрова в сторону увеличения площадной доли лесных и лесотундровых сообществ и сдвига соответствующих границ в северо-восточном направлении.

По данным настоящего исследования структурно-площадная характеристика материкового наземного покрова ИТ может быть представлена следующим образом:

- кустарничковая и кустарничково-лишайниковая растительность вдоль берега Белого моря — 1,6%;
- участки суши, лишённые напочвенного покрова, — 1,3%;
- экосистемы северной тайги и лесотундры — 32,5%;

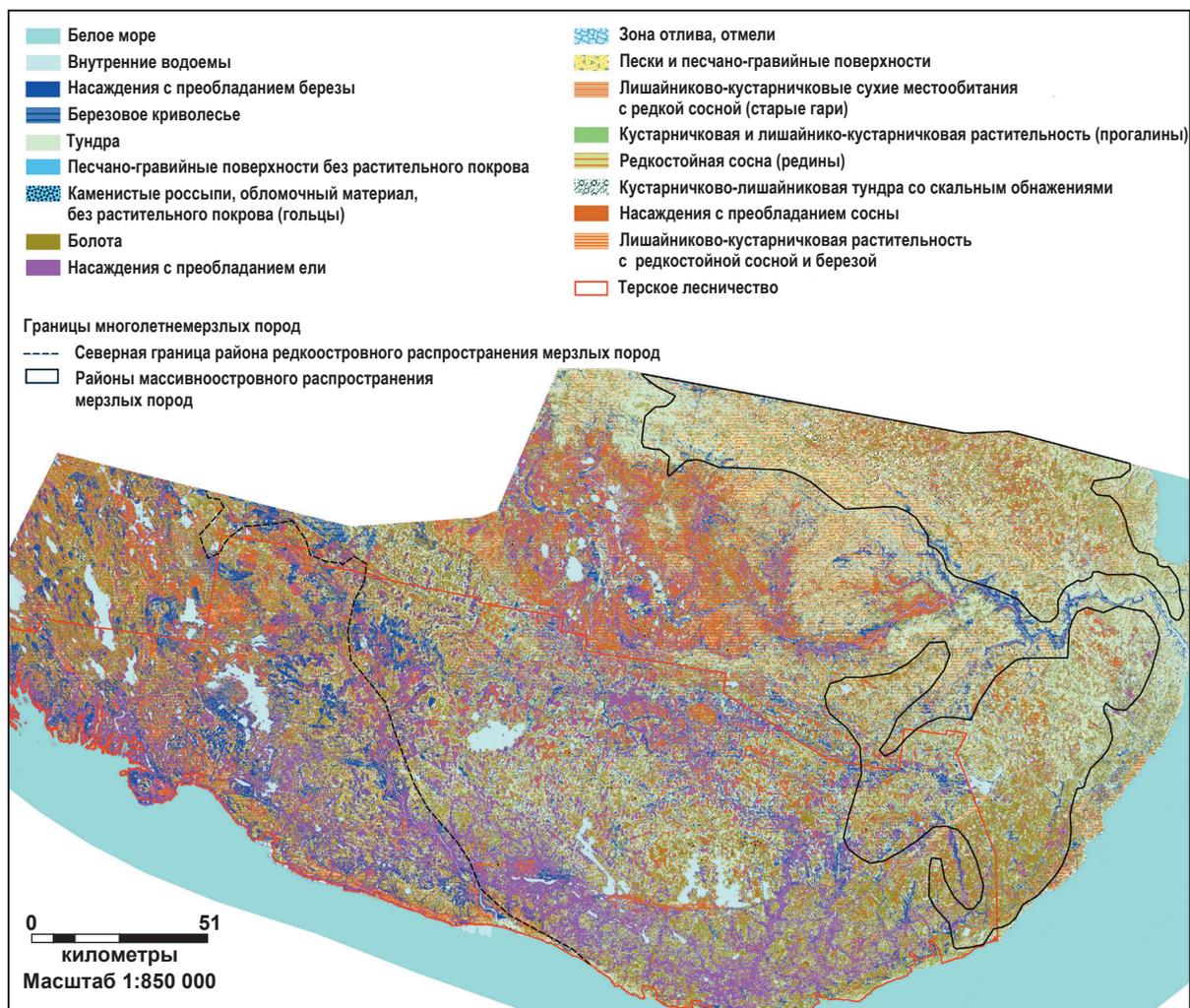


Рис. 2. Карта типов наземного покрова исследуемой территории. Границы многолетнемерзлых пород даны по «Геокриологической карте России» 1996 г. [30]

Fig. 2. Map of land cover types of the area under study. Permafrost boundaries are given according to the “Geocryological Map of Russia” of 1996 [30]

- тундровые сообщества — 40,8%;
- болота — 19,7%;
- внутренние водоемы — 4,1%.

