

УДК: 528.88+574.42+004.93

DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-393-405

В.А. Мелкий¹, А.А. Верхотуров²

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ СОСТОЯНИЯ ЛЕСНЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ В ЗАКАЗНИКЕ «МАКАРОВСКИЙ» (САХАЛИН) ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты анализа изменения состояния лесных растительных сообществ в заказнике «Макаровский» в период с 1980 по 2020 гг. В процессе работы создана модель растительного покрова Макаровского заказника, которая позволила определять различные растительные сообщества и их состояние. Данными для построения картографической модели послужили формализованные спектральные характеристики о поверхности растительных сообществ, зафиксированные на снимках Landsat-1–7 и Sentinel-2. При проведении неконтролируемой классификации на территории ООПТ с помощью ArcGIS по спектральным характеристикам выделено 7 классов объектов. Разделение темнохвойных и лиственных лесов, выявление границ участков с различным породным составом древостоев, выделение мест вырубок производилось на основании нормализованного вегетационного индекса (NDVI). Точность определения состава древостоев по результатам дешифрирования проверялась на основе данных геоботанических исследований на территории заказника «Макаровский». В составе растительного покрова Макаровского заказника выделено 8 лесных растительных сообществ — елово-пихтовые, каменноберезовые леса, формация кедрового стланика, долинные лиственные, березовые, березово-еловые леса, редколесья, местами лиственничные леса, и 2 нелесных — формация курильского бамбука и луговая растительность. Лесные сообщества занимают 95 % территории заказника «Макаровский». Ландшафтно-климатические условия района оптимальны для произрастания елово-пихтовых лесов, которые покрывают 44 % от общей площади Макаровского заказника. На вырубках широко распространены березовые и каменноберезовые леса (39 %) заказника. Наблюдается широкое распространение вторичной сукцессии на территории Макаровского заказника. Состав древостоев в лесах заказника существенно изменился за исследуемый период в пользу молодых хвойных деревьев. Растительность в Макаровском заказнике сохранила свой естественный первозданный облик и отражает как высотную дифференциацию, так и ландшафтно-зональные особенности средней подзоны тайги Сахалина. Применение космических снимков среднего пространственного разрешения позволило достаточно точно проанализировать состояние лесов Макаровского заказника. Более детальные исследования требуют применения беспилотных летательных аппаратов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дистанционное зондирование, геоинформационное картографирование, растительные сообщества, лесные экосистемы, устойчивое развитие

¹ Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, лаборатория вулканологии и вулканопасности, ул. Науки, 1Б, г. Южно-Сахалинск, Россия, 693022, e-mail: vamelkiy@mail.ru

² Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, Центр коллективного пользования, ул. Науки, 1Б, г. Южно-Сахалинск, Россия, 693022, e-mail: ussr-91@mail.ru

Vyacheslav A. Melkiy¹, Alexey A. Verkhoturov²

**ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF CONDITION FOREST PLANT COMMUNITIES
IN THE “MAKAROVSKY” NATURE SANCTUARY (SAKHALIN ISLAND)
BY REMOTE SENSING DATA**

ABSTRACT

The results of the analysis of changes in the state of forest plant communities in the “Makarovsky” Nature Sanctuary in the period from 1980 to 2020 are presented in the article. In the process of our work there was created a model of the vegetation cover of the “Makarovsky” Sanctuary, which made it possible to determine the difference between plant communities and their condition. The data for the construction of the cartographic model were formalized spectral characteristics of the surface of plant communities recorded on Landsat-1–7 and Sentinel-2 images. In a specially protected natural area, 7 classes of objects have been identified when conducting uncontrolled classification using ArcGIS according by their spectral characteristics. The division of dark coniferous and deciduous forests, the identification of the boundaries of plots with different species composition of forest stands and the allocation of felling sites was performed on the basis of the normalized vegetation index (NDVI). The accuracy of determining the composition of forest stands based on the results of interpretation was checked by data of geobotanical research data on the territory of the “Makarovsky” Nature Sanctuary. As part of the vegetation cover of the “Makarovsky” Nature Sanctuary, 8 forest communities were identified — spruce-fir, stone-birch forests, cedar elfin formation, valley deciduous, birch, birch-spruce forests, woodlands, sometimes larch forests, and 2 non-forest communities — Kuril bamboo formation and meadow vegetation. Forest communities occupy 95 % of the territory of the “Makarovsky” Sanctuary. The landscape and climatic conditions of the area are optimal for the growth of spruce-fir forests, which cover 44 % of the total area of the “Makarovsky” Nature Sanctuary. Birch and stone-birch forests (39 %) are widespread on logged land in Sanctuary. There is a wide distribution of secondary succession in the territory of the “Makarovsky” Nature Sanctuary. The composition of forest stands in Sanctuary has changed significantly over the research period in favor of young coniferous trees. Vegetation in the “Makarovsky” Nature Sanctuary has preserved its natural pristine appearance and reflects both altitude differentiation and landscape-zonal features of the middle taiga subzone of Sakhalin. The use of satellite images of medium spatial resolution made it possible to accurately analyze the state of forests of the “Makarovsky” Sanctuary. More detailed researches require the use of unmanned aerial vehicles.

KEYWORDS: remote sensing, geoinformation mapping, plant communities, forest ecosystems, sustainable development

ВВЕДЕНИЕ

Одной из главных современных экологических проблем на Земле считается обезлесение [Imai, 2012; Myers, 2019; Кузьмичев и др., 2018]. Наиболее значимые потери лесных насаждений наблюдались в последние десятилетия в России, Канаде, США, Бразилии и Индонезии [The State..., 2016]. Вырубка и сожжение лесов ведет к снижению переработки углекислого газа в кислород, деградации почв, опустыниванию и

¹ Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern branch of Russian Academy of Sciences, Laboratory of Volcanology and volcano hazard, 1B, Nauki str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia, e-mail: vamelkiy@mail.ru

² Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern branch of Russian Academy of Sciences, Center of collective use, 1B, Nauki str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia, e-mail: ussr-91@mail.ru

уменьшению биоразнообразия. Для защиты лесных экосистем от уничтожения целесообразно создавать особо охраняемые природные территории (ООПТ) [Атаев и др., 2016; Сабиров, Сабирова, 2013].

