

---

## ГЕОБОТАНИКА

---

УДК 528.88:574.472

### ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВИДОВ ДЕРЕВЬЕВ ЗАПОВЕДНИКА «БРЯНСКИЙ ЛЕС» И ЕГО ОХРАННОЙ ЗОНЫ НА ОСНОВЕ РАЗНОСЕЗОННЫХ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ LANDSAT

© **Е. А. Гаврилюк, А. В. Горнов, Д. В. Ершов**  
E. A. Gavrilyuk, A. V. Gornov, D. V. Ershov

Estimation of spatial trees species distribution in Bryansk Forest Nature Reserve  
based on multitemporal Landsat data

*ФГБУН Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН  
117997, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, стр. 14. Тел.: +7 (499) 743-00-25, e-mail: cepfras@cepl.rssi.ru*

Аннотация. Описаны методы и приведены результаты оценки разнообразия и пространственного распределения видов деревьев, полученные на основе спутниковых данных Landsat для территории заповедника «Брянский лес». Мы использовали шесть разносезонных мультиспектральных изображений для объектно-ориентированной тематической классификации лесного покрова по доминантам древесного полога и числу видов в верхнем ярусе древостоев. Сегментация выполнялась алгоритмом Full Lambda Schedule, классификация – методом случайных лесов. Общая точность полученных тематических продуктов по данным наземных обследований составила 89,6% для карты доминантов древесного полога и 72,4% для карты числа видов. На основе пространственного совмещения этих карт была получена комплексная оценка видовой структуры лесов заповедника.

Ключевые слова: леса, разнообразие видов деревьев, заповедник «Брянский лес», дистанционное зондирование Земли, тематическое картографирование, случайные леса, Landsat, Full Lambda Schedule.

Abstract. This article describes the methods and contains the results of the estimation of the trees species diversity and their spatial distribution based on Landsat data for the territory of Bryansk Forest Nature Reserve. Six multispectral images of different seasons were used to make the object-based thematic classification of forest cover according to the dominants of the tree canopy and the number of species in the upper tier of the stands. Preliminary segmentation was performed by the Full Lambda Schedule algorithm followed by the Random Forest classification. The total accuracy of the derived thematic products, evaluated with field data, was 89,6% for the map of the dominants and 72,4% for the map of the number of species. Integrated assessment of the species structure of the Reserve forests was obtained, basing on the spatial combination of these maps.

Keywords: forests, species diversity, Bryansk Forest Nature Reserve, remote sensing of the earth, thematic mapping, Landsat, Full Lambda Schedule, random forest.

DOI: 10.22281/2307-4353-2018-3-13-23

### Введение

Разнообразие видов деревьев и их пространственное распределение на анализируемой территории – один из важнейших индикаторов при оценке ресурсного потенциала, биологического разнообразия и сукцессионного статуса лесов (Горнов и др., 2018). Распределение видов деревьев может быть охарактеризовано качественными и/или количественными показателями, отражающими число и соотношение видов на каждом отдельном исследуемом участке. Мультиспектральные спутниковые изображения высокого пространственного разрешения, получаемые в рамках программ Landsat, Sentinel и с аналогичных им аппаратов, в настоящее время являются универсальным, оперативным и общедоступным материалом для решения широкого спектра задач в области дистанционного мониторинга наземных экосистем. Современные методы и технологии позволяют получать на их основе тематические

продукты, характеризующие породную структуру лесов как на локальном уровне (Ершов и др., 2017), так и для территорий крупных регионов (Гаврилюк, Ершов, 2012; Ершов и др., 2015a) и отдельных стран (Li et al., 2014; Thompson et al., 2015). Эти продукты могут, в свою очередь, служить основой для оценок различных производных характеристик лесных экосистем, включая разнообразие видов деревьев (Ершов и др., 2015b). Совместное использование разносезонных спутниковых изображений, отражающих последовательность фенологических изменений лесного покрова в течение всего года, позволяет существенно повысить точность тематической классификации при оценке породного состава древостоев (Zhu, Liu, 2014; Pasquarella et al., 2018). В ряде работ показаны статистически значимые взаимосвязи между количественными характеристиками биоразнообразия – общее число видов, индекс Шеннона, индекс Симпсона и др. (Morris et al., 2014) и спектральными характеристиками подстилающей поверхности в каналах спутниковых изображений, а также производными от них вегетационными индексами (Gould, 2000; Parviainen et al., 2010; Mohammedi, Shataee, 2010; Madonsela et al., 2017).

Цель работы – дать оценку пространственного распределения видов деревьев в лесах заповедника «Брянский лес» и его охранной зоны на основе объектно-ориентированной тематической классификации разносезонных мультиспектральных спутниковых изображений Landsat. Для территории заповедника это первое исследование подобного рода. Мы анализировали древостои по двум основным признакам – наличию выраженных доминантов и общему числу видов деревьев, чтобы затем на основе соответствующих тематических продуктов получить комплексную оценку видовой структуры.

### Материалы и методы

Исследования проводили в юго-восточной части Брянской области в пределах заповедника «Брянский лес» и его охранной зоны (рис. 1), общая площадь которых составляет 20,7 тыс. га.

