

КАРТОГРАФИЯ И ГЕОИНФОРМАТИКА

Научная статья

УДК 528.88

doi: 10.17072/2079-7877-2022-1-150-164

**КАРТОГРАФИРОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА
ПЕРМСКОГО КРАЯ ПО СПУТНИКОВЫМ СНИМКАМ LANDSAT**Андрей Николаевич Шихов^{1✉}, Анастасия Владимировна Семакина²¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, г.Пермь, Россия²Пермский филиал ФГБУ «Рослесинфорг», г.Пермь, Россия¹shikhovan@gmail.com[✉]²anastaiasemakina@gmail.com

Аннотация. Рассматриваются методика и результаты картографирования растительного покрова Пермского края на основе спутниковых снимков Landsat, полученных в 2016–2020 гг. Методика создания карты основана на классификации спутниковых снимков с обучением и последующей постобработке. Постобработка предполагает использование ряда дополнительных источников, а именно результатов глобального картографирования нарушений лесного покрова, водных поверхностей и пахотных земель по снимкам Landsat, а также данных о лесовосстановлении на сельскохозяйственных угодьях. В результате создана карта с пространственным разрешением 30 м (которое соответствует масштабу 1:100000). Легенда карты включает 19 тематических классов, 11 из них содержат информацию о лесной растительности. Оценка точности полученных данных выполнена с использованием карты растительности России, полученной по спутниковым данным MODIS, а также материалов лесоустроительных работ по двум лесничествам Пермского края. Наибольшая точность классификации характерна для темнохвойных и сосновых лесов (по данным карты растительности России – около 70%, а по материалам лесоустройства – около 75%). Класс лиственных лесов выделен с минимальной точностью, поскольку в результатах классификации он частично отнесен к классу смешанных лесов с преобладанием лиственных пород. Направления практического использования полученных данных могут включать оценку изменчивости площади отдельных классов во времени (в частности, малонарушенных лесных территорий) или выполнение различных расчетов, основанных на данных о породном составе и возрастной структуре лесов. Созданная карта растительного покрова Пермского края доступна по ссылке <https://figshare.com/s/98d29e83d1f2039b2528>.

Ключевые слова: спутниковое картографирование, снимки Landsat, дешифрирование, классификация, постобработка, растительный покров, Пермский край

Для цитирования: Шихов А.Н., Семакина А.В. Картографирование растительного покрова Пермского края по спутниковым снимкам Landsat // Географический вестник = Geographical bulletin. 2022. № 1(60). С. 150–164. doi: 10.17072/2079-7877-2022-1-150-164.

CARTOGRAPHY AND GEOINFORMATICS

Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2022-1-150-164

**MAPPING OF THE VEGETATION COVER OF THE PERM REGION BASED ON
LANDSAT SATELLITE IMAGES**Andrey N. Shikhov^{1✉}, Anastasia V. Semakina²¹Perm State University, Perm, Russia²Perm Branch of the Federal State Institution 'Roslesinforг', Perm, Russia¹shikhovan@gmail.com[✉] ²anastaiasemakina@gmail.com

Abstract. The paper deals with the methodology and results of Landsat-based vegetation cover mapping for the Perm region. Initial Landsat images were obtained in 2016–2020. The map building technique is based on the supervised classification of satellite images and subsequent post-processing. This technique involves the use of a number of additional sources, in particular, the results of global-Landsat-based mapping of forest disturbances, water surface, and arable lands, as well as reforestation areas on abandoned agricultural lands. As a result, a map with a spatial resolution of 30 m (which corresponds to a scale of 1:100,000) has been created. The map legend includes 19 thematic classes, 11 of them contain information on forest vegetation. The accuracy assessment of the obtained data was carried out with the use of a MODIS-based map of the vegetation cover of Russia and also forest inventory data on two forestries of the Perm region. The highest classification accuracy is typical for dark-coniferous and pine forests (it is about 70% according to the map of the vegetation cover of Russia, and up to 75% according to the forest inventory data). Deciduous forests are recognized with the lowest accuracy since, according to the classification results, they were partly categorized as mixed forests (with a predominance of deciduous species). The practical use of the created map of the vegetation cover may include estimation of long-term changes for individual vegetation classes (in particular, for intact forest landscapes), or various calculations based on the species composition and age structure of the forests. The compiled map of the vegetation cover of the Perm region is available at <https://figshare.com/s/98d29e83d1f2039b2528>.

Keywords: satellite-based mapping, Landsat images, satellite data interpretation, classification, post-processing, vegetation cover, Perm region

For citation: Shikhov, A.N. and Semakina, A.V. (2022). Mapping of the vegetation cover of the Perm region based on Landsat satellite images. *Geographical Bulletin*. No. 1(60). Pp. 150–164. doi: 10.17072/2079-7877-2022-1-150-164.

Введение

Растительный покров и, в частности леса, являются одним из важнейших природных ресурсов России. Так, леса России занимают более 49% площади земель страны, на них приходится около 20% общей площади лесного покрова планеты [4]. Антропогенное воздействие и глобальные изменения климата сопровождаются нарастанием процессов трансформации и деградации растительного покрова. Так, наиболее значимыми факторами воздействия на леса России являются природные пожары и вырубki [23]. В других странах ключевое значение имеют вспышки размножения насекомых-вредителей, изменения режимов землепользования, опустынивание [20]. Имеющиеся карты растительного покрова часто не отражают эти процессы, и в результате обеспеченность объективной и регулярно обновляемой информацией о состоянии растительного покрова остается недостаточной [3].

Все эти предпосылки, а также стремительное совершенствование технических возможностей современных спутниковых систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) послужили основанием для развития нового научно-технического направления – спутникового картографирования растительного покрова [4]. Современный этап его развития характеризуется нарастающим уровнем открытости доступа к спутниковым данным, возможностью оперативного их получения и формирования однородных по радиометрическому и геометрическому качеству многолетних рядов, развитием автоматических технологий предварительной и тематической обработки данных, а также созданием веб-сервисов, предоставляющих информационные продукты и инструменты их анализа для оценки состояния и динамики растительного покрова [5].

Для картографирования растительности на глобальном и макрорегиональном уровнях используются в основном данные ДЗЗ низкого и среднего пространственного разрешения (от 250 до 1100 м). В частности, первый опыт спутникового картографирования растительного покрова Земли был получен в рамках Международной геосферно-иосферной программы [24] на основе данных радиометра NOAA/AVHRR. В результате была создана

Картография и геоинформатика
Шихов А.Н., Семакина А.В.

глобальная карта земного покрова с размером ячейки 1 км и легендой, включающей 17 тематических классов. В последующие годы наибольшую известность получили такие проекты картографирования растительного покрова Земли, как Global Land Cover 2000 на основе данных SPOT-Vegetation [18]; GlobCover-2009 [15] на основе данных радиометра MERIS спутника ENVISAT, а также ежегодно обновляемый по данным сенсора MODIS продукт MCD12q1 [21]. Первая глобальная карта растительности на основе снимков среднего разрешения Landsat была создана Национальным центром геоматики Китая. Однако ее легенда имеет низкий уровень тематической детальности, включая лишь десять различных классов земного покрова [19]. Также на основе данных Landsat была создана глобальная карта распространения пахотных земель [27].