С момента появления в России в начале 1917 г. Баргузинского заповедника сеть ООПТ страны развивалась и совершенствовалась [Чибилев, 2017]; иногда имело место сокращение числа заповедников (1951, 1961 гг.), были времена быстрого роста их численности (1990-е).

В Сахалинской области перспективы развития лесного и охотничьего хозяйства, а также ООПТ определяются долгосрочными программными документами в данной сфере, принятыми в Российской Федерации¹. Областной государственной программой предусмотрены повышение эффективности лесопользования при сохранении экологической функции лесов и обеспечение надежной охраны и восстановления биоразнообразия в пределах ООПТ регионального значения².

Достижение поставленных задач требует проведения оценки лесных ресурсов и состояния земель лесного фонда с целью обоснованного планирования и проектирования лесовосстановительных работ. Оценка состояния растительных сообществ производят с помощью моделирования процессов, происходящих в лесных экосистемах [Kolobov, Frisman, 2016; Marconi et al., 2017] на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [Gonsamo, Chen, 2016].

В свободном доступе в большом количестве имеются материалы ДЗЗ среднего пространственного разрешения (10–100 м по ГОСТ Р 59478-2021³), которые пригодны для картографирования в м-бах 1: 2 000–1: 20 000. Разрешение этих изображений недостаточно для исследования породного состава древостоев, где растительный покров сильно неоднороден. В настоящее время все более востребованными при исследованиях природной среды становятся методы аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), которые позволяют получить координатно- и высотнo-привязанную информацию о состоянии поверхности с пространственным разрешением 0,02–0,07 м [Аврунев и др., 2018; Хлебникова, Опритова, 2018].

В тематическом геоинформационном картографировании используется значительное количество ГИС [Тикунов, Цанук, 1999], позволяющих осуществлять мониторинг состояния окружающей среды; несмотря на это, оценить состояние растительного покрова удастся не всегда. Требуется глубокое понимание как специфики извлечения данных о процессах отражения и прохождения электромагнитных волн в атмосфере, клетках растений и почвах, так и особенностей системных связей в лесных сообществах. Следует тщательно подбирать технологические схемы предварительной

¹ Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 г. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 20.09.2018 г. № 1989-р (с изменениями на 28.02.2019 г.). Сайт АО «Кодекс». Электронный ресурс: <http://docs.cntd.ru/document/553806752> (дата обращения 25.01.2023).

² Государственная программа Сахалинской области «Развитие лесного комплекса, охотничьего хозяйства и особо охраняемых природных территорий Сахалинской области на 2014–2020 гг.». Утверждена Постановлением Правительства Сахалинской области от 18.07.2013 г. № 353. Официальный сайт Министерства экологии Сахалинской области. 2020. Электронный ресурс: https://ecology.sakhalin.gov.ru/dejat_elnost/lesopromyshlennyi-kompleks/strategija-razvitija/ (дата обращения 25.01.2023).

³ ГОСТ Р 59478-2021. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Требования к данным дистанционного зондирования Земли из космоса. Перечень требований к данным дистанционного зондирования Земли из космоса, получаемым с космических аппаратов оптико-электронного наблюдения в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне. Сайт «ГОСТы и стандарты». Электронный ресурс: https://standartgost.ru/g/ГОСТ_Р_59478-2021 (дата обращения 25.05.2023).

обработки снимков. Мы уделили существенное внимание решению задач выявления типов растительных сообществ заказника «Макаровский».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Государственный биологический заказник «Макаровский» создан в 1992 г. Он располагается к востоку от водораздельной линии Камышового хребта и объединяет верхнюю часть бассейнов рр. Макарова, Лесной и Лазовой. Заказник «Макаровский» (рис. 1) представляет собой охраняемую природную территорию, площадью 346,85 км², предназначенную для охраны редких и исчезающих видов растений и животных и сохранения биотопов лесных горных массивов, характерных для южной части о. Сахалин [Лобищева, Мелкий, 2010].

