

С.В. Коптев, Х. Алабдуллахалхасно

**ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ И ДИНАМИКИ ЛЕСОВ
АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

Введение. Леса являются одним из наиболее важных возобновляемых природных ресурсов, представляя значимый источник биоразнообразия и экономических благ [Powell et al., 2013; Russian forests..., 2020]. Ухудшение состояния лесного покрова служит индикатором экологических проблем; для их оценки существует множество методов. Среди них выделяются технологии дистанционного зондирования как один из ключевых современных инструментов, применяемых в сфере охраны и защиты природных ресурсов. Эти технологии обеспечивают точную информацию о состоянии лесов [Никитина, 2018; Study..., 1998].

Разнообразие и качество материалов дистанционного зондирования значительно выросло за последние несколько лет, что облегчило их использование при составлении топографических карт, земельных кадастров, экологической оценке растительности, изучении динамики объектов и природных явлений [Сутырина, 2013; Учебно-методическая документация..., 2015].

В этом контексте было разработано множество вегетационных спектральных индексов, большинство из которых зависят от различий между красным (RED) и ближним инфракрасным (NIR) диапазонами [Tripathi, 2020]. Эти индексы широко использовались для получения характеристик растительного покрова более трех десятилетий. Разработка и усовершенствование этих индексов продолжают и, соответственно, требуют новых научных исследований [Al-Rahili, 2003]. Кроме того, разработаны современные технологии и инструменты, такие как использование лазерного сканирования для анализа и определения состояния лесов [Никитина, 2018].

Нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI считается одним из наиболее распространенных показателей, применяемых для исследования лесов [Gandhi et al., 2015]. Кроме того, в последнее время

появились так называемые биофизические показатели, которые являются ключевыми при использовании материалов ДЗЗ для описания и определения темпов испарения влаги и обмена энергией в растительном покрове Земли, а также при определении общей биомассы растений [Fassnacht et al., 2023].

Леса сухопутной территории Арктики Архангельской области имеют важное значение в экономике региона как источник сырьевых ресурсов, играют большую роль в защите континента от северных ветров. Здесь произрастают уникальные массивы старовозрастных лесов [Gromtsev, 2002].

К наиболее существенным проблемам лесов северотаежного региона в последние десятилетия относятся преобладающее чрезмерное использование природных ресурсов, изменение климата, а также пожары, ветровалы. В связи с обширностью и сложностью таежных экосистем довольно затруднительно проводить непосредственное наблюдение за происходящими процессами [Барталев и др., 2011]. Отсюда вытекает важность проведения исследований в области использования технологий дистанционного зондирования, которые позволяют оперативно оценивать текущее состояние лесов в крупных масштабах и разрабатывать необходимые мероприятия по устойчивому лесопроизводству.

Цели исследования. Исследование проведено с целью оценки изменений лесного покрова и физиологического и санитарного состояния лесов северотаежного района сухопутной территории Арктики Архангельской области с использованием обработки изображений со спутников Landsat 8 и Sentinel-2.

Снимки со спутника Landsat 8 использовались для расчета индекса NDVI; биофизические показатели и индекс PSRI были рассчитаны путем анализа и обработки снимков со спутника Sentinel-2.

Объекты и методы исследования. Объект исследования расположен на территории сухопутной зоны Арктики Архангельской области в пределах орбиты спутника Landsat 8 по пути (Path) 179 и ряду (Row) 15 (63°N 43°E,) (рис. 1).

Исследуемая территория относится к зоне притундровых лесов. Следует отметить, что большинство лесных насаждений относится к смешанным по составу. Средний состав насаждений – 4,6Е 2,5Б 2,4С 0,3Ос 0,2 Лц¹.

¹ Лесохозяйственный регламент Мезенского лесничества Архангельской области (ред. от 09.11.2022 г. № 24п).

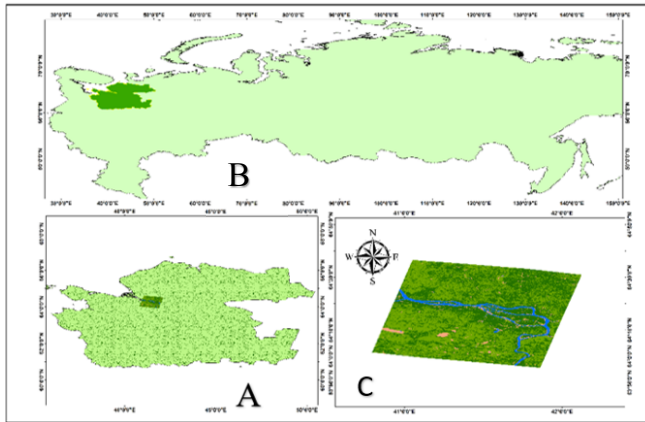


Рис. 1. Район исследований (А – в Архангельской области, В – на территории России, С – объект исследования)

Fig. 1. Research area (A – in the Arkhangelsk region, B – in Russia, C – research territory)

Спектральные показатели растительного покрова.