Как уже упоминалось, на территории западной части (1 484 563 га) Терского лесничества последнее лесоустройство было проведено в 1998 г. Составлен план лесонасаждений в масштабе 1:50 000. Восточная часть лесничества (1 042 259 га), где преобладают тундровые экосистемы, последний раз обследовалась аэротаксационным методом в 1952 г. Последнее означает, что контуры выделов были намечены по аэрофотоснимкам, а их таксационные характеристики определялись визуально без использования традиционного глазомерно-измерительного метода. Масштаб плана лесонасаждений для этой части лесничества составил 1:100 000. На рис. 3а представлен фрагмент плана лесонасаждений (квартал № 345) из восточной части лесничества. Сам квартал площадью 22 500 га с размерами сторон примерно

13,5×18 км был выбран как пример сочетания контрастных типов наземного и растительного покрова, включающего внутренние водоемы, массивы болот и древесную растительность. Полигоны выделов были векторизованы (рис. 3б) и положены на тематическую карту (см. рис. 2), увеличенный фрагмент которой представлен на рис. 3в. Следует отметить, что на рис. 3 все перечисленные изображения даны в одинаковом масштабе — 1:100 000. Анализ данного рисунка позволяет заключить, что дешифрованное изображение несомненно демонстрирует хорошую позиционную достоверность (контуры выделов ели легко узнаваемы), а также обладает более высоким уровнем детализации по сравнению с ведомственными планами лесонасаждений. Таким образом, можно утверждать, что для значительной по площади (более 1,0 млн га) труднодоступной территории юго-восточной части Кольского полуострова впервые за последние 70 лет была сформирована достоверная простран-

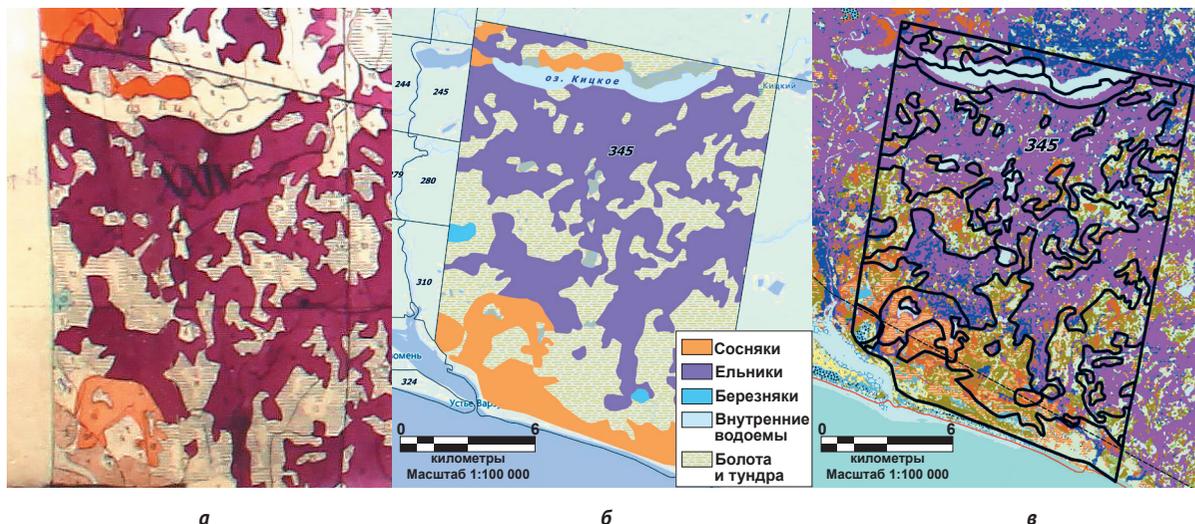


Рис. 3. Фрагменты плана лесонасаждений и карты типов наземного покрова в квартале № 345 Терского участкового лесничества: а – фрагмент плана 1952 г., б – оцифрованные полигоны выделов, в – векторный слой выделов на тематической карте (см. легенду на рис. 2)

Fig. 3. Fragments of the forest plantation plan and the map of land cover types in forest block No. 345 of the Terskoye district forestry: а – fragment of the 1952 plan, б – digitized polygons of forest units, в – vector layer of forest units on the thematic map (see the legend in Fig. 2)

ственная модель наземного/растительного покрова, которая может быть представлена в широком диапазоне картографических масштабов.