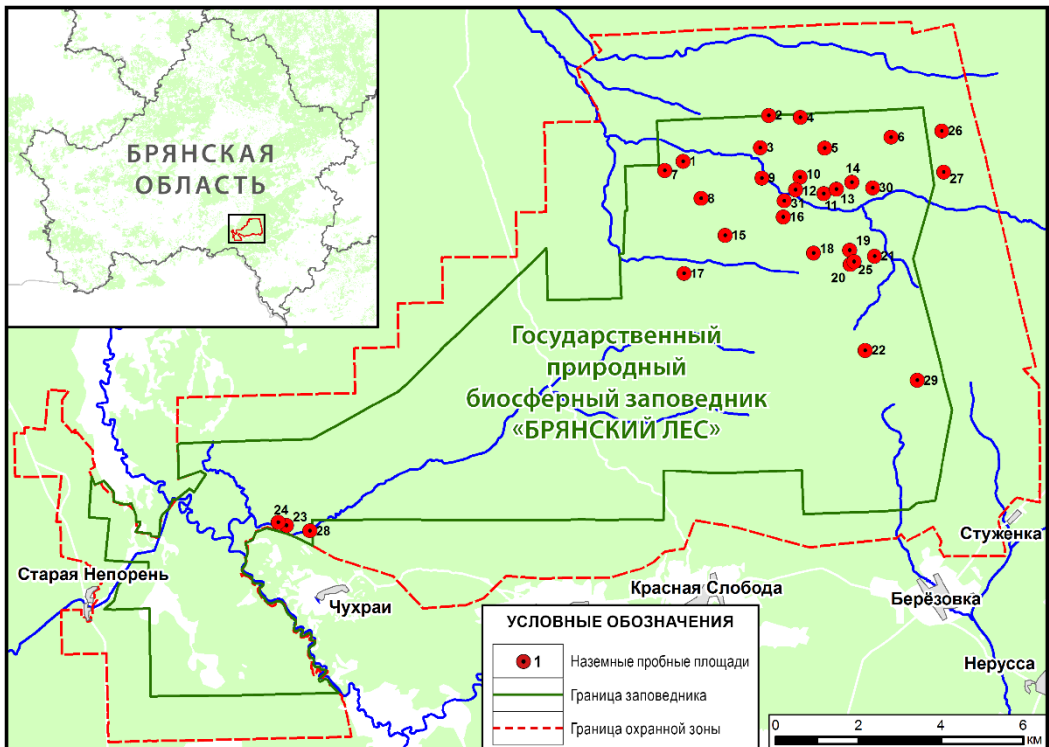


Рис. 1. Территория исследования. Общегеографическая основа здесь и далее – OpenStreetMap.

На этой территории лесами покрыто более 97% площади. В ботанико-географическом плане район относится к Полесской подпровинции Восточноевропейской провинции Европейской широколиственнолесной области (Растительность..., 1980).

В работе использованы геоботанические, таксационные и дистанционные методы. Рассмотрим их подробнее.

*Геоботанические методы.* В 2016 г. на территории заповедника заложены 29 наземных пробных площадей размером 400 м<sup>2</sup>. На каждой площади выполнено геоботаническое описание. На всех площадках выявлен полный флористический состав с учётом ярусной структуры леса. В каждом ярусе определено участие видов по шкале обилия-покрытия Ж. Браун-Бланке (Миркин и др., 1989). Латинские названия сосудистых растений даны по С. К. Черепанову (1995).

*Таксационные методы.* Для получения исходной информации о видовом составе и пространственном распределении лесов заповедника, а также при подготовке обучающей выборки для последующей тематической классификации спутниковых изображений, мы использовали материалы лесоустройства 2006 г., трансформированные в геопривязанную цифровую полигональную сеть лесоустроительных выделов с полным таксационным описанием в качестве атрибутивной информации (всего 6085 выделов). В первом ярусе лесов заповедника и его охранной зоны, согласно материалам лесоустройства, встречаются пятнадцать видов деревьев. Восемь из них (*Alnus glutinosa*, *Betula pendula*, *B. pubescens*, *Fraxinus excelsior*, *Picea abies*, *Pinus sylvestris*, *Populus tremula*, *Quercus robur* и *Tilia cordata*) могут доминировать в отдельных выделах (составляют не менее 6 единиц в формуле древостоя). Максимальное число видов деревьев, встречающихся на одном выделе в числе не менее одной единицы в формуле древостоя, равно восьми.

*Дистанционные методы.* Исходный набор спутниковых данных состоял из шести разносезонных (февраль, апрель, май, июль, сентябрь, октябрь) безоблачных сцен Landsat-OLI (продукты уровня L2) за период с 2014 по 2016 гг., полученных из открытого архива Геологической службы США (<https://earthexplorer.usgs.gov>), и содержащих измерения спектральной яркости на уровне земной поверхности. Из девяти спектральных каналов сенсора OLI в работе мы использовали четыре наиболее информативных для мониторинга растительности – это изображения в красном (0,63–0,69 мкм), ближнем инфракрасном (0,75–0,90 мкм) и двух средних инфракрасных (1,55–1,75 мкм, 2,09–2,35 мкм) диапазонах пространственным разрешением 30 метров.

Объектно-ориентированный подход, получивший широкое распространение при анализе спутниковых изображений сверхвысокого пространственного разрешения, в настоящее время часто применяется и для менее детальных данных (Gomez et al., 2016), хотя по мере снижения разрешения падает и его объективное преимущество в точности результатов по сравнению с традиционным попиксельным анализом (Gao, Mas, 2008). В рамках объектно-ориентированной тематической классификации спутниковых данных первый этап – сегментация, или выделение компактных участков изображения, однородных по своим спектральным характеристикам. Подразумевается, что выделенные сегменты однородны также и по оцениваемым качественным и количественным показателям. Мы использовали алгоритм автоматической сегментации Full Lambda Schedule (Redding et al., 1999) с экспериментально подобранным масштабом равным 30 (величина эквивалентная среднему размеру сегмента в пикселях изображения).

Для предварительной стратификации спутниковых изображений на покрытые и не покрытые древесной растительностью территории мы использовали актуальные геопространственные данные проекта Global Forest Change (Hansen et al., 2013) о сомкнутости и ежегодных изменениях лесного покрова. Сегменты со средней сомкнутостью менее 10% не принимали участия в тематической классификации.

