



Научная статья

УДК 630*5:528.85:630*9

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-2-11-28

Выявление повреждений хвойных насаждений на основе комплексного анализа результатов дистанционного зондирования Земли и наземных обследований

А.С. Алексеев[✉], *д-р геогр. наук, проф.*; *ResearcherID: F-6891-2010*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8795-2888>

Д.М. Черниковский, *д-р с.-х. наук*; *ResearcherID: I-7020-2016*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6375-3080>

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова,
Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; a_s_alekseev@mail.ru[✉],
cherndm2006@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.04.22 / Одобрена после рецензирования 03.08.22 / Принята к печати 05.08.22

Аннотация. Повреждение лесных насаждений и их гибель в результате вспышки вредных насекомых и болезней отмечаются на значительных площадях и представляют собой важную лесохозяйственную проблему. Для ее решения целесообразно использовать материалы дистанционного зондирования Земли, т. к. поврежденные и погибшие леса могут занимать большие, удаленные друг от друга территории. В статье представлена методика оценки состояния древостоев и влияния на них вредителей и болезней леса, основанная на совместной обработке данных регулярной сети пробных площадей и материалов дистанционного зондирования Земли с помощью геоинформационных технологий, дисперсионного и регрессионного анализа. Пробные площади были заложены по методике ICP-Forests и характеризовали общий фон состояния лесов на изучаемой территории северо-западной и центральной частей Ленинградской области, на которой одновременно были обнаружены очаги размножения вредителей и болезней леса. Проведена оценка применимости 2 вегетационных индексов – нормализованного дифференциального (NDVI) и коротковолнового (SWVI), а также индекса влажности растительного покрова (NDMI) и пожарного индекса (NBR), спектральных характеристик соответствующих каналов снимка Sentinel-2B для выявления очагов повреждения лесов вредителями и болезнями. Установлены статистически достоверные связи между состоянием насаждений и перечисленными индексами. Показано, что очаги размножения вредителей и болезней достоверно выявляются с помощью материалов дистанционного зондирования Земли на общем фоне состояния лесов, представленном регулярной сетью пробных площадей. Разработана тематическая карта насаждений, подразделяющая их на 2 группы классов состояния: здоровые и ослабленные; отмирающие и сухостой. Методом опорных векторов проведена оценка ее точности на основе совмещения наземных и дистанционных данных. Для оценки адекватности автоматической классификации была использована матрица ошибок с вычис-

© Алексеев А.С., Черниковский Д.М., 2024

Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

лением индекса Каппа, который оказался равным 0,878, что свидетельствует о высоком качестве классификации. Показано, что разработанная тематическая карта применима для обнаружения потенциальных очагов размножения вредителей и болезней леса на изучаемой территории.

Ключевые слова: ICP-Forests, классы состояния, дистанционные методы, Sentinel-2B, автоматическая классификация изображений, метод опорных векторов, вегетационный индекс, индекс влажности растительного покрова, пожарный индекс, тематическая карта, Ленинградская область

Благодарности: Данное исследование проводилось в рамках проекта РНФ № 21-16-00065 «Роль насекомых и патогенов в ослаблении и гибели хвойных древостоев Северо-Запада Российской Федерации: количественная оценка и мониторинг».

Для цитирования: Алексеев А.С., Черниковский Д.М. Выявление повреждений хвойных насаждений на основе комплексного анализа результатов дистанционного зондирования Земли и наземных обследований // Изв. вузов. Лесн. журнал. 2024. № 2. С. 11–28. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-11-28>

Original article

Identification of Damage to Coniferous Stands Based on Comprehensive Analysis of the Results of Remote Sensing of the Earth and Ground Surveys

Aleksandr S. Alekseev[✉], Doctor of Geography; ResearcherID: [F-6891-2010](https://orcid.org/0000-0001-8795-2888),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8795-2888>

Dmitriy M. Chernikhovskiy, Doctor of Agriculture; ResearcherID: [I-7020-2016](https://orcid.org/0000-0002-6375-3080),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6375-3080>

Saint Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, St. Petersburg, 194021, Russian Federation; a_s_alekseev@mail.ru[✉], cherndm2006@yandex.ru

Received on April 30, 2022 / Approved after reviewing on August 3, 2022 / Accepted on August 5, 2022

Abstract. Damage to forest stands and their death as a result of outbreaks of destructive insects and diseases occur over significant areas and represent an important forestry problem. To solve this problem, it is advisable to use materials from remote sensing of the Earth, since damaged and dead forests can occupy significant areas, from remote each other. The article presents a methodology for assessing the state of forest stands and the impact of forest pests and diseases on them based on the joint processing of data from a regular grid of sample plots and materials from remote sensing of the Earth via geoinformational technologies, variance and regression analyses. The sample plots have been laid according to the ICP-Forests methodology and have characterized the general background of the state of the forests in the study area of the North-Western and central parts of the Leningrad Region, where the foci of forest pests and diseases reproduction have been identified at the same time. The applicability of 2 vegetation indices – normalized difference (NDVI) and short-wave (SWVI), as well as the normalized difference moisture index (NDMI), the normalized burn ratio (NBR) and the spectral characteristics of the corresponding channels of the Sentinel-2B image to identify the foci of forest damage by pests and diseases has been assessed. Statistically significant relationships between the state of the stands and the values of the listed indices have been established. It has been shown that the foci of pests and



diseases reproduction are reliably detected using the materials from remote sensing of the Earth against the general background of the state of the forests represented by the regular grid of sample plots. A thematic map of the stands has been developed dividing them into 2 groups of state classes: healthy and weakened stands; suppressed stands and deadwood. Its accuracy was assessed via the support vector machine (SVM) on the basis of the combination of ground and remote sensing data. To assess the adequacy of the automatic classification, the error matrix and the calculation of the Cohen's Kappa coefficient have been used. The coefficient has turned out equal to 0.878, which indicates a high quality of the classification. It has been shown that the developed thematic map is applicable for detecting potential foci of forest pests and diseases reproduction in the study area.

Keywords: ICP-Forests, state classes, remote sensing methods, Sentinel-2B, automatic image classification, support vector machine (SVM), vegetation index, normalized difference moisture index (NDMI), normalized burn ratio (NBR), thematic map, the Leningrad Region
Acknowledgements: This study was conducted within the framework of the the Russian Science Foundation project no. 21-16-00065 "The Role of Insects and Pathogens in the Weakening and Death of Coniferous Forests in the North-West of the Russian Federation: Quantitative Assessment and Monitoring".

For citation: Alekseev A.S., Chernikhovskiy D.M. Identification of Damage to Coniferous Stands Based on Comprehensive Analysis of the Results of Remote Sensing of the Earth and Ground Surveys. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 2, pp. 11–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-11-28>

Введение

Повреждение лесов насекомыми и болезнями, а также борьба с ними представляют собой важные проблемы устойчивого управления лесами. На рис. 1 показаны площади лесных насаждений, погибших в 2020 г. в Российской Федерации по данным официальной статистики (<https://rosstat.gov.ru/>).