### Заключение

В связи с труднодоступностью и обширностью территории Арктической зоны Восточной Фенноскандии создание цифровых векторных карт ее растительного покрова на основе дешифрирования данных дистанционного зондирования имеет исключительное значение с точки зрения организации мониторинга их природной и антропогенной динамики. Разработка пространственных моделей растительного покрова обзорно-топографического уровня (М 1:150—200 000) на базе управляемой классификации ДДЗ требует значительного количества эталонов по десяткам тематических классов. Однако в настоящее время для этой территории нет общедоступных баз данных биотопов и геоботанических описаний с точной пространственной привязкой. Поэтому планы лесонасаждений и таксационные описания во многих случаях являются единственным альтернативным источником информации, позволяющим сформировать обучающие выборки без многолетних геоботанических исследований.

Результаты исследований, изложенные в настоящей статье, свидетельствуют, что дешифрирование мультиспектральных снимков среднего разрешения спутниковой программы Landsat с использованием методов контролируемой классификации позволило с приемлемой точностью сформировать пространственную модель растительного покрова юго-восточной части Кольского полуострова. Итоговая оценка тематического и позиционного аспектов достоверности дешифрирования на основании рас-

четных статистических показателей, сравнительного анализа созданной векторной тематической карты с планом лесонасаждений Терского лесничества и данными полевых исследований позволила сделать вывод, что такой «классический» алгоритм контролируемой классификации, как метод «минимального расстояния», показал хорошую достоверность результатов классификации, особенно в отношении древесной растительности.

В результате проведенного исследования для значительной по площади (более 4 млн га) труднодоступной территории юго-восточной части Кольского полуострова была разработана пространственная модель наземного/растительного покрова, которая может быть представлена в широком диапазоне картографических масштабов.

Предложенная пространственная модель растительного покрова исследуемой территории наглядно показывает тесную взаимосвязь дислокации и породного состава древесной растительности и степени распространения многолетнемерзлых пород. Полученная информация позволяет предположить, что сохранение в перспективе ближайших столетий ныне наблюдаемой тенденции устойчивого потепления климата восточной части Кольского полуострова будет способствовать увеличению площадной доли лесных и лесотундровых сообществ и их продвижению в северо-восточном направлении.