Индекс нормализованной разности вегетационного покрытия NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) является одним из ключевых показателей для различения растительных покровов и определения их состояния и плотности. Расчет этого индекса основан на разнице в спектральном отражении между видимым красным и ближним инфракрасным диапазонами [Алшаиби, 2017; Normalized Difference Vegetation Index, 2014]. Он рассчитывается по следующему уравнению:

$$NDVI = \frac{NIR + R}{NIR - R}, \quad (1)$$

где NIR – ближний инфракрасный диапазон; R – видимый красный диапазон.

Значения этого индекса колеблются в пределах от –1 до +1, где отрицательные значения указывают на наличие водной поверхности, значения, близкие к нулю – на скалистые участки и почву без растительного покрытия, а положительные значения – на наличие растительности [Rouse et al., 1974].

Индекс отражения старения растений (PSRI – Plant Senescence Reflectance Index) количественно характеризует состояние растительности, подвергаемой негативному воздействию. Индикатор находит применение для различных целей, включая мониторинг санитарного состояния лесов, определение их физиологического стресса. Стресс растений оценивается

на основе эффективности использования растениями фотосинтетической части солнечного света. Увеличение индикатора указывает на негативное воздействие [Gao et al., 2020].

Значения PRSI варьируют в пределах от -1 до +1, где отрицательные значения, как правило, указывают на хорошее состояние лесных насаждений [Khorrami, Kamran, 2022].

Биофизические индикаторы необходимы для оценки физиологического состояния растительности, а также для понимания динамики экосистемы [Gupta, Pandey, 2021]. Они являются ключевыми для оценки ресурсов и моделирования процессов обмена веществ и энергии между экосистемами лесов, атмосферой и гидросферой [Барталев и др., 2011]. Биофизические индексы включают:

- *Индекс площади листовой поверхности* (LAI – Leaf Area Index) – показатель, используемый для описания структуры полога насаждений, характеристики степени продуктивности условий произрастания насаждений, оценки процесса испарения и энергообмена растительности с землей. Данный индекс определяется как отношение односторонней суммарной площади поверхности листьев к единице поверхности Земли. Значения индекса LAI варьируют от 0 до 7. Чем ближе значение LAI к 7, тем выше сомкнутость крон [Weiss, Baret, 2016];

- *Индикатор доли зеленого растительного покрова* (CCC – Canopy Chlorophyll Content) отражает соотношение площади зеленого растительного покрова на данной территории и общей площади суши. Значения индикатора колеблются от 0 (открытая почва) до 600 (сомкнутый растительный покров) [García-Álvarez, Lara Hinojosa, 2022];

- *Индикатор содержания хлорофилла* (FCOVER – Fraction of Green Vegetation Cover) считается одним из наиболее важных индикаторов, характеризующих состояние насаждений. Значение индикатора колеблется от 0 до 1. Высокие значения указывают на высокую интенсивность фотосинтеза и, соответственно, хорошее состояние насаждений [Weiss, Baret, 2016]. Также данный индикатор характеризует количество азота в почве.

Непосредственное измерение этих показателей является сложной задачей и требует значительных усилий, поэтому были разработаны алгоритмы для их расчета, основанные на применении нейронных сетей (ANN), что считается самым современным и эффективным для определения перечисленных показателей [Xie et al., 2019; Gupta, Pandey, 2021].

Показатель NDVI рассчитывали на основе спутниковых изображений Landsat 8, полученных с веб-сайта Геологической службы США USGS за

летние месяцы 2013 и 2022 года (использовались снимки с низкой долей облаков). Программа ArcGIS 10.3 использовалась для проведения анализов и мониторинга изменений в лесном покрове. Полученные снимки были отображены в соответствии с системой координат UTM_38N (проекция Меркатора), а затем преобразованы в глобальную географическую координатную систему WGS 84.

Мониторинг изменений растительного покрова часто включает анализ разностей между изображениями одной территории за разные периоды времени [Meneses-Tovar, 2009; Al-Mousawi, 2014]. Одним из методов мониторинга является классификация территории с вычислением площади каждой категории за разные годы для последующего расчёта изменений [Reis, 2008]. Другой метод основан на классификации пикселей космических снимков с использованием морфологического анализа для выявления изменений [Денисова и др., 2020].

В данном исследовании был использован метод классификации на основе индексов NDVI и PSRI. Классы, основанные на значениях индекса NDVI, отражены в табл. 1. После классификации были определены доли площади каждого полученного класса относительно общей площади объекта исследования.