Для территории России спутниковые карты растительного покрова созданы Институтом космических исследований РАН. В частности, в рамках проекта GLC2000 по данным SPOT-Vegetation была создана карта наземных экосистем Северной Евразии, легенда которой включает 27 тематических классов [16]. В последующие годы в ИКИ РАН был разработан алгоритм локально-адаптивной классификации LAGMA [17], с применением которого создаются ежегодно обновляемые карты растительности России с пространственным разрешением 230 м [2, 4]. Помимо них на основе многолетнего ряда спутниковых данных MODIS ежегодно обновляются карты используемых пахотных земель, преобладающих пород леса и запасов стволовой древесины в лесах с аналогичным пространственным разрешением [4].

Также в России создан ряд карт растительного покрова регионального уровня. Первым подобным проектом было создание карты лесов Ханты-Мансийского автономного округа на основе снимков с российского аппарата Метеор-3М и американского спутника Landsat-7. Легенда этой карты содержала 8 тематических классов [11]. По снимкам Landsat 5/7, полученным в 2006–2011 гг., была создана карта наземных экосистем Московской области, пространственное разрешение которой составляет 30 м, а легенда включает 12 тематических классов [7]. Региональные карты растительного покрова создаются для решения разных задач, в том числе для уточнения пространственного распределения разных типов растительных сообществ, создания картографической основы для мониторинга динамики лесов [8] или для идентификации отдельных классов (например, малонарушенных лесных территорий) и их изменений во времени [28]. В рамках настоящей работы рассматривается создание такой карты для территории Пермского края на основе спутниковых снимков Landsat.

Материалы и методы

Исходные данные

В качестве исходных данных для создания карты растительного покрова использовались снимки со спутника Landsat-8, полученные сенсором Operational Land Imager (OLI). Основными критериями их выбора являются пространственное разрешение, наличие необходимых спектральных каналов, ширина полосы обзора и доступность данных. Снимки Landsat-8 имеют пространственное разрешение 30 м в спектральных каналах видимого, ближнего и среднего инфракрасного (ИК) диапазона, которые имеют ключевое значение для анализа растительного покрова. Ширина полосы обзора спутника Landsat составляет 185 км, что идеально подходит для решения задач регионального картографирования. Данные Landsat находятся в открытом доступе на ряде веб-сервисов, в частности [30].

Для территории Пермского края было создано безоблачное покрытие снимками Landsat, полученными в летний период (всего 16 сцен). Покрытие состоит из снимков за 2016–2020 гг., большинство из них были получены в июле, другие – в конце июня или в начале августа. Такой выбор обоснован минимальной облачностью в эти даты, а также

Картография и геоинформатика

Шихов А.Н., Семакина А.В.

невозможностью использования более ранних снимков, например, за май, когда в горной части края еще не начинается вегетационный период. Обработка каждого снимка осуществлялась отдельно с последующей сшивкой результатов в единое покрытие.

Формирование обучающей выборки и классификация изображений

Классификация изображений выполнена на основе комбинации среднего ИК, ближнего ИК и зеленого спектральных каналов, имеющих номера 7, 5 и 3. Выбор этих спектральных каналов обусловлен тем, что максимум отражательной способности растительности достигается в ближнем ИК диапазоне спектра, а средний ИК, в свою очередь, чувствителен к содержанию воды в листьях и хвое [4]. По изображению в данной комбинации каналов выделяются особенности древостоев различного породного состава. В частности, темно-зеленый цвет лесных массивов является индикатором увеличения доли темнохвойных пород. Для сосновых лесов характерны темно-фиолетовый или серо-фиолетовый цвета, а для лиственных лесов – зеленый. Луговая растительность выделяется ярко-зеленым цветом. Ярко-розовый цвет характерен для участков открытой почвы, гари будут выделяться ярко-красным цветом, а городская застройка – розово-фиолетовым [10].

Для классификации снимков в настоящей работе использовался метод максимального правдоподобия, который относится к группе классификаторов с обучением [1]. Отличительной особенностью реализации данного метода в пакете ESRI ArcGIS является высокая скорость вычислений, что имело значение при обработке значительного объема данных. В результате классификации каждый пиксел изображения был отнесен к тому классу, к которому он может принадлежать с наибольшей вероятностью.

Первым шагом при классификации является определение тематических классов (предварительной легенды формируемой карты). Тематические классы должны отражать характерные для данной территории объекты местности. В качестве основы для построения легенды использовались данные карты растительности России с пространственным разрешением 230 м [4]. Для территории Пермского края были определены 14 тематических классов, включая 6 классов лесной растительности и 8 классов, которые соответствуют нелесным территориям (табл. 1). Обучающая выборка формировалась с учетом данных карты растительности России [4], а также известных дешифровочных признаков основных типов растительного покрова, включая леса различного породного состава [13]. Классификация каждого снимка проводилась отдельно. В результате классификации были получены 16 растров (с пространственным разрешением 30 м) в 40-й зоне проекции UTM на эллипсоиде WGS-1984.

Таблица 1

Состав легенды карты растительного покрова
Composition of the vegetation map legend

<i>Выделенные в результате классификации</i>		<i>Выделенные в ходе постобработки</i>
<i>леса</i>	<i>нелесопокрытые земли</i>	
Темнохвойные леса, сосновые леса, смешанные леса с преобладанием темнохвойных пород, смешанные леса, смешанные леса с преобладанием лиственных пород, лиственные леса	Открытый грунт и каменные россыпи, горная тундра, водная поверхность, сельскохозяйственные поля, луга, населенные пункты, болота	Населенные пункты, вырубки, зарастающие лиственным, смешанным и хвойным лесом; участки восстановления на бывших сельхозугодьях (с преобладанием лиственных и хвойных пород), вырубки, гари и ветровалы

Постобработка результатов классификации

Постобработка представляет собой совокупность операций по обработке классифицированного изображения (схемы автоматизированного дешифрирования) для создания итоговой тематической карты [1]. Она включает переклассификацию для выделения тех классов, которые невозможно выделить путем автоматизированной

классификации изображения (например, населенных пунктов), слияние классов, сглаживание изображения для перехода от классифицированных пикселей к тематическим контурам. Для постобработки часто используются дополнительные данные (априорно известная информация об объектах на территории), если их пространственное разрешение близко к таковому для исходных снимков.