### Финансирование

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

## Литература/References

1. Ramsai W. Uber die geologische Entwicklung der Halbinsel Kola in der Quarterarz. Fennia, 1898, no. 16.
2. Федеральный закон «О государственной поддержке предпринимательской деятельности в Арктической зоне Российской Федерации» от 13 июля 2020 г. № 193-ФЗ. — URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_357078/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_357078/).
3. Federal law “About governmental support of business activity in Arctic zone of Russian Federation” from July 13, 2020 no. 193-ФЗ. Available at: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_357078/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_357078/). (In Russian).
4. Королева Н. Е. Растительность Мурманской области как компонент биоразнообразия // Вестн. МГТУ. — 2009. — Т. 12, № 1. — С. 153—166.  
Koroleva N. E. Vegetation of Murmansk region as a component of biodiversity. Proceedings of Bauman Moscow State Technical University, 2009, vol. 12, no. 1, pp. 153—166. (In Russian).
5. Аврорин Н. А., Качурин М. Х., Коровкин А. А. Материалы по растительности Хибинских гор // Тр. СОПС АН СССР. Сер. Кольская. — 1936. — Вып. 11. — С. 3—95.  
Avrorin N. A., Kachurin M. Kh., Korovkin A. A. Study results concerning vegetation of Khibin mountains. Publications of Productive Forces Investigation Commission USSR Academy of Sciences. Kolsky series, 1936, iss. 11, pp. 3—95. (In Russian).
6. Боброва Л. И., Качурин М. Х. Очерк растительности Монче-тундры // Тр. СОПС АН СССР. Сер. Кольская. — 1936. — Вып. 2. — С. 95—121.  
Bobrova L. I., Kachurin M. Kh. Outline of Monche-tundra vegetation. Publications of Productive Forces Investigation Commission USSR Academy of Sciences. Kolsky series, 1936, iss. 2, pp. 95—121. (In Russian).
7. Чернов Е. Г. Карта растительности Кольского полуострова в масштабе 1:1 000 000 с пояснительным текстом: Дис. ... канд. биол. наук. — Кировск, 1953. — 274 с.  
Chernov E. G. Vegetation map of Kolsky peninsula on a scale of 1:1 000 000 with comments. Candidate (Phd) of biology thesis. Kirovsk, 1953, 274 p. (In Russian).
8. Атлас Мурманской области, 1971. — URL: <https://kolamap.ru/img/1971/1971.html>.  
Atlas of Murmansk region, 1971. Available at: <https://kolamap.ru/img/1971/1971.html>. (In Russian).
9. Королева Н. Е., Лошкарева А. Р. Полевые геоботанические исследования как первый этап создания новой геоботанической карты Кольского полуострова // ИнтерКарто/ИнтерГИС 17: устойчивое развитие территорий; теория ГИС и практический опыт. Материалы Международной конференции. — Барнаул, 2011. — С. 131—134.  
Koroleva N. E., Loshkareva A. R. Field geobotanical investigations as the first stage in developind of new geobotanic map of Kola peninsula. InterCarto/InterGIS 17: sustainable development; theory of GIS and practice experience. Proceedings of international conference. Barnaul, 2011, P. 131—134. (In Russian).
10. Королева Н. Е., Лошкарева А. Р. Анализ отображения ключевого участка на границе зональной тундры и лесотундры Кольского полуострова на геоботанических картах // Тр. Карельского науч. центра РАН. — 2013. — № 32. — С. 3—21.  
Koroleva N. E., Loshkareva A. R. Evaluation of geobotanically mapped key plot at t the border of zonal tundra and forest tundra of Kolsky peninsula. Transactions of Karelian Research Centre RAS, 2013, no. 32, pp. 3—21. (In Russian).
11. Черненко Т. В., Пузаченко М. Ю., Басова Е. В., Королева Н. Е. Ценотическое разнообразие и картографирование растительного покрова центральной части Мурманской области // Геоботан. картографирование. — 2015. — Июнь. — С. 78—94.  
Chernenkova T. V., Puzachenko M. Yu., Basova E. V., Koroleva N. E. Coenotic diversity and vegetation mapping of central part of Murmansk region. Geobotanic mapping, 2015, June, pp. 78—94. (In Russian).
12. Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О. и др. Спутниковое картографирование растительного покрова России. — М.: ИКИ РАН, 2016. — 208 с.  
Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V. Land cover mapping over Russia using Earth observation data. Moscow, IKI, 2016, 208 p.
13. Ярошенко А. Ю., Добрынин Д. А., Егоров А. В. и др. Леса центра и севера Европейской России: Карта масштаба 1:4 500 000. — М., 2008. — URL: [http://forestforum.ru/info/map\\_for\\_print.pdf](http://forestforum.ru/info/map_for_print.pdf).  
Jaroshenko A. U., Dobrynin D. A., Egorov A. V., Juravleva I. V., Manisha A. E., Potapov P. V., Turbanova S. A., Hakimulin E. V. Forests of central and northern Russia. Map on a scale 1:4 500 000. Moscow, 2008. Available at: [http://forestforum.ru/info/map\\_for\\_print.pdf](http://forestforum.ru/info/map_for_print.pdf). (In Russian).
14. Ершов Д. В., Гаврилюк Е. А., Карпучкина 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.  
Ershov D. V., Gavriljuk E. A., Karpukhina D. A., Kovganko K. A. New map of vegetation cover of the central part of European Russia based on high resolution space data. Doklady Akademii nauk, 2015, vol. 464, no. 5, pp. 639—641. (In Russian).
15. Лесной план Мурманской области. — URL: <https://mpr.gov-murman.ru/documents/lesplan/>.  
Forest plan of Murmansk region. Available at: <https://mpr.gov-murman.ru/documents/lesplan/>. (In Russian).
16. Лесной план Республики Карелия. — URL: [https://gov.karelia.ru/upload/iblock/ffb/12\\_2\\_562\\_704.pdf](https://gov.karelia.ru/upload/iblock/ffb/12_2_562_704.pdf).  
Forest plan of Republic of Karelia. Available at: [https://gov.karelia.ru/upload/iblock/ffb/12\\_2\\_562\\_704.pdf](https://gov.karelia.ru/upload/iblock/ffb/12_2_562_704.pdf). (In Russian).
17. Шихов А. Н., Герасимов А. П., Пономарчук А. И., Перминова Е. С. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и вы-