Таблица 1

Классификация космических изображений после расчета NDVI
Classification and separation of satellite images after NDVI calculation

Класс	Диапазон NDVI
1	NDVI < 0
2	0 < NDVI < 0,2
3	0,2 < NDVI < 0,35
4	NDVI > 0,35

Индекс PSRI был рассчитан с использованием снимков с космического аппарата Sentinel-2 и программного обеспечения SNAP 9 (Sentinel Application Platform) с использованием инструмента «band math's». Расчет осуществлялся с использованием уравнения (2):

$$PSRI = \frac{B4 - B2}{B6}, \quad (2)$$

где B2 – синий спектральный канал; B4 – красный спектральный канал; B6 – видимый и ближний инфракрасный канал.

На основе полученных значений индекса PSRI была проведена классификация территории с определением площадей лесных участков разных категорий состояния.

Биофизические показатели были рассчитаны с использованием программы SNAP 9, включающей инструмент «Биофизический процессор», разработанный Европейским космическим агентством (ESA) для оценки физических и биологических параметров растений с использованием данных от Sentinel-2.

Результаты исследования и их обсуждение. В табл. 2 и на рис. 2 показано распределение значений индекса NDVI на исследуемой территории с 2013 по 2022 год. Значения индекса в 2013 году достигали максимального значения 0,7, минимального – 0,25 и среднего – 0,30, стандартное отклонение от среднего значения составило 0,079. Это свидетельствует об однородном распределении значений индекса растительности. В 2022 году среднее значение вегетационного индекса увеличилось до 0,34 при стандартном отклонении от среднего значения 0,078, что свидетельствует о незначительном общем улучшении состояния растительного покрова за указанный период.

Таблица 2

Значения вегетационного индекса NDVI в 2013 и 2022 году

NDVI values in 2013 and 2022

Год	Минимум	Максимум	Среднее значение	Среднее квадратичное отклонение
2013	–0,25	0,70	0,31	0,080
2022	–0,24	0,60	0,34	0,078

Была определена доля изменений вегетационного индекса за учетный период (табл. 3, рис. 3). Практически без изменения остались водные поверхности (класс 1). Непригодные для ведения лесного хозяйства площади земель уменьшились незначительно – на 1,1% (класс 2).

Значительные снижения индекса (14,29%) отмечены для площадей класса 3, представляющих насаждения средней продуктивности и качественного состояния, а площади, представляющие насаждения повышенной продуктивности, увеличились на 15,49%. Это можно объяснить улучшенным ростом насаждений вторичных генераций, сформировавшихся на вырубках к 2022 году, и снижением доли перестойных насаждений.

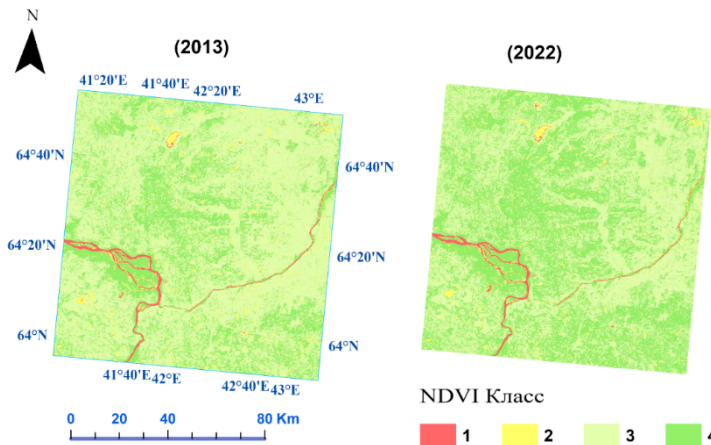


Рис. 2. Распределение значений вегетационного индекса NDVI в течение периода исследования в соответствии с классификацией (данные спутника Landsat 8)

Fig. 2. Distribution of NDVI values during the study period according to classification (Landsat 8 satellite data)

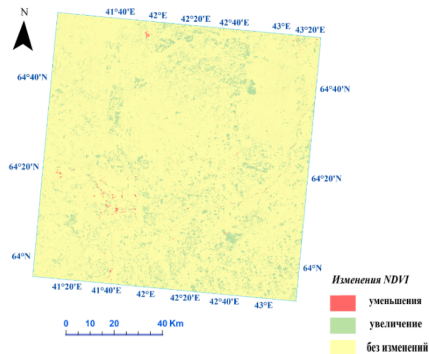


Рис. 3. Динамика вегетационного индекса NDVI

Fig. 3. Dynamics of vegetation index NDVI

Таблица 3

Изменения индекса с 2013 по 2022 год, %
Index changes from 2013 to 2022, %

Год	Класс 1	Класс 2	Класс 3	Класс 4
2022	1,27	2,1	54,66	41,97
2013	1,35	3,22	68,95	26,48
Изменения	-0,08	-1,12	-14,29	15,49

Индекс отражения старения растений (PSRI)

На рис. 4 показаны значения индекса PSRI, которые в основном близки к нулю и имеют отрицательные значения (обозначены зеленым цветом). Это говорит о хорошем качественном состоянии насаждений. На небольшой части территории индекс достигает 0,1 (обозначено желтым цветом), что указывает на переходный или средний уровень состояния. Эти значения могут быть ранними признаками деградации растений или негативного воздействия. На участках, занимающих примерно 5% от общей площади, индекс принимает положительные значения, превышающие 0,2, что указывает на физиологический стресс и снижение фотосинтеза. С течением времени это может привести к частичному или полному высыханию насаждений.