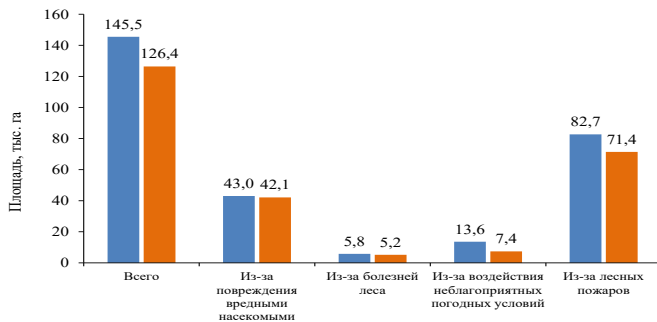


Рис. 1. Площади погибших лесных насаждений в Российской Федерации в 2020 г. (голубой цвет – всех пород, оранжевый – хвойных)

Fig. 1. The areas of dead forest stands in the Russian Federation in 2020 (blue – all species, yellow – coniferous)

Данные рис. 1 показывают, что площадь погибших от повреждения насекомыми лесов занимает 2-е место после площади повреждений, вызванных лесными пожарами. При этом почти все погибшие насаждения – хвойные. От иных причин, не указанных на рис. 1, погибли 392 га лесных насаждений, из них 295 га – хвойные. Таким образом, борьба с вредителями и болезнями леса в Российской Федерации – актуальная проблема, сопоставимая с борьбой с лесными пожарами.

Вопросы, связанные с изучением повреждений лесов по материалам дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), достаточно многообразны. К ним относятся выявление лесных участков, подвергшихся различным видам негативных воздействий (пожары, болезни, насекомые, промышленные выбросы и др.), определение границ повреждений и оценка их степени. Также представляют интерес изучение связей между характеристиками материалов ДЗЗ и поврежденных насаждений, анализ динамики повреждения и восстановления древостоев с использованием методов моделирования и прогнозирования.

Базовые сведения о применении дистанционных методов для оценки состояния поврежденных лесов приведены в ряде пособий и монографий [2, 13, 16, 29]. В этой группе источников содержится информация о возможностях выявления поврежденных насаждений по материалам ДЗЗ, отмечаются признаки поврежденных насаждений на снимках, характерные изменения отражательной способности насаждений при воздействии на них негативных факторов, рассматриваются основы лесоэнтомологического мониторинга. Считается, что дистанционными методами невозможно непосредственно обнаружить наличие вредителей и болезней в насаждении. Однако их присутствие с большой долей вероятности определяется опосредованно, через повреждение лесного полога. Под воздействием негативных факторов среды в клеточных тканях ассимиляционных побегов происходят биохимические реакции, симптомами которых служат нарушения клеточной структуры мезофилла, сопровождаемые изменениями отражательной способности и хода спектральных кривых яркости хвои (листьев), побегов, ветвей, крон или полога насаждений [13].

Определение на основе материалов ДЗЗ контрастных категорий состояния насаждений (здоровых и погибших), заметно отличающихся по спектральным характеристикам, как правило, не представляет трудностей. Но для практики большое значение также имеет выявление переходных (ослабленных и сильно ослабленных) насаждений, что сложно с методической точки зрения. В [34] отмечается, что в связи с неустойчивым проявлением на материалах ДЗЗ признаков дешифрирования ослабленных и усыхающих насаждений дистанционная оценка лесопатологического состояния лесов является одним из наименее разработанных разделов лесного дешифрирования.

Физические основы изменения спектральных характеристик насаждений, поврежденных пожарами, обобщены в работах [3, 4]. Указывается, что при повреждении (усыхании) насаждений в вегетативных органах снижается концентрация хлорофилла. Как следствие – в видимом диапазоне (особенно в красной части) снижается поглощение света и увеличивается отражательная способность. В ближнем инфракрасном диапазоне она падает, в среднем инфракрасном – повышается из-за снижения количества влаги в листе (хвое).

Изучению вспышек массового размножения насекомых-вредителей лесных насаждений и последствий этого посвящено значительное число публикаций [1, 10–12, 18, 21, 22, 39]. Во многих случаях при обследовании больших по площади территорий используются материалы ДЗЗ [10, 12, 18, 21, 30, 33, 39].

В исследованиях, проводимых в начале 2000-х гг. на территории Национального парка «Водлозерский» с целью изучения вспышек массового размножения короеда-типографа, особое внимание уделялось дистанционным

методам. В частности, оценивались возможности применения визуального дешифрирования, а также выполнения автоматических и автоматизированных классификаций [19, 21].

В статье [11] рассмотрены достоинства и недостатки распространенных подходов к оценке состояния поврежденных насаждений на основе дистанционных методов. Указаны особенности применения материалов ДЗЗ разного пространственного и спектрального разрешений с учетом визуального и автоматизированного дешифрирования. Проведено обследование участков, поврежденных короедом-типографом, с использованием съемки Landsat и GeoEye-1 разными методами.

К показателям анализа состояния лесов на основе материалов ДЗЗ относится ряд индексов – нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), коротковолновый вегетационный индекс SWVI (Short Wave Vegetation Index), разностный индекс гарей NBR (Normalized Burn Ratio) [8, 15] и др. [3, 4, 11, 20]. Для оценки содержания влаги в растительности и мониторинга засух может использоваться нормализованный разностный индекс влажности NDMI (Normalized Difference Moisture Index) – <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/sentinel-2/ndmi/>.

Нормализованный индекс NDVI широко распространен для изучения сезонной и многолетней динамики фотосинтетически активной фитомассы растительности. Коротковолновый индекс SWVI отражает стресс растительности вследствие неблагоприятных факторов среды. Данный индекс хорошо зарекомендовал себя в количественной оценке усыхания и повреждения древесной растительности в результате различных деструктивных биотических и абиотических факторов. Использование SWVI позволяет выделять участки растительности с ухудшенным санитарным состоянием, которое связано как с нарушением процесса фотосинтеза при повреждении или гибели хвои, так и с воздействием на лес атмосферной или почвенной засухи. По сравнению с NDVI коротковолновый индекс SWVI обладает более низкой сезонной изменчивостью [39]. При изучении процесса лесовосстановления индекс SWVI оказался более предпочтительным по сравнению с NDVI и NBR при разделении покрытых и непокрытых лесной растительностью земель по космическим снимкам [8].

На основе наблюдений, выполненных при обследовании пробных площадей регулярной сети ICP-Forest на территории Карельского перешейка Ленинградской области в 2019 г., установлены статистически значимые связи между агрегированными классами состояния насаждений и значениями индекса SWVI, а также получены успешные результаты автоматизированной классификации состояния насаждений методом ближайшего соседа [23, 24].

В монографии [6] перечислен ряд исследований, связанных с изучением влияния насекомых на дефолиацию растительности. Представляет интерес методика мониторинга состояния лесов, основанная на анализе отклонения индекса NDVI на основе MODIS от сезонной траектории, разработанная и апробированная на территории Швеции и Финляндии [35, 36]. Авторы методики указывают, что использование данных Sentinel-2 в будущем позволит добиться лучших результатов мониторинга.