- сокого пространственного разрешения. — Пермь, 2020. — 191 с.
- Shikhov A. N., Gerasimov A. P., Ponomarchuk A. I., Perminova E. S. Thematic decryption and interpretation of space images of medium and high spatial resolution. Perm, Perm State National Research Univ., 2020, 191 p. (In Russian).
17. Евдокимов С. И., Михалач С. Г. Определение физического смысла комбинации каналов снимков Landsat для мониторинга состояния наземных и водных экосистем // Вестн. Псков. гос. ун-та. Сер. «Естеств. и мат. науки». — 2010. — № 7. — С. 21—32. Evdokimov S. I., Mikhalap S. G. Determine the physical meaning of a combination of Landsat image channels to monitor the state of terrestrial and aquatic ecosystems. Annals of Pscov State Univ. Ser. "Natural and Mathematical Sciences", 2010, no. 7, pp. 21—32. (In Russian).
18. Лабутина И. А., Балдина Е. А. Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга экосистем ООПТ: Методическое пособие. — М., 2011. — 88 с. Labutina I. A., Baldina E. A. Using remote sensing data to monitor protected areas ecosystems. Guidebook. Moscow, WWF Rossii, 2011, 88 p. (In Russian).
19. Барталев С. А., Лулян Е. А. Исследования и разработки ИКИ РАН по развитию методов спутникового мониторинга растительного покрова // Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. — 2013. — Т. 10, № 1. — С. 197—214. Bartalev S. A., Loupian E. A. R&D on methods for satellite monitoring of vegetation by the Russian Academy of Sciences' Space Research Institute. Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Current problems in remote sensing of the earth from space], 2013, vol. 10, no. 1, pp. 197—214. (In Russian).
20. 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. Komarova A. F., Zhuravleva I. V., Yablokov V. M. Open source multispectral data and basic methods of remote sensing in vegetation cover investigations. Principles of ecology, 2016, no. 1, pp. 40—74. (In Russian).
21. Chuvieco E. Fundamentals of satellite remote sensing: an environmental approach. Second Edition. Boca Raton/London. New York, CRC Press Taylor & Francis, 2016, 468 p.
22. Jensen J. R. Introductory digital image processing: a remote sensing perspective. Pearson Series in Geographic Information Science. [S. l.], 2015, 656 p.
23. Shridhar D., Prapti D., Alvarinho J. A. Comprehensive Review on Pixel Oriented and Object Oriented Methods for Information Extraction from Remotely Sensed Satellite Images with a Special Emphasis on Cryospheric Applications. Advances in Remote Sensing, 2015, vol. 4, no. 3, pp. 177—195. DOI: 10.4236/ars.2015.43015.
24. Раевский Б. В., Тарасенко В. В., Петров Н. В. Оценка современного состояния и динамики растительных сообществ Онежского полуострова по разновременным спутниковым снимкам Landsat // Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. — 2021. — Т. 18, № 5. — С. 145—155. — DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18. Raevsky B. V., Tarasenko V. V., Petrov N. V. Inventory of the current state and changes in vegetation cover of the Onega Peninsula using staggered Landsat images. Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Current problems in remote sensing of the earth from space], 2021, vol. 18, no. 5, pp. 145—155. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18. (In Russian).
25. Раевский Б. В., Тарасенко В. В., Петров Н. В. Оценка современного состояния растительных сообществ заповедника «Костомукшский» по спутниковым снимкам системы Landsat // Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. — 2022. — Т. 19, № 3. — С. 47—61. — DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-47-61. 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 [Current problems in remote sensing of the earth from space], 2022, vol. 19, no. 3, pp. 47—61. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18.
26. Курбанов Э. А., Воробьев О. Н. Дистанционные методы в лесном хозяйстве. — Йошкар-Ола, 2020. — 268 с. Kurbanov E. A., Vorobyov O. N. Remote methods in forestry: a textbook. Yoshkar-Ola, Volga State Technological Univ., 2020, 266 p. (In Russian).
27. Fassnacht F. E., Latifi H., Stereńczak K., Modzelewska A., Lefsky M., Waser L. T. Review of studies on tree species classification from remotely sensed data. Remote Sensing of Environment, 2016, vol. 186, pp. 64—87.
28. Haapanen R., Ek A. R., Bauer M. E., Finley A. O. Delineation of forest/non forest land use classes using nearest neighbor methods. Remote Sensing of Environment, 2004, vol. 89, pp. 265—271.
29. Малышева Н. В. Автоматизированное дешифрирование аэрокосмических изображений лесных насаждений: Методическое пособие. — М.: Изд-во МГУЛ, 2012. — 154 с. Malysheva N. V. Automatic interpretation of forests' remote sensing data. Guidebook. Moscow, MGUL publish., 2012, 154 p. (In Russian).
30. Геокриологическая карта России. Масштаб 1:2 500 000 / Под ред. Э. Д. Ершова. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1996. Geocryology map of Russia on a scale of 1:2 500 000. Ed. By E. D. Ershov. Moscow, Moscow Univ. edition, 1996. (In Russian).