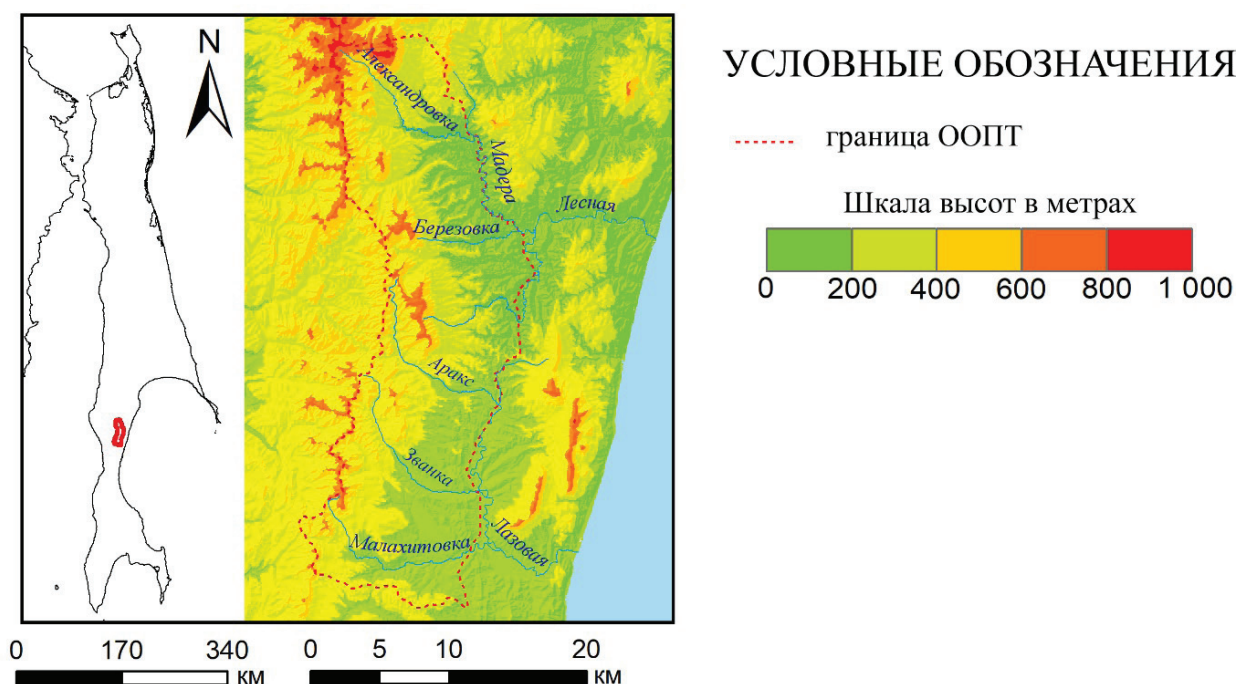


Рис. 1. Местоположение заказника «Макаровский» и схема рельефа на его территории
Fig. 1. Location of the Makarovsky Nature Sanctuary and the relief scheme on its territory

Материалами для проведения оценочных работ послужили доступные снимки с различных космических аппаратов, отличающиеся техническими характеристиками, в т. ч. различным набором каналов среднего пространственного разрешения систем Landsat¹ и Sentinel-2² в период с 1980 по 2020 гг., разномасштабные топографические карты, цифровая модель рельефа (ALOS) и данные многолетних геоботанических исследований. Для работы использовались снимки с пространственным разрешением 15–30 м, которые пригодны для создания моделей и картографических изображений м-бов 1: 3 000 – 1: 60 000.

В работе выполнена подготовка космических снимков к дальнейшим преобразованиям посредством применения функционала GIS: обработки растров, векторизации и подсчета пространственно-количественных показателей (рис. 2).

¹ Landsat Missions. United States Geological Survey (USGS), 2020. Электронный ресурс: <https://www.usgs.gov/media/images/9-millionth-scene-added-usgs-landsat-archive> (дата обращения 25.01.2023).

² Sentinel Online. European Space Agency (ESA), 2021. Электронный ресурс: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions> (дата обращения 25.01.2023).

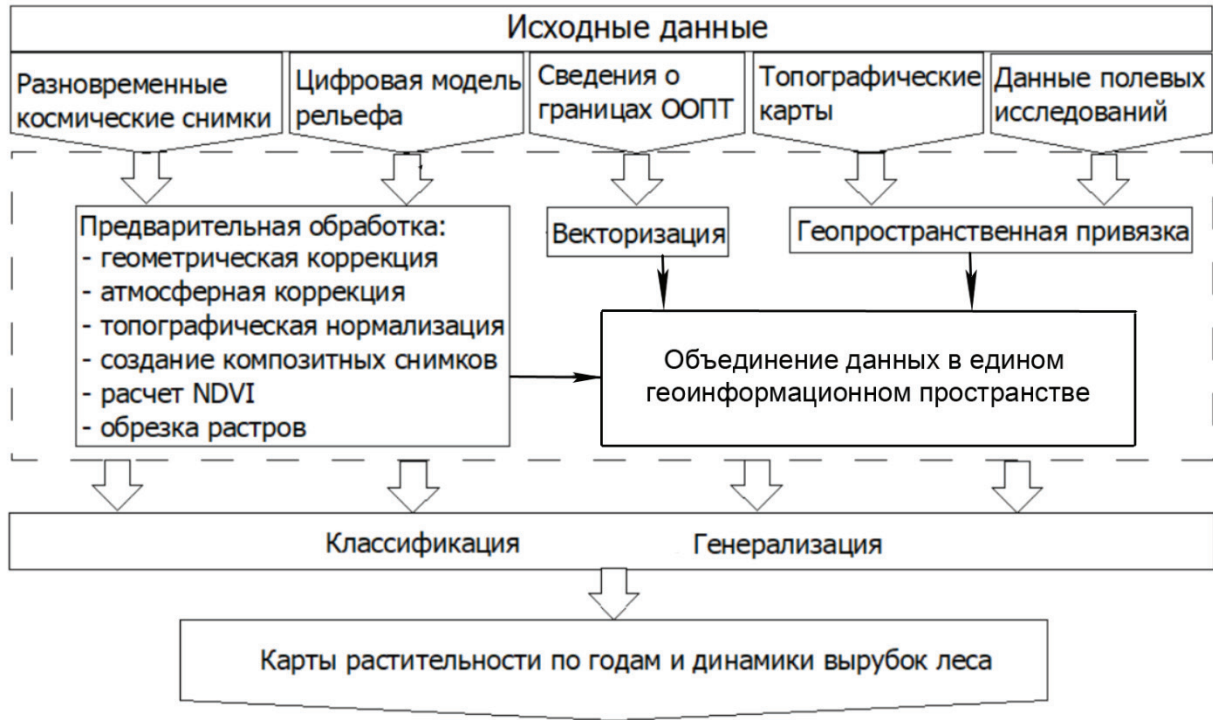


Рис. 2. Технологическая схема подготовки и обработки снимков [Верхотуров, 2020]
 Fig. 2. Technological scheme for preparing and processing images [Verkhotur, 2020]

Существует множество способов классификации растровых изображений [Shahtahmasebi et al., 2013; Барталев и др., 2015; Корзников и др., 2020; Маркова, Тикунов, 2022]. Процедура классификации в работе проведена с последовательным использованием методов классификации без обучения и с обучением. Обучающая выборка составлена из наборов пикселей, соответствующих местам выполнения геоботанических описаний. Группы пикселей, принадлежащие к различным растительным сообществам, объединены и переведены в векторный формат. Работа с векторными и растровыми данными проведена в программных продуктах QGIS 3.10, а также ArcGIS 10.4.1. Оценка состояния растительности определялась по нормализованному вегетационному индексу (NDVI), отражающему различия спектральной отражательной способности поверхности при отражении волн разной длины [Черепанов, Дружинина, 2009; Черепанов, 2011].