В ряде работ применяется последовательность вегетационных индексов, определяемых на основе разновременных снимков (например, до и после по-

жара), – разностного dSWVI и относительного RdSWVI [3–5, 15]. Установлены линейные зависимости средневзвешенной категории состояния насаждений от индексов RdSWVI и RdNDVI для разных регионов. Примечательно, что для проведения подобных исследований помимо снимков, выполненных в течение вегетационного периода, рекомендуется также использовать зимние снимки [15].

Перспективно изучение и иных вегетационных индексов, потенциально отражающих состояние растительности [20], в частности индексов «зелености», рассчитываемых в узких спектральных зонах; индексов содержания пигментов (каротиноидов и антоцианинов); индексов, показывающих содержание влаги в растительном покрове. Возможно применение гиперспектральной съемки для расчета ряда индексов в узких спектральных зонах [7].

В Чехии в целях информационной поддержки правительства результаты мониторинга повреждения лесов насекомыми-вредителями (преимущественно короедом), формируемые путем обработки материалов ДЗЗ, размещаются на веб-сайтах. Для получения итоговых картографических материалов используются разнообразные источники пространственных данных – материалы наземных обследований, лесоустройства, ДЗЗ разного пространственного и временного разрешения, сведения о лесопользовании, модели высот полого и др. [33].

Принципы и подходы к изучению лесов при помощи современных материалов ДЗЗ, дистанционных методов и геоинформационных технологий (ГИС-технологий) отражены в работах [29, 32, 37].

Целью исследования является разработка методов дистанционного мониторинга состояния хвойных пород, позволяющих идентифицировать развитие патологического процесса в них на начальных стадиях.

Задачи:

разработка методики оценки состояния древостоев и влияния вредителей и болезней на основе совместной обработки данных регулярной сети пробных площадей и материалов ДЗЗ с помощью ГИС-технологий;

оценка применимости вегетационных индексов, индекса влажности растительного покрова и пожарного индекса, а также спектральных характеристик соответствующих каналов снимка Sentinel-2В для выявления повреждений лесов;

разработка тематических карт состояния (степени повреждения) насаждений методами автоматической классификации, оценка их точности посредством совмещения наземных и дистанционных данных.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования служили пробные площади, заложенные на территории Северо-Западного и Рощинского лесничеств, Лисинской части Учебно-опытного лесничества и Гатчинского лесничества Ленинградской области в вегетационный период 2021 г. Выбор модельной территории обусловлен представленностью характерных для Северо-Запада типов леса с преобладанием хвойных насаждений и разными уровнями антропогенной нагрузки. Леса Карельского перешейка испытывают значительные рекреационные нагрузки и характеризуются стабильно самыми худшими средними значениями показате-

лей на всей сети мониторинга ICP-Forests [9]. На территории Лисинской части Учебно-опытного лесничества уровень антропогенной нагрузки считается относительно низким.

При проведении полевых работ по оценке состояния хвойных насаждений использовалась методика ICP-Forests (<http://icp-forests.net/page/icp-forests-manual>), дополненная классической методикой лесопатологических обследований. На каждой пробной площади, на постоянном пункте учета (ППУ), фиксировалось центральное дерево, для которого осуществлялась координатная привязка, затем по 4 сторонам света на расстоянии 25 м от центрального дерева выбирались 4 точки – точки учета. Вокруг каждой из них отмечались 6 ближайших деревьев 1-го и 2-го классов Крафта и определялась их категория состояния. Затем в квадрате, углы которого соответствовали 4 точкам учета, проводился пересчет всех хвойных деревьев с диаметром от 8 см и более. Для каждого дерева определялись категория состояния, наличие вредителей и их видовой состав, отмечались гнили, плодовые тела грибов, механические повреждения и нарушения развития.

Также были использованы результаты наземного мониторинга выявленных в процессе полевых работ очагов массового размножения стволовых вредителей (далее – очагов повреждения). Основными стволовыми вредителями были короед-типограф *Ips typographus* и черные усачи *Monochamus spp.*

Применялись материалы наземных обследований 74 ППУ (25 в ельниках и 29 в сосняках Карельского перешейка, а также 20 в ельниках на территории Лисинской части Учебно-опытного лесничества Ленинградской области). Кроме того, учтены результаты наземного наблюдения за 10 очагами повреждения (9 очагами на территории Карельского перешейка, 1 – в Гатчинском районе). Общее количество обследованных участков составило 84. Далее участки с очагами повреждения были разделены на части в соответствии с площадью одного полигона ППУ (0,3 га). Так был сформирован набор из 143 участков-строк в базе данных: 74 ППУ и 69 участков очагов повреждения. Эта информация использовалась при проведении статистического анализа и автоматизированной классификации материалов ДЗЗ.

С помощью сервиса <https://earthexplorer.usgs.gov/> получены космические снимки Sentinel-2B (уровень обработки Level-1C) модельной территории за период с мая по ноябрь 2021 г. Использовались следующие спектральные каналы: B4 – красный (Red, центральная длина волны – 665 нм), B8 – ближний инфракрасный (NIR, 833 нм), B8A – «узкий» ближний инфракрасный (Narrow NIR, 864 нм), B11 – средний инфракрасный (SWIR, 1610 нм), B12 – средний инфракрасный (SWIR, 2186 нм). Материалы съемки (22 ноября 2021 г.) 3 сцен Sentinel-2B объединены в единое многозональное изображение.

Совмещение и анализ пространственных данных выполнялись средствами ГИС QGIS. Координаты центров ППУ, определенные средствами GPS при проведении наземных обследований, экспортировались в ГИС. Вокруг сформированных по координатам точек строились буферные зоны радиусом 30 м. В качестве атрибутов векторных полигонов указывались номер ППУ, средний класс состояния и краткие таксационные характеристики, полученные в результате наземных обследований. Средствами ГИС для каждой пробной площади были

определены средние значения спектральных яркостей по отдельным каналам, а также рассчитаны средние значения индексов.

Расположение пробных площадей на изучаемой территории показано на рис. 2.



Рис. 2. Расположение пробных площадей на модельной территории, покрытой съемкой Sentinel-2B. Красными точками показаны ППУ и очаги повреждения

Fig. 2. The location of sample plots in the model area covered by the Sentinel-2B survey. The red dots show the permanent stations and the damage foci

Индексы NDVI, SWVI, NDMI и NBR рассчитывались на основе материалов съемки Sentinel-2B по формулам:

$$\begin{aligned} \text{NDVI} &= (B8 - B4) / (B8 + B4); \\ \text{SWVI} &= (B8 - B11) / (B8 + B11); \\ \text{NDMI} &= (B8A - B11) / (B8A + B11); \\ \text{NBR} &= (B8 - B12) / (B8 + B12). \end{aligned}$$

Связь классов состояния древостоев и индексов оценивалась с помощью методов математической статистики (корреляционного, дисперсионного и регрессионного анализа) в программах MS Excel и Statgraphics.