В данном случае постобработка включала несколько этапов. Первым этапом были выделение нарушений лесного покрова и их классификация на вырубки, гари и ветровалы. Для этого использованы тематические продукты обработки снимков Landsat, созданные лабораторией GLAD университета штата Мэриленд – Global Forest Change (GFC) [22] и Eastern Europe Forest Cover Change (EEFCC) [26]. Они представляют собой растровые слои с пространственным разрешением 30 м, которые содержат данные о нарушениях лесного покрова за период с 1985 по 2012 г. (EEFCC) и с 2001 г. по н.в. (GFC). При этом данные EEFCC включают только 4 класса – потери лесного покрова за 1986–1988, 1989–2000, 2001–2006 и 2007–2012 гг., тогда как в данных GFC шаг по времени составляет 1 год.

Данные GFC и EEFCC были переклассифицированы на два класса со значениями 0 и 100, которые соответствуют отсутствию и наличию нарушений лесного покрова, и затем суммированы с результатами классификации. Для каждого класса, относящегося к участкам потери лесного покрова, проведено визуальное дешифрирование и определен класс, к которому он относится по определенной ранее легенде. В результате на участках вырубок были выделены три новых класса – вырубки, зарастающие лиственными, смешанными и хвойными лесами (рис. 1, табл. 1). Также на основе ранее опубликованных баз данных [14] были выделены классы крупных гарей и ветровалов.

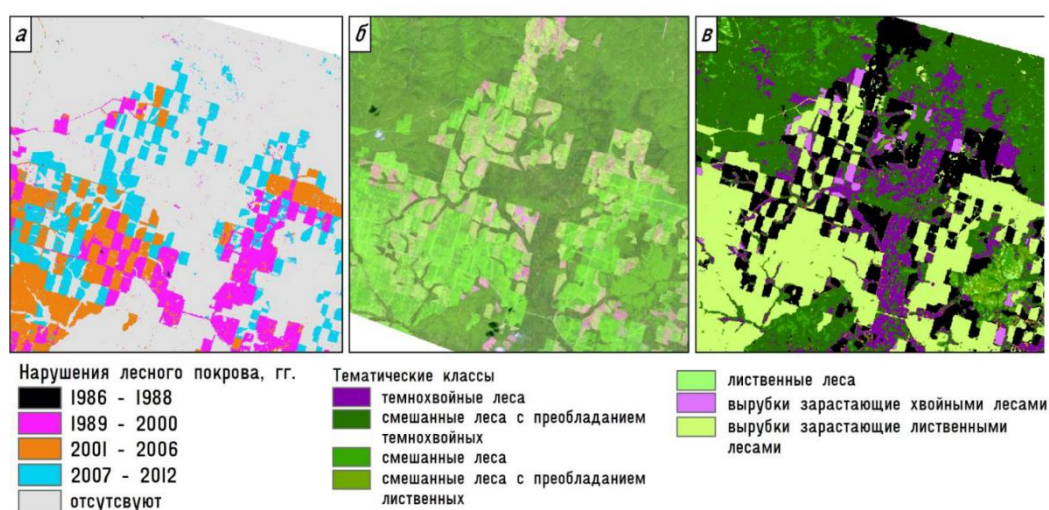


Рис. 1. Постобработка результатов классификации на основе данных о нарушениях лесного покрова: а – данные EEFCC, б – снимок Landsat, в – откорректированный результат классификации

Fig.1. Post-processing of the image classification results with the use of forest disturbance data (a – EEFCC data, b – Landsat image, v – corrected classification result)

Следующим этапом постобработки было выделение населенных пунктов на основе векторного слоя их границ, полученного по векторной картографической основе М 1:200000. Проведена корректировка границ населенных пунктов по каждому снимку, которая включала в себя изменение контура ряда населенных пунктов по границе застроенных территорий. Далее векторные данные были конвертированы в растр с пространственным разрешением, соответствующим результатам классификации, и проведена вышеописанная процедура включения этого класса в результирующий растр.

Картография и геоинформатика
Шихов А.Н., Семакина А.В.

Аналогичным образом выполнено маскирование участков водной поверхности (для исключения ошибочного распознавания воды) по данным проекта Global Surface Water [25]. В качестве водной поверхности рассматривались пиксели, в которых вода была зафиксирована в 75% наблюдений по снимкам Landsat за период с 1984 по 2020 г. Участки пахотных земель были маскированы по данным проекта [27], которые также имеют пространственное разрешение 30 м.

Также постобработка включала в себя исправление ошибок классификации. В первую очередь проведена ручная оцифровка участков каменных россыпей в горах (гольцовый пояс). Каменные россыпи хорошо выделяются по спектральным признакам от горных тундр, но могут иметь признаки, сходные с объектами, расположенными в других высотных поясах (свежими вырубками, нарушенными землями). Для горной части Пермского края характерной ошибкой при классификации снимков было также ошибочное отнесение болот в класс горной тундры. Для исправления данной ошибки также проводилось ручное оконтуривание болот в горной местности с добавлением данного класса в результирующий растр.

В рамках постобработки также было проведено выделение зарастающих лесом сельскохозяйственных полей. Для этого использовался созданный в 2020 г. по разновременным снимкам Landsat (за период с 1986 по 2018 г.) набор данных о зарастающих древесной растительностью пахотных землях на территории Пермского края [6]. В результате совмещения этого слоя с результатами классификации в легенду были добавлены еще два класса – сельскохозяйственные угодья, зарастающие лесами с преобладанием хвойных и лиственных пород (рис. 2).

Завершающим этапом постобработки является фильтрация результатов классификации, которая необходима для перехода от характеристик отдельных пикселей к тематическим контурам, а также для улучшения визуального восприятия. Фильтрация полученных растров проводилась с применением фильтра большинства по 8 соседям и с порогом замещения MAJORITY, при котором пикселу присваивается значение большинства ячеек, попавших в матрицу фильтра. Данная операция проведена дважды для каждого растра с результатами классификации. После выполнения фильтрации проведена сшивка растров и создано итоговое покрытие – информационная основа карты растительного покрова Пермского края.

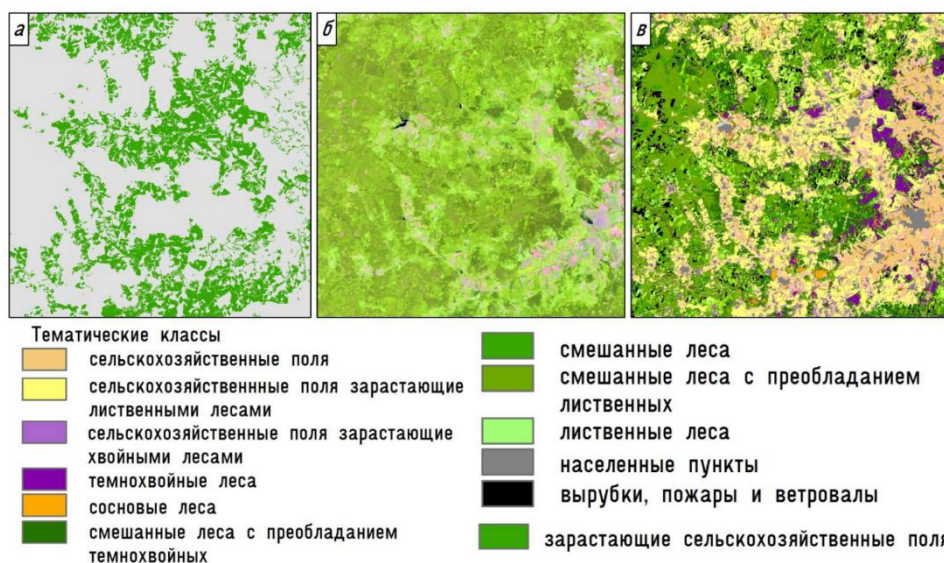


Рис. 2. Постобработка результатов классификации на основе данных о зарастающих сельскохозяйственных полях: а – исходные данные о зарастающих полях, б – снимок Landsat, в – откорректированный результат классификации