Расчет индекса NDVI основан на способности хлорофилла листьев высших сосудистых растений максимально поглощать излучение в красном (RED) диапазоне электромагнитного спектра и максимально отражать излучение клеточными структурами листа в ближнем инфракрасном (NIR) диапазоне электромагнитного спектра и определяется по следующей формуле:

$$NDVI = (NIR-RED) / (NIR+RED) \quad (1),$$

где NIR — отражение в ближней инфракрасной области спектра;
 RED — отражение в красной области спектра [Кравцова, 1995].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Комбинация каналов ближнего инфракрасного, красного и зеленого позволила уверенно выделить при дешифрировании типы растительного покрова на разносезонных снимках. Так, на летних снимках разделяются участки, покрытые хвойными или

лиственными породами. Для отделения лиственничных лесов от елово-пихтовых сообществ хорошо подходят снимки, полученные поздней осенью (октябрь), когда хвоя лиственниц окрашивается в желтый цвет, а лиственные породы уже сбросили листву. На зимних снимках хорошо обособляются хвойный лес, а также древостои, в составе которых участвуют хвойные деревья. На летних снимках на этих же участках отмечаются лиственные деревья. Данный факт свидетельствует о наличии сукцессии в поздних стадиях развития, когда в составе древостоев наблюдается достаточно много хвойных деревьев, которые находятся во втором ярусе или в подросте.

При проведении неконтролируемой классификации на территории ООПТ по спектральным характеристикам выделено 7 классов объектов. Среди них хорошо обособляются хвойные и березовые леса, заросли кедрового стланика, травянистая растительность (бамбучники, альпийские и долинные луга) и редколесье. Три класса объектов (березовых и каменноберезовых лесов, класс, объединяющий часть стлаников и хвойных пород, а также затененные участки лесов преимущественно на северных склонах) получились проблемными с точки зрения идентификации. Требуется дополнительная обработка с учетом специфики распределения растительности в условиях высотной поясности, а также данных геоботанических исследований.

Для проведения контролируемой классификации были использованы эталонные области, которые принадлежат к определенному классу, выявленному по данным геоботанических исследований. Значения пикселей эталонных областей в различных диапазонах спектра используются в качестве обучающих выборок для настройки алгоритмов распознавания. В результате для каждого растительного сообщества определяется свой эталон, который объединяет спектральные признаки класса принадлежащих ему пикселей. После сравнения с этими эталонами пиксели изображения отнесены к тому или иному классу.

В составе растительного покрова Макаровского заказника выделено 10 физиономических типов растительных сообществ (рис. 3). На исследованной территории в той или иной степени представлены темнохвойные, каменноберезовые и другие лиственные леса, долинные лесные комплексы, заросли кедрового стланика и курильского бамбука, луговая растительность, а также фрагменты лиственничников.

Темнохвойные леса покрывают 44 % площади заказника «Макаровского» и являются характерной растительной средой в бассейнах рр. Лесной и Лазовой. Такой же лес формирует подзону в центральной части сахалинской тайги [Крестов и др., 2004]. Климатический фон территории является благоприятным для роста и развития темнохвойных лесов.

Основные площади коренных каменноберезовых лесов расположены в горах выше ельников, образуя отдельный высотный растительный пояс, а также в сообществе с курильским бамбуком встречаются на выположенных водоразделах. Каменноберезники тянутся в виде узких и неровных лент, которые поднимаются до высоты 650–750 м над уровнем моря, вклиниваясь языками в пояс кедрового стланика. В настоящее время каменноберезники, встречающиеся вне пояса своего распространения, представляют чаще всего производные сообщества и находятся на различной стадии восстановительных сукцессий.

Кедровостланиковые сообщества распространены на горных склонах и хребтах, образуя самостоятельный растительный пояс, расположенный выше каменноберезового. В верхней части Камышового хребта кедровый стланик сплошным ковром покрывает вершины и отроги.