### Информация об авторах

**Раевский Борис Владимирович**, доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Отдел комплексных научных исследований Карельского научного центра РАН (185910, Россия, Петрозаводск, Пушкинская ул., д. 11), e-mail: borisraevsky@gmail.com.

**Тарасенко Виктор Владимирович**, научный сотрудник, Отдел комплексных научных исследований Карельского научного центра РАН (185910, Россия, Петрозаводск, Пушкинская ул., д. 11), e-mail: victor.tarasenko.2208@mail.ru.

---

## DIGITAL LAND COVER MAPPING OF THE EAST FENNOSCANDIAN ARCTIC ZONE: CASE STUDY OF THE SOUTH-EASTERN KOLA PENINSULA

**Raevsky, B. V., Tarasenko, V. V.**

Department for Multidisciplinary Research of the Karelian Research Centre of Russian Academy of Sciences

The article was received on May 22, 2024

### For citing

**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, vol. 14, no. 4, pp. 617—629. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-4-617-629. (In Russian).

### Abstract

The conducted research has shown that interpretation of medium-resolution multispectral images of the Landsat satellite program by supervised classification methods made it possible to form a spatial model of the land cover of the southeastern part of the Kola Peninsula with acceptable accuracy. Based on the assessment of the thematic and positional aspects of the reliability of interpretation, the researchers have concluded that such a supervised classification algorithm as the “minimum distance” method showed good reliability of the interpretation results, especially with respect to woody vegetation. Using this algorithm for an area of more than 4 million hectares, a reliable spatial model of the land/vegetation cover has been developed, which is informative in a wide range of image scales. Analysis of spatial information has revealed that typical northern taiga coniferous and deciduous stands are represented to the southwest of the northern boundary of the sparse island distribution of permafrost. To the east of this boundary, woody vegetation exists in the form of separate massifs of pre-tundra sparse forests and along watercourses. In the area of massive-island distribution of permafrost, there is practically no woody vegetation, or it is found only in the valleys of large rivers.

**Keywords:** multispectral satellite images, supervised classification, Landsat program, land cover, remote sensing data, interpretation.

### Funding

The research was supported from the federal budget under state assignment to the Karelian Research Center of Russian Academy of Sciences (No. FMEN-2022-0014).

---

### Information about the authors:

**Raevsky, Boris Vladimirovich**, Doctor of Agriculture Science, Leading Researcher at the Department for Multidisciplinary Research of the Karelian Research Centre of Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., Petrozavodsk, 185910, Russia), e-mail: borisraevsky@gmail.com.

**Tarasenko, Victor Vladimirovich**, Researcher at the Department for Multidisciplinary Research of the Karelian Research Centre of Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., Petrozavodsk, 185910, Russia), e-mail: victor.tarasenko.2208@mail.ru.