Fig. 2. Post-processing of the image classification results with the use of the dataset on natural reforestation on abandoned croplands (a – initial data on natural reforestation, b – Landsat image, v – corrected classification result)

Результаты и их обсуждение

Верификация созданной карты выполнена по нескольким источникам данных. Изначально для проверки использовались данные о породно-качественных характеристиках лесов из поквартальной базы данных с картографического веб-сервиса «Лесной диспетчер Пермского края» [9]. Эта база данных включает в себя основные характеристики древостоя (возраст, бонитет, формулу состава и др.) в разрезе лесных кварталов. Данные получены на основе лесоустройства разных лет (с 1990-х гг.) и по ряду лесничеств значительно устарели. На их основе проведено сравнение площадей различных типов леса и совпадающей площади (табл. 2).

Площади темнохвойных и сосновых лесов по данным [9] значительно превышают площади, полученные по результатам классификации. Такая разница в площадях обусловлена тем, что в основе определения преобладающей породы в поквартальных данных лежит оценка запасов древесины, а не проективного покрытия. Обширные болотные массивы на севере края по данным [9] частично попали в класс сосновых лесов, что привело к завышению их площади. В свою очередь, площади смешанных лесов по результатам классификации оказались больше, чем по квартальным данным [9]. Данное превышение площади связано с тем, что для сравнения в класс смешанных были объединены такие тематические классы, как смешанные леса с преобладанием темнохвойных пород и с преобладанием лиственных пород. Для сравнения был также определен процент совпадения площадей тематических классов. Для различных классов он варьируется от 44 до 69% и в среднем составляет около 54 %.

Таблица 2

Сравнение площадей различных типов леса с поквартальными данными [9]
Comparison of areas of different forest types with quarterly data [9]

Леса по преобладающим породам	Площадь по полученной карте растительного покрова, га	Площадь по данным лесного диспетчера, га	Площадь совпадения, га	Процент совпавшей площади от общей площади полученных классов, %
Темнохвойные	1 134 990	6 063 960	649 718	57
Светлохвойные (сосновые)	608 508	2 201 809	419 639	69
Смешанные	7 811 782	5 807 435	3 410 767	44
Лиственные	1 261 217	1 031 521	577 646	46

Также проведено сравнение данных, полученных в результате классификации с данными карты растительности России [2, 4], полученными за 2018 г. (рис. 3). В результате выделены классы, площади которых близки по двум источникам данных – темнохвойные леса и смешанные леса с преобладанием темнохвойных. Доля совпавшей площади для них составляет 70 и 52% соответственно. Расхождение по общей площади темнохвойных лесов обусловлено фрагментацией данного класса в связи с многократным различием в пространственном разрешении данных MODIS и Landsat.

Наибольшая степень совпадения площадей по двум источникам характерна для лиственных лесов и составляет 78%, при этом для данного класса характерно наиболее сильное расхождение по общей площади. Оно связано с тем, что обширные площади были отнесены к классу смешанных лесов с преобладанием лиственных. Это же привело к превышению площади смешанных лесов с преобладанием лиственных, полученных в результате классификации, над данными карты растительности России. Двукратное расхождение по площади наблюдается для сосновых лесов. Такое расхождение связано

Картография и геоинформатика

Шихов А.Н., Семакина А.В.

с тем, что территории, занятые сосновыми лесами по данным карты растительности России, при классификации по снимкам Landsat частично попали в класс болот. Также на карте лесов России отсутствуют данные о крупных нарушениях лесов пожарами, которые также происходят в основном в сосновых лесах [12]. В целом доля совпавшей площади составляет от 39 до 78% для разных тематических классов (табл. 3).

Таблица 3

Сравнение площадей различных типов леса с данными Карты растительности России [4]

Comparison of areas of different forest types with data from the Vegetation Map of Russia [4]

Преобладающая порода	Площадь по полученной карте растительности, га	Площадь по карте лесов России, га	Площадь совпадения, га	Доля совпавшей площади от общей площади классов, %
Темнохвойные леса	1 134 990	1 367 777	797 217	70
Светлохвойные (сосновые) леса	608 508	1 123 892	445 944	73
Лиственные леса	1 261 217	4 515 898	988 027	78
Смешанные леса с преобладанием темнохвойных	1 872 115	1 780 788	969 801	52
Смешанные леса	2 240 271	1 812 581	996 789	44
Смешанные леса с преобладанием лиственных	3 220 580	1 995 017	1 255 865	39