Обучающая выборка формировалась из сегментов площадью не менее 1 га на основе лесоустроительной информации, исключая те сегменты, которые отображены для наземных об-

следований. Соотношение древесных видов для сегментов оценивалось на основе формулы древостоя выделов пропорционально площадям их пространственных перекрытий. В качестве признаков для тематической классификации использованы стандартные статистические метрики (среднее, стандартное отклонение и коэффициент вариации), рассчитанные в границах сегментов на основе значений спектральных яркостей каналов исходных изображений. Таким образом, общее число признаков составило 72 (шесть изображений, по четыре канала – критерии отбора для обучающей выборки).

Мы смогли выделить 8 тематических классов по доминантам древесного полога (в скобках – критерии отбора для обучающей выборки).

#### I. Монодоминантные леса.

1. Сосняки (площадь проективного покрытия крон *Pinus sylvestris* составляет более 60% площади сегмента).

2. Березняки (*Betula pendula* и *B. pubescens* занимают более 60% площади сегмента).

3. Осинники (*Populus tremula* занимает более 60% площади сегмента).

4. Черноольшаники (*Alnus glutinosa* занимает более 60% площади сегмента).

#### II. Полидоминантные леса.

5. Широколиственные леса (*Acer platanoides*, *Fraxinus excelsior*, *Quercus robur* и *Tilia cordata* занимают более 60% площади суммарно в сегменте).

6. Смешанные хвойные леса (*Picea abies* и *Pinus sylvestris* занимают более 80% площади сегмента, но ни один вид не достигает 60%).

7. Смешанные хвойно-лиственные леса (хвойные или лиственные породы занимают от 40 до 60% площади сегмента).

8. Смешанные лиственные леса (лиственные породы суммарно занимают более 80% площади сегмента, но ни один вид не достигает 60%).

Для монодоминантных классов ельников и отдельных широколиственных пород не удалось выделить достаточного числа (не менее 20) эталонных сегментов. В итоге, объем обучающей выборки для классификации по доминантам древесного полога составил 430 сегментов (5,3% от их общего числа).

Для классификации по признаку общего числа древесных видов сформирована отдельная обучающая выборка из 195 сегментов, которая частично перекрывалась с предыдущей. Критерием для отбора была разница между наибольшим и наименьшим (но не менее 10%) значением долей пород в сегменте. Для потенциальных эталонных участков эта разница не превышала двух единиц: разные породы в сегментах представлены примерно в равных долях. Изначально обучающая выборка формировалась для 4 тематических классов по числу видов – один, два, три, четыре и более. Впоследствии два последних объединены в один класс «три и более» из-за низкого значения их принципиальной разделимости, оценённой в процессе обучения классификатора.

Для тематической классификации спутниковых изображений мы использовали метод случайных лесов (Breiman, 2001). Случайные леса – статистический метод, предназначенный для решения задач классификации и регрессии, основанный на построении большого числа деревьев решений, каждое из которых строится по выборке, получаемой из исходной обучающей выборки с помощью бутстрепа (то есть выборки с возвращением). При построении каждого дерева на стадиях расщепления вершин используется только фиксированное число случайно отбираемых признаков обучающей выборки и строится полное дерево (без усечения), то есть каждый лист дерева содержит наблюдения только одного класса. Классификация осуществляется с помощью простого голосования классификаторов, определяемых отдельными деревьями. В данной работе мы использовали ансамбль из 2000 деревьев решений, которые строились на основе восьми случайно отбираемых признаков.

Случайные леса позволяют получать естественную оценку вероятности распознавания классов на основе исходной выборки методом Out-of-bag (OOB) непосредственно в

ходе обучения классификатора (Liaw, Wiener, 2002). Суть метода заключается в использовании части измерений из исходной обучающей выборки, которые не попадают в случайные бутстреп-выборки в процессе построения отдельных деревьев решений, в качестве контрольных данных для проверки обученного классификатора. По результатам проверки строится ООВ-матрица ошибок классификации, из которой вычисляются величины ООВ-точности распознавания классов.

Точность спутниковых тематических продуктов распределения доминантов древесного полога и числа древесных видов оценивалась независимо друг от друга на основе сравнения с показателями, определёнными на наземных пробных площадях.

### Результаты и их обсуждение

Оценки вероятностей корректного распознавания тематических классов на основе спектральных признаков разносезонных спутниковых изображений, полученные при обучении классификатора методом случайных лесов, приведены в табл. 1. Общая точность распознавания оказалась высокой как для классификации по доминантам древесного полога (93,0%), так и по числу видов деревьев (96,9%). Однако, для отдельных классов этот показатель варьируется в зависимости от количества использованных для обучения сегментов. Наиболее низкие значения ООВ-точности распознавания получены для осинников (75,0%) и смешанных хвойных лесов (60,0%), для которых удалось выделить всего по 20 эталонных участков.

Таблица 1

Точность распознавания тематических классов при классификации спутниковых данных методом случайных лесов

Тематический класс (сокращенное обозначение)	Всего обучающих сегментов	Распознано	Не распознано	ООВ-точность, %
Доминанты древесного полога				
Сосняки (С)	95	89	6	93,7
Березняки (Б)	82	79	3	96,3
Осинники (ОС)	20	15	5	75,0
Черноольшаники (ОЛЧ)	41	39	2	95,1
Широколиственные леса (ШЛ)	25	22	3	88,0
Смешанные хвойные леса (СМХ)	20	12	8	60,0
Смешанные хвойно-лиственные леса (СМХЛ)	104	104	0	100,0
Смешанные лиственные леса (СМЛ)	43	40	3	93,0
Всего	430	400	30	93,0
Число пород				
1 порода	31	26	5	83,9
2 породы	87	87	0	100,0
3 и более пород	77	76	1	98,7
Всего	195	189	6	96,9

По результатам тематической классификации разносезонных спутниковых данных Landsat построены карты доминантов древесного полога (рис. 2) и числа пород в древостоях (рис. 3) на территории заповедника «Брянский лес» по состоянию на 2016 г. пространственным разрешением 30 метров.