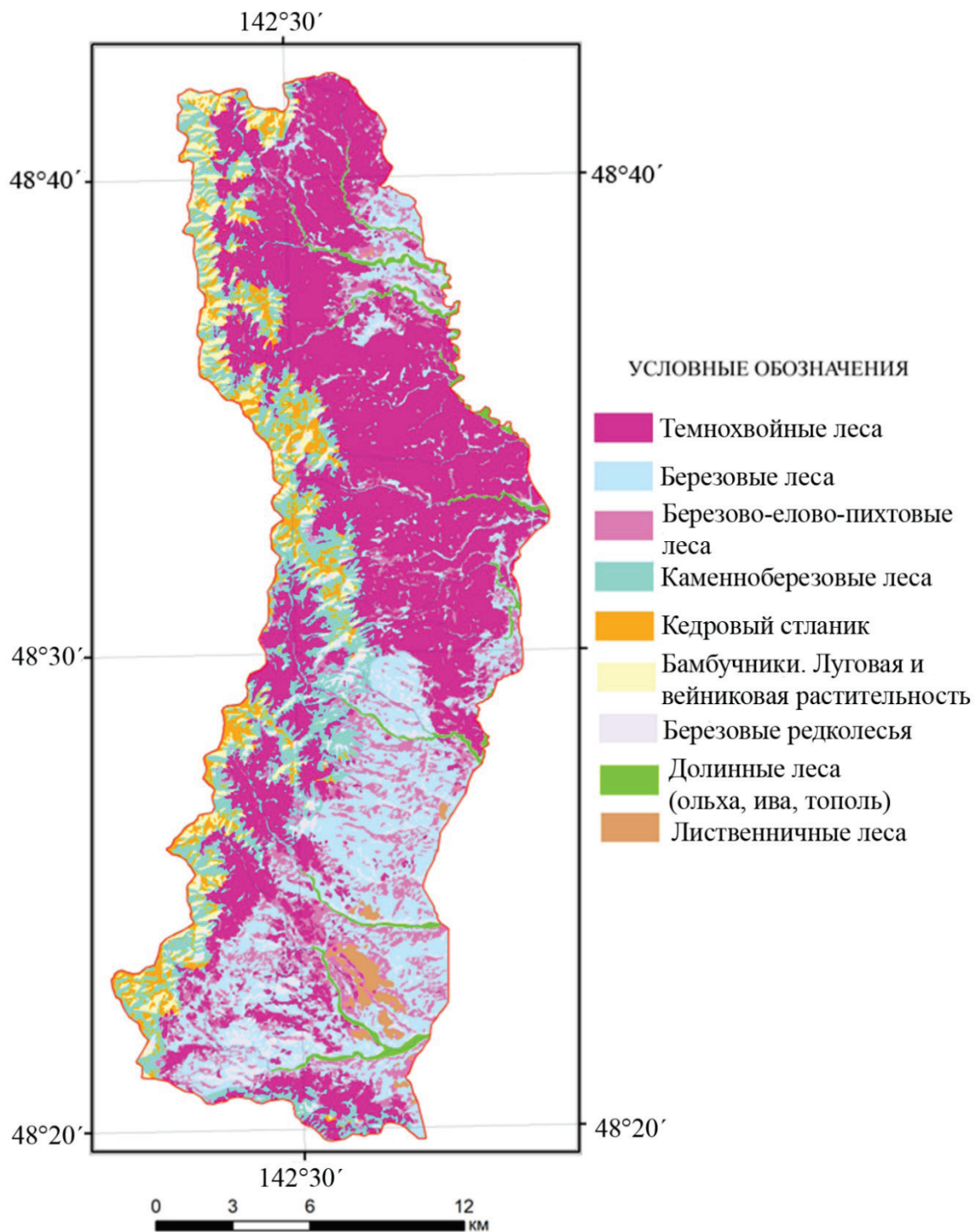


Рис. 3. Современные растительные сообщества заказника «Макаровский»
Fig. 3. Current state of plant associations of the "Makarovsky" Nature Sanctuary

Долинные леса распространены локально и небольшими участками, занимают чуть более 2% площади исследованной территории. Они, как правило, располагаются по поймам и вдоль берегов рек и их притоков.

Формация курильского бамбука чаще всего формируется в высокогорных комплексах. Бамбук также участвует в составе темнохвойных лесов и горных каменноберезников.

Лиственный леса в основном приурочены к заболоченным низинам. Однако в связи с гористым характером большей части территории этой подзоны, болотные комплексы развиты очень слабо.

Луговая растительность на территории Макаровского заказника, в связи с особыми природными условиями, не имеет столь масштабного распространения, как лесная. Как правило, эти луга имеют вторичное происхождение, возникают на месте сведенной лесной растительности, в основном после сплошных рубок.

Дешифрирование космических снимков территории заказника «Макаровский» позволило выявить значительную пестроту спектральных свойств поверхности, отражающих состояние растительности в его пределах [Сабиров и др., 2009]. По яркостным признакам в красном, ближнем инфракрасном диапазоне отчетливо разделились территории с различными растительными формациями. Съёмочные системы используемых спутников получают изображения в диапазонах, позволяющих решать поставленные в работе задачи. Результаты дешифрирования не противоречат информации, полученной ранее при исследованиях растительности по космическим изображениям [Лобищева, Мелкий, 2010; Верхотуров, Мелкий, 2020].

Динамика сукцессии растительности после вырубок и пожаров определена и охарактеризована на больших площадях по данным дистанционного зондирования, что позволяет понять характер данного процесса. Анализ экологического состояния территории заказника «Макаровский» выполнен на основе исследования изменений показателя фотосинтетически активной биомассы (рис. 4). Вегетационный индекс (NDVI) характеризует параметры растительности, которые рассчитываются для каждого пикселя снимка в красной и ИК-зонах спектра (табл. 1).

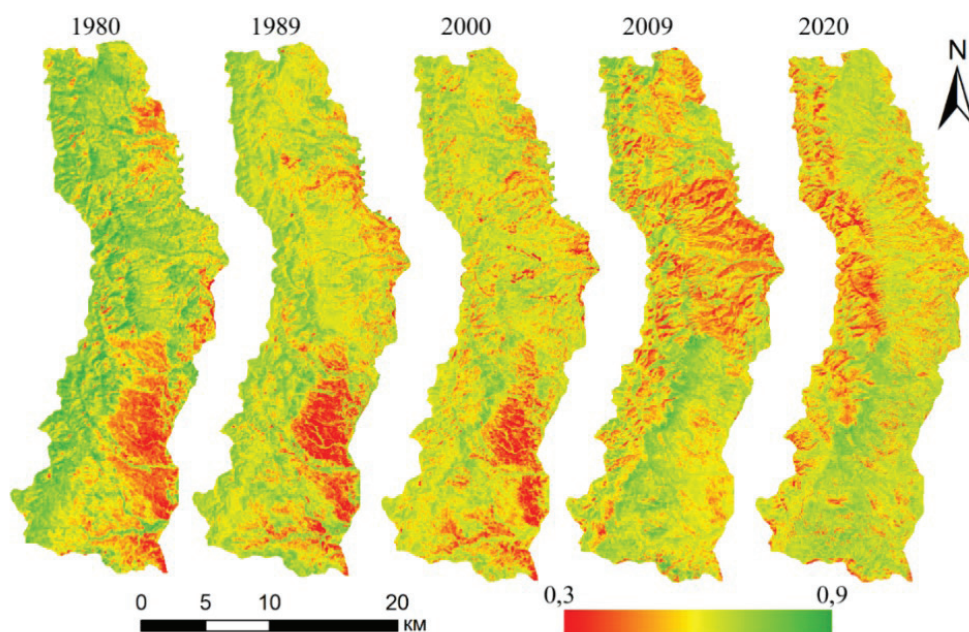


Рис. 4. Изменение фитомассы растительных сообществ в заказнике «Макаровский» по NDVI

Fig. 4. Changes in the phytomass of plant communities in Makarovskiy nature sanctuary according to NDVI

На снимках, выполненных с интервалом в 10 лет, хорошо прослеживаются изменения в северо-восточной и юго-восточной частях заказника «Макаровский». За этот

период на этих территориях практически на всех безлесных участках сформировались березовые леса. На $\frac{1}{4}$ площади, занятой березниками, в настоящее время до 50 % древостоев составляют хвойные породы.