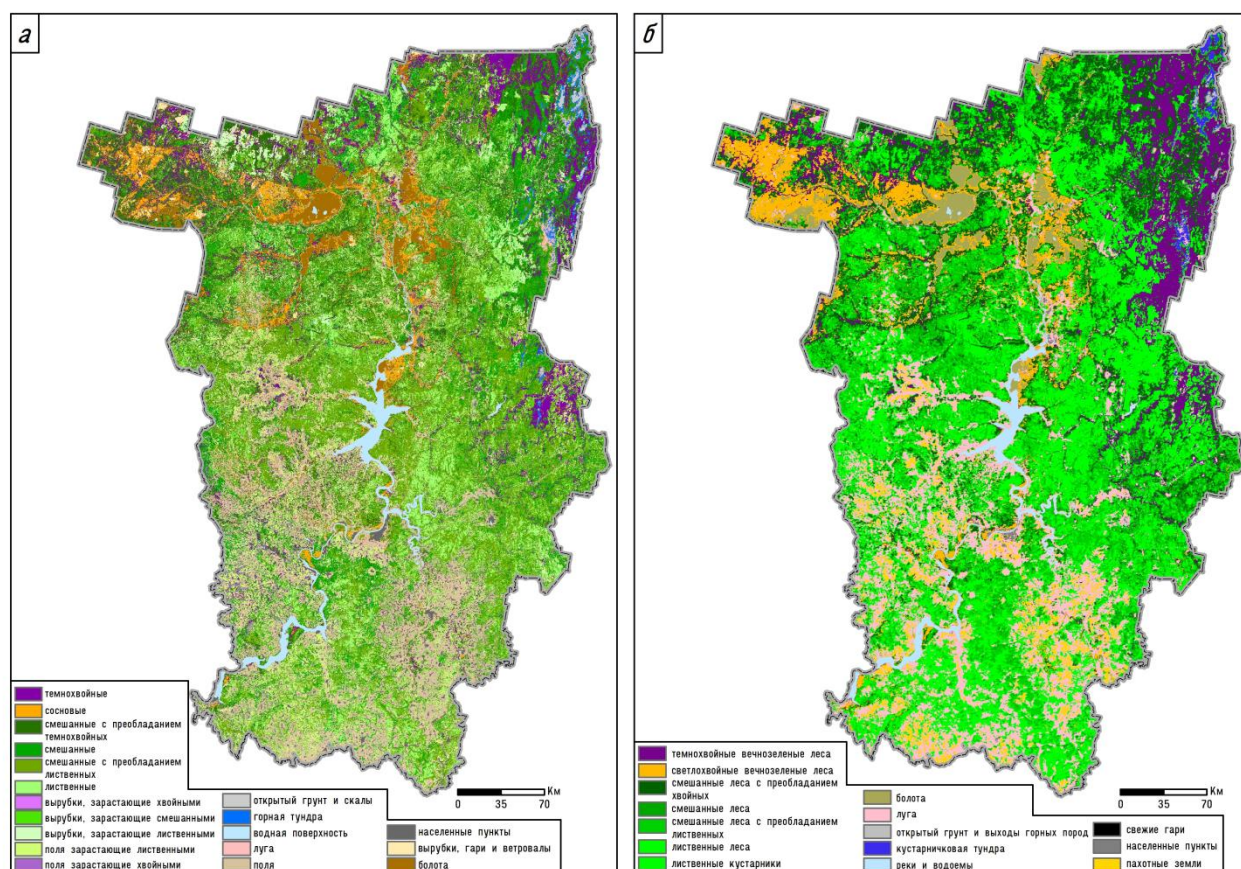


Рис. 3. Сравнение карты растительного покрова Пермского края (а) с фрагментом карты растительности России [4] для той же территории (б)

Fig. 3. Comparison of the land cover map of the Perm region (a) with the map of vegetation cover of Russia [4] for the same area (b)

Картография и геоинформатика

Шихов А.Н., Семакина А.В.

На более локальном масштабе было проведено сравнение полученных данных с материалами лесоустройства Сивинского и Чердынского лесничеств, лесоустройство которых было завершено в 2020 г. Материалы лесоустройства представляют собой повыделные данные с основными таксационными характеристиками лесонасаждений, причем материалы по Сивинскому лесничеству были получены в полном объеме, а по Чердынскому – для нескольких урочищ. Для сопоставления с результатами классификации на основе формулы состава древостоя были выделены классы темнохвойных, сосновых, смешанных и лиственных лесов (табл. 4).

Классы темнохвойных и сосновых лесов характеризуются превышением площади по материалам лесоустройства над данными классификации. Площади сосновых лесов по материалам лесоустройства превышают площади по данным классификации в два раза. Такие расхождения могут быть связаны с тем, что при классификации также был выделен класс смешанных лесов с преобладанием темнохвойных (которые в проверочных данных отсутствуют). Также часть территорий, выделенных по данным классификации как болота, по материалам лесоустройства попала в класс сосновых лесов. Доля площади, совпавшей с проверочными данными, для этих классов составила от 69 до 80%, а для класса смешанных лесов – около 55%. При этом площадь смешанных лесов по данным классификации больше, чем по материалам лесоустройства. Расхождения обусловлены тем, что обширные площади, определенные в результате классификации как лиственные леса, по материалам лесоустройства попали в класс смешанных лесов. Но наибольшие расхождения характерны для класса лиственных лесов, поскольку лиственные леса по данным лесоустройства сильно пересекаются со смешанными лесами с преобладанием лиственных пород по данным классификации.

Таблица 4

Сравнение площадей различных типов леса с данными материалов лесоустройства
Comparison of areas of different forest types with data from forest inventory materials

Преобладающая порода	Площадь по полученной карте растительности, га	Площадь по материалам лесоустройства, га	Площадь совпадения, га	Доля совпавшей площади от общей площади, полученной в результате классификации классов, %
Сивинское лесничество				
Темнохвойные	116 675	174 915	83 546	72
Сосновые леса	11 343	30 782	7 967	70
Смешанные	162 546	109 185	89 065	55
Лиственные	12 860	30 242	5 063	39
Чердынское лесничество				
Темнохвойные	159 438	222 979	109 381	69
Сосновые леса	71 121	130 271	56 655	80
Смешанные	178 357	163 109	94 628	53
Лиственные	63 497	3 152	2 143	4

Одним из направлений практического использования созданной карты может быть оценка изменения площади малонарушенных лесных территорий (МЛТ). МЛТ имеют ключевое значение для сохранения биоразнообразия, а нарушения лесного покрова, вызванные деятельностью человека и природными факторами (пожарами, ветровалами, вспышками численности насекомых-вредителей), ведут к сокращению их площади [28].

В Пермском крае МЛТ представлены первичными бореальными лесами на северо-востоке региона (рис. 4). Для проведения анализа были получены данные об их границах по состоянию на 2013 г. [28]. Данный слой содержит информацию о границах не фрагментированных участков МЛТ, которые достаточно велики для того, чтобы

сохранить биоразнообразие. Согласно этим данным, площадь МЛТ на территории края составляет около 854 тыс. га. Так как к МЛТ относятся в основном темнохвойные леса, сравнение с данными классификации проводилось для двух классов – темнохвойных лесов и смешанных лесов с преобладанием темнохвойных пород. Их общая площадь в границах МЛТ составила около 468 тыс. га. Такая разница в площадях обусловлена тем, что в пределы области МЛТ попадают также обширные не покрытые лесом участки – болота, горная тундра, скалы. Реальное сокращение площади МЛТ, которое может быть оценено в ≈ 72 тыс. га, обусловлено вырубками в южной части данной области, а также пожарами лета 2010 и ветровалами 2012 и 2015 гг. [14].