В табл. 2 приведены результаты сравнения спутниковых тематических продуктов с данными о видовом составе древостоев, полученными в ходе наземных обследований пробных площадей.

Совпадения со спутниковой картой доминантов древесного полога наблюдаются для 26 из 29 наземных пробных площадей (89,6%). Это можно оценить, как высокую степень соответствия данных. Для карты числа пород результаты более умеренные – 21 из 29 (72,4%). При этом в шести из восьми случаев несоответствия число пород занижено относительно наземных данных. Стоит отметить, что поскольку пробные площади имели фиксированный

размер и покрывали соответствующие им сегменты изображения лишь частично, то полученные оценки соответствия носят ориентировочный характер. В целом, сравнение показало, что результаты классификации спутниковых данных достаточно точны, но при этом карта доминантов древесного полога более достоверна по сравнению с картой числа пород, которая имеет тенденцию к занижению оцениваемого показателя.

Таблица 2

Сравнение оценок породного состава древостоев на пробных площадях по наземным и спутниковым данным

№ п. п.	Наземные данные			Спутниковые данные	
	Формула древостоя	Класс по доминантам	Число видов деревьев	Класс по доминантам	Число видов деревьев
1.	6ОС2Д1КЛ1ЛИП	СМЛ	4	СМЛ	3 и более
2.	7СЗБ	С	2	С	1
3.	5Б2Д1КЛ1ЛИП1ОС	СМЛ	5	СМЛ	3 и более
4.	10ОЛЧ	ОЛЧ	1	ОЛЧ	1
5.	4ОС2Б2КЛ2ЛИП	СМЛ	4	СМЛ	3 и более
6.	5С4Е1Б	СМХ	3	СМХ	2
7.	10ОЛЧ	ОЛЧ	1	ОЛЧ	1
8.	4ОС3С1Б1Д1Е	СМХЛ	5	СМХЛ	3 и более
9.	3Д3С2Б2Е	СМХЛ	4	СМХЛ	3 и более
10.	6С2Б2Е	СМХ	3	С	1
11.	10С	С	1	С	1
12.	10ОЛЧ	ОЛЧ	1	ОЛЧ	1
13.	5Е3Д1Б1КЛ	СМХЛ	4	СМХЛ	3 и более
14.	9Б1Д	Б	2	Б	2
15.	6Б2ЛИП1ОЛЧ1ОС	СМЛ	4	СМЛ	3 и более
16.	8С1Б1Е	С	3	С	1
17.	10Б	Б	1	Б	1
18.	10С	С	1	С	1
19.	8Д2ОС	ШЛ	2	СМЛ	3 и более
20.	4Д2ОС1Б1Е1КЛ1С	СМЛ	6	СМЛ	3 и более
21.	5Е5С	СМХ	2	СМХ	2
22.	10Б	Б	1	Б	1
23.	6ОС2ЛИП1Д1КЛ	СМЛ	4	СМЛ	2
24.	5Д3КЛ2ЛИП	ШЛ	3	ШЛ	3 и более
25.	4Е3ОС2С1Б	СМХЛ	4	СМХЛ	3 и более
26.	6С2Б2Е	СМХ	3	СМХ	2
27.	8ОС2КЛ	ОС	2	СМЛ	3 и более
28.	7Д2КЛ1ЛИП	ШЛ	3	ШЛ	3 и более
29.	10Б	Б	1	Б	1
Число совпадений				26	21
Доля совпадений, %				89,6	72,4

Примечание. Формула древостоя составлялась исходя из площади проективного покрытия крон деревьев верхнего яруса с точностью до 10%. Обозначения в формуле древостоя: Б – берёза, Д – дуб, Е – ель, КЛ – клён, ЛИП – липа, ОС – осина, ОЛЧ – ольха чёрная, С – сосна. Полное название классов – в табл. 1.

На основе пространственного пересечения полученных тематических продуктов нами сформирована комплексная карта, характеризующая пространственное распределение и видовое разнообразие древесных растений в лесах заповедника и его охранной зоны (рис. 4). При совмещении результатов классификации выявлены семантические несоответствия для 3,4% лесов территории. В данной ситуации предпочтение отдавалось более точной карте доминантов древесного полога. В частности, сегменты с числом пород равным единице, но отнесённые к полидоминантным древостоям, переносились в соответствующие классы с числом пород равным двум.