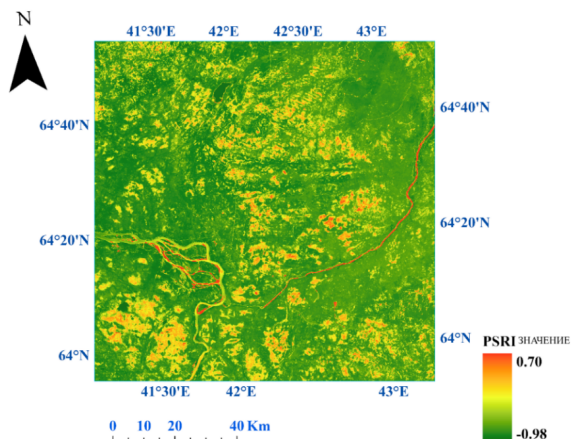


Рис. 4. Индекс отражения старения растений (PSRI) за 2022 год

Fig. 4. Senescence Reflectance Index (PSRI) for 2022

Биофизические показатели

Результаты анализа биофизических индексов (табл. 4, рис. 5–7) показали, что лесные насаждения в районе исследования находятся в среднем качественном состоянии. Средние значения биофизических индексов находятся на низком уровне. Индекс площади листовой поверхности (LAI) достиг наивысшего значения 7,4, но на небольшой площади. В основном встречаются насаждения со средним значением индекса 1,87 и стандартным отклонением 0,53. Варьирование показателя составило 28%.

Индекс содержания хлорофилла в листьях (ССС), который достиг наивысшего значения 537 при среднем содержании хлорофилла в листьях 88,61 со стандартным отклонением 38,18, имеет более высокий уровень изменчивости – 43%. Низкое среднее значение индекса указывает на преимущественно слабую концентрацию хлорофилла и снижающуюся эффективность фотосинтеза растительного покрова, что также подтвердил индекс старения растительности. Такой результат может быть следствием широкого распространения спелых и перестойных древостоев, составляющих 60–80% от покрытой лесом площади в разных частях района исследований.

Таблица 4

Значения биофизических индексов в 2022 году

Biophysical indices values for 2022

Индекс	Минимум	Максимум	Среднее	STD
LAI	0	7,46	1,87	0,53
CCC	0	537,00	88,61	38,18
FCover	0	1,00	0,54	0,14

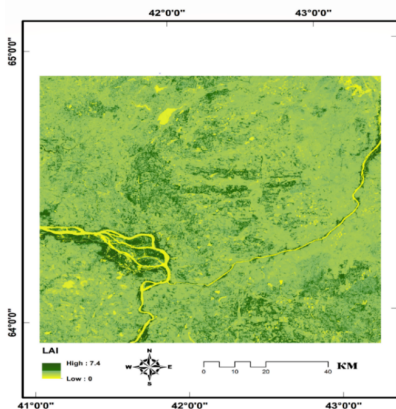


Рис. 5. Значения индекса LAI за 2022 год

Fig. 5. LAI index values for 2022

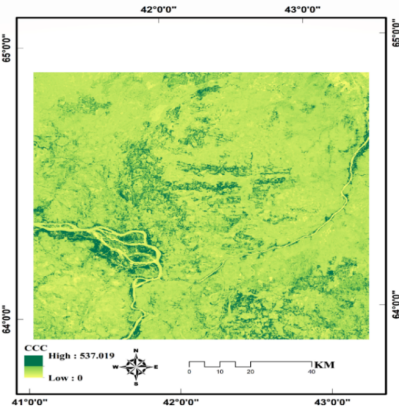


Рис. 6. Значения индекса CCC за 2022 год

Fig. 6. CCC index values for 2022

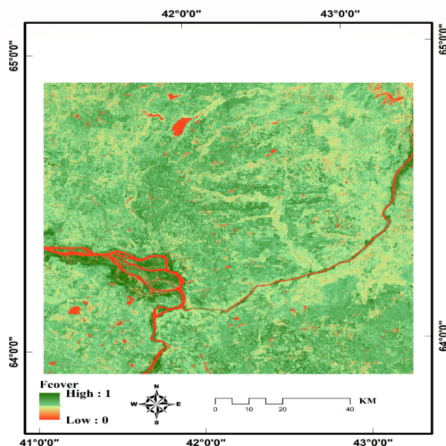


Рис. 7. Значения индекса FCover за 2022 год

Fig. 7. FCover index values for 2022

Индекс FCover показал приемлемые результаты, где максимальное значение достигло 1, но также на ограниченных площадях, в то время как среднее значение составило 0,54 со стандартным отклонением 0,14. Это соответствует также индексу растительности, который был оценен с использованием спутника Landsat 8. Это подтверждает важность и возможность использования этого показателя для анализа изменений в растительности.