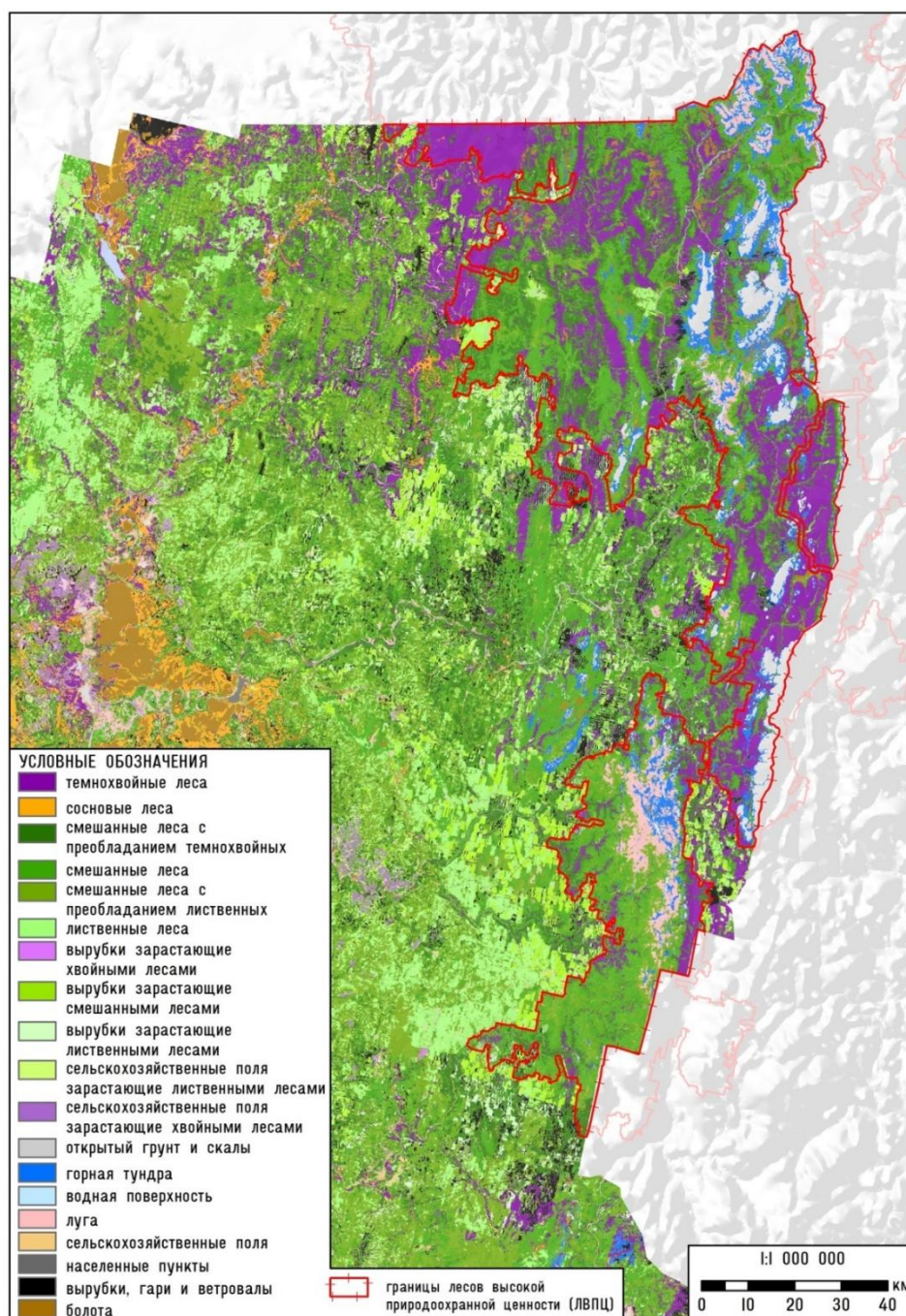


Рис. 4. Результаты классификации в пределах малонарушенных лесных территорий
Fig. 4. Classification results within the area of intact forest landscapes

Заключение

Основным результатом проведенного исследования стало создание новой карты растительного покрова Пермского края с пространственным разрешением 30 м на основе классификации спутниковых снимков Landsat, которая на сегодняшний день не имеет аналогов. Использование дополнительных материалов (в частности, данных о нарушениях лесного покрова, а также об участках лесовосстановления на сельскохозяйственных угодьях) обеспечило достаточно высокую тематическую детальность созданной карты. Карта содержит 19 тематических классов, 11 из них включают информацию о лесной растительности. Данная карта в формате .geotiff опубликована в открытом доступе [29].

Выполненная оценка точности выделения тематических классов с использованием данных карты растительности России, а также материалов лесоустроительных работ показала неоднозначные результаты. Наибольшая точность выделения характерна для темнохвойных и сосновых лесов (по данным карты растительности России – около 70%, а по материалам лесоустройства – около 75%). Класс лиственных лесов выделен с минимальной точностью, поскольку его площадь сильно варьируется по разным данным, а в результатах классификации они частично отнесены к классу смешанных лесов с преобладанием лиственных пород.

Совершенствование разработанной методики и повышение точности данных возможно в нескольких направлениях. В частности, возможна реализация данной методики на основе снимков более высокого пространственного разрешения (Sentinel-2) с использованием более современных, но ресурсоемких методов классификации, например, классификатора Random Forest. Прилагается также использование новых дополнительных источников данных, в частности, исторических снимков Landsat, полученных в зимний период, что позволит внести в легенду классификации новые данные о возрасте лесных насаждений или же недавно опубликованной глобальной оценки площади пахотных земель [26].

Направления практического использования полученных данных могут включать в себя оценку изменчивости площади отдельных классов во времени или выполнение различных расчетов, основанных на данных о породном составе и возрастной структуре лесов. К числу последних относится оценка подверженности лесов воздействию пожаров и ветровалов, которая ранее уже проводилась для территории Пермского края на основе снимков низкого пространственного разрешения [12].

Список источников

1. Балдина Е.А., Лабутина И.А. Дешифрирование аэрокосмических снимков: учебник. 2-е изд., перераб. и дополн. М.: Добросвет, 2021. 269 с. [Электронное издание]. URL: <https://bookonlime.ru/node/6333> (дата обращения: 31.01.2022).
2. Барталев С.А., Егоров В.А., Еришов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т.8. № 4. С. 285–302.
3. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А. Состояние и перспективы развития методов спутникового картографирования растительного покрова России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 203–221.
4. 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.
5. Барталев С.А., Лупян Е.А. Исследования и разработки ИКИ РАН по развитию методов спутникового мониторинга растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 197–214.

Картография и геоинформатика

Шихов А.Н., Семакина А.В.