Табл. 1. Изменения площади, занятой растительными сообществами с различными значениями NDVI и свежих вырубок

Table 1. Changes in area occupied by plant communities with different NDVI values and fresh felling

Значение NDVI	Площадь по годам (км ²)				
	1980	1989	2000	2009	2020
0–0,2	0	0	0,0012	0,0014	0,0017
0,2–0,4	0,4370	0,1250	0,1440	1,4316	0,0864
0,4–0,6	143,9224	2,7041	6,3747	151,7517	0,8741
0,6–0,8	247,5456	231,1453	265,8041	238,7203	201,8312
0,8–1,0	0	157,9306	119,5810	0	189,1116
Площадь свежих вырубок	4,9841	0,6270	2,3625	5,2256	не отмечено

Интерпретация разновременных NDVI-сцен и синтезированных снимков позволили выявить места свежих вырубок темнохвойных лесов (рис. 5). В последние 40 лет на исследуемой территории наблюдались рубки в центральной, северо-западной и юго-западной частях.

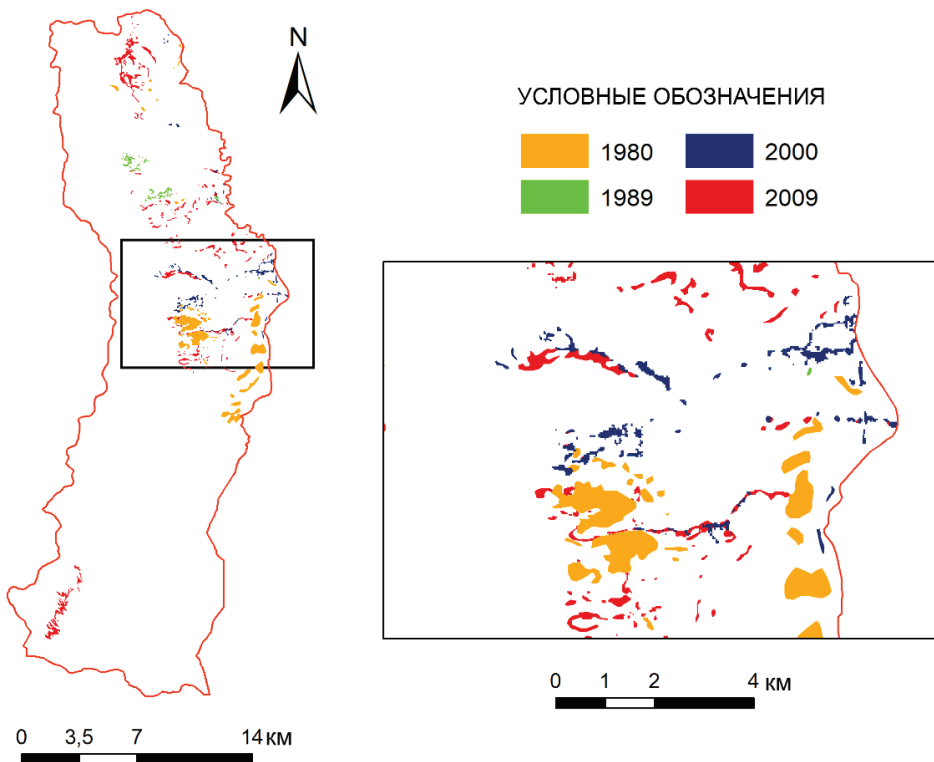


Рис. 5. Изменения площадей свежих вырубок
Fig. 5. Changing areas of fresh felling

ВЫВОДЫ

Применение космических снимков среднего пространственного разрешения позволило достаточно точно выделить ареалы растительных сообществ посредством классификации и проанализировать состояние лесов Макаровского заказника при помощи изображений, полученных с использованием NDVI. Более детальные исследования требуют применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), которые дают возможность получать изображения с очень высоким пространственным разрешением.

На месте сведенных хвойных лесов широко распространены березовые и каменноберезовые леса (39 %). На территории Макаровского заказника отмечается развитие вторичной сукцессии. За 30 лет существенно изменился состав растительных сообществ: количество хвойных деревьев на территориях, занятых вторичными лесами, заметно увеличилось, что хорошо просматривается на индексных изображениях масштабов крупнее 1: 300 000. Индексные изображения, характеризующие динамику состояния растительности в заказнике, приведены в статье в мелком масштабе, но даже они позволяют увидеть тенденции изменения растительного покрова в различных частях заказника.

Несмотря на высокую антропогенную нагрузку в лесах на территории до момента образования заказника «Макаровский», отмечается наличие хорошо сохранившихся, малонарушенных участков темнохвойной сахалинской тайги с большим биологическим и ценогическим разнообразием. Изменение флористического состава древостоев и процессы деградации отдельных видов деревьев, обусловленные факторами естественного отбора, не имеют в заказнике широкого распространения, что свидетельствует о хорошей геоэкологической обстановке в его лесах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аврунев Е.И., Ямбаев Х.К., Опритова О.А., Чернов А.В., Гоголев Д.В. Оценка точности 3D-моделей, построенных с использованием беспилотных авиационных систем. Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий (СГУГиТ), 2018. Т. 23. № 3. С. 211–228. Электронный ресурс: https://geocartography.ru/source/vestnik_ssugt/2018_3_211-228 (дата обращения 25.05.2023).

Атаев З.В., Братков В.В., Абдулаев К.А., Балгуев Т.Р., Гаджибеков М.И. Географические аспекты сохранения биологического и ландшафтного разнообразия в проектируемом Самурском национальном парке на Восточном Кавказе. Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки, 2016. Т. 10. № 3. С. 91–102. Электронный ресурс: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_27206594_96536233.pdf (дата обращения 25.05.2023).