Выводы. Результаты применения вегетационных индексов выявили некоторую тенденцию улучшения состояния растительного покрова в районе исследований. Анализ значений NDVI показал повышение доли покрытой лесом площади с 2013 по 2022 год, о чем говорит повышение среднего значения NDVI, что свидетельствует о положительных изменениях в экологической обстановке исследуемой территории.

Значительное увеличение лесных площадей, характеризующихся повышенной продуктивностью, и снижение площадей с ухудшенным качественным состоянием может указывать на эффективность применяемых методов управления лесами, своевременное проведение системы рубок ухода и лесовосстановления.

Отмечено наличие физиологического стресса у части насаждений, о чем свидетельствуют значения индекса старения растительности и индекса хлорофилла. Полученные результаты подтверждают необходимость даль-

нейшего изучения факторов, способствующих повышению качественного состояния насаждений и эффективности фотосинтеза в северотаежном районе и на сухопутной территории Арктики.

В исследовании подчеркивается важность применения методов дистанционного зондирования для крупномасштабного мониторинга и оценки изменений растительности на больших и отдаленных территориях северотаежного района сухопутной территории Арктики.

Необходимы дальнейшие исследования для изучения фундаментальных факторов динамики растительного покрова Севера, включая изменение климата, методы лесопользования, антропогенное воздействие, для обоснования стратегий устойчивого управления лесными ресурсами.

Сведения о финансировании исследования. Публикация подготовлена по результатам НИР, выполненных в рамках государственного задания ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований в сфере деятельности Федерального агентства лесного хозяйства (регистрационный номер темы 123022800118-4).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Алиаби А. Анализ динамики состояния лесов с использованием данных дистанционного зондирования Земли и ГИС-технологий: магистерская диссертация. Томск: Томский политехнический университет, 2017. 122 с.

Барталев С.А., Еришов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А. Основные задачи и перспективы создания системы глобального спутникового мониторинга лесов // Лесоведение. 2011. № 6. С. 3–15.

Денисова А.Ю., Егорова А.А., Сергеев В.В. Обнаружение изменений границ лесных насаждений по данным ДЗЗ // «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2020): сб. тр. по материалам VI Междунар. конф. и молодеж. шк. Самара, 2020. Т. 2. С. 15–28.

Никитина Н.А. Обзор современных методов исследования лесного покрова по данным дистанционного зондирования // Интерэкспо Гео-Сибирь: XIV Межд. науч. конгресс. Новосибирск, 2018. Т. 2. С. 174–177.

Сутырина Е.Н. Дистанционное зондирование Земли: учеб. пособие. Иркутск: ИГУ, 2013. 165 с.

Учебно-методическая документация: Мониторинг лесохозяйственной деятельности. Тюмень: ТГУ, 2015. 138 с.

Al-Mousawi I.M.H. Detection of Temporal Changes in Al-Diwaniyah Governorate Using Image Differencing Method for the Period from 2001 to 2006 // Journal of University of Babylon for Pure and Applied Sciences. 2014. Vol. 22, iss. 4. P. 1388–1401. (In Arab.)

Al-Ruhayli B. Functional Equivalence among Spectral Vegetation Indices in Estimating Vegetation Cover from Satellite Data in the Al-Hada and Al-Shafa Regions North of the Sarat Mountains // *Egyptian Journal of Environmental Change*. 2013. Vol. 5, no. 5. P. 79–104. (In Arab.)

Fassnacht F., White J., Wulder M., Næsset E. Remote Sensing in Forestry: current challenges, considerations and directions // *Forestry: An International Journal of Forest Research*. 2024. Vol. 97, iss. 1. P. 11–37. DOI: 10.1093/forestry/cpad024.

Gandhi G.M., Parthiban S., Thummalu N., Christy A. Ndvi: Vegetation change detection using remote sensing and Gis – A case study of Vellore District // *Procedia Computer Science*. 2015. Vol. 57: 3rd International Conference on Recent Trends in Computing 2015 (ICRTC-2015) (special issue). P. 1199–1210. DOI: 10.1016/j.procs.2015.07.415.