6. Белоусова А.П., Брыжко И.В. Анализ зарастания сельскохозяйственных угодий на территории Пермского края по спутниковым снимкам Landsat // ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: мат. Межд. конф. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2021. Т. 27. Ч. 4. С. 150–161.
7. Гаврилюк Е.А., Ершов Д.В. Методика совместной обработки разносезонных изображений Landsat-TM и создания на их основе карты наземных экосистем Московской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. №4. С. 15–23.
8. Ершов Д.В., Миртова И.А., Гудкова Д.А. Анализ динамики лесов Московской области по космическим снимкам для целей геоэкологического мониторинга // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2014. № 1. С. 78–82.
9. ИАС «Лесной диспетчер Пермского края» // URL: <http://gis.rkomi.ru/fires59> (дата обращения: 31.01.2022).
10. Интерпретация комбинаций каналов данных Landsat TM / ETM+ // URL: <https://gis-lab.info/qa/landsat-bandcomb.html> (дата обращения: 31.01.2022).
11. Хамедов В.А., Копылов В.Н., Полищук Ю.М., Сугаипова А.Н., Шимов С.В. Создание карты лесов Ханты-Мансийского округа на основе космических снимков среднего разрешения // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса, 2009. Т. 6. № 2. С. 474–478.
12. Шихов А.Н., Абдуллин Р.К., Семакина А.В. Картографирование подверженности лесов гибели от пожаров и ветровалов (на примере территории Урала) // Геодезия и картография. 2020. Т. 81. № 4. С. 19–30.
13. Шихов А.Н., Герасимов А.П., Пономарчук А.И., Перминова Е.С. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения: учеб. пособие / Перм. гос. нац. иссл. ун-т. Пермь, 2020. 191 с. [Электронное издание]. URL: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchuk-perminova-tematicheskoe-deshifrovanie-i-interpretaciya-kosmicheskikh-snimkov.pdf>. (дата обращения: 31.01.2022).
14. Шихов А.Н., Зарипов А.С. Многолетняя динамика потерь лесов от пожаров и ветровалов на северо-востоке Европейской России по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. №. 7. С. 114–128.
15. Arino O., Bicheron P., Achard F., Latham J., Witt R., Weber J.-L. GlobCover: the most detailed portrait of Earth // European Space Agency Bulletin. 2008. V. 136. P. 24–31.
16. Bartalev S.A., Belward A., Ershov D.V., Isaev A.S. A New SPOT4-VEGETATION Derived Land Cover Map of Northern Eurasia // International Journal of Remote Sensing. 2003. V. 24(9). P. 1977–1982.
17. Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A., Khvostikov S.A. A new locally-adaptive classification method LAGMA for large-scale land cover mapping using remote-sensing data // Remote Sensing Letters. 2014. V. 5(1). P. 55–64.
18. Bartholome E., Belward A. GLC2000: a new approach to global land cover mapping from Earth observation data // International Journal of Remote Sensing. 2005. V. 26(9). P. 1959–1977.
19. Chen Jun., Chen Jin., Liao A., Cao X., Chen L., Chen X., He C., Han G., Peng S., Lu M., Zhang W., Tong X., Mills J. Global land cover mapping at 30 m resolution: A POK-based operational approach // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2015. V. 103. P. 7–27.
20. Curtis P.G., Slay C.M., Harris N.L., Tyukavina A., Hansen M.C. Classifying drivers of global forest loss // Science. 2018. V. 361(6407). P. 1108–1111.
21. Friedl M.A., Sulla-Menashe D., Tan B., Schneider A., Ramankutty N., Sibley A., Huang X. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets // Remote Sensing of Environment. 2010. V. 114(1). P. 168–182.
22. 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. High Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // Science. 2013. V. 342. P. 850–853.
23. Krylov A., McCarty J.L., Potapov P., Loboda T., Tyukavina A., Turubanova S., Hansen M.C. Remote sensing estimates of stand-replacement fires in Russia, 2002–2011 // Environ. Res. Letters. 2014. V. 9(10). Art. no 105007.

Картография и геоинформатика

Шихов А.Н., Семакина А.В.

24. Loveland T.R., Zhu Z., Ohlen D.O., Brown J.F., Reed B.C., Yang L. An analysis of the IGBP Global Land-Cover Characterization Process // *Photogrammetric engineering and remote sensing*. 1999. Vol. 65(9). P. 1021–1032.

25. Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A.S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes // *Nature* 2016. V. 540(7633). P. 418–422.

26. Potapov P.V., Turubanova S.A., Tyukavina A., Krylov A.M., McCarty J.L., Radeloff V.C., Hansen M.C. Eastern Europe's Forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive // *Remote Sensing of Environment*. 2015. V. 159. P. 28–43.

27. Potapov P., Turubanova S., Hansen M.C., Tyukavina A., Zalles V., Khan A., Song X.-P., Pickens A., Shen Q., Cortez J. Global maps of cropland extent and change show accelerated cropland expansion in the twenty-first century // *Nature Food*. 2021. doi: 10.1038/s43016-021-00429-z (статья в печати).

28. Potapov P., Hansen M.C., Laestadius L., Turubanova S., Yaroshenko A., Thies C., Smith W., Zhuravleva I., Kotarova A., Minnemeyer S., Esipova E. The last frontiers of wilderness: Tracking loss of intact forest landscapes from 2000 to 2013 // *Sci. Advances*. 2017. V. 3(1), Art. No. e1600821

29. Shikhov A., Semakina A. Landsat-based map of the vegetation cover of the Perm region. Figshare Dataset. [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.19130813.v1> (дата обращения: 07.02.2022).

30. USGS EarthExplorer. [Электронный ресурс]. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 31.01.2022).

References

1. Baldina, E.A., Labutina, I.A. (2021), *Interpretation of aerospace images: textbook [electronic edition]*, Moscow, Dobrosvet publisher, available at: <https://bookonline.ru/node/6333> (Accessed 31 January 2022).

2. Bartalev, S.A., Egorov, V.A., Ershov, D.V., Isaev, A.S., Lupyan, E.A., Plotnikov, D.E., Uvarov, I.A. (2011), Mapping of Russia's vegetation cover using MODIS satellite spectroradiometer data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, vol. 8, no. 4, pp. 285–302.

3. Bartalev, S.A., Egorov, V.A., Zharko, V.O., Lupyan, E.A., Plotnikov, D.E., Khvostikov, S.A. (2015), Current state and development prospects of satellite mapping methods of Russia's vegetation cover, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, vol. 12, no. 5, pp. 203–221.

4. Bartalev, S.A., Egorov, V.A., Zharko, V.O., Lupyan, E.A., Plotnikov, D.E., Khvostikov, S.A., Shabanov, N.V. (2016), *Satellite-based mapping of the vegetation cover of Russia*, Moscow, Space Research Institute of RAS.

5. Bartalev, S.A., Loupian, E.A. (2013), 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*, vol. 10, no. 1, pp. 197–214.

6. Belousova, A.P., Bryzhko, I.V. (2021), Analysis of overgrowing of agricultural lands on the Perm region based on Landsat satellite images, *InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference*. Moscow, MSU, Faculty of Geography, vol. 27, part 4, pp. 150–161.

7. Gavriluk, E.A., Ershov, D.V. (2012), Method of joint processing of multi-seasonal Landsat-TM images and creation of a map of terrestrial ecosystems of the Moscow region on their basis, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, vol. 9, no. 4, pp. 15–23.

8. Ershov, D.V., Mirtova, I.A., Gudkova, D.A. (2014), Analysis of forest dynamics in the Moscow region based on satellite images for the purposes of environmental monitoring, *Proceedings of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography*, no. 1, pp. 78–82.