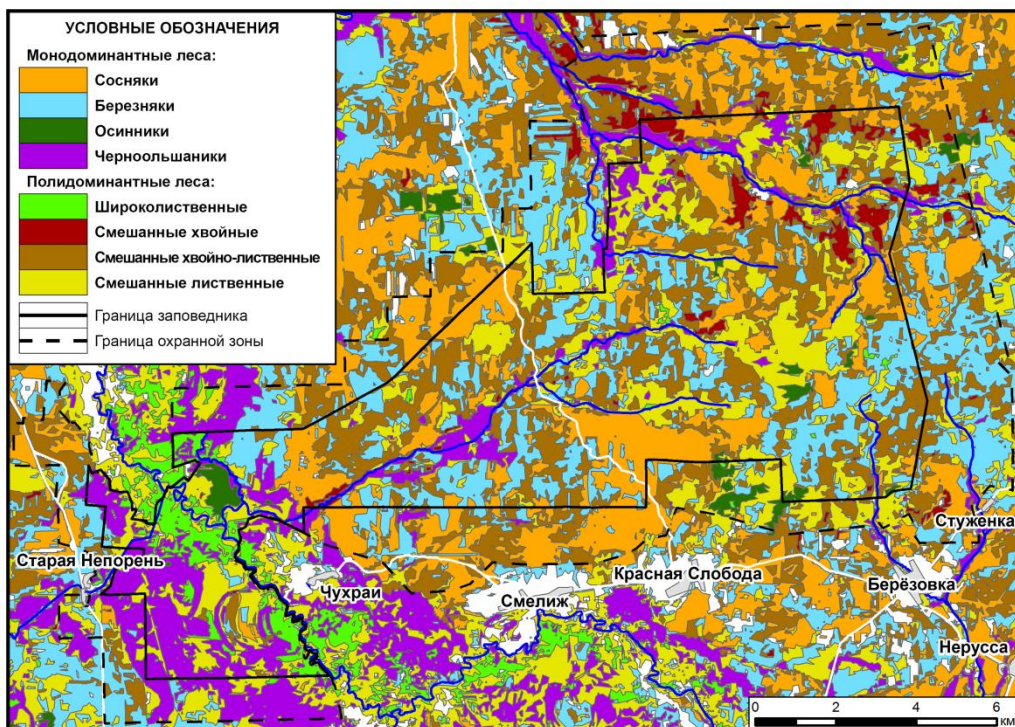


Рис. 2. Доминанты древесного полога заповедника «Брянский лес» и его охранной зоны по данным Landsat.

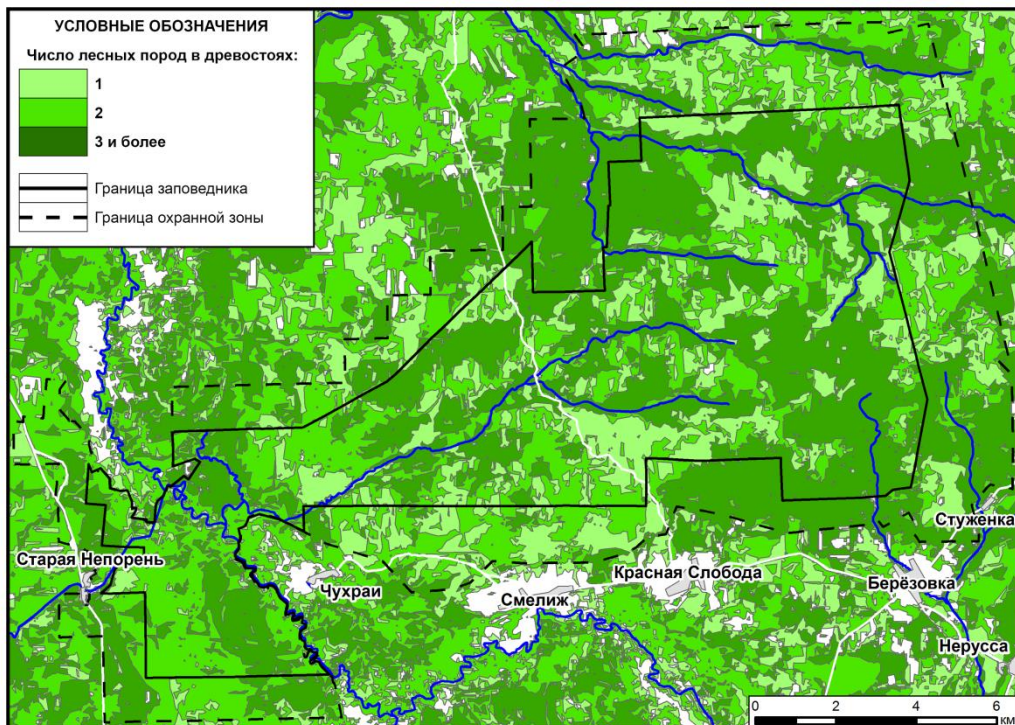


Рис. 3. Карта числа пород в древостоях заповедника «Брянский лес» и его охранной зоны по данным Landsat.