Для построения тематической карты с целью выявления потенциальных мест расположения очагов повреждения лесов вредителями и болезнями проводилась автоматизированная классификация спутникового снимка, представленного на рис. 2, методом опорных векторов (SVM – Support Vector Machine) [27, 31]. При классификации рассматривались 2 группы насаждений: здоровые, ослабленные и умеренно ослабленные (ППУ); отмирающие, свежий сухостой и старый сухостой (очаги повреждения). Классификация проводилась в ГИС Saga [26, 28].

Для выполнения автоматизированной классификации исходный набор данных в ГИС был случайным образом разделен на 2 части – тренировочную (58 участков) и тестовую (85). Тренировочная часть использовалась для обучения программы по алгоритму SVM, тестовая – для оценки качества классификации. Последняя осуществлялась путем построения и анализа матрицы ошибок и расчета индекса Каппа [17, 25].

Результаты исследования и их обсуждение

С целью определения характеристик материалов ДЗЗ, значимых при выявлении поврежденных насаждений, проведена оценка динамики спектральных яркостей отдельных каналов и индексов для пробных площадей с мая по ноябрь 2021 г. (рис. 3 и 4).

Однозначно установить причины естественного варьирования спектральных яркостей и вегетационных индексов здоровых насаждений затруднительно. Варьирование значений индексов и спектральных яркостей может быть обусловлено динамикой содержания хлорофиллов в хвое [14]. Причинами многолетней динамики спектральных яркостей насаждений становятся также различия в стадиях лесообразования, типе леса, доле хвойных пород в составе [38].

Важным практическим вопросом данного исследования является выяснение характеристик материалов ДЗЗ, позволяющих отличать поврежденные насаждения от здоровых и ослабленных. Сложность решения такой задачи состоит во временном «отставании» признаков повреждения насаждений на материалах ДЗЗ от фактического состояния насаждения, отмечаемого при наземном обследовании. Так, при обследовании очагов повреждения в ноябре 2021 г. отмечалось, что больше 1/2 деревьев заселены 2-м поколением типографа. Активное заселение этих насаждений вредителями происходило в течение всего вегетационного периода. Полное усыхание древостоев в выявленных очагах прогнозировалось в 2022 г. Но на период обследования внешних признаков повреждений насаждения на материалах ДЗЗ не наблюдалось.

Если по графикам изменения спектральных яркостей отдельных каналов (рис. 3) трудно установить закономерности, характерные для поврежденных насаждений, то на графиках динамики индексов (рис. 4) такая тенденция видна: расхождения средних значений между ослабленными (ППУ) и усыхающими (очаги повреждения) насаждениями начинают явно прослеживаться с начала осени и затем усиливаются. Эта закономерность также подтверждается результатами дисперсионного анализа.

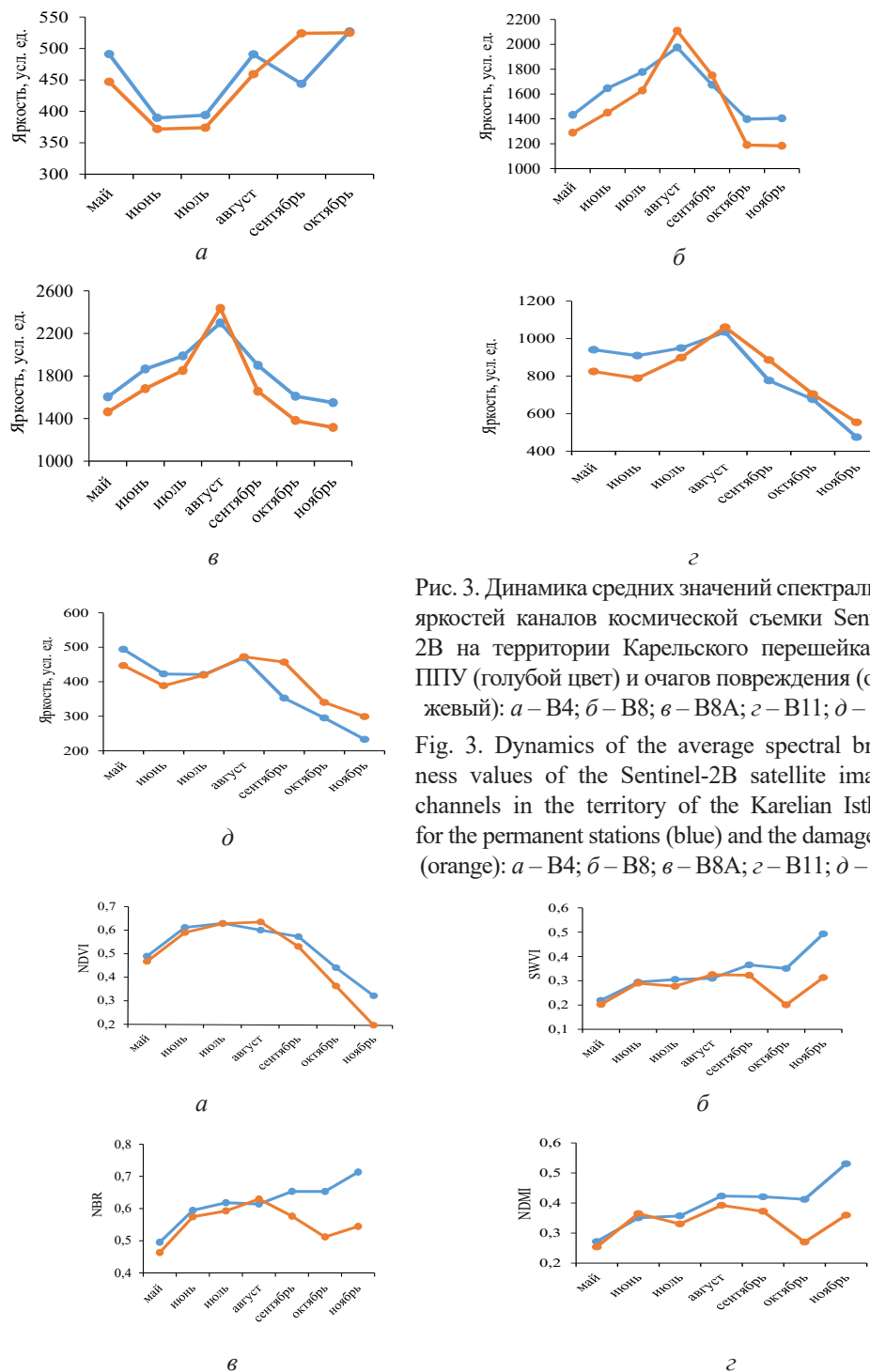


Рис. 3. Динамика средних значений спектральных яркостей каналов космической съемки Sentinel-2B на территории Карельского перешейка для ППУ (голубой цвет) и очагов повреждения (оранжевый): а – В4; б – В8; в – В8А; г – В11; д – В12

Fig. 3. Dynamics of the average spectral brightness values of the Sentinel-2B satellite imagery channels in the territory of the Karelian Isthmus for the permanent stations (blue) and the damage foci (orange): а – В4; б – В8; в – В8А; г – В11; д – В12

Рис. 4. Динамика средних значений индексов на территории Карельского перешейка для ППУ (голубой цвет) и очагов повреждения (оранжевый): а – NDVI; б – SWVI; в – NBR; г – NDMI

Fig. 4. Dynamics of the average index values in the territory of the Karelian Isthmus for the permanent stations (blue) and the damage foci (orange): а – NDVI; б – SWVI; в – NBR; г – NDMI

В табл. 1 и на рис. 5 приведены результаты дисперсионного анализа различий индексов ППУ и индексов очагов повреждения.