Gao Y., Quevedo A., Loya J. Forest Disturbance Detection by Landsat-Based NDVI Time Series for Ayuquila River Basin, Jalisco, Mexico // *Latin American GRSS & ISPRS Remote Sensing Conference (LAGIRS)*. Santiago, 2020. P. 82–86. DOI: 10.1109/LAGIRS48042.2020.9165583.

García-Álvarez D., Lara Hinojosa J. Global Thematic Land Use Cover Datasets Characterizing Vegetation Covers // *Land Use Cover Datasets and Validation Tools: Validation Practices with QGIS*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-90998-7>.

Gromtsev A. Natural disturbance dynamics in the boreal forests of European Russia // *Silva Fennica*. 2002. Vol. 36, no. 1. P. 41–55.

Gupta S.K., Pandey A.Ch. Spectral aspects for monitoring forest health in extreme season using multispectral imagery // *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. 2021. Vol. 24, iss. 3 (part 2). P. 579–586. DOI: 10.1016/j.ejrs.2021.07.001

Khorrami B., Kamran K.V. A fuzzy multi-criteria decision-making approach for the assessment of forest health applying hyperspectral imageries: A case study from Ramsar forest, North of Iran // *International Journal of Engineering and Geosciences*. 2022. Vol. 7. Iss. 3. P. 214–220.

Meneses-Tovar C.L. Analysis of the Normalized Differential Vegetation Index (NDVI) for the Detection of Degradation of Forest Cover in Mexico 2008 – 2009 // *Forest Resources Assessment Programme*. Rome, 2009. 29 p.

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Products by Using OCM2-GAC Sensor Data. SDAPSA; National Remote Sensing Centre, 2014. 4 p.

Powell B., Ickowitz A., McMullin S., Jamnadass R., Padoch Ch., Pinedo-Vasquez M., Sunderland T. The Role of Forests, Trees and Wild Biodiversity for Nutrition-Sensitive Food Systems and Landscapes. FAO; WHO, 2013. 25 p.

Reis S. Analyzing Land Use/Land Cover Changes Using Remote Sensing and GIS in Rize, North-East Turkey // *Sensors*. 2008. Vol. 8, iss. 10. P. 6188–6202. DOI: 10.3390/s8106188.

Rouse J.W., Hass R.H., Schell J.A., Deering D.W., Harlan J.C. Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Greenwave Effect) of Natural Vegetation. NASA/GSFC Type III Final Report. Greenbelt (MD), 1974. 390 p.

Russian forests and climate change. What Science Can Tell Us 11. European Forest Institute, 2020. 136 p.

Study of Modern Technologies Applied in Advanced Countries in the Field of Conservation and Development of Forest Wealth. Khartoum: Arab Organisation for Agricultural Development, 1998. 147 p. (In Arab.)

Treitz P., Howarth Ph. Hyperspectral remote sensing for estimating biophysical parameters of forest ecosystems // Progress in Physical Geography: Earth and Environment. 1999. Vol. 23, iss. 3. P. 359–390.

Tripathi P. Remote sensing indices and their applications // Training of Trainers on the applications of remote sensing and GIS for Afghanistan. 2020. 46 p.

Weiss M., Baret F. S2ToolBox Level 2 products: LAI, FAPAR, FCOVER. Version 1.1. National Institute of Agronomic Research, 2016. 53 p.

Xie Q., Dash J., Huete A., Jiang A., Yin G., Ding Ya., Peng D., Hall C. C., Brown L., Shi Yu., Ye H., Dong Yi., Huang W. Retrieval of crop biophysical parameters from Sentinel-2 remote sensing imagery // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2019. Vol. 80. P. 187–195.

References

Al-Mousawi I. M. H. Detection of Temporal Changes in Al-Diwaniyah Governorate Using Image Differencing Method for the Period from 2001 to 2006. *Journal of University of Babylon for Pure and Applied Sciences*, 2014, vol. 22, iss. 4, pp. 1388–1401. (In Arab.)

Al-Ruhayli B. Functional Equivalence among Spectral Vegetation Indices in Estimating Vegetation Cover from Satellite Data in the Al-Hada and Al-Shafa Regions North of the Sarat Mountains. *Egyptian Journal of Environmental Change*, 2013, vol. 5, no. 5, pp. 79–104. (In Arab.)

Alshaibi A. Analysis of the dynamics of forests using Earth remote sensing data and GIS technologies: Master's thesis. Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2017. 122 p. (In Russ.)

Bartalev S.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Lupyan E. A. Main tasks and prospects for creating a system of global satellite monitoring of forests. *Lesovedenie*, 2011, no. 6, pp. 3–15. (In Russ.)

Denisova A.Yu., Egorova A.A., Sergeev V.V. Detection of changes in the boundaries of forest plantations according to remote sensing data. «*Information Technologies and Nanotechnologies*» (ITNT-2020): mater. of VI Intern. conf. and youth school. Samara, 2020. T. 2. P. 15–28. (In Russ.)