9. Information and analytical system "Forest dispatcher of the Perm region", available at: <http://gis.rkomi.ru/fires59> (Accessed 31 January 2022).

10. Interpretation of Landsat TM/ETM+ data band combinations, available at: <https://gis-lab.info/qa/landsat-bandcomb.html> (Accessed 31 January 2022).

11. Khamedov, V.A., Kopylov, V.N., Polishchuk, Yu.M., Sugaipova, A.N., Shimov, S.V. (2009), Forestry mapping of Khanty-Mansiysk okrug on base of middle resolution space images, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, vol. 6, no. 2, pp. 474–478.

Картография и геоинформатика

Шихов А.Н., Семакина А.В.

12. Shikhov, A.N., Abdullin, R.K., Semakina, A.V., (2020), Mapping forest areas threatened by fires and windthrows (on the example of the Ural territory), *Geodesy and cartography = Geodezia i Kartografiya*, no. 81(4), pp. 19–30.
13. Shikhov, A.N., Gerasimov, A.P. Ponomarchuk, A.I., Perminova, E.S. (2020), Thematic interpretation of satellite images of medium and high spatial resolution: textbook, Perm. state university, Perm, 191 p., available at: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchuk-perminova-tematicheskoe-deshifrovanie-i-interpretaciya-kosmicheskikh-snimkov.pdf>. (Accessed 31 January 2022)
14. Shikhov, A.N., Zaripov, A.S. (2018), Long-term dynamics of fire- and wind-related forest losses in northeast European Russia from satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, vol. 15, no. 7, pp. 114–128.
15. Arino, O., Bicheron, P., Achard, F., Latham, J., Witt, R., Weber, J.-L. (2008), GlobCover: the most detailed portrait of Earth, *European Space Agency Bulletin*, vol. 136, pp. 24–31.
16. Bartalev, S.A., Belward, A., Ershov, D.V., Isaev, A.S. (2003), A New SPOT4-VEGETATION Derived Land Cover Map of Northern Eurasia, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 24(9), pp. 1977–1982.
17. Bartalev, S.A., Egorov, V.A., Loupian, E.A., Khvostikov, S.A. (2014), A new locally-adaptive classification method LAGMA for large-scale land cover mapping using remote-sensing data, *Remote Sensing Letters*, vol. 5(1), pp. 55–64.
18. Bartholome, E., Belward, A. (2005), GLC2000: a new approach to global land cover mapping from Earth observation data, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 26(9), pp. 1959–1977.
19. Chen, Jun., Chen, Jin., Liao, A., Cao, X., Chen, L., Chen, X., He, C., Han, G., Peng, S., Lu, M., Zhang, W., Tong, X., Mills, J. (2015), Global land cover mapping at 30 m resolution: A POK-based operational approach, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 103, pp. 7–27.
20. Curtis, P.G., Slay, C.M., Harris, N.L., Tyukavina, A., Hansen, M.C. (2018), Classifying drivers of global forest loss, *Science*, vol. 361(6407), pp. 1108–1111.
21. Friedl, M.A., Sulla-Menashe, D., Tan, B., Schneider, A., Ramankutty, N., Sibley, A., Huang, X. (2010), MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets, *Remote Sensing of Environment*, vol. 114(1), pp. 168–182.
22. 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, pp. 850–853.
23. Krylov, A., McCarty, J.L., Potapov, P., Loboda, T., Tyukavina, A., Turubanova, S., Hansen, M.C. (2014), Remote sensing estimates of stand-replacement fires in Russia, 2002–2011, *Environmental Research Letters*, vol. 9(10), art. no 105007.
24. Loveland, T.R., Zhu, Z., Ohlen, D.O., Brown, J.F., Reed, B.C., Yang, L. (1999), An analysis of the IGBP Global Land-Cover Characterization Process, *Photogrammetric engineering and remote sensing*, vol. 65(9), pp. 1021–1032.
25. Pekel, J.-F., Cottam, A., Gorelick, N., Belward, A.S. (2016), High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes, *Nature*, vol. 540(7633), pp. 418–422.
26. Potapov, P.V., Turubanova, S.A., Tyukavina, A., Krylov, A.M., McCarty, J.L., Radeloff, V.C., Hansen, M.C. (2015), Eastern Europe’s Forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive, *Remote Sensing of Environment*, vol. 159, pp. 28–43.
27. Potapov, P., Turubanova, S., Hansen, M.C., Tyukavina, A., Zalles, V., Khan, A., Song, X.-P., Pickens, A., Shen, Q., Cortez, J. (2021), Global maps of cropland extent and change show accelerated cropland expansion in the twenty-first century, *Nature Food*. doi: 10.1038/s43016-021-00429-z (Article in Press).
28. Potapov, P. Hansen, M.C., Laestadius, L., Turubanova, S., Yaroshenko, A., Thies, C., Smith, W., Zhuravleva, I., Komarova, A., Minnemeyer, S., Esipova, E. (2017), The last frontiers of wilderness: Tracking loss of intact forest landscapes from 2000 to 2013, *Science Advances*, vol. 3(1), art. No. e1600821.
29. Shikhov, A., Semakina, A. (2022), Landsat-based map of the vegetation cover of the Perm region. Figshare Dataset, available at: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.19130813.v1> (Accessed 07.02.2022).
30. USGS EarthExplorer, available at: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (Accessed 31 January 2022).

Статья поступила в редакцию: 01.02.2022; одобрена после рецензирования: 16.02.2022; принята к опубликованию: 09.03.2022.

The article was submitted: 01 February 2022; approved after review: 16 February 2022; accepted for publication: 9 March 2022.

Информация об авторах

Information about the authors

Андрей Николаевич Шихов

к.г.н., доцент кафедры картографии и геоинформатики, Пермский государственный национальный исследовательский университет; 614990, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15

e-mail: shikhovan@gmail.com

Andrey N. Shikhov

Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Department of Cartography and GIS, Perm State University;

15 Bukireva st., Perm, 614990, Russia

Анастасия Владимировна Семакина

инженер отдела государственной инвентаризации лесов, Пермский филиал ФГБУ «Рослесинфорг»;

614990, Россия, г. Пермь, ул. Маршрутная, д. 14

e-mail: anastaiasemakina@gmail.com

Anastasia V. Semakina

Engineer, Department of State Forest Inventory, Perm Branch of the Federal State Institution 'Roslesinform';

14, Marshrutnaya st., Perm, 614990, Russia

Вклад авторов

Шихов А.Н. – формулировка идеи, подготовка и редактирование текста, валидация результатов;

Семакина А.В. – сбор данных, обработка спутниковых снимков, создание карты, валидация результатов, подготовка рисунков и отдельных разделов текста.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

Shikhov A.N. – formulation of the problem, writing (original draft preparation), reviewing and editing, validation of the results;

Semakina A.V. – data compilation, satellite data processing, mapping, validation of the results, preparing of the figures, writing (several sections of original draft).

The authors declare no conflict of interest.