

Оценка современного состояния растительных сообществ заповедника «Костомукшский» по спутниковым снимкам системы Landsat

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

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

Разработка цифровых векторных карт растительного покрова на основе дешифрирования данных дистанционного зондирования имеет исключительное значение с точки зрения организации мониторинга природной и антропогенной динамики лесных сообществ таёжной зоны Российской Федерации. На примере территории заповедника «Костомукшский» выполнен сравнительный анализ эффективности применения алгоритмов контролируемой классификации: минимального расстояния, дистанции Махаланобиса и максимального правдоподобия. Показано, что все три использованных алгоритма дали результаты, характеризующиеся значительной или хорошей степенью надёжности согласованности данных (по коэффициенту каппа Коэна). Верификация итогов дешифрирования структуры малонарушенного таёжного ландшафта на основе лесоустроительной информации выявила, что метод минимального расстояния оказался способен сформировать более достоверную модель растительного покрова исследуемой территории. Автоматизированное дешифрирование спектрально-зональных снимков Landsat среднего пространственного разрешения с углублённой постклассификационной обработкой информации позволили создать обновляемую цифровую карту растительности заповедника «Костомукшский», по своей информационной насыщенности близкую к такому ведомственному картографическому продукту, как план лесонасаждений. Однако в отличие от данной картограммы, разрабатываемой традиционным методом, использование технологий дешифрирования снимка Landsat дало возможность отразить скрытый процесс увеличения доли ели в структуре сосняков, происходящий при низкой частоте катастрофических нарушений, например пожаров. Полученные данные свидетельствуют, что лесной массив заповедника, по крайней мере с момента его организации, избежал крупных катастрофических нарушений и в настоящее время находится в состоянии подвижного равновесия.

Ключевые слова: многозональные космические снимки, классификация с обучением, программа Landsat, растительный покров, леса, данные дистанционного зондирования, дешифрирование

Одобрена к печати: 03.06.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-47-61

Введение

По экологическим, природоохранным и рекреационным критериям «Зелёный пояс Фенноскандии» (ЗПФ), простирающийся по обе стороны вдоль российско-финляндско-норвежской границы на протяжении около полутора тысяч километров, представляет собой уникальный природный объект, имеющий общеевропейское значение и выступающий северным фрагментом Зелёного пояса Европы (Титов и др., 2009). В его пределах велико ландшафтное разнообразие — от плоских озёрно-ледниковых, сильно заболоченных равнин до среднегорных массивов с отметками до 1000 м н. у. м. (над уровнем моря). В российской части это полоса, характеризующаяся средней шириной около 50 км с крупными массивами относительно хорошо сохранившихся в естественном состоянии северотаёжных лесов и болот, разделяемых в той или иной степени антропогенно трансформированными территориями. Ключевыми участками ЗПФ становятся существующие и планируемые особо охраняемые природные территории (ООПТ) различного ранга. В настоящее время к наиболее крупным из них относятся действующие национальные парки «Паанаярви», «Калевальский» и «Ладожские шхеры», заповедники «Пасвик», «Лапландский» и «Костомукшский» на общей площади более полумиллиона гектаров.

В конце XX – начале XXI вв. в границах Костомукшского городского округа (Республика Карелия) были организованы две крупные особо охраняемые природные территории федерального значения: государственный природный заповедник (ГПЗ) «Костомукшский» (1983) и национальный парк (НП) «Калевальский» (2006). С марта 2015 г. данные ООПТ (всего 123,63 тыс. га) функционируют как единое природоохранное учреждение, сохранившее наименование ГПЗ «Костомукшский». В настоящее время эти два заповедных кластера разделены полосой эксплуатационных лесов шириной 36 км (рис. 1). Названные объекты имеют ключевое природоохранное значение в границах карельской части ЗПФ. В их пределах сохранились крупнейшие на западе таёжной зоны Евразии массивы коренных, преимущественно сосновых лесов в условиях типичных для Фенноскандии типов географического ландшафта. Принимая во внимание биосферную значимость ЗПФ и ландшафтных эталонов северотаёжных коренных лесов, можно утверждать, что данная территория остро нуждается в развитой системе экологического мониторинга, охватывающего все аспекты её природной и антропогенной динамики. Учитывая современный уровень и темпы развития технологий аэрокосмической съёмки и ИТ-технологий, очевидно, что в перспективе значимость информации, полученной дешифрированием данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗ) и представленной в геоинформационных (ГИС) форматах, в структуре любой современной системы мониторинга растительного покрова будет только увеличиваться.

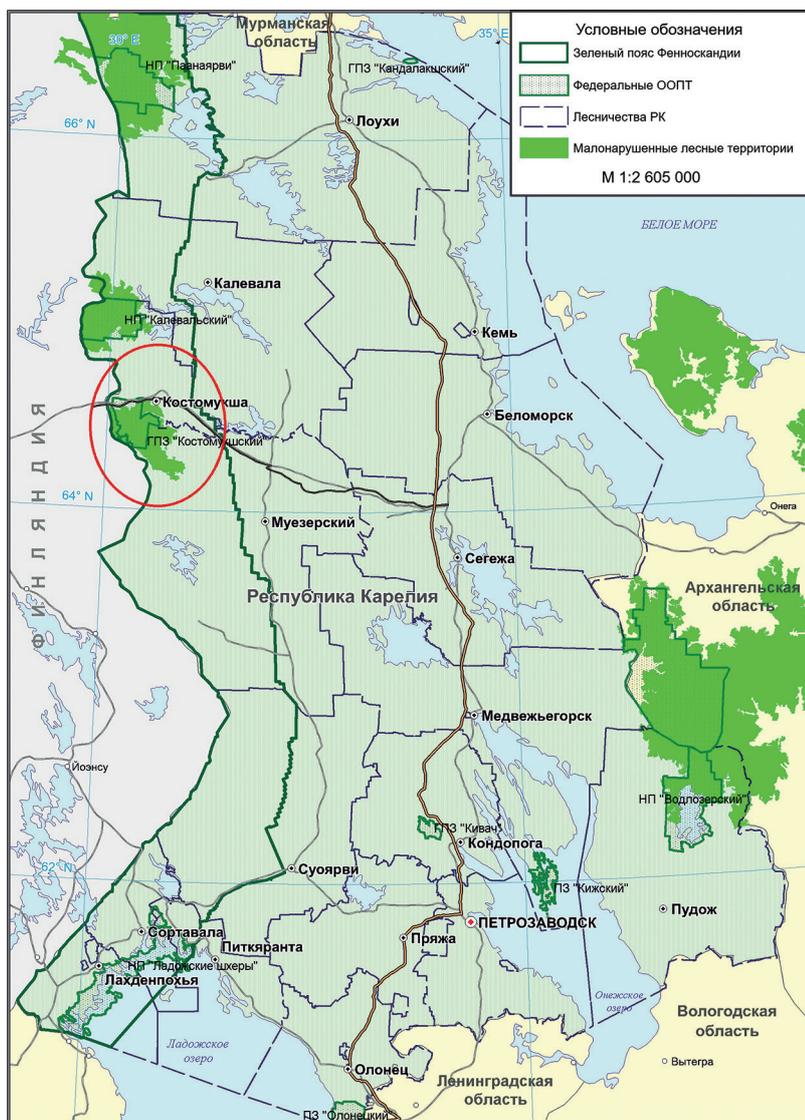


Рис. 1. Расположение ГПЗ «Костомукшский» (выделен) в границах карельской части ЗПФ