Educational and methodological documentation: Monitoring forestry activities. Tyumen: TSU, 2015. 138 p. (In Russ.)

Fassnacht F., White J., Wulder M., Næsset E. Remote Sensing in Forestry: current challenges, considerations and directions. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 2024, vol. 97, iss. 1, pp. 11–37. DOI: 10.1093/forestry/cpad024.

Gandhi G.M., Parthiban S., Thummalu N., Christy A. Ndzi: Vegetation change detection using remote sensing and Gis – A case study of Vellore District. *Procedia Computer Science*, 2015, vol. 57: 3rd International Conference on Recent Trends in Computing 2015 (ICRTC-2015) (special issue), pp. 1199–1210. DOI: 10.1016/j.procs.2015.07.415.

Gao Y., Quevedo A., Loya J. Forest Disturbance Detection by Landsat-Based NDVI Time Series for Ayuquila River Basin, Jalisco, Mexico. *Latin American GRSS & ISPRS Remote Sensing Conference (LAGIRS)*. Santiago, 2020. P. 82–86. DOI: 10.1109/LAGIRS48042.2020.9165583.

García-Álvarez D., Lara Hinojosa J. Global Thematic Land Use Cover Datasets Characterizing Vegetation Covers. *Land Use Cover Datasets and Validation Tools: Validation Practices with QGIS*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-90998-7>.

Gromtsev A. Natural disturbance dynamics in the boreal forests of European Russia: a review. *Silva Fennica*, 2002, vol. 36, no. 1, pp. 41–55.

Gupta S.K., Pandey A.Ch. Spectral aspects for monitoring forest health in extreme season using multispectral imagery. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 2021, vol. 24, iss. 3 (part 2), pp. 579–586. DOI: 10.1016/j.ejrs.2021.07.001

Khorrami B., Kamran K.V. A fuzzy multi-criteria decision-making approach for the assessment of forest health applying hyperspectral imageries: A case study from Ramsar forest, North of Iran. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 2022, vol. 7, iss. 3, pp. 214–220.

Meneses-Tovar C.L. Analysis of the Normalized Differential Vegetation Index (NDVI) for the Detection of Degradation of Forest Cover in Mexico 2008–2009. *Forest Resources Assessment Programme*. Rome, 2009. 29 p.

Nikitina N. A. Review of modern methods for studying forest cover based on remote sensing data. Interexpo: Geo-Syberia: XIV Int. sci. congress. Novosibirsk, 2018. T. 2. P. 174–177. (In Russ.)

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Products by Using OCM2-GAC Sensor Data. SDAPSA; National Remote Sensing Centre, 2014. 4 p.

Powell B., Ickowitz A., McMullin S., Jamnadass R., Padoch Ch., Pinedo-Vasquez M., Sunderland T. The Role of Forests, Trees and Wild Biodiversity for Nutrition-Sensitive Food Systems and Landscapes. FAO; WHO, 2013. 25 p.

Reis S. Analyzing Land Use/Land Cover Changes Using Remote Sensing and GIS in Rize, North-East Turkey. *Sensors*, 2008, vol. 8, iss. 10, pp. 6188–6202. DOI: 10.3390/s8106188.

Rouse J.W., Hass R.H., Schell J.A., Deering D.W., Harlan J.C. Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Greenwave Effect) of Natural Vegetation. NASA/GSFC Type III Final Report. Greenbelt (MD), 1974. 390 p.

Russian forests and climate change. What Science Can Tell Us 11. European Forest Institute, 2020. 136 p.

Study of Modern Technologies Applied in Advanced Countries in the Field of Conservation and Development of Forest Wealth. Khartoum: Arab Organisation for Agricultural Development, 1998. 147 p. (In Arab.)

Sutyryna E.N. Remote sensing of the Earth. Irkutsk: ISU, 2013. 165 p. (In Russ.)

Treitz P., Howarth Ph. Hyperspectral remote sensing for estimating biophysical parameters of forest ecosystems. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 1999, vol. 23, iss. 3, pp. 359–390.

Tripathi P. Remote sensing indices and their applications. *Training of Trainers on the applications of remote sensing and GIS for Afghanistan*. 2020. 46 p.

Weiss M., Baret F. S2ToolBox Level 2 products: LAI, FAPAR, FCOVER. Version 1.1. National Institute of Agronomic Research, 2016. 53 p.

Xie Q., Dash J., Huete A., Jiang A., Yin G., Ding Ya., Peng D., Hall C. C., Brown L., Shi Yu., Ye H., Dong Yi., Huang W. Retrieval of crop biophysical parameters from Sentinel-2 remote sensing imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, vol. 80, pp. 187–195.