Таблица 1

Результаты дисперсионного анализа различий индексов SWVI, NDVI, NDMI и NBR для древостоев регулярной сети пробных площадей и очагов повреждения

The results of the variance analysis of the differences in the SWVI, NDVI, NDMI and NBR indices for the stands of the regular grid of sample plots and damage foci

Источник изменчивости	Сумма квадратов отклонений	Число степеней свободы	Средний квадрат	Критерий Фишера	Вероятность ошибки
<i>SWVI</i>					
Между группами	1,0205	1	1,0205	356,03	0
Внутри групп	0,4041	141	0,0029	–	–
<i>Всего</i>	1,4246	142	–	–	–
<i>NDVI</i>					
Между группами	0,4912	1	0,4912	98,88	0
Внутри групп	0,7005	141	0,0050	–	–
<i>Всего</i>	1,1917	142	–	–	–
<i>NDMI</i>					
Между группами	0,9297	1	0,9297	374,58	0
Внутри групп	0,3500	141	0,0025	–	–
<i>Всего</i>	1,2797	142	–	–	–
<i>NBR</i>					
Между группами	0,7919	1	0,7919	254,24	0
Внутри групп	0,4392	141	0,0031	–	–
<i>Всего</i>	1,2311	142	–	–	–

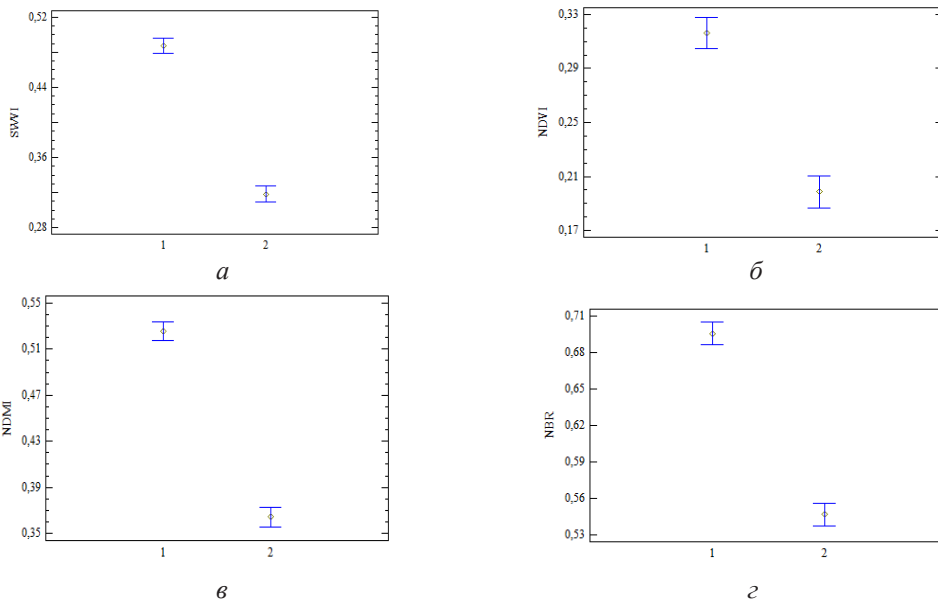


Рис. 5. Средние значения и их 95%-е доверительные интервалы индексов SWVI (а), NDVI (б), NDMI (в) и NBR (г) для древостоев регулярной сети пробных площадей (1) и очагов повреждения (2)

Fig. 5. The average values and their 95% confidence intervals of the SWVI (a), NDVI (б), NDMI (в) and NBR (г) indices for the stands of the regular grid of sample plots (1) and damage foci (2)

Данные табл. 1 и рис. 5 показывают, что все 4 индекса позволяют статистически достоверно выявлять очаги повреждения леса на фоне текущего состояния древостоев изучаемой территории. Во всех случаях 95%-е доверительные интервалы средних значений индексов не пересекаются для ППУ и очагов повреждения и отношение средних значений достигает 1,6 для индекса NDVI и 1,53 для индекса SWVI. Наивысшие значения критерия Фишера получены для индексов NDMI и SWVI. По совокупности этих оценок наиболее подходит для выявления очагов повреждения коротковолновый вегетационный индекс SWVI.

Начиная с сентября между вегетационными индексами и классами состояния насаждений отмечаются регрессионные связи с достаточно высокими коэффициентами детерминации. В табл. 2 приведены результаты регрессионного анализа связи классов состояния насаждений с индексами в ноябре.

Таблица 2

Результаты линейного и нелинейного регрессионного анализа классов состояния насаждений и значений индексов SWVI, NDVI, NDMI, NBR
The results of the linear and nonlinear regression analysis of the stands state classes and the SWVI, NDVI, NDMI and NBR index values

Индекс	Линейная регрессия, класс состояния = $b - a \cdot \text{индекс}$	Нелинейная регрессия, класс состояния = $a - (b / (1 + c \cdot \exp(-d \cdot \text{индекс})))$
SWVI	$5,92 - 7,1 \cdot \text{SWVI}$ ($R^2 = 66,43$)	$5,1 - (4,2 / (1 + 53,20 \cdot \exp(-9,59 \cdot \text{SWVI})))$ ($R^2 = 71,3$)
NDVI	$4,85 - 6,78 \cdot \text{NDVI}$ ($R^2 = 48,49$)	$5,18 - (4,39 / (1 + 8,81 \cdot \exp(-7,91 \cdot \text{NDVI})))$ ($R^2 = 49,42$)
NDMI	$6,25 - 7,21 \cdot \text{NDMI}$ ($R^2 = 67,19$)	$5,14 - (5,02 / (1 + 73,23 \cdot \exp(-8,67 \cdot \text{NDMI})))$ ($R^2 = 72,66$)
NBR	$7,22 - 6,73 \cdot \text{NBR}$ ($R^2 = 62,38$)	$5,17 - (6,36 / (1 + 196,71 \cdot \exp(-7,22 \cdot \text{NBR})))$ ($R^2 = 68,89$)

Примечание: a, b, c и d – коэффициенты уравнений; R^2 – коэффициент детерминации, %.

Из данных табл. 2 следует, что более точно класс состояния насаждений описывается нелинейной зависимостью от индексов. Наиболее тесная нелинейная связь существует между средним классом состояния насаждений на пробных площадях и индексами NDMI и SWVI (с коэффициентами детерминации более 70 %).