Сегодня подавляющее большинство регионов Российской Федерации не имеют электронных карт актуальной растительности обзорно-топографического уровня (масштаба 1:150 000–200 000) и крупнее, которые отражали бы тенденции природной динамики и антропогенной трансформации растительного покрова. Республика Карелия в этом аспекте исключением не становится. Решение данной проблемы видится в поэтапном получении такого рода картографической информации для отдельных крупных районов Карелии, таких, например, как ЗПФ, на базе дешифрирования спектрально-зональных космоснимков среднего пространственного разрешения. В настоящее время разработано большое количество разнообразных методик и методов дешифрирования ДДЗ, базирующихся на использовании подходов неконтролируемой и контролируемой (с обучением) классификации (Барталев и др., 2016; Курбанов, Воробьев, 2020; Шовенгердт, 2010). Важнейшими начальными этапами при реализации алгоритмов контролируемой классификации становятся определение набора классов (категорий) дешифрируемых объектов и составление классификаторов, т. е. формирование обучающих выборок по каждому из выделенных тематических классов. Особенность Карелии заключается в том, что в пределах одного снимка могут быть представлены как малонарушенные, так и в той или иной степени антропогенно трансформированные ландшафты. Поэтому основная цель настоящей работы состоит в определении метода (алгоритма) контролируемой классификации снимка Landsat, позволяющего достичь наибольшей достоверности (точности) при дешифрировании малонарушенных лесных территорий (МЛТ) при условии реализации его на базе классификатора, включающего классы объектов, характерных как для малонарушенных, так и для глубоко антропогенно изменённых ландшафтов.

Материалы и методы

Территория исследования — государственный природный заповедник «Костомукшский», занимающий площадь 49 276 га (см. *рис. 1*).

Для достижения поставленной цели были проанализированы открытые источники ДДЗ и выбраны многозональные космические снимки системы Landsat-8 (пространственное разрешение 30 м/пиксель; комплект спектральных каналов, достаточный для выполнения разнообразных задач научного и прикладного характера (Курбанов, Воробьев, 2020)). При выборе снимков были учтены требования сезонности (вегетационный период июнь — сентябрь), минимальные значения облачности (в пределах от 0 до 10 %) космосъёмки и максимальная временная актуальность. В результате для дешифрирования был использован снимок сенсора OLI (*англ.* Operational Land Imager), спутник Landsat-8, дата съёмки 29.07.2018 (Геологическая служба США, *англ.* United States Geological Survey — USGS, <https://earthexplorer.usgs.gov/>, <https://libra.developmentseed.org/>).

Стандартная обработка ДДЗ проводилась с использованием открытого программного обеспечения (ПО) QGIS v7. С помощью модуля Semi-Automatic Classification Plugin ПО QGIS для ДДЗ, полученных с сервера USGS, была проведена атмосферная коррекция (DOS1) многоканальных сцен и сформирован цветной RGB-композит в комбинации каналов 7-5-3 (*рис. 2*, см. с. 50):

- 7 — коротковолновый инфракрасный 2 (SWIR2, *англ.* short wave infrared);
- 5 — ближний инфракрасный (NIR, *англ.* near infrared);
- 3 — зелёный (Green).

Выбор такой комбинации каналов объясняется тем, что, по выполненным ранее исследованиям растительного покрова, при дешифрировании цветного RGB-композита каналов 7-5-3 достигается большая общая точность и более высокий показатель коэффициента κ (каппа Коэна) в сравнении с цветным RGB-композитом каналов 6-5-4 (Евдокимов, Михалат, 2010; Костикова, 2016).

Методы тематической обработки ДДЗ подробно описаны в многочисленных публикациях, посвящённых дистанционному зондированию Земли из космоса (Антонушкина и др.,

2015; Балдина, Лабутина, 2021; Курбанов, Воробьев, 2020; Топаз, Кочуб, 2012; Шихов и др., 2020).

В настоящей работе разработка классификатора (табл. 1) осуществлялась на основании оригинальной методики, базирующейся на использовании цифровых картографо-атрибутивных повыведельных баз данных (ЦКАПБД) ГПЗ «Костомукшский», Костомукшского и Муезерского лесничеств, а также данных ландшафтных профилей. Для каждого тематического класса формировался основной (рабочий) набор эталонов, использовавшийся для классификации, а также набор контрольных участков для оценки точности и надёжности дешифрирования.

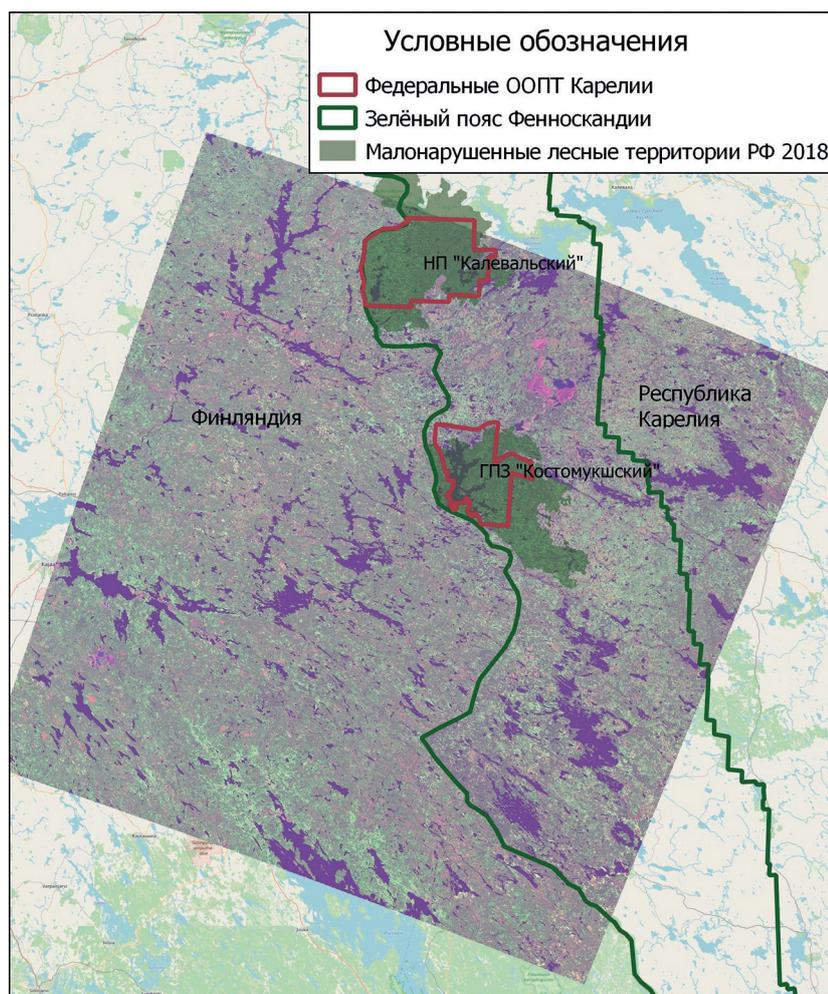


Рис. 2. Спектральный снимок Landsat-8, комбинация спектральных каналов 7-5-3

По территории ГПЗ «Костомукшский» использовались данные последнего (2015) лесораздела, выполненные с использованием ГИС-технологий с опорой на космосъёмку высокого разрешения (QuickBird и WorldView-2, пространственное разрешение 0,61–0,46 м/пиксель (панхроматический канал)). Важным фактором в подборе эталонов (регионов интереса) в границах заповедника выступила его хорошая изученность в ландшафтно-экологическом аспекте. Для заповедника характерно абсолютное доминирование денудационно-тектонического холмисто-рядового с комплексами ледниковых и водно-ледниковых образований среднезаболоченного ландшафта с преобладанием сосновых местообитаний (Громцев, 2008). Кроме того, с 2016 г. здесь закладывается сеть лесного мониторинга с учётом его внутриландшафтной дифференциации на крупные морфологические части — местности и особенности природной и антропогенной динамики лесных сообществ (рис. 3, см. с. 52).