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. № 12(5). С. 203–221.

Верхотуров А.А. Анализ изменений состояния экосистем на острове Атласова (Курильские острова). Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий (СГУГиТ), 2020. Т. 25. № 3. С. 139–150. DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-3-139-150.

Верхотуров А.А., Мелкий В.А. Картографирование растительных сообществ подзоны темнохвойных лесов юга Сахалина на основе космических съемок. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Издательство Московского университета, 2020. Т. 26. Ч. 4. С. 60–72. DOI: 10.35595/2414-9179-2020-4-26-60-72.

- Корзников К.А., Беляева Н.Г., Сандлерский Р.Б.* Моделирование лесного покрова бассейна реки Венгери на острове Сахалин с применением данных дистанционного зондирования. Лесоведение, 2020. № 5. С. 399–411. DOI: 10.31857/S002411482005006X.
- Кравцова В.И.* Космические методы картографирования: учебное пособие для вузов. М.: Издательство Московского университета, 1995. 239 с.
- Крестов П.В., Баркалов В.Ю., Таран А.А.* Ботанико-географическое районирование острова Сахалин. Растительный и животный мир острова Сахалин: Материалы Международного сахалинского проекта. Владивосток: Дальнаука, 2004. Т. 1. С. 67–92. Электронный ресурс: https://www.researchgate.net/publication/267452843_Botaniko-geograficeskoe_rajonirovanie_ostrova_Sahalin (дата обращения 25.01.2023).
- Кузьмичев Е.П., Трушина И.Г., Лопатин Е.В.* Объемы незаконных рубок лесных насаждений в Российской Федерации. Лесохозяйственная информация: электронный сетевой журнал, 2018. № 1. С. 63–77. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2018.1.06.
- Лобищева И.И., Мелкий В.А.* Оценка экологической обстановки и проблемы сохранения биоразнообразия в заказнике «Макаровский» (остров Сахалин). Вестник Томского государственного университета, 2010. № 339. С. 201–204.
- Маркова О.И., Тикунов В.С.* Новые технологии для современной геоинформатики ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2022. Т. 28. Ч. 1. С. 5–34. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-5-34.
- Сабиров Р.Н., Сабирова Н.Д.* Лесные пожары в северных районах Сахалина. Вестник Сахалинского музея, 2013. № 1 (20). С. 235–244. Электронный ресурс: https://elibrary.ru/download/elibrary_36684746_36763741.pdf (дата обращения 25.01.2023).
- Сабиров Р.Н., Сабирова Н.Д., Мелкий В.А., Белянина Я.П., Картушина Е.А.* Растительный мир сахалинского природного заказника «Макаровский». Вестник Сахалинского музея, 2009. № 16. С. 302–318. Электронный ресурс: https://elibrary.ru/download/elibrary_36684097_72675301.pdf (дата обращения 25.01.2023).
- Тикунов В.С., Цапук Д.А.* Устойчивое развитие территорий: картографо-геоинформационное обеспечение. Москва – Смоленск: Издательство СГУ, 1999. 176 с.
- Хлебникова Т.А., Опритова О.А.* Экспериментальные исследования точности построения плотной цифровой модели по материалам беспилотной авиационной системы. Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий (СГУГиТ), 2018. Т. 23. № 2. С. 119–129. DOI: 10.33764/2618-981X-2019-4-2-213-220.
- Черепанов А.С.* Вегетационные индексы. Геоматика, 2011. № 2. С. 98–102.
- Черепанов А.С., Дружинина Е.Г.* Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы. Геоматика, 2009. № 3. С. 28–32.
- Чибилев А.А.* История и современное состояние заповедного дела в России. Вестник Российской академии наук, 2017. Т. 87. № 3. С. 231–241. DOI: 10.7868/S0869587317030057.
- Gonsamo A., Chen J.M.* Circumpolar vegetation dynamics product for global change study. Remote Sensing of Environment, 2016. V. 182 (1). P. 13–26. DOI: 10.1016/j.rse.2016.04.022.
- Imai N., Titin J., Kita S., Ong R.C., Kitayama K.* Co-benefits of sustainable forest management for carbon sequestration. Co-benefits of Sustainable Forestry. Ecological Research Monographs. Springer – Tokyo, 2012. P. 129–148. DOI: 10.1007/978-4-431-54141-7_7.
- Kolobov A.N., Frisman E.Ya.* Individual-based model of spatio-temporal dynamics of mixed forest stands. Ecological Complexity, 2016. V. 27. P. 29–39. DOI: 10.1016/j.ecocom.2015.10.002.

Marconi S., Chiti T., Nolè A., Valentini R., Collalti A. The role of respiration in estimation of net carbon cycle: coupling soil carbon dynamics and canopy turnover in a novel version of 3D-CMCC forest ecosystem model. *Forests*, 2017. V. 8 (6). ID: 220. DOI: 10.3390/f8060220.

Myers S.L. China's voracious appetite for timber stokes fury in Russia and beyond. *The New York Times*, 2019. 10 April. Section A. P. 4. Web resource: <https://www.nytimes.com/2019/04/09/world/asia/chinas-voracious-appetite-for-timber-stokes-fury-in-russia-and-beyond.html> (accessed 25.01.2023).

Shahtahmassebi A., Yang N., Wang K., Moore N., Zhangquan Sh. Review of shadow detection and de-shadowing methods in remote sensing. *Chinese Geographical Science*, 2013. V. 23. No. 4. P. 403–420. DOI: 10.1007/s11769-013-0613-x.

REFERENCES

Ataev Z.V., Bratkov V.V., Abdulaev K.A., Balguez T.R., Gadzhibekov M.I. Geographical aspects of biological and landscape diversity in the designed Samur National Park in the Eastern Caucasus. Dagestan State Pedagogical University. *Natural and Exact Sciences*, 2016. V. 10. No. 3. P. 91–102 (in Russian). Web resource: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_27206594_96536233.pdf (accessed 25.05.2023).