Помимо выявления связей между классами состояния и спектральными характеристиками материалов ДЗЗ важно определение пространственного расположения поврежденных участков. Формирование тематических карт состояния (повреждения) насаждений может выполняться как на основе регрессионных зависимостей классов состояния от характеристик материалов ДЗЗ, так и на основе результатов автоматизированной классификации космических снимков по состоянию насаждений.

Результат классификации и тематическая карта для 2 групп классов состояния насаждений продемонстрированы на рис. 6, матрица ошибок приведена в табл. 3.

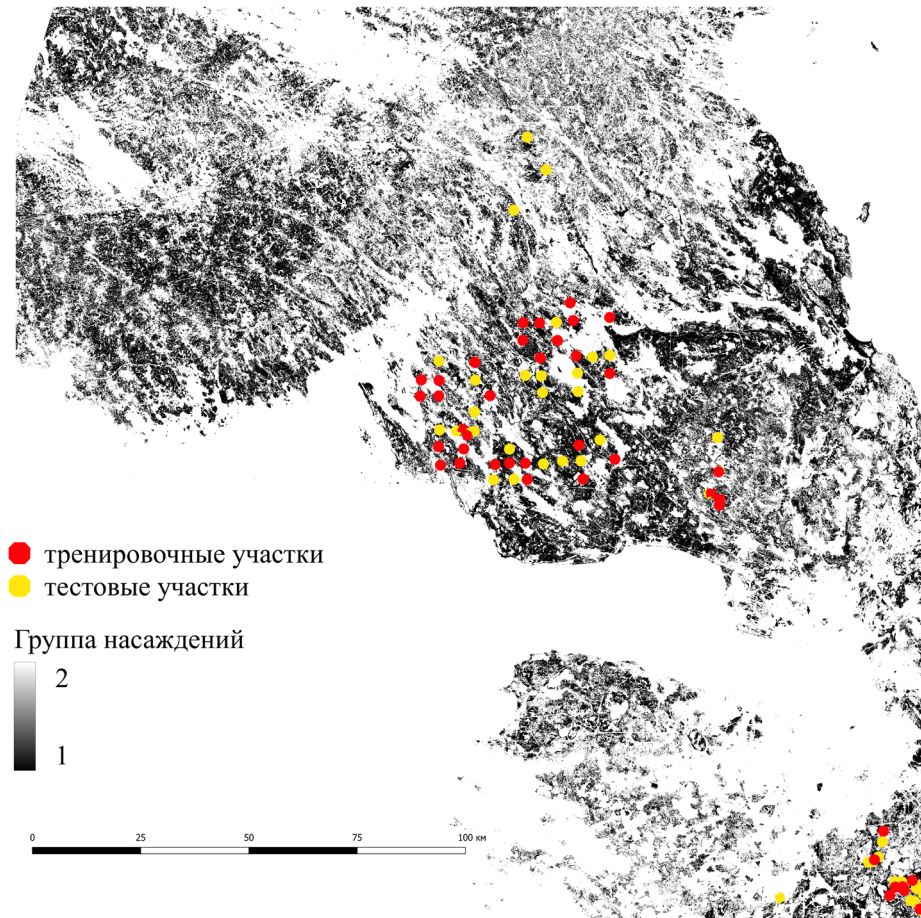


Рис. 6. Тематическая карта результатов классификации состояния насаждений методом опорных векторов по группам классов состояния: 1 – здоровые, ослабленные, умеренно ослабленные; 2 – отмирающие, свежий и старый сухостой

Fig. 6. The thematic map of the results of the stands state classification via the support vector machine (SVM) for two groups of state classes: 1 – healthy, weakened and moderately weakened; 2 – suppressed, fresh and old deadwood

Таблица 3

Матрица ошибок автоматизированной классификации спутникового снимка
The error matrix for the automated classification of the satellite image

Результаты классификации	Фактические наземные данные			
	1*	2*	Сумма	Ошибка пропуска
1*	32	0	32	0
2*	5	48	53	0,094
Сумма	37	48	85	
Ошибка дополнения	0,135	0		

*1 – здоровые, ослабленные, умеренно ослабленные насаждения; 2 – отмирающие, свежий и старый сухостой. Согласованность (точность) – 0,941; случайная согласованность – 0,516; индекс Каппа – 0,878.

Данные табл. 3 показывают высокую степень точности автоматизированной классификации спутникового снимка по 2 группам классов состояния методом опорных векторов. Точность классификации составила 0,941, индекс Каппа – 0,878. Поэтому тематическая карта, построенная по результатам такой классификации на основе совместной обработки материалов космической съемки и наземных обследований, применима для обнаружения потенциальных очагов повреждения лесных экосистем. Источниками повреждений при этом могут быть болезни, воздействие насекомых, лесные пожары, неблагоприятные погодные условия и иные причины.

Выводы

Результаты проведенного анализа позволяют сделать следующие выводы относительно возможностей выявления на актуальных спутниковых снимках очагов повреждения леса стволовыми вредителями:

1. Для получения наиболее достоверных результатов материалы ДЗЗ должны анализироваться совместно с данными наземных обследований, которые необходимы для проведения автоматизированной классификации.

2. Для выявления сильно поврежденных (усыхающих) насаждений могут быть использованы вегетационные индексы NDVI и SWVI, а также индексы влажности растительного покрова NDMI и пожарный индекс NBR. Наиболее подходящим для выявления очагов повреждения является коротковолновый вегетационный индекс SWVI.

3. Отличие значений всех индексов для усыхающих насаждений от значений для здоровых начинает проявляться с начала осени. К концу этого сезона отличия усиливаются и становятся статистически достоверными.

4. Между состоянием насаждений и характеристиками материалов ДЗЗ существуют достоверные статистические связи, что подтверждается результатами дисперсионного и регрессионного анализа.

5. Тематическое картирование насаждений по 2 группам классов состояния (здоровые и ослабленные; отмирающие и сухостой) методом опорных векторов дало положительные результаты с высокой степенью точности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ахматович Н.А., Селиховкин А.В., Магдеев Н.Г. Управление рисками в Республике Татарстан: вредители и болезни основных лесобразующих пород // Изв. вузов. Лесн. журн. 2015. № 1. С. 21–34.

Akhmatovich N.A., Selikhovkin A.V., Magdeev N.G. Risk Management in the Republic of Tatarstan: Pests and Diseases of the Main Forest Forming Plants. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2015, no. 1, pp. 21–34. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2015.1.21>

2. Аэрокосмические методы в охране природы и в лесном хозяйстве / под ред. В.И. Сухих, С.Г. Сеницына. М.: Лесн. пром-сть, 1979. 287 с.

Aerospace Methods in Nature Conservation and Forestry. Ed. by V.I. Sukhikh, S.G. Sinitsyna. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1979. 287 p. (In Russ.).

3. Барталев С.А., Егоров В.А., Крылов А.М., Стыценок Ф.В., Ховратович Т.С. Исследование возможностей оценки состояния поврежденных пожарами лесов по дан-

ным многоспектральных спутниковых измерений // Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7, № 3. С. 215–225.