Таблица 1. Распределение числа эталонов по тематическим классам

Номер класса	Название	Число эталонов	
		общее	в том числе контрольных
1	Березняки	2	1
2	Берёзово-еловое насаждение	4	1
3	Берёзово-осиновое насаждение	4	1
4	Болото	35	8
5	Вырубка свежая (не старше 5 лет)	9	2
6	Вырубка средневозрастная (6–10 лет)	8	2
7	Вырубка старая (старше 10 лет)	9	2
8	Гари	5	1
9	Гидрообъекты	8	2
10	Дороги	5	2
11	Елово-сосновое насаждение	15	3
12	Ельник черничный	11	3
13	Карьеры	8	2
14	Лесные культуры	34	5
15	Луг	2	1
16	Населённые пункты	6	2
17	Открытое место	3	1
18	Сосна по болоту	3	1
19	Сосново-елово-берёзовые молодняки	19	4
20	Сосново-еловое насаждение	82	17
21	Сосново-еловый молодняк	3	1
22	Сосняк багульниковый	13	3
23	Сосняк беломошный	5	1
24	Сосняк брусничный	44	12
25	Сосняк брусничный скальный	5	1
26	Сосняк осоково-сфагновый	6	2
27	Сосняк скальный	6	2
28	Сосняк черничный	37	9
29	Сосняки средневозрастные	33	10

Построением запросов в среде ПО MapInfo к повыведельной ЦКАПБД заповедника формировались наборы выделов по тем или иным тематическим классам, которые затем накладывались на космоснимок. Роль подложки в этом случае выполнял описанный выше снимок Landsat, а также мозаика снимков с открытого картографического сервиса Bing Maps. В границах выдела выделялся максимально однородный участок, который в дальнейшем сохранялся в качестве эталона. Работа выполнялась в первую очередь в пределах модельных территорий, а по некоторым классам — по всей территории заповедника. В границах модельной территории № 2, где представлена холмисто-грядовая среднезаболоченная местность крупных денудационно-тектонических возвышенностей с ярко выраженным преобладанием сосновых местообитаний, акцент делался на отбор эталонов, соответствующих таким классам, как «сосняк брусничный скальный», «сосняк брусничный» и «сосняк черничный». В пределах модельной территории № 3 (мелкогрядово-холмистая сильнозаболоченная местность депрессий кристаллического фундамента с ярко выраженным преобладанием сосновых местообитаний) отбирались эталоны по классам переувлажнённых сосняков и болот.

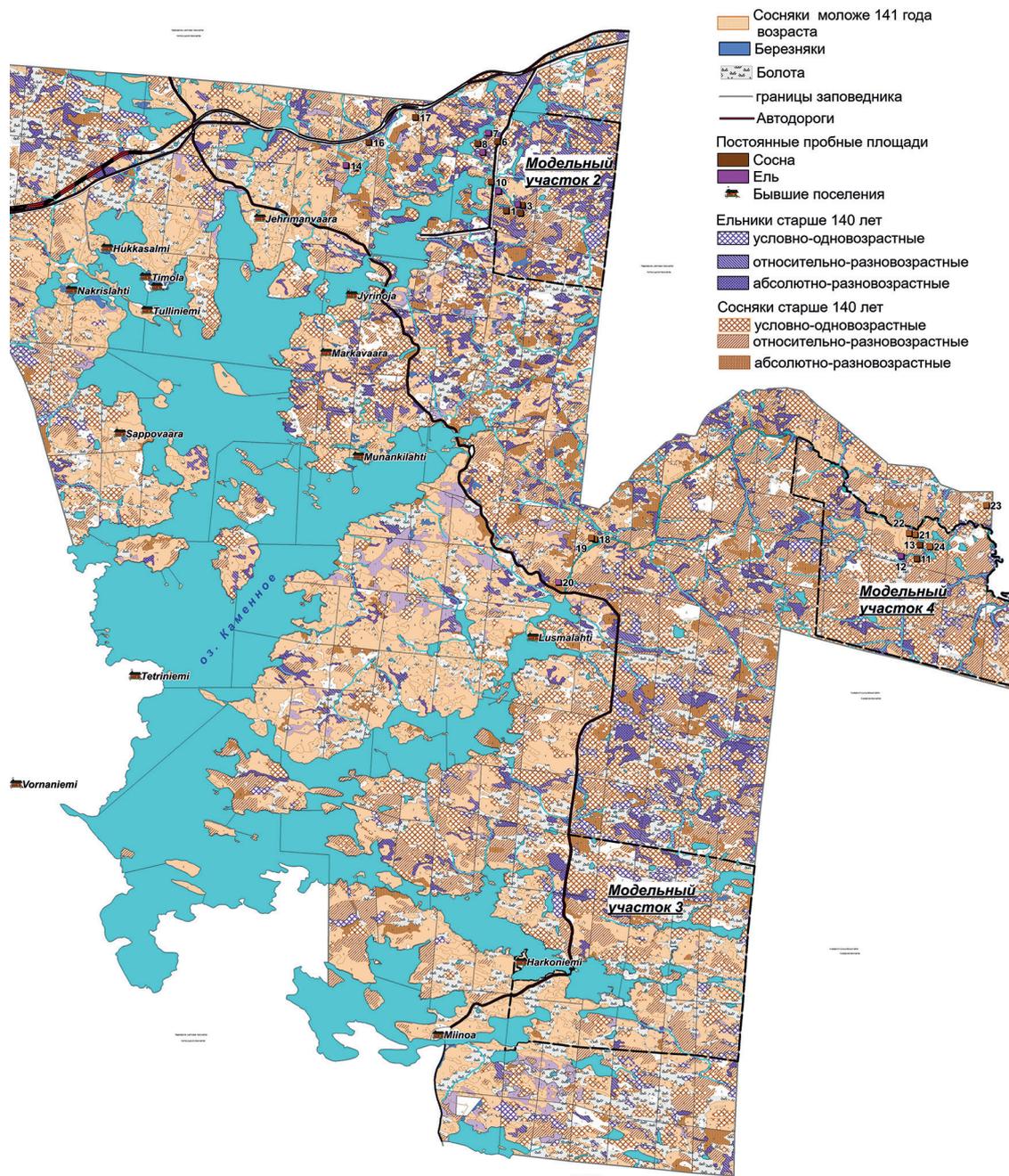


Рис. 3. Дислокация модельных участков и постоянных пробных площадей на территории ГПЗ «Костомукшский»

Особое внимание было уделено модельному участку № 4, представляющему мелкогрядово-холмистую водно-ледниковую слабозаболоченную местность с абсолютным преобладанием сосновых местообитаний. Здесь в первую очередь отбирались эталоны сосняков брусничных и лишайниковых вследствие тотального господства этих типов леса, произрастающих на песчаных подзолах.