Avrunev E.I., Yambaev Kh.K., Opritova O.A., Chernov A.V., Gogolev D.V. Accuracy evaluation of 3D models by using unmanned aerial system. *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT)*, 2018. V. 23. No. 3. P. 211–228 (in Russian). Web resource: https://geocartography.ru/source/vestnik_ssugt/2018_3_211-228 (accessed 25.05.2023).

Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Lupyay E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A. Current state and development prospects of Satellite Mapping Methods of Russia's Vegetation Cover. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 2015. V. 12. No. 5. P. 203–221 (in Russian).

Cherepanov A. Spectral characteristics of vegetation and vegetation indexes. *Geomatica*, 2011. No. 2. P. 98–102 (in Russian).

Cherepanov A., Druzhinina E. Spectral characteristics of vegetation and vegetation indexes. *Geomatica*, 2009. No. 3. P. 28–32 (in Russian).

Chibilev A.A. History and Current status of Reserve Management and Study in Russia. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2017. V. 87. No. 3. P. 181–190 (in Russian). DOI: 10.1134/S1019331617020022.

Gonsamo A., Chen J.M. Circumpolar vegetation dynamics product for global change study. *Remote Sensing of Environment*, 2016. V. 182. No. 1. P. 13–26. DOI: 10.1016/j.rse.2016.04.022.

Imai N., Titin J., Kita S., Ong R.C., Kitayama K. Co-benefits of sustainable forest management for carbon sequestration. *Co-benefits of Sustainable Forestry. Ecological Research Monographs. Springer – Tokyo*, 2012. P. 129–148. DOI: 10.1007/978-4-431-54141-7_7.

Khlebnikova T.A., Opritova O.A. Experimental studies of the dense digital model accuracy by using unmanned aerial system. *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT)*, 2018. V. 23. No. 2. P. 119–129 (in Russian). DOI: 10.33764/2618-981X-2019-4-2-213-220.

Kolobov A.N., Frisman E.Ya. Individual-based model of spatio-temporal dynamics of mixed forest stands. *Ecological Complexity*, 2016. V. 27. P. 29–39. DOI: 10.1016/j.ecocom.2015.10.002.

Korznikov K.A., Belyaeva N.G., Sandler'sky R.B. Modeling the forest cover of the Vengeri River Basin on the Sakhalin Island using the remote sensing data. *Russian Journal of Forest Science*, 2020. No. 5. P. 399–411 (in Russian). DOI: 10.31857/S002411482005006X.

- Kravtsova V.I.* Space mapping methods: a textbook for universities. Moscow: Moscow University Press, 1995. 239 p. (in Russian).
- Krestov P.V., Barkalov V.Yu., Taran A.A.* Botanical and geographical zoning of Sakhalin Island. Flora and fauna of Sakhalin Island: Proceedings of the International Sakhalin project. V. 1. Vladivostok: Dalnauka, 2004. P. 67–92 (in Russian). Web resource: https://www.researchgate.net/publication/267452843_Botaniko-geograficeskoe_rajonirovanie_ostrova_Sahalin (accessed 25.01.2023).
- Kuzmichev E.P., Trushina I.G., Lopatin E.V.* Volumes of illegal forest logging in Russian Federation. Forestry Information: Electronic Online Magazine, 2018. No. 1. P. 63–77 (in Russian). DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2018.1.06.
- Lobishcheva I.I., Melkiy V.A.* Assessment of environmental situation and problems of biodiversity conservation in the reserve Makarovskiy (Sakhalin Island). Tomsk State University Journal, 2010. No. 339. P. 201–204 (in Russian).
- Marconi S., Chiti T., Nolè A., Valentini R., Collalti A.* The role of respiration in estimation of net carbon cycle: coupling soil carbon dynamics and canopy turnover in a novel version of 3D-CMCC forest ecosystem model. Forests, 2017. V. 8. No. 6. ID 220. DOI: 10.3390/f8060220.
- Markova O.I., Tikunov V.S.* New technologies for modern geoinformatics. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2022. V. 28. Part 1. P. 5–34 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-5-34.
- Myers S.L.* China’s voracious appetite for timber stokes fury in Russia and beyond. The New York Times, 2019. 10 April. Section A. P. 4. Web resource: <https://www.nytimes.com/2019/04/09/world/asia/chinas-voracious-appetite-for-timber-stokes-fury-in-russia-and-beyond.html> (accessed 25.01.2023).
- Sabirov R.N., Sabirova N.D.* Forest fires in the Northern regions of Sakhalin. Journal of the Sakhalin Museum, 2013. V. 20. No. 1. P. 235–244 (in Russian). Web resource: https://elibrary.ru/download/elibrary_36684746_36763741.pdf (accessed 25.01.2023).
- Sabirov R.N., Sabirova N.D., Melkiy V.A., Belyanina Ya.P., Kartushina E.A.* Flora of the Sakhalin nature reserve “Makarovskiy”. Journal of the Sakhalin Museum, 2009. No. 16. P. 302–318 (in Russian). Web resource: https://elibrary.ru/download/elibrary_36684097_72675301.pdf (accessed 25.01.2023).
- Shahtahmassebi A., Yang N., Wang K., Moore N., Shen Z.* Review of shadow detection and de-shadowing methods in remote sensing. Chinese Geographical Science, 2013. V. 23. No. 4. P. 403–420. DOI: 10.1007/s11769-013-0613-x.
- Tikunov V.S., Tsapuk D.A.* Sustainable development of territories: cartographic and geoinformation support. Moscow – Smolensk: Publishing House of Smolensk State University, 1999. 176 p.
- Verkhoturov A.A.* Analysis of changes in the State of ecosystems on Atlasova Island (Kuril Islands). Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT), 2020. V. 25. No. 3. P. 139–150 (in Russian). DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-3-139-150.
- Verkhoturov A.A., Melkiy V.A.* Mapping of vegetation communities of the subzone of dark coniferous forests of the South Sakhalin based on space surveys. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: Moscow University Press, 2020. V. 26 No. 4. P. 60–72 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2020-4-26-60-72.