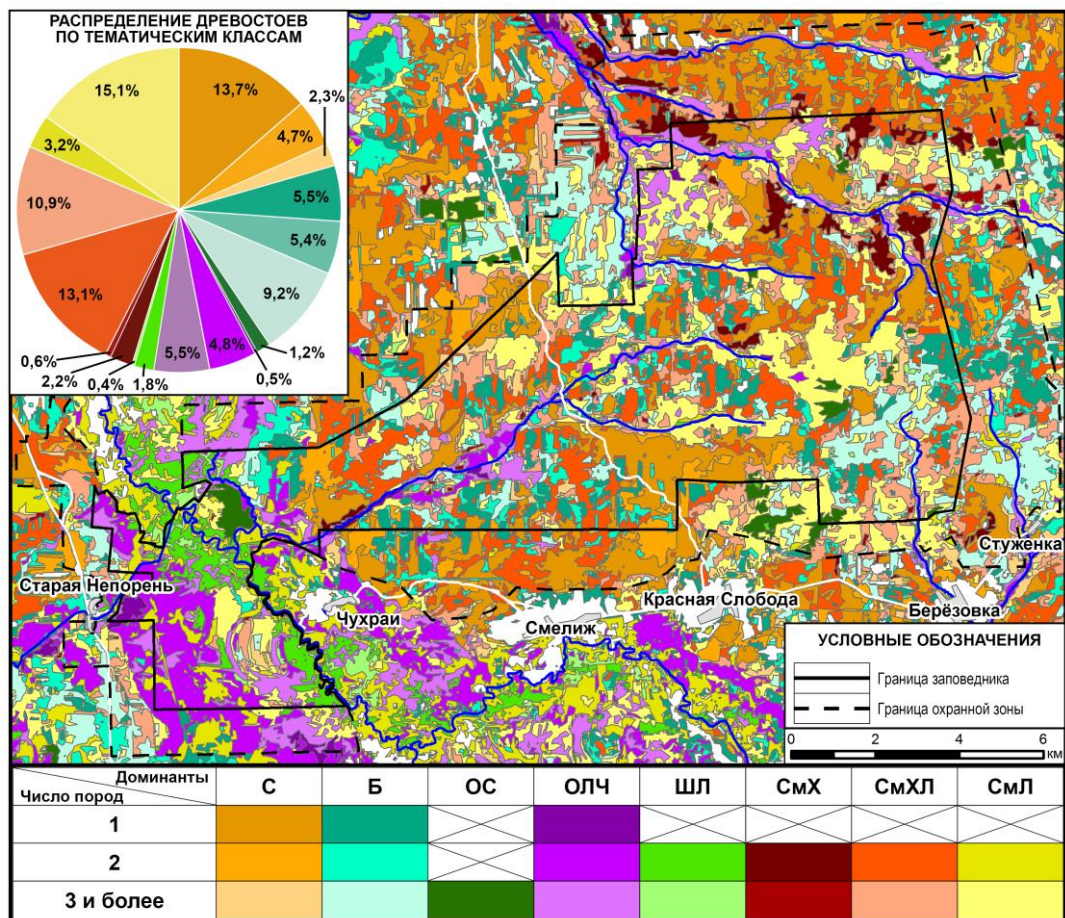


Рис. 4. Комплексная карта разнообразия видов древесных растений заповедника «Брянский лес» и диаграмма распределения площадей древостоев по тематическим классам. Полное название классов – в табл. 1.

На основе полученных результатов оценена видовая структура древесного яруса лесов с учетом их ландшафтной приуроченности. В ландшафтной структуре заповедника его охранной зоны выделяют следующие элементы: местности пойменного, террасного, полесского, предполесского ландшафтов (Евстигнеев, Федотов, 1999). Монодоминантные древостои (сосняки, березняки, черноольшаники и осинники) составляют 52,7% от общей площади лесов. Среди них наиболее распространены сообщества с преобладанием раннесукцессионных видов деревьев: сосны (20,6%) и берёзы (20,1%). Сосняки и березняки (*Betula pendula* и *B. pubescens*) преимущественно распространены на песчаных местностях террасного и полесского ландшафтов (рис. 2, 4). Эти обширные территории с давних времён и до создания заповедника подвергалась рубкам и пожарам (Евстигнеев, 2009). После нарушений обычно сажали сосну, поскольку она отлично приживается на песках. Берёза активно внедряется на свободные территории самостоятельно при помощи анемохории (Евстигнеев и др., 2017). Сформировавшиеся сосняки и березняки находятся на начальной стадии восстановительной сукцессии (Евстигнеев, Korotkov, 2016; Горнов и др., 2018). Черноольшаники (10,7%) приурочены к пойменному ландшафту (рис. 2, 4). В настоящее время они возникают на месте оставленных бобровых поселений или заброшенных сенокосов (Евстигнеев, Беляков, 1997; Евстигнеев, Горнова, 2017). Со временем молодые ольховые леса могут сформировать сообщества более продвинутых стадий сукцессии – сначала кочкарные черноольшаники, а затем высокотравные



ельники (Евстигнеев, Горнова, 2017). Наименее распространены леса с преобладанием осины (1,2%). Эти вторичные сообщества относятся к начальным стадиям восстановительной сукцессии. Они встречаются на территории полесского и предполесского ландшафтов. Полидоминантные древостои составляют 47,3% площади лесов и представлены главным образом смешанными хвойно-лиственными (23,9%) и смешанными лиственными (18,3%) лесами. Если в составе яруса деревьев хвойно-лиственных сообществ есть раннесукцессионные виды, то такие леса принадлежат к начальным стадиям восстановительной сукцессии (Евстигнеев, Korotkov, 2016; Горнов и др., 2018). Они наиболее распространены и встречаются в местностях террасного, полесского и предполесского ландшафтов. Хвойно-лиственные лиственные леса без сосны и берёзы представляют собой сообщества продвинутых стадий сукцессии. Они отличаются наличием позднесукцессионных видов: *Acer platanoides*, *Picea abies*, *Quercus robur*, *Tilia cordata* и др. Такие леса наиболее хорошо сохранились по бортам малых рек (рис. 2, 4), поскольку здесь была ограничена хозяйственная деятельность. Смешанные лиственные древостои большей частью представляют вторичные леса, которые встречаются в местностях террасного, полесского и предполесского ландшафтов. Однако сообщества с преобладанием широколиственных видов находятся на продвинутой стадии сукцессии (*Acer platanoides*, *Fraxinus excelsior*, *Quercus robur* и *Tilia cordata*). Они сохранились в поймах рек.

Доля лесов, в верхнем ярусе которых представлены деревья только одного вида, составляет 19,6%, двух видов – 35,2%, трёх и более видов – 45,2%. Пять наиболее распространенных комплексных тематических классов занимают суммарно 62% территории лесов заповедника: смешанные лиственные насаждения с тремя и более видами в составе (15,1%); монодоминантные сосняки (13,7%); смешанные хвойно-лиственные насаждения с двумя (13,1%) или тремя и более (10,9%) видами в составе; березняки с тремя и более видами в составе (9,2%).

### Заключение

Оценено разнообразие видов деревьев верхнего яруса лесов заповедника «Брянский лес» и его охранной зоны на основе разносезонных мультиспектральных спутниковых изображений Landsat с высокой степенью точности. Полученные результаты наглядно демонстрируют потенциал использованных методов обработки спутниковых данных для целей дистанционной оценки ресурсного потенциала, биологического разнообразия и сукцессионного статуса лесов. Кроме того, данные методы в значительной степени автоматизированы и легко масштабируются для применения на территориях с более широким пространственным охватом (например, на уровне субъектов РФ).

*Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 15-29-02697 «Выявление роли экосистемных инженеров и биоразнообразия в функционировании лесов на основе синтеза наземных и спутниковых данных» (тематическая обработка данных) и ГЗ ЦЭПЛ РАН №0110-2018-0001 «Концепция спутникового мониторинга состояния и динамики лесных экосистем» (подготовка исходных данных).*

### Список литературы

Гаврилюк Е. А., Ершов Д. В. 2012. Методика совместной обработки разносезонных изображений Landsat-TM и создания на их основе карты наземных экосистем Московской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 9. № 4. С. 15–23. [Gavrilyuk E. A., Ershov D. V. 2012. Metodika sovmestnoi obrabotki raznosezonnnykh izobrazhenii Landsat-TM i sozdaniya na ikh osnove karty nazemnykh ekosistem Moskovskoi oblasti // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. T. 9. № 4. P. 15–23.]

Горнов А.В., Горнова М. В., Тихонова Е. В., Шевченко Н. Е., Кузнецова А. И., Ручинская Е. В., Тебенькова Д. Н. 2018. Оценка сукцессионного статуса хвойно-широколиственных лесов европейской части России на основе популяционного подхода // Лесоведение. № 4. С. 1–15. [Gornov A. V., Gornova M. V., Tikhonova E. V., Shevchenko N. E., Kuznetsova A. I., Ruchinskaya E. V., Teben'kova D. N. 2018. Otsenka suksessionnogo statusa khvoyno-shirokolistvennykh lesov yevropeiskoi chasti Rossii na osnove populyatsionnogo podkhoda // Lesovedenie. № 4. P. 1–15.]

Евстигнеев О. И. 2009. Неруссо-Деснянское полевье: история природопользования. Брянск: Группа компаний «Десяточка». 139 с. [Evstigneev O. I. 2009. Nerusso-Desnyanskoe poles'e: istoriya prirodopol'zovaniya. Bryansk: Gruppy kompanii «Desyatochka». 139 p.]