Эталоны по таким классам, как «болота», «сосна по болоту», «сосняки скальные», «луга», «березняки», «ельники», выделялись по всей территории заповедника. При участии ели по составу древостоя в количестве трёх единиц и более насаждение относилось к классу сосново-еловых, и наоборот. Следует подчеркнуть, что подавляющее число эталонов по классам лесной растительности с преобладанием хвойных пород, выделенных на территории заповедника, имело возраст более 120 лет.

На территориях Костомукшского и Муезерского лесничеств выделялись эталоны по классам, характерным для массивов производных лесов, а именно: вырубки различной давности, лесные культуры, молодняки лиственные, хвойные и смешанные по составу, средневозрастные хвойные насаждения. Также здесь выделены эталоны по горям (крупные пожары). Эталоны гидрографической сети и антропогенной инфраструктуры формировались на основе твёрдо опознанных объектов топографических карт масштаба 1:100 000 и космической съёмки высокого разрешения. Векторный слой эталонов всех классов в ГИС-формате представлен на *рис. 4*.

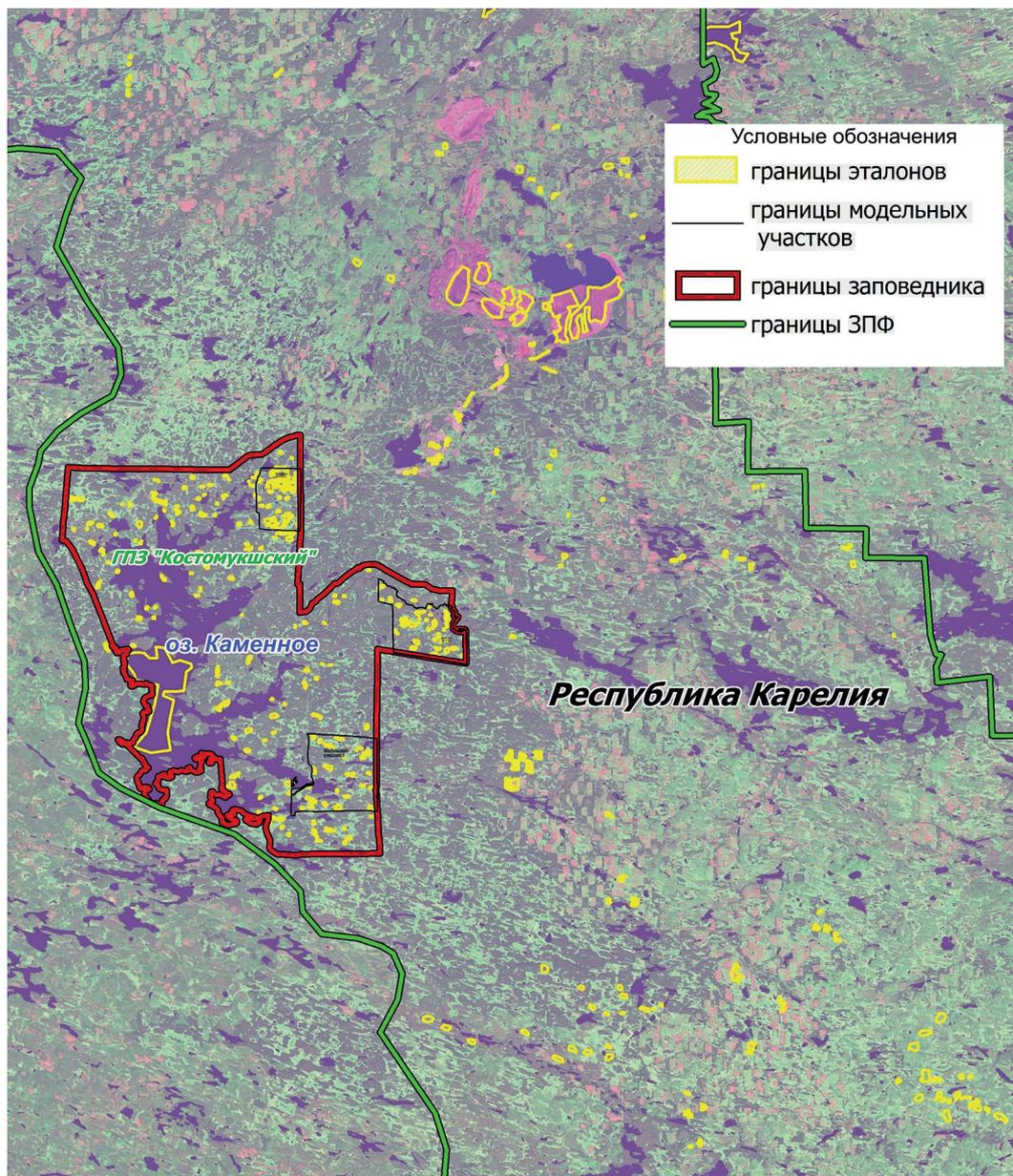


Рис. 4. Пространственное распределение эталонов всех классов

В настоящей работе процедуры классификации, а также расчёт оценок её точности и надёжности выполнены с использованием специализированных модулей программного обеспечения ENVI 5. Применялись следующие методы контролируемой классификации: минимального расстояния, дистанции Махаланобиса и максимального правдоподобия (Балдина, Лабутина, 2021; Лабутина, Балдина, 2011; Топаз, Кочуб, 2012).

Результаты контролируемой классификации по каждому методу были оформлены в виде растровых изображений в формате GeoTiff (геокодированное растровое изображение). Постклассификационная обработка полученных данных заключалась в генерализации классов (3×3) и их векторизации. Файл результатов классификации в векторном формате становится источником исходных данных для всех последующих количественных оценок.

Результаты и обсуждение

В табл. 2 представлены результаты реализации трёх методов контролируемой классификации территории заповедника отдельно по тематическим классам (см. табл. 1), за исключением сосняков (данные объединены по классам 18–29). В тех случаях, где это возможно, дано относительное различие расчётных площадей с данными лесоустройства.

Таблица 2. Результаты контролируемой классификации территории ГПЗ «Костомукшский»

Категории	Данные лесоустройства, га	Минимальное расстояние		Дистанция Махаланобиса		Максимальное правдоподобие	
		га	%	га	%	га	%
Лиственные	163,0	79,4	–51,3	56,9	–65,1	210,5	29,2
Лиственно-еловые	–	1892,3	–	2507,5	–	2182,2	–
Болота	6532,2	2087,2	–68,0	2386,1	–63,5	3382,6	–48,2
Вырубки свежие (0–5 лет)	–	7,1	–	0,0	–	13,0	–
Вырубки средней давности (6–10 лет)	–	182,9	–	43,2	–	71,9	–
Вырубки старые (старше 10 лет)	–	2877,9	–	292,9	–	349,4	–
Гари	–	16,6	–	31,0	–	70,4	–
Воды	12542,1	11761,9	–6,2	11701,9	–6,7	10397,1	–17,1
Дороги	65,4	48,6	–25,7	48,4	–26,0	144,8	121,4
Ельники	5688	5546,1	–2,5	3489,4	–38,7	4162,4	–26,8
Елово-сосновое	–	1783,5	–	4352,0	–	2643,6	–
Карьеры	–	3,8	–	0,4	–	419,3	–
Лесные культуры	–	226,9	–	242,1	–	352,3	–
Луга	99,6	238,2	139,2	122,5	23,0	109,0	9,4
Населённые пункты	–	7,2	–	5,1	–	171,5	–
Открытое место (прочие земли)	160,6	15,8	–90,2	28,3	–82,4	66,2	–58,8
Сосна по болоту	–	1662,7	–	2647,2	–	1459,9	–
Сосняки	23962	20918,9	–12,7	21384,8	–10,8	23116,4	–3,5
Общая площадь	49259	49357,1	0,2	49339,6	0,2	49322,4	0,1
Покрытая лесом площадь	29812,8	30447,1	2,1	32032,7	7,4	32667,4	9,6
Хвойные насаждения	29650	30140,8	1,7	29226,3	–1,4	29922,4	0,9
Сумма относительных отклонений по модулю			399,8	–	325,2	–	325,0
Сумма относительных отклонений			–113,4		–263,9		16,2

Анализ данных табл. 2 и их пространственного представления на тематических изображениях свидетельствует о высоком уровне достоверности классификации покрытой лесом площади в целом и хвойных насаждений в частности.