Материал поступил в редакцию 25.01.2024

Коптев С.В., Алабдуллахалхасно Х. Оценка состояния и динамики лесов Архангельской области с использованием технологий дистанционного зондирования // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 251. С. 141–157. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.141-157

Проведена оценка динамики и состояния растительного покрова в северотаежном районе сухопутной территории Арктики Архангельской области с помощью данных дистанционного зондирования Земли и с использованием вегетационных индексов. Результаты анализа индекса NDVI показали улучшение состояния растительного покрова за последние 10 лет. Сравнение значений NDVI в 2013 и 2022 г. показало, что площади насаждений со средними характеристиками сократились на 14,29%, в то время как площади насаждений повышенной продуктивности увеличились на 15,49%. Это увеличение объясняется повышенным ростом насаждений вторичных генераций, формирующихся на месте старовозрастных насаждений, повышением сомкнутости крон и увеличением относительной полноты, что является результатом эффективной реализации лесохозяйственных мероприятий, включая рубки ухода и лесовосстановление. Анализ индекса старения растительного покрова показал значения, близкие к нулю, на площади, составляющей 5% от общей площади исследования, в то время как на большей ее части были обнаружены положительные значения, превышающие 0,2, что указывает на физиологическое напряжение и начало процесса превращения хлорофилла в каротиноиды. Результаты анализа биофизических показателей свидетельствуют,

что растительный покров на исследуемой территории находится в среднем качественном состоянии. Средний индекс листовой поверхности на большей части территории исследования составил 1,87, что указывает на отсутствие высокой густоты растительности. Среднее значение хлорофиллового индекса в листьях составило 88,61, что также является низким значением и свидетельствует о слабом содержании хлорофилла, физиологическом стрессе и низкой интенсивности процесса фотосинтеза.

Ключевые слова: NDVI, биофизические показатели, сухопутная территория Арктики, ДЗЗ, динамика.

Koptev S.V., Alabdullahalkhasno H. Assessment of forest dynamics and condition in the Arkhangelsk region using remote sensing technologies and vegetation indices. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnikeskoj Akademii*, 2024, iss. 251, pp. 141–157 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.141-157

Conducted study purposed to assess the dynamics and condition of vegetation cover in North-taiga Arctic region, using the Arkhangelsk region as a case study. This involved processing satellite imagery with the calculation of several vegetation indices. The results of the NDVI analysis for 2013 revealed a maximum value of 0.7 and a minimum of -0.25 , with an average of 0.30. Values were distributed closely around the mean. By 2022, the average vegetation coverage index had increased to 0.34, suggesting an improvement in vegetation coverage over the study points. The percentage changes were calculated by comparing NDVI values over the study years. The results showed a decrease of 14.29% in areas representing moderate vegetation cover, while areas representing good vegetation cover increased by 15.49%. This increase is attributed to tree growth, improved canopy coverage, and increased vegetation density in 2022, which is a result of effective forest management practices, including thinning and reforestation measures. Analysis of the vegetation aging index indicated values close to zero in 5% of the total study area, while positive values exceeding 0.2 were observed over a significant portion of the region. These findings suggest physiological stress, partial chlorophyll degradation, and the initiation of conversion to carotenoids. The results of the analysis of biophysical indicators showed that the vegetation cover in the study area is in the average state. The average leaf area index was 1.87 over most of the study area, indicating the absence of high densities of vegetation. The average value of the chlorophyll index in the leaves was 88.61, which is also a low value and indicates weak chlorophyll content, which indicates physiological stress and low efficiency of the photosynthesis process.

Keywords: NDVI, biophysical indicators, North Taiga region, remote sensing data, dynamic detection.

КОПТЕВ Сергей Викторович – заведующий кафедрой лесоводства и лесоустройства Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, доктор сельскохозяйственных наук, доцент; главный научный сотрудник Северного научно-исследовательского института лесного хозяйства. Researcher ID: ABD-5497-2021. ORCID: 0000-0002-5402-1953.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия; 163062, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия. E-mail: s.koptev@narfu.ru

KOPTEV Sergey V. – DSc (Agriculture), Head of Silviculture and Forest Management Department Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov; Leading Researcher Northern Research Institute of Forestry. Researcher ID: ABD-5497-2021. ORCID: 0000-0002-5402-1953.

163002. Severnaya Dvina emb. 17. Arkhangelsk. Russia; 163062. Nikitova str. 13. Arkhangelsk. Russia. E-mail: s.koptev@narfu.ru

АЛАБДУЛЛАХАЛХАСНО Хасан – аспирант кафедры лесоводства и лесоустройства Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. ORCID: 0000-0003-0854-550X.

163002, набережная Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: 199213000hfa@gmail.com

ALABDULLAHALKHASNO Hasan – PhD student of the Department of Forestry and Forest Management of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. ORCID: 0000-0003-0854-550X.

163002. Severnaya Dvina emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: 199213000hfa@gmail.com