- Евстигнеев О. И., Беляков К. В.* 1997. Влияние деятельности бобра на динамику растительности малых рек (на примере заповедника «Брянский лес») // Бюл. МОИП. Отд. биол. Т. 102. Вып. 6. С. 34–41. [*Evstigneev O. I., Belyakov K. V.* 1997. Vliyanie deyatel'nosti bobra na dinamiku rastitel'nosti malykh rek (na primere zapovednika «Bryanskiy les») // Byul. MOIP. Otd. biol. T. 102. Vyp. 6. P. 34–41.]
- Евстигнеев О. И., Горнова М. В.* 2017. Ельники высокоотравные – климаксные сообщества на низинных болотах Брянского полейя // Russian Journ. of Ecosystem Ecology. Vol. 2 (3). P. 1–23. [*Evstigneev O. I., Gornova M. V.* 2017. El'niki vysokotravnye – klimaksnye soobshchestva na nizinnnykh bolotakh Bryanskogo poles'ya // Russian Journ. of Ecosystem Ecology. Vol. 2 (3). P. 1–23.]
- Евстигнеев О. И., Мурашев И. А., Коротков В. Н.* 2017. Анемохория и дальность рассеивания семян деревьев восточноевропейских лесов // Лесоведение. № 1. С. 45–52. [*Evstigneev O. I., Murashev I. A., Korotkov V. N.* 2017. Anemokhoriya i dal'nost' rasseivaniya semyan derev'ev vostochnoevropetskikh lesov // Lesovedenie. № 1. P. 45–52.]
- Евстигнеев О. И., Федотов Ю. П.* 1999. Оценка разнообразия растительного покрова российско-украинской трансграничной экологической сети (на примере Неруссо-Деснянского полейя) // Перспективы развития экологической сети и создания трансграничных охраняемых территорий в бассейне Десны. М. С. 27–44. [*Evstigneev O. I., Fedotov Yu. P.* 1999. Otsenka raznoobraziya rastitel'nogo pokrova rossiisko-ukrainskoi transgranichnoi ekologicheskoi seti (na primere Nerusso-Desnyanskogo poles'ya) // Perspektivy razvitiya ekologicheskoi seti i sozdaniya transgranichnykh okhranyaemykh territorii v basseine Desny. M. P. 27–44.]
- Ершов Д. В., Бурцева В. С., Гаврилюк Е. А., Королева Н. В., Алейников А. А.* 2017. Диагностика современного сукцессионного состояния лесных экосистем Печоро-Ильчского заповедника по спутниковым тематическим продуктам // Лесоведение. № 5. С. 3–15. [*Ershov D. V., Burtseva V. S., Gavrilyuk E. A., Koroleva N. V., Aleinikov A. A.* 2017. Diagnostika sovremenennogo suksessionnogo sostoyaniya lesnykh ekosistem Pechoro-Ilychskogo zapovednika po sputnikovym tematicheskim produktam // Lesovedenie. № 5. P. 3–15.]
- Ершов Д. В., Гаврилюк Е. А., Карпухина Д. А., Ковганко К. А.* 2015. Новая карта растительности центральной части Европейской России по спутниковым данным высокой детальности // Доклады академии наук. Т. 464. № 5. С. 639–641. [*Ershov D. V., Gavrilyuk E. A., Karpukhina D. A., Kovganko K. A.* 2015. Novaya karta rastitel'nosti tsentral'noi chasti Evropeiskoi Rossii po sputnikovym dannym vysokoi detal'nosti // Doklady akademii nauk. T. 464. № 5. P. 639–641.]
- Ершов Д. В., Исаев А. С., Лукина Н. В., Гаврилюк Е. А., Королева Н. В.* 2015. Оценка биоразнообразия Центрального федерального округа по спутниковой карте наземных экосистем // Лесоведение. № 6. С. 403–416. [*Ershov D. V., Isaev A. S., Lukina N. V., Gavrilyuk E. A., Koroleva N. V.* 2015. Otsenka bioraznoobraziya Tsentral'nogo federal'nogo okruga po sputnikovoi karte nazemnykh ekosistem // Lesovedenie. № 6. P. 403–416.]
- Миркин Б. М., Розенберг Л. Г., Наумова Л. Г.* 1989. Словарь понятий и терминов современной фитоценологии. М. 224 с. [*Mirkin B. M., Rozenberg L. G., Naumova L. G.* 1989. Slovar' ponyatii i terminov sovremennoy fitotsenologii. M. 224 p.]
- Растительность европейской части СССР. 1980. Л. 431 с. [*Rastitel'nost' evropeiskoi chasti SSSR.* 1980. L. 431 p.]
- Черепанов С. К.* 1995. Сосудистые растения России и сопредельных государств. СПб. 992 с. [*Cherepanov S. K.* 1995. Sosudistye rasteniya Rossii i sopredel'nykh gosudarstv. SPb. 992 p.]
- Breiman L.* 2001. Random forests // Machine Learning. Vol. 45. № 1. P. 5–32.
- Evstigneev O. I., Korotkov V. N.* 2016. Pine Forest Succession on Sandy Ridges within Outwash Plain (Sandur) in Nerussa-Desna Polesie // Russian Journ. of Ecosystem Ecology. Vol. 1 (3). P. 1–18.
- Gao Y., Mas J. F.* A Comparison of the Performance of Pixel Based and Object Based Classifications over Images with Various Spatial Resolutions // Online Journ. of Earth Sciences. 2008. Vol. 2. P. 27–35.
- Gómez C., White J. C., Wulder M. A.* 2016. Optical Remotely Sensed Time Series Data for Land Cover Classification: A Review // ISPRS Journ. of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 116. P. 55–72.
- Gould W.* 2000. Remote sensing of vegetation, plant species richness, and regional biodiversity hotspots // Ecological Applications. Vol. 10. № 6. P. 1861–1870.
- Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S. V., Goetz S. J., Loveland T. R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. O., Townshend J. R. G.* 2013. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // Science. Vol. 342. P. 850–853.
- Li C. C., Wang J., Hu L. Y., Yu L., Clinton N., Huang H. B., Yang J., Gong P.* 2014. A circa 2010 thirty meter resolution forest map for China // Remote Sensing. Vol. 6. № 6. P. 5325–5343.
- Liaw A., Wiener M.* 2002. Classification and Regression by randomForest // R News. Vol. 2. № 3. P. 18–22.
- Madonsela S., Cho M. A., Ramoelo A., Mutanga O.* 2017. Remote sensing of species diversity using Landsat 8 spectral variables // ISPRS Journ. of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 133. P. 116–127.
- Mohammadi J., Shataee S.* 2010. Possibility investigation of tree diversity mapping using Landsat ETM+ data in the Hircanian forests of Iran // Remote Sensing of Environment. Vol. 114. P. 1504–1512.
- Morris E. K., Caruso T., Buscot F., Fischer M., Hancock C., Maier T. S., Meiners T., Müller C., Obermaier E., Prati D., Socher S. A.* 2014. Choosing and using diversity indices: insights for ecological applications from the German Biodiversity Exploratories // Ecology and Evolution. Vol. 4. № 18. P. 3514–3524.
- Parviainen M., Luoto M., Heikkinen R. K.* 2010. NDVI-based productivity and heterogeneity as indicators of plant-species richness in boreal landscapes // Boreal Environment Research. Vol. 15. № 3. P. 301–318.
- Pasquarella V. J., Holden C. E., Woodcock C. E.* 2018. Improved mapping of forest type using spectral-temporal Landsat features // Remote Sensing of Environment. Vol. 210. P. 193–207.
- Redding N. J., Crisp D. J., Tang D., Newsam G. N.* 1999. An efficient algorithm for Mumford-Shah segmentation and its application to SAR imagery // Proc. Conf. «Digital Image Computing: Techniques & Applications» (DICTA-99). Australia: Perth. P. 35–41.

Thompson S. D., Nelson T. A., White J. C., Wulder M. A. 2015. Large area mapping of tree species using composited Landsat imagery // Canadian Journ. of Remote Sensing. Vol. 41. № 3. P. 203–218.

Zhu X., Liu D. 2014. Accurate mapping of forest types using dense seasonal Landsat time-series // ISPRS Journ of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 96. P. 1–11.

### **Сведения об авторах**

**Гаврилюк Егор Александрович**

с. н. с. лаборатории мониторинга лесных экосистем  
ФГБУН Центр по проблемам экологии  
и продуктивности лесов РАН, Москва  
E-mail: egor@ifl.rssi.ru

**Горнов Алексей Владимирович**

к. б. н., зам. директора  
ФГБУН Центр по проблемам экологии  
и продуктивности лесов РАН, Москва  
E-mail: aleksey-gornov@yandex.ru

**Ершов Дмитрий Владимирович**

к. т. н., зам. директора  
ФГБУН Центр по проблемам экологии  
и продуктивности лесов РАН, Москва  
E-mail: ershov@ifl.rssi.ru

**Gavrilyuk Egor Alexandrovich**

Senior researcher of the laboratory of Forest ecosystem monitoring  
Center for Forest Ecology and Productivity of the RAS, Moscow  
E-mail: egor@ifl.rssi.ru

**Gornov Aleksey Vladimirovich**

Ph. D. in Biology, Deputy Director  
Center for Forest Ecology and Productivity of the RAS, Moscow  
E-mail: aleksey-gornov@yandex.ru

**Ershov Dmitry Vladimirovich**

Ph. D. in Technical sciences, Deputy Director  
Center for Forest Ecology and Productivity of the RAS, Moscow  
E-mail: ershov@ifl.rssi.ru