Сравнительно крупные водные объекты классифицировались хорошо, но ручьи при данном уровне пространственного разрешения не определялись совсем, а малые лесные озёра площадью менее 1 га распознавались не во всех случаях. Имеющиеся в заповеднике немногочисленные лесные дороги классифицировались чаще всего как вырубки и болота.

Категории сосняков и ельников в целом разделились удовлетворительно. Однако спектральные характеристики лиственно-еловых древостоев в позднелетний период оказались близки к параметрам сосны, что привело к ошибочному отнесению к данному классу части площади сосновых выделов заповедника. Справедливо было также и обратное. Часть площади березняков оказалась классифицирована сосной. Наиболее заметными были ошибки классификации площади болотных экосистем. Часть площади болот классифицировалась вырубками, лугами, гарями и пр. В целом, оценивая результаты классификации по сумме относительных отклонений в разрезе категорий, где было возможно сравнение с инвентаризационными данными (см. табл. 2), можно заключить, что алгоритм максимального правдоподобия выглядит предпочтительнее.

Оценка точности полученных результатов произведена модулем “Confusion matrix” ПО ENVI 5 и построена так называемая «матрица неточностей», на основании которой определены такие показатели, как общая точность (достоверность) классификации и коэффициент каппа Коэна (табл. 3).

Таблица 3. Достоверность результатов классификации снимка Landsat-8

Параметры оценки	Методы классификации		
	Минимальное расстояние	Дистанция Махаланобиса	Максимальное правдоподобие
Общая точность, %	86,2449	86,1498	87,2091
Коэффициент каппа Коэна	0,7167	0,7152	0,7383

В табл. 4 представлена информация, характеризующая пространственную корректность дешифрирования в разрезе основных для данного типа ландшафта лесных формаций и категорий земель.

Таблица 4. Пространственная достоверность классификации в разрезе основных лесных формаций и категорий земель

Категории	Всего пикселей	Минимальное расстояние		Дистанция Махаланобиса		Максимальное правдоподобие	
		правильная классификация	%	правильная классификация	%	правильная классификация	%
Сосняки	1884	1632	86,6	1518	80,6	1447	76,8
Ельники	668	640	95,8	628	94,0	566	84,7
Болота	690	482	69,9	453	65,7	464,0	67,2
Водные объекты	31 194	31 194	100	31 194	100	31 132	99,8
Среднее			88,1		85,1		82,1

В табл. 4 приведена общая сумма всех пикселей в контрольных эталонах сосняков багульниковых, беломошных, брусничных и черничных (соответственно классы 22–24, 28, см. табл. 1). На указанные типы леса приходится 93,4 % площади сосновых экосистем заповедника. То же справедливо в отношении ельников (классы 11 и 12), болот (класс 4) и водных объектов (класс 9). Достоверность классификации оценивалась по соотношению правильно классифицированных пикселей к общему числу пикселей в эталонах соответствующего класса или их совокупностей. В случаях с болотами и водными объектами корректно отклассифицированные пиксели располагались на диагонали матрицы. В случае с елью таковыми считались пиксели, отнесённые к классам 11 и 12. В варианте сосновых сообществ под правильной классификацией полагалось отнесение пикселей к любому из классов в диапазоне 20–29

(см. табл. 1). Таким образом, можно утверждать, что в варианте алгоритма «минимальное расстояние» 86,6 и почти 96 % пикселей вышеперечисленных сосновых и еловых классов были классифицированы как принадлежащие соответственно сосновой и еловой формациям. Из данных табл. 4 следует, что среди наземных экосистем насаждения с преобладанием ели были дешифрованы с наибольшей надёжностью, при этом метод минимального расстояния продемонстрировал сравнительно более высокую пространственную достоверность в разрезе всех указанных категорий.

Полученные величины позволяют говорить о значительной надёжности согласованности данных классификации во всех трёх случаях, при этом метод максимального правдоподобия характеризуется чуть более высокими показателями.

Благодаря наличию актуальной лесоустроительной информации точно известно, что на территории заповедника в настоящее время нет вырубок, лесных культур, населённых пунктов, карьеров, а листовенно-еловые древостои, выделенные в результате классификации, — это фрагменты сосновых выделов. После соответствующих преобразований (табл. 5) были получены откорректированные площадные данные по категориям ландшафтных объектов, которые свидетельствуют о том, что метод минимального расстояния в итоге оказался способен дать более достоверный образ растительного покрова исследуемой территории.

Таблица 5. Откорректированные результаты контролируемой классификации территории ГПЗ «Костомукшский»

Категории	Данные лесоустройства, га	Минимальное расстояние		Дистанция Махаланобиса		Максимальное правдоподобие	
		га	%	га	%	га	%
Сосняки	23962	23929,9	-0,1	26310,4	9,8	26972,7	12,6
Ельники	5688	6437,8	1,2	5665,4	-0,4	5484,2	-3,6
Лиственные	163	79,4	-51,3	56,9	-65,1	210,5	29,1
Болота	6644,4	6834,4	2,9	5400,4	-18,7	5347,1	-19,5
Воды	12542,1	11761,9	-6,2	11701,9	-6,7	10397,1	-17,1
Дороги	65,4	48,6	-25,7	48,4	-26,0	144,8	121,4
Луга	99,6	238,2	139,2	122,5	23,0	109,0	9,4
Прочие земли	160,6	26,9	-83,3	33,7	-79,0	657,0	309,1
Общая площадь	49259	49357,1	0,2	49339,6	0,2	49322,4	0,1
Покрытая лесом площадь	29812,8	30447,1	2,1	32032,7	7,4	32667,4	9,6
Хвойные насаждения	29650	30140,8	1,7	29799,8	0,5	29922,4	0,9
Сумма относительных отклонений по модулю			325,9		236,8		532,4
Сумма относительных отклонений			-7,4		-155,0		452,1
Сумма относительных отклонений по модулю (сосняки, ельники, болота, воды)			22,4		35,6		52,8

Особенно его преимущество заметно в разрезе основных для данного типа географического ландшафта категорий (выделены в табл. 4 полужирным начертанием), а именно: сосняков, ельников, болот и объектов гидрографии, занимающих в сумме 99,1 % площади заповедника.