Bartalev S.A., Egorov V.A., Krylov A.M., Stytsenko F.V., Khovratovich T.S. The Evaluation of Possibilities to Assess Forest Burnt Severity Using Multi-Spectral Satellite Data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space, 2010, vol. 7, no. 3, pp. 215–225. (In Russ.).

4. *Барталев С.А., Стыценко Ф.В., Егоров В.А., Луян Е.А.* Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.

Bartalev S.A., Stytsenko F.V., Egorov V.A., Loupian E.A. Satellite-Based Assessment of Russian Forest Fire Mortality. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2015, no. 2, pp. 83–94. (In Russ.).

5. *Барталев С.А., Стыценко Ф.В., Хвостиков С.А., Луян Е.А.* Методология мониторинга и прогнозирования пирогенной гибели лесов на основе данных спутниковых наблюдений // Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 6. С. 176–193.

Bartalev S.A., Stytsenko F.V., Khvostikov S.A., Loupian E.A. Methodology of Post-Fire Tree Mortality Monitoring and Prediction Using Remote Sensing Data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space, 2017, vol. 14, no. 6, pp. 176–193. (In Russ.). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-6-176-193>

6. *Воробьев О.Н., Курбанов Э.А., Демисева Е.Н., Меньшиков С.А., Али М.С., Смирнова Л.Н., Тарасова Л.В.* Дистанционный мониторинг устойчивости лесных экосистем / под общ. ред. проф. Э.А. Курбанова. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2019. 166 с.

Vorobiev O.N., Kurbanov E.A., Demisheva E.N., Menshikov S.A., Ali M.C., Smirnova L.N., Tarasova L.V. *Remote Monitoring of Forest Ecosystems Sustainability*. Ed. by prof. E.A. Kurbanov. Yoshkar-Ola, Volga State University of Technology, 2019. 166 p. (In Russ.).

7. *Григорьева О.В.* Наблюдение деградации лесов по данным гиперспектрального аэро- и космического зондирования // Исследование Земли из космоса. 2014. № 1. С. 43–48.

Grigoryeva O.V. Observation of Forest Degradation Using Hyperspectral Data Aerial and Satellite Sensing. *Earth Observation and Remote Sensing*, 2014, no. 1, pp. 43–48. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S020596141306002X>

8. *Карпов А., Васке Б.* Метод отнесения земель к землям, занятым лесной растительностью, по аэрокосмическим снимкам Landsat // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 3. С. 83–92.

Karpov A., Waske B. Method for Transferring Non-Forest Cover to Forest Cover Land Using Landsat Imageries. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2020, no. 3, pp. 83–92. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-3-83-92>

9. *Князева С.В., Эйдлина С.П.* Картографическая оценка динамики показателей состояния древесных растений северо-западных регионов России // Вопр. лесн. науки. 2018. Т. 1(1). С. 1–33.

Knyazeva S.V., Eydlina S.P. Cartographic Estimation of Tree Parameter Dynamics in Russian Northwest Regions. *Voprosy lesnoy nauki* = Forest Science Issues, 2018, vol. 1(1), pp. 1–33. (In Russ.). <https://doi.org/10.31509/2658-607X-2018-1-1-1-33>

10. *Ковалев А.В.* Анализ устойчивости лесных насаждений к повреждениям сибирским шелкопрядом по данным дистанционного зондирования // Сиб. лесн. журн. 2021. № 5. С. 71–78.

Kovalev A.V. Analysis of Forest Stands Resistance to Siberian Silkmoth Attack According to Remote Sensing Data. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2021, no. 5, pp. 71–78. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20210508>

11. *Крылов А.М., Соболев А.А., Владимирова Н.А.* Выявление очагов короеда-типографа в Московской области с использованием снимков Landsat // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2011. № 4. С. 54–60.

Krylov A.M., Sobolev A.A., Vladimirova N.A. Revealing of Centers *Ips typographus* in Moscow Region with Use of Pictures Landsat. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2011, no. 4, pp. 54–60. (In Russ.).

12. Малахова Е.Г., Крылов А.М. Усыхание ельников в Клинском лесничестве Московской области // Изв. СамНЦ РАН. 2012. Т. 14, № 1(8). С. 1975–1978.

Malakhova E.G., Krylov A.M. The Fir Groves Drying in Klinsky Forestry of Moscow Oblast. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 14, no. 1(8), pp. 1975–1978. (In Russ.).

13. Методы мониторинга вредителей и болезней леса / под общ. ред. В.К. Тузова. М.: ВНИИЛМ, 2004. 200 с.

Methods for Monitoring Forest Pests and Diseases. Ed. by V.K. Tuzov. Moscow, VNIILM Publ., 2004. 200 p. (In Russ.).

14. Силкина О.В., Винокурова Р.И. Сезонная динамика содержания хлорофиллов и микроэлементов в формирующейся хвое *Abies sibirica* и *Picea abies* // Физиология растений. 2009. Т. 56, № 6. С. 864–870.

Silkina O.V., Vinokurova R.I. Seasonal Dynamics of Chlorophyll and Microelement Content in Developing Conifer Needles of *Abies sibirica* and *Picea abies*. *Fiziologiya Rasteniy* = Russian Journal of Plant Physiology, 2009, vol. 56, no. 6, pp. 864–870. (In Russ.).

15. Стыценок Ф.В., Барталев С.А., Букась А.В., Ершов Д.В., Сайгин И.А. Возможности пролонгированной оценки постпожарного состояния хвойных вечнозеленых лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 5. С. 217–227.

Stytsenko F.V., Bartalev S.A., Bukas A.V., Ershov D.V., Saigin I.A. The Possibilities of Prolonged Burnt Severity Assessment of Evergreen Coniferous Forest Using Multi-Spectral Satellite Data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space, 2019, vol. 16, no. 5, pp. 217–227. (In Russ.). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-5-217-227>

16. Сухих В.И. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. 392 с.

Sukhikh V.I. *Aerospace Methods in Forestry and Landscape Construction*. Yoshkar-Ola, MarSTU Publ., 2005. 392 p. (In Russ.).

17. Токарева О.С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли. Томск: ТПУ, 2010. 148 с.

Tokareva O.S. *Processing and Interpretation of the Earth Remote Sensing Data*. Tomsk, TPU Publ., 2010. 148 p. (In Russ.).

18. Федотова Е.В., Заречнева А.И. Пространственно-временная динамика вспышки массового размножения сибирского шелкопряда в темнохвойных древостоях Горного Алтая // Журн. СФУ. Сер.: Техника и технологии. 2017. Т. 10, № 6. С. 747–757.

Fedotova E.V., Zarechneva A.I. Spatial-Temporal Dynamics of Siberian Silkmoth Outbreak in Dark Needle Coniferous Forest in Altay Mountains. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii* = Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 2017, vol. 10, no. 6, pp. 747–757. (In Russ.). <https://doi.org/10.17516/1999-494X-2017-10-6-747-757>

19. Хумала А.Э., Полевой А.В., Шалаев В.С., Галкин Ю.С., Щербаков А.Н., Нальдеев Д.Ф., Никула А., Ройнинен Х. Оценка возможности применения аэрокосмических методов для мониторинга лесного покрова в Национальном парке «Водлозерский» // Водлозерские чтения: естественнонаучные и гуманитарные основы природоохранной, научной и просветительской деятельности на охраняемых природных территориях Русского Севера: материалы науч.-практ. конф., посвящ. 15-летию Нац. парка «Водлозерский», Петрозаводск, 27–28 апр. 2006 г. Петрозаводск: КарНЦ, 2006. С. 106–112.