Сделанные по результатам анализа данных табл. 2 и 5 выводы иллюстрируются тематическими картами, представленными на рис. 5 и 6 (см. с. 57). Известно, что планы лесонасаждений составляются по правилам, определённым лесоустроительной инструкцией, как правило, в масштабе 1:25 000 (см. рис. 5а, 6а). Хозяйственные участки (выделы) раскрашиваются цветом, присвоенным преобладающей по запасу породе. В основе цифровых тематических карт, созданных с помощью дешифрирования снимка Landsat (см. рис. 5б, 6б), лежат резуль-

таты попиксельной классификации с некоторой её генерализацией. Тем не менее визуальная оценка вышеупомянутых рисунков позволяет заключить, что контуры выделов основных категорий экосистем модельных участков № 2 и 4 неплохо согласуются с планом лесонасаждений заповедника. На *рис. 5*, кроме того, представлен пример, когда редкие для заповедника берёзовые выделы (кв. 49 и 20) были классифицированы как сосняки.

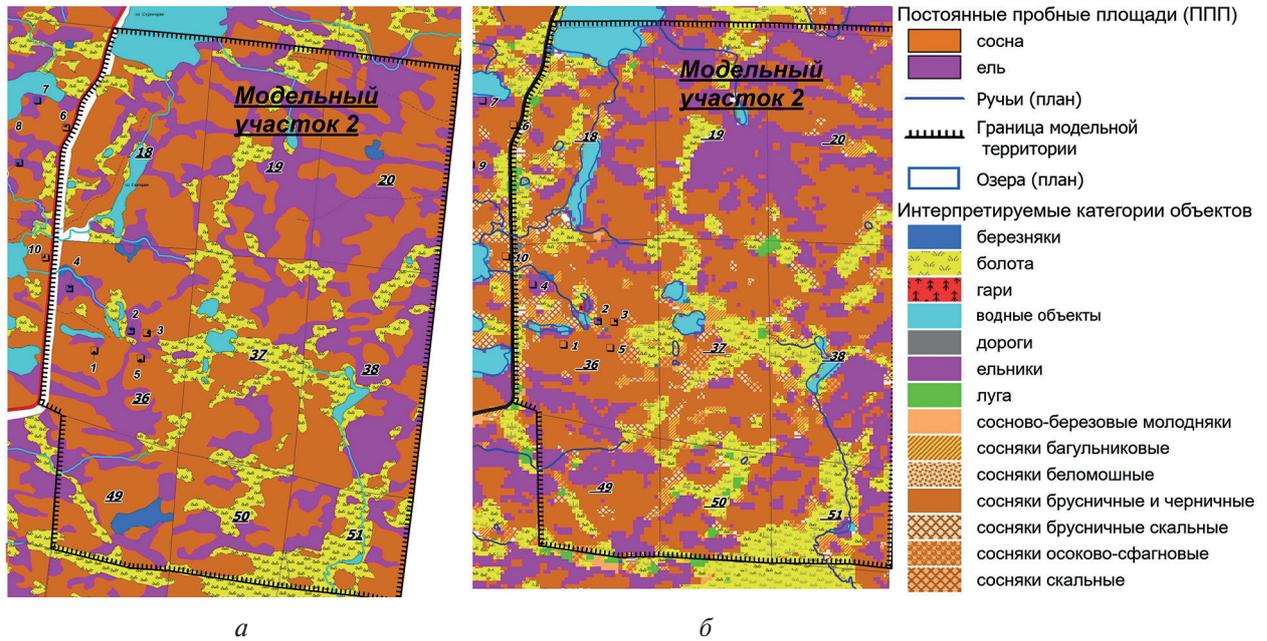


Рис. 5. Тематические карты растительного покрова модельного участка № 2 заповедника «Костомукшский»: *а* — план лесонасаждений; *б* — результаты дешифрирования по методу минимального расстояния

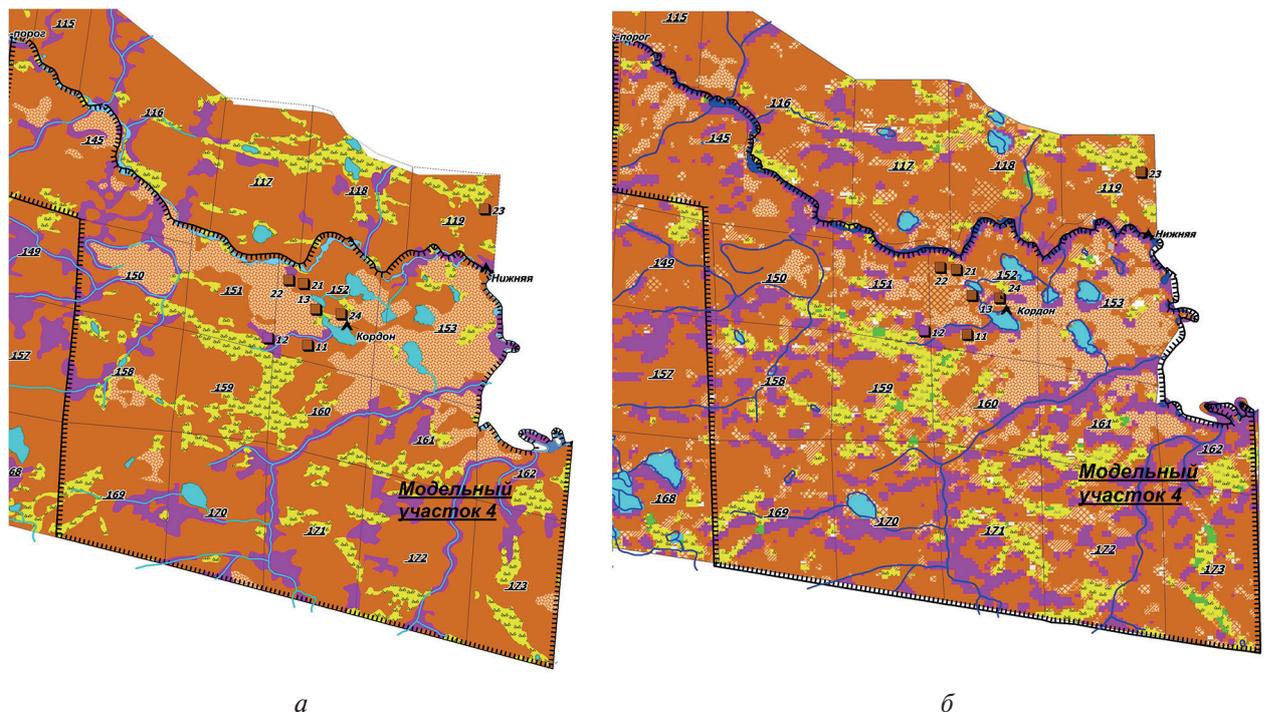


Рис. 6. Тематические карты растительного покрова модельного участка № 2 заповедника «Костомукшский»: *а* — план лесонасаждений; *б* — результаты дешифрирования по методу минимального расстояния

Весьма важным представляется факт, что оказалась возможной достаточно надёжная классификация как переувлажнённых (сосняки багульниковые и сфагновые), так и особенно экстремально сухих (сосняки беломошные, вересковые и скальные) типов леса. На *рис. 6* хорошо просматривается контур массива беломошных и вересковых сосняков, произрастающих в массиве песчаных флювио-гляциальных отложений в границах модельного участка № 4.

Ещё одна возможность оценки достоверности дешифрирования возникает путём определения соответствия дислокации имеющихся постоянных пробных площадей (ППП) лесным формациям (сосновая или еловая), в которых они закладывались. На участке № 2 девять из десяти ППП (90 %), а на участке № 4 шесть из семи ППП (86 %) локализируются в соответствии со своей формацией.

Генерализованная тематическая карта растительности заповедника в сравнении с его планом лесонасаждений представлена на *рис. 7*.

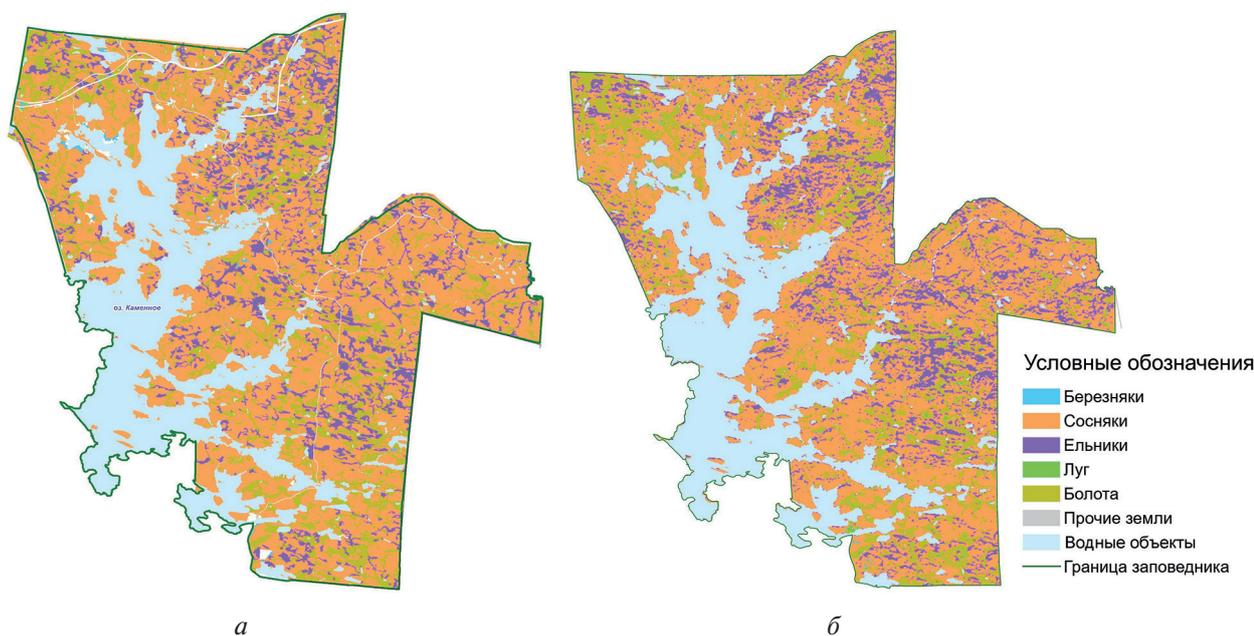


Рис. 7. Тематические карты растительного покрова заповедника «Костомукшский»: *а* — план лесонасаждений; *б* — результаты дешифрирования по методу минимального расстояния

Смена сосны елью в ходе сукцессионного цикла — это весьма распространённое явление в европейской тайге. В этой связи высказывается мнение (Громцев, 2009), что на исследуемой территории увеличение площади сосновых лесов в XVII—XIX столетиях было в определённой степени обусловлено антропогенной трансформацией естественного пожарного режима в сторону увеличения частоты возгораний. Исчезновение во второй половине XX в. в данной местности поселений и, соответственно, активного хозяйственного воздействия вкупе со строгим режимом охраны лесов с момента организации заповедника в 1983 г. способствовало восстановлению коренных еловых сообществ в условиях более редкого пирогенного воздействия. Действительно, по имеющимся в заповеднике данным, с момента его организации и за период с 1983 по 2020 г. на его территории было зарегистрировано всего восемь небольших пожаров общей площадью 48,3 га. В условиях редких и ограниченных по площади огневых воздействий происходит увеличение доли участия ели в смешанных древостоях с участием сосны везде, где этому благоприятствуют экологические условия.

В отличие от планов лесонасаждений тематика дешифрированных изображений формируется на принципиально иной основе, позволяющей отражать процессы и явления, остающиеся скрытыми при составлении картограмм традиционными методами. Так, в частности,

дешифрирование снимка Landsat за 2018 г. показывает большее присутствие ели в покрытой лесом площади заповедника, чем это следует из лесостроительных данных (см. табл. 2, 5). Несмотря на изменения аппаратных характеристик, длительный временной период функционирования системы Landsat создаёт принципиальные возможности организации мониторинга структурных характеристик лесного массива, в том числе и по долевым участию основных лесообразующих пород. Так, по результатам классификации (метод минимального расстояния) снимка Landsat за 2018 г. было учтено 7329,5 га насаждений с преобладанием ели, в том числе 5546,1 га чистых ельников (класс 12 — ельник черничный, см. табл. 1, 2) и 1783,5 га смешанных елово-сосновых древостоев (класс 11). Дешифрирование снимка Landsat за 1988 г. дало следующие результаты: всего ельников — 7274,4 га, в том числе ельников с абсолютным преобладанием ели (класс 12) — 4852,9 и 2421,5 га — елово-сосновых древостоев. Оценивая полученные данные, следует подчеркнуть, что в подзоне северной тайги процесс смены пород происходит очень медленно и занимает столетия. За временной промежуток в 30–50 лет можно ожидать не столько абсолютного увеличения общей площади насаждений с преобладанием ели, сколько увеличение доли её участия в уже существующих биогеоценозах. Как следует из полученных данных, пространственные модели лесного покрова, создаваемые на базе дешифрирования снимка Landsat, оказываются способными это отразить.

В целом тематическая карта, представленная на рис. 7б, свидетельствует, что на основе автоматизированного дешифрирования спектрзональных снимков Landsat среднего пространственного разрешения возможна разработка картограмм, близких по информационной насыщенности к таким ведомственным картографическим продуктам, как планы лесонасаждений, выполняемых в масштабах 1:25 000 и 1:50 000.

Заключение

Сравнительный анализ применения различных методов контролируемой классификации многозональных данных дистанционного зондирования по территории заповедника «Костомукшский» показал, что все три использованных алгоритма дали результаты, характеризующиеся значительной или хорошей степенью надёжности согласованности данных. Тем не менее верификация итогов дешифрирования структуры малонарушенного таёжного ландшафта на основе лесостроительной информации позволила заключить, что метод минимального расстояния оказался способен дать более достоверный образ растительного покрова исследуемой территории.

Таким образом, результаты автоматизированного дешифрирования спектрзональных снимков Landsat среднего пространственного разрешения с углублённой постклассификационной обработкой информации позволили создать обновляемую цифровую карту растительности заповедника «Костомукшский» (по состоянию на вегетационный период 2018 г.), которая по своей информационной насыщенности близка к такому ведомственному картографическому продукту, как план лесонасаждений. Однако в отличие от данного продукта, разрабатываемого традиционным методом, использование технологий дешифрирования снимка Landsat позволило отразить такой малозаметный процесс, как увеличение доли ели в структуре сосняков, идущий при низкой частоте катастрофических нарушений (пожаров), а также получить актуальную и достоверную оценку текущего состояния растительности. Полученные данные свидетельствуют, что лесной массив заповедника, по крайней мере с момента его организации, избежал крупных катастрофических нарушений и в настоящее время находится в состоянии подвижного равновесия.

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

Литература

1. Антонушкина С. В., Зенин В. А., Егошкин Н. А., Зенин В. А., Князьков П. А., Козлов Е. П., Кузнецов А. Е., Макаренков А. А., Москвитин А. Э., Побаруев В. И., Пошехонов В. И., Пресняков О. А., Светелкин П. Н. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / ред. Еремеев В. В. М.: Физматлит, 2015. 460 с.
2. Балдина Е. А., Лабутина И. А. Дешифрирование аэрокосмических снимков: учебник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: КДУ, Добросвет, 2021. 269 с. DOI: 10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1163-4-2021-269.
3. 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.
4. Громцев А. Н. Основы ландшафтной экологии Европейских таежных лесов России. Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН, 2008. 250 с.
5. Громцев А. Н. Леса заповедника «Костомукшский»: структура, динамика, ландшафтные особенности // Тр. Карельского науч. центра РАН. 2009. Вып. 2. С. 71–78.
6. Евдокимов С. И., Михалат С. Г. Определение физического смысла комбинации каналов снимков Landsat для мониторинга состояния наземных и водных экосистем // Вестн. Псковского гос. ун-та. Сер. «Естественные и математические науки». 2010. № 7. С. 21–32.
7. Костинова А. Интерпретация комбинаций каналов данных Landsat TM/ETM+ // GISLAB. Географические информационные системы и дистанционное зондирование. 2016. URL: <http://gis-lab.info/qa/landsat-bandcomb.html> (дата обращения: 07.03.2019).
8. Курбанов Э. А., Воробьев О. Н. Дистанционные методы в лесном хозяйстве: учеб. пособие. Йошкар-Ола: Поволжский гос. технолог. ун-т, 2020. 266 с.
9. Лабутина И. А., Балдина Е. А. Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга экосистем ООПТ: метод. пособие. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF России), 2011. 88 с.
10. Титов А. Ф., Буторин А. А., Громцев А. Н., Иешко Е. П., Крышень А. М., Савельев Ю. В. Зеленый пояс Фенноскандии: состояние и перспективы развития // Тр. Карельского науч. центра РАН. 2009. № 2. С. 3–11.
11. Топаз А. А., Кочуб Е. В. Методы тематической обработки материалов дистанционного зондирования Земли // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. 2012. Сер. Ф. № 16. С. 127–128.
12. Шихов А. Н., Герасимов А. П., Пономарчук А. И., Перминова Е. С. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения. Пермь: Пермский гос. нац. исследоват. ун-т, 2020. 191 с.
13. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование: Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.

Inventory of the Kostomukshskiy Strict Nature Reserve vegetation using Landsat images

B. V. Raevsky, V. V. Tarasenko, N. V. Petrov

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

Digital mapping of boreal vegetation based on remote sensing data interpretation is of great importance for monitoring natural and anthropogenic dynamics of North Russian forest ecosystems. We comparatively assessed the effectiveness of three supervised classification methods, viz. “minimal distance”, “Mahalanobis distance” and “maximal likelihood”, applied to the Kostomukshskiy Strict Nature Reserve (SNR) territory. All these classifications produced results with a high level of reliability (Cohen’s kappa). The final results of space image interpretation were verified using forest survey data and the outcome was that the “minimal distance” procedure enabled the most realistic spatial modeling of the nature reserve’s vegetation cover. Automatic classification of medium spatial resolution multispectral remote sensing data followed by post-classification treatment made it possible to develop an updatable digital map of the nature reserve’s ecosystems roughly equivalent to the map of forest stands.

But in contrast to this traditional specialized thematic map, remote data interpretation techniques permit visualizing the latent process of spruce canopy formation, which commonly takes place when natural disturbances (e.g. fires) in the area are rare. The resultant data show that at least in the period since nature reserve foundation its landscapes have luckily avoided large-scale catastrophic events, and now they are in a dynamic balance condition.

Keywords: multispectral space images, supervised classification, Landsat program, vegetation cover, forests, remote sensing data, interpretation

Accepted: 03.06.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-47-61

References

1. Antonushkina S. V., Zenin V. A., Egoshekin N. A., Zenin V. A., Knyaz'kov P. A., Kozlov E. P., Kuznetsov A. E., Makarenkov A. A., Moskvitin A. E., Pobaruiev V. I., Poshekhonov V. I., Presnyakov O. A., Svetelkin P. N., *Sovremennye tekhnologii obrabotki dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (Modern technologies for processing Earth remote sensing data), Ereemeev V. V. (ed.), Moscow: Fizmatlit, 2015, 460 p. (in Russian).
2. Baldina E. A., Labutina I. A., *Deshifrirovaniye aerokosmicheskikh snimkov: uchebnyk* (Decoding of aerospace images: textbook), 2nd ed., Moscow: KDU, Dobrosvet, 2021, 269 p. (in Russian), DOI: 10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1163-4-2021-269.
3. 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. (in Russian).
4. Gromtsev A. N., *Osnovy landshaftnoi ekologii Evropeiskikh taizhnykh lesov Rossii* (Fundamentals of landscape ecology of the European taiga forests of Russia), Petrozavodsk: Karel'skii nauchnyi tsentr RAN, 2008, 250 p. (in Russian).
5. Gromtsev A. N., Forests of the Kostomukshskiy Strict Nature Reserve: structure, dynamics, landscape features, *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2009, No. 2, pp. 71–78 (in Russian).
6. Evdokimov S. I., Mikhlat S. G., Determine the physical meaning of a combination of LandSat image channels to monitor the state of terrestrial and aquatic ecosystems, *Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta, Ser. "Natural and Mathematical Sciences"*, 2010, No. 7, pp. 21–32 (in Russian).
7. Kostikova A., Interpretation of Landsat TM/ETM+ data channel combinations, *GISLAB. Geographic Information Systems and Remote Sensing*, 2016 (in Russian), available at: <http://gis-lab.info/qa/landsat-bandcomb.html> (accessed: 07.03.2019).
8. Kurbanov E. A., Vorobiev O. N., *Distantsionnye metody v lesnom khozyaistve* (Remote methods in forestry), Yoshkar-Ola: Volga State Technological University, 2020, 266 p. (in Russian).
9. Labutina I. A., Baldina E. A., *Ispol'zovaniye dannykh distantsionnogo zondirovaniya dlya monitoringa ekosistem OOPT: metodicheskoe posobie* (Using remote sensing data to monitor protected areas ecosystems: a methodological guidebook), Moscow: Vsemirnyi fond dikoi prirody (WWF Rossii), 2011, 88 p. (in Russian).
10. Titov A. F., Butorin A. A., Gromtsev A. N., Ieshko E. P., Kryshen A. M., Savelyev Yu. V., Green Belt of Fennoscandia: State and Perspectives, *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2009, No. 2, pp. 3–9 (in Russian).
11. Topaz A. A., Kochub E. V., Methods of thematic processing of Earth remote sensing materials, *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, Issue F, No. 16, pp. 127–128 (in Russian).
12. Shikhov A. N., Gerasimov A. P., Ponomarchuk A. I., Perminova E. S., *Tematicheskoe deshifrirovaniye i interpretatsiya kosmicheskikh snimkov srednego i vysokogo prostranstvennogo razresheniya* (Thematic decryption and interpretation of space images of medium and high spatial resolution), Perm: Perm State National Research Univ., 2020, 191 p. (in Russian).
13. Chauvengerdt R. A., *Distantsionnoe zondirovaniye: Modeli i metody obrabotki izobrazhenii* (Remote sensing. Models and methods of image processing), Moscow: Technosphere, 2010, 560 p. (in Russian).