Khumala A.E., Polevoy A.V., Shalaev V.S., Galkin Yu.S., Shcherbakov A.N., Naldeev D.F., Nikula A., Rojnenin H. Assessment of the Possibility of Using Aerospace Methods for Monitoring Forest Cover in the «Vodlozersky» National Park. *Vodlozersky Readings: Natural Science and Humanitarian Foundations of Environmental, Scientific and Educational Activities in Protected Natural Areas of the Russian North*: Materials of the Scientific and Practical Conference Dedicated to the 15th Anniversary of the “Vodlozersky” National Park (Petrozavodsk, April 27–28, 2006). Petrozavodsk, Karelian Research Centre Publ., 2006, pp. 106–112. (In Russ.).

20. Черепанов А.С., Дружинина Е.Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // Геоматика. 2009. № 3. С. 28–32.

Cherepanov A., Druzhinina E. Spectral Characteristics of Vegetation and Vegetation Indexes. *Geomatica = Geomatics*, 2009, no. 3, pp. 28–32. (In Russ.).

21. Шаталов А.В., Жирин В.М., Сухих В.И., Эйдлиня С.П., Шалаев В.С. К оценке повреждения лесов Национального парка «Водлозерский» по космическим изображениям // Водлозерские чтения: естественнонаучные и гуманитарные основы природоохранной, научной и просветительской деятельности на охраняемых природных территориях Русского Севера: материалы науч.-практ. конф., посвящ. 15-летию Нац. парка «Водлозерский», Петрозаводск, 27–28 апр. 2006 г. Петрозаводск: КарНЦ, 2006. С. 102–106.

Shatalov A.V., Zhirin V.M., Sukhikh V.I., Eydlina S.P., Shalaev V.S. To the Assessment of Damage to the Forests of the «Vodlozersky» National Park Based on Satellite Images. *Natural Science and Humanitarian Foundations of Environmental, Scientific and Educational Activities in Protected Natural Areas of the Russian North*. Materials of the Scientific and Practical Conference Dedicated to the 15th Anniversary of the “Vodlozersky” National Park (Petrozavodsk, April 27–28, 2006). Petrozavodsk, Karelian Research Centre Publ., 2006, pp. 102–106. (In Russ.).

22. Шелуха В.П., Шошин В.И., Ключев В.С. Динамика санитарного состояния ельников в период кульминации размножения типографа и эффективность лесозащитных мероприятий // Изв. вузов. Лесн. журн. 2014. № 2. С. 30–39.

Shelukho V.P., Shoshin V.I., Klyuev V.S. Sanitary State Dynamics of Spruce Forests Under Culminating *Ips typographus* Reproduction and Efficiency of Forest-Protection Measures. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2014, no. 2, pp. 30–39. (In Russ.).

23. Alekseev A., Chernikhovskii D. Assessment of the Health Status of Tree Stands Based on Sentinel - 2B Remote Sensing Materials and the Short-Wave Vegetation Index SWVI. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 876, art. no. 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/876/1/012003>

24. Alekseev A., Chernikhovskii D., Vetrov L., Gurjanov M., Nikiforchin I. Determination of the State of Forests Based on a Regular Grid of Ground-Based Sample Plots and Sentinel-2B Satellite Imagery Using the k-NN («Nearest Neighbour») Method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 876, art. no. 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/876/1/012002>

25. Congalton R.G., Green K. *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data. Principles and Practices*. 3rd ed. Boca Raton, CRC Press, 2019. 346 p. <https://doi.org/10.1201/9780429052729>

26. Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development*, 2015, vol. 8, iss. 7, pp. 1991–2007. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>

27. Fan R.-E., Chen P.-H., Lin C.-J. Working Set Selection Using Second Order Information for Training Support Vector Machines. *Journal of Machine Learning Research*, 2005, vol. 6, pp. 1889–1918.

28. Fisher R., Hobgen S., Mandaya I., Kaho N., Zulkarnain N. *Satellite Image Analysis and Terrain Modelling. A Practical Manual for Natural Resource Management, Disaster Risk and Development Planning Using Free Geospatial Data and Software. Version 2. SAGA GIS 4*. Charles Darwin University, 2017. 150 p.
29. Franklin S.E. *Remote Sensing for Sustainable Forest Management*. Boca Raton, CRC Press, 2001. 424 p. <https://doi.org/10.1201/9781420032857>
30. Kharuk V.I., Ranson K.J., Kozuhovskaya A.G., Kondakov Y.P., Pestunov I.A. NOAA/AVHRR Satellite Detection of Siberian Silkmoth Outbreaks in Eastern Siberia. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, vol. 25, iss. 24, pp. 5543–5556. <https://doi.org/10.1080/01431160410001719858>
31. Hsu C.-W., Chang C.-C., Lin C.-J. *A Practical Guide to Support Vector Classification*, 2016. 16 p.
32. Lillesand T.M., Kiefer R.W., Chipman J.W. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 7th ed. New York, Wiley Inc., 2015. 736 p.
33. Lukeš P. Monitoring of Bark Beetle Forest Damages. *Big Data in Bioeconomy*. Springer Publ., 2021, chapt. 26, pp. 351–361. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71069-9_26
34. Nelson R.F. Detecting Forest Canopy Change Due to Insect Activity Using Landsat MSS. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1983, vol. 49, no. 9, pp. 1303–1314.
35. Olsson P.-O., Kantola T., Lyytikäinen-Saarenmaa P., Jönsson A.M., Eklundh L. Development of a Method for Monitoring of Insect Induced Forest Defoliation – Limitation of MODIS Data in Fennoscandian Forest Landscapes. *Silva Fennica*, 2016, vol. 50, no. 2, art. no. 1495. <https://doi.org/10.14214/sf.1495>
36. Olsson P.-O., Lindström J., Eklundh L. Near Real-Time Monitoring of Insect Induced Defoliation in Subalpine Birch Forests with MODIS derived NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 2016, vol. 181, pp. 42–53. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.03.040>
37. *QGIS and Applications in Agriculture and Forest*. Vol. 2. Ed. by N. Baghdadi, C. Mallet, M. Zribi. Wiley Inc., 2018. 368 p.
38. Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eydlina S.P. Dynamics of Spectral Brightness of the Species/Age Structure for Groups of Forest Types on Landsat Satellite Images. *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, vol. 7, pp. 788–796. <https://doi.org/10.1134/S1995425514070142>
39. Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eydlina S.P. Long-Term Dynamics of Vegetation Indices in Dark Coniferous Forest after Siberian Moth Disturbance. *Contemporary Problems of Ecology*, 2016, vol. 9, pp. 834–843. <https://doi.org/10.1134/S1995425516070118>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest