

ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ, ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ И ГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТОВ

УДК 551.583

<https://doi.org/10.25587/2587-8751-2025-1-55-67>

Оригинальная научная статья

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПАСА ДРЕВОСТОЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ALOS PALSAR НА ПРИМЕРЕ ГЕОПАРКА «ТОРАТАУ»

Е. А. Богдан^{1,2}, Л. Н. Белан^{1,2}, Р. С. Бахтиярова¹, А. Ю. Витценко¹,
И. О. Туктарова¹, Р. Р. Гумеров¹*

¹Уфимский государственный нефтяной технический университет,
г. Уфа, Россия

²Уфимский университет науки и технологий,
г. Уфа, Россия

*eavolkova@bk.ru

Аннотация

В последнее время имеют широкое распространение дистанционные методы анализа динамики и состояния древостоя.

Для соответствия критериям глобального геопарка ЮНЕСКО геопарку Торатау важно проводить исследования в части глобального изменения климата и устойчивого управления природными ресурсами.

Используя векторные данные лесоустройства 2017 года и данные статистики раstra ALOS Palsar проведен регрессионно-корреляционный анализ. Статистика растров получена с помощью модуля SAGA GIS (программа QGIS) инструмент – статистика растров в полигоны (среднее значение). Также на основании полученного регрессионного уравнения построены изображения, отражающие запас древостоя геопарка Торатау на 2017 и 2023 год.

Проведенный регрессионный анализ показал наличие значимой связи между значениями пикселей ALOS Palsar и запасами древостоя – коэффициент корреляции Пирсона $r = 0,62$, коэффициент детерминации $R^2 = 0,38$.

Результаты оценки запаса древостоя 2017 года по данным таксационных описаний) и ALOS Palsar (HV поляризация) немного различаются. Распределение максимальных значений запаса древостоя по данным ALOS Palsar также соответствует северной части геопарка, но число полигонов с максимальным значением ниже, чем по данным таксации. Диапазон максимальных значений – 279–497 м³ на га. на изображении 2023 года отмечаются участки с отрицательным запасом древостоя – они соответствуют вырубленным площадкам.

Предложенный подход может быть использован для мониторинга за рубками, фитосанитарным состоянием древостоя и воздействия рекреации на леса геопарка «Торатау»

Ключевые слова: изменение климата, дистанционное зондирование Земли, геопарк Торатау, запасы древостоя, ALOS Palsar

Для цитирования: Богдан Е. А., Белан Л. Н., Бахтиярова Р. С., Витценко А. Ю., Туктарова И. О., Гумеров Р. Р. Определение запаса древостоя с использованием спутниковых данных ALOS Palsar на примере Геопарка «Торатау». *Вестник СВФУ*. 2025;(2): 55–67. DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-55-67

DETERMINATION OF THE STAND STOCK USING ALOS PALSAR SATELLITE DATA: THE CASE OF TORATAU GEOPARK

Ekaterina A. Bogdan ^{1,2*}, Larisa N. Belan ^{1,2}, Rosa S. Bakhtiyarova¹, Anastasia Y. Vitsenko ¹,
Iren O. Tuktarova¹, Rinat R. Gumerov¹

¹Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

²Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

*eavolkova@bk.ru

Abstract

Recently, remote methods for analyzing the dynamics and condition of a stand have become widely used. In order to meet the criteria of the UNESCO Global Geopark, it is important for Toratau Geopark to conduct research on global climate change and sustainable management of natural resources.

Using vector data from the 2017 forest management and statistical data from the ALOS Palsar raster, a regression and correlation analysis was performed. Raster statistics are obtained using the SAGA GIS module (QGIS program) tool – raster statistics into polygons (average value). Also, based on the obtained regression equation, images reflecting the stock of the stand of the Toratau Geopark for 2017 and 2023 were constructed.

The regression analysis showed the presence of a significant relationship between the values of ALOS Palsar pixels and stand stocks – Pearson correlation coefficient $r = 0.62$, coefficient of determination $R^2 = 0.38$.

The results of the 2017 stand stock assessment according to the tax descriptions and ALOS Palsar (HV polarization) differ slightly. The distribution of the maximum values of the stand stock according to ALOS Palsar data also corresponds to the northern part of the geopark, but the number of polygons with the maximum value is lower than according to the taxation data. The maximum value range is 279–497 m³ per ha. in the image of 2023, areas with a negative stock of stand are marked – they correspond to the cut-down sites.

The proposed approach can be used to monitor logging, the phytosanitary condition of the stand and the impact of recreation on the forests of Toratau Geopark.

Keywords: climate change, remote sensing of the Earth, Toratau Geopark, stand stocks, ALOS Palsar

For citation: Bogdan E.A., Belan L.N., Bakhtiyarova R.S., Vitsenko A.Y., Tuktarova I.O., Gumerov R.R. Determination of the stand stock using ALOS Palsar satellite data on the example of Toratau Geopark. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*. 2025;(2):55–67. DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-55-67

Введение

Эффективность экологической политики региона во многом зависит от глубокого понимания тенденций климатических изменений и того, как на них реагируют местные экосистемы.

Леса играют ключевую роль в процессе удаления атмосферного углерода, выступая в качестве мощных депонирующих систем. Поэтому крайне важно учитывать их потенциал при разработке стратегий адаптации региона к изменениям климата.

Исторически, продуктивность растительности оценивалась преимущественно наземными методами. Эти методы также использовались для калибровки и подтверждения результатов дистанционных измерений. Наиболее масштабные исследования продуктивности растительности в Северной Евразии были проведены группой ученых из Института географии АН СССР и РАН под руководством Н.И. Базилевич [1, 2].

Для особо охраняемых природных территорий Республики Башкортостан была проведена оценка продуктивности лесов, основанная на данных лесной таксации [3, 4].

Еще одним эффективным способом оценки продуктивности лесов является использование лидарной съемки с беспилотного летательного аппарата [5] и космических снимков [6, 7].

В работе Santoro [8] приводятся результаты обработки космических SAR (ALOS PALSAR, Envisat ASAR), оптических (Landsat-7), лидарных (ICESAT) и вспомогательных наборов данных с несколькими процедурами оценки.

Для реализации критерия 2 глобальных геопарков ЮНЕСКО [9] для территории геопарка Торатау важно оценить его потенциал декарбонизации.

Целью нашей работы является изучение возможности оценить запас древостоя широколиственных лесов с помощью данных ALOS Palsar на примере территории геопарка «Торатау».

Материалы и методы исследования

Геопарк Торатау расположен в центральной части Республики Башкортостан и включает в себя территории Гафурийского, Ишимбайского и Стерлитамакского районов (рис. 1).

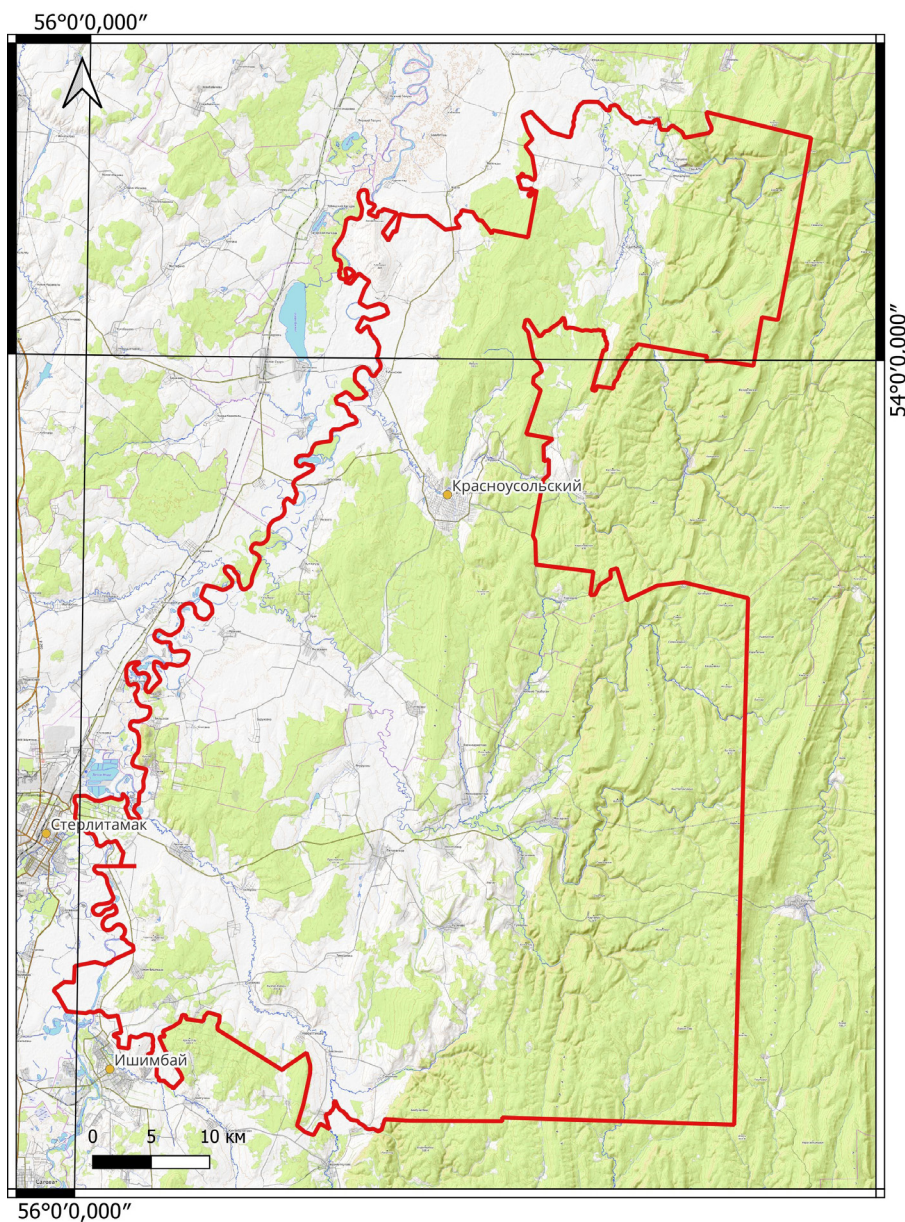


Рис. 1. Местоположение геопарка «Торатау»

Fig. 1. Location of Toratau Geopark

На территории геопарка Торатау широколиственные леса занимают значительную часть. Они представлены такими породами, как липа *Tilia cordata* Mill., дуб *Quercus robur* L., клён *Acer platanoides* L. и вяз *Ulmus glabra* Huds. [10-12].

Липа – наиболее распространенный вид в геопарке Торатау (рис. 2). Она образует как монодоминантные, так и смешанные с другими видами древостои. Липа достигает доминирующего положения благодаря успешному размножению семян под пологом сосново-березовых лесов, а также выборочным рубкам сосны и берёзы [13].

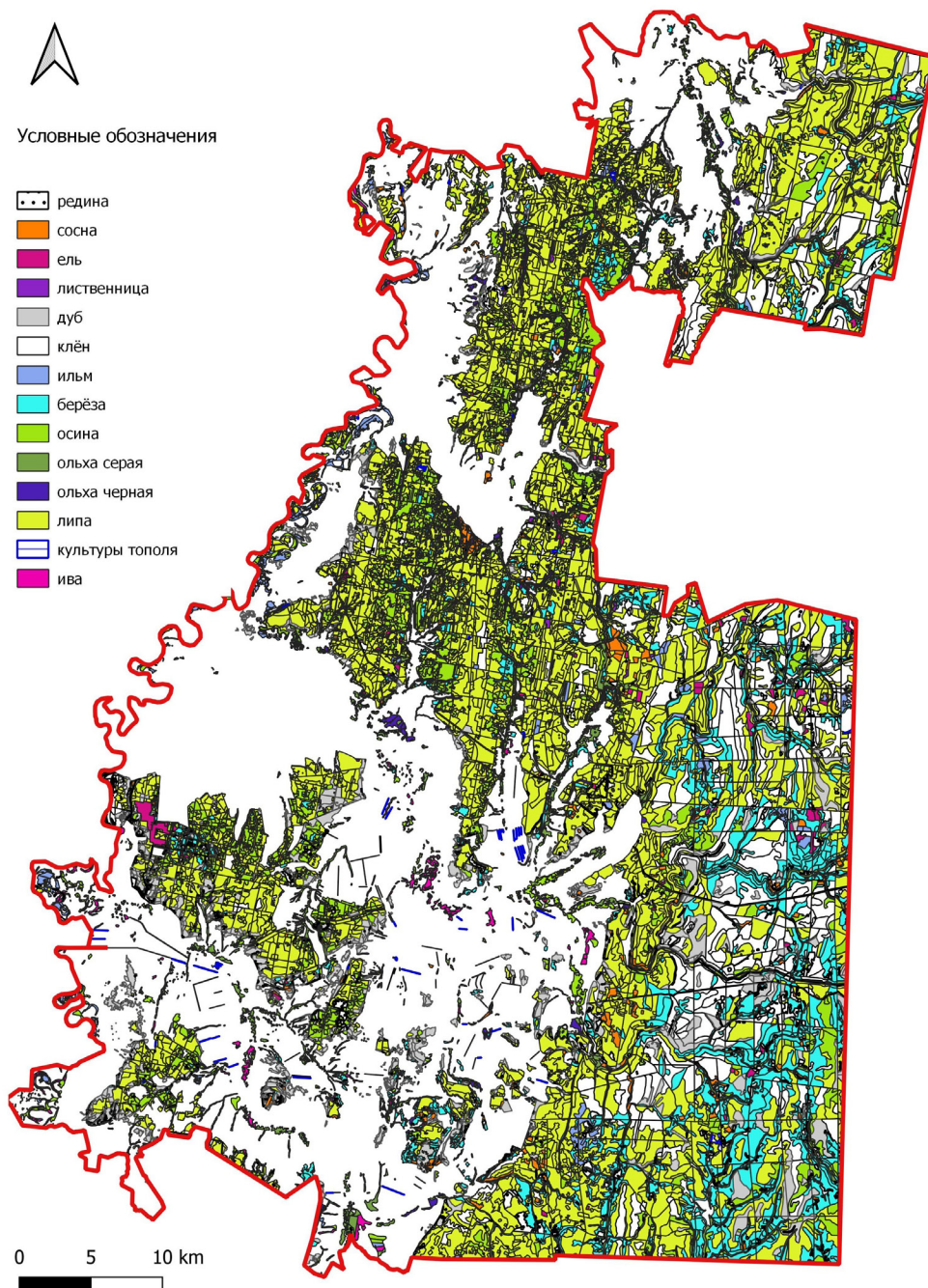


Рис. 2. Породный состав геопарка «Торатау»

Fig. 2. Species composition of Toratau Geopark

Липовые насаждения являются самой продуктивной кормовой базой пчеловодства в Башкортостане. Около 33 % всех насаждений липы содержат нектар, что составляет почти 80 % от общих медоносных ресурсов [14].

В связи с тем, что лесоустройство проходило в 2017 году нами были отобраны снимки ALOS Palsar за 2017 год.

Используя векторные данные лесоустройства 2017 года и данные статистики растра ALOS Palsar проведен регрессионно-корреляционный анализ. Статистика растров получена с помощью модуля SAGA GIS (программа QGIS) инструмент – статистика растров в полигоны (среднее значение)

Запас древостоя на 2017 год построен по данным лесной таксации и ALOS Palsar (на основании полученного регрессионного уравнения). Также на основании полученного регрессионного уравнения построены изображения, отражающие запас древостоя геопарка Торатау на 2023 год.

Результаты исследования

Проведенный регрессионный анализ показал наличие значимой связи между значениями пикселей ALOS Palsar и запасами древостоя (рис. 3) – коэффициент корреляции Пирсона $r = 0,62$, коэффициент детерминации $R^2 = 0,38$.

Результаты оценки запаса древостоя 2017 года по данным таксационных описаний (рис. 4) и ALOS Palsar (HV поляризация) (рис. 5) немного различаются. В соответствии с данными таксационных описаний наибольший запас характерен также для северной части геопарка и района населенных пунктов Утяково, Арметка, Кутлугуза с максимальным значением 230-470 м³ на га. Распределение максимальных значений запаса древостоя по данным ALOS Palsar также соответствует северной части геопарка и району населенных пунктов Утяково, Арметка, Кутлугуза, но число полигонов с максимальным значением ниже, чем по данным таксации. Диапазон максимальных значений – 279-497 м³ на га.

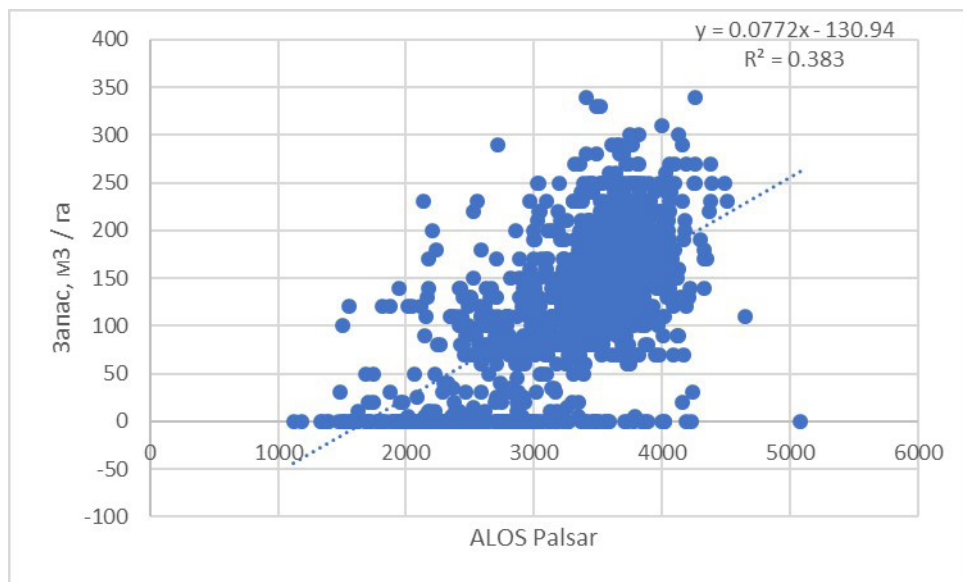


Рис. 3. Корреляционные связи значений пикселей ALOS Palsar и данных лесной таксации на 2017 год. (по средним значениям)

Fig. 3. Correlation relationships between ALOS Palsar pixel values and forest inventory data for 2017 (based on average values)

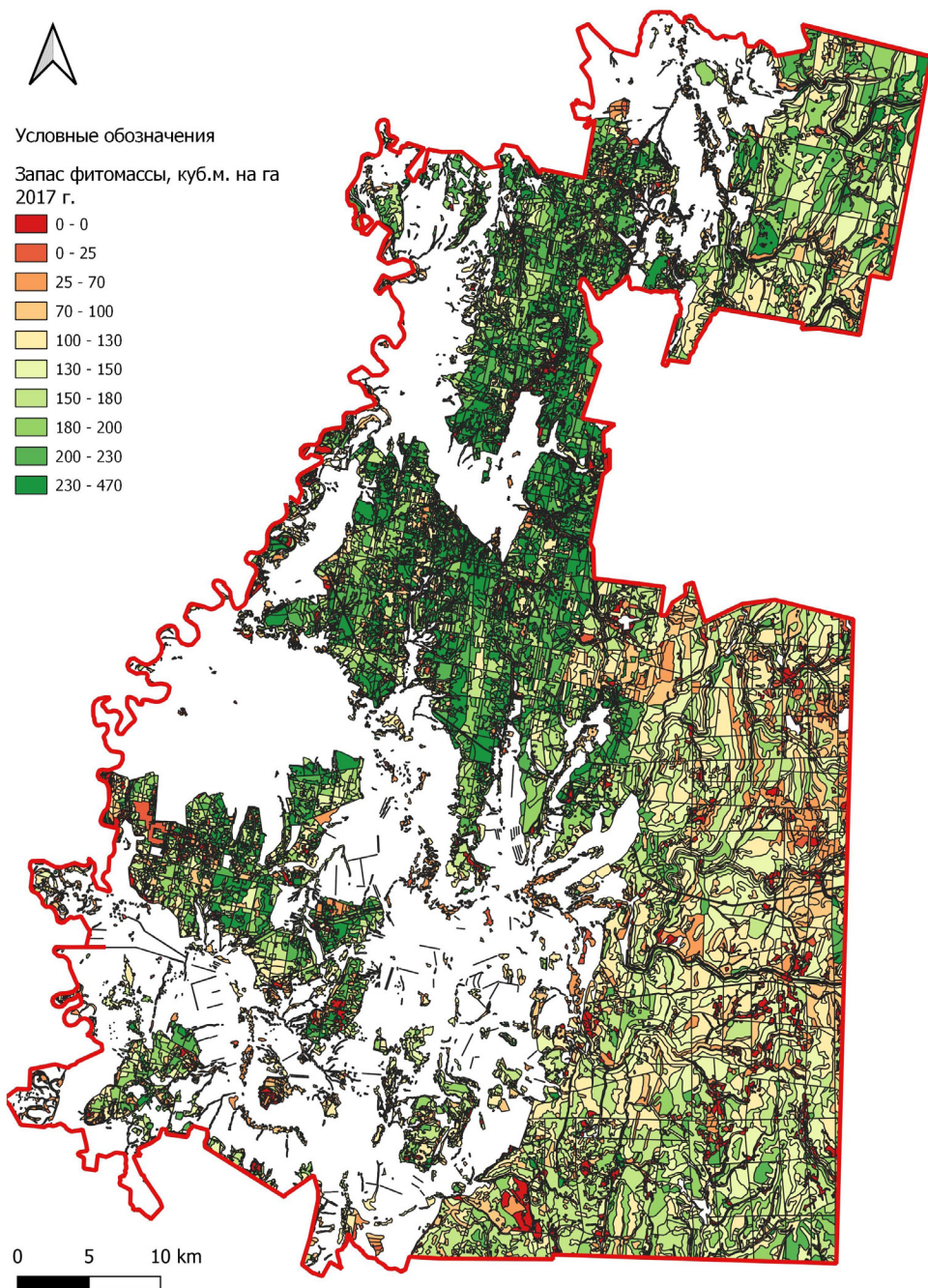


Рис. 4. Запас по данным лесной таксации на 2017 год

Fig. 4. Reserve according to forest inventory data for 2017

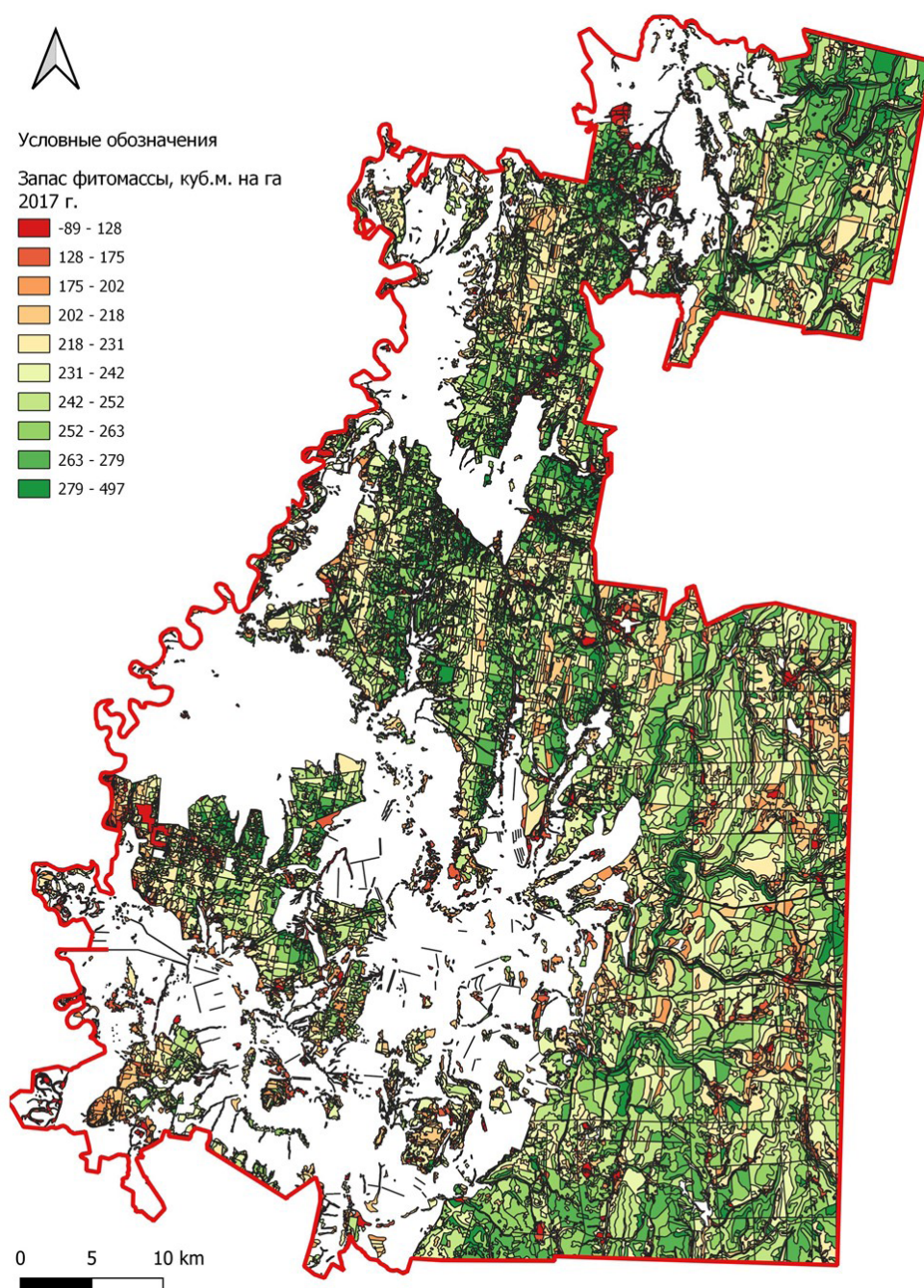


Рис. 5. Запас древостоя по данным снимков ALOS (Palsar) на 2017 год

Fig. 5. Growing stock according to ALOS (Palsar) images for 2017

Результаты, полученные на 2023 год по данным ALOS Palsar, также показывают увеличение запаса древостоя. При этом территориальное распределение запасов древостоя изменилось. Максимальные значения 324-499 м³ на га характерны для северной части в районе населённого пункта Имендяшево и всей восточной части геопарка. Также отмечаются участки с отрицательным запасом древостоя – они соответствуют вырубленным площадкам (рис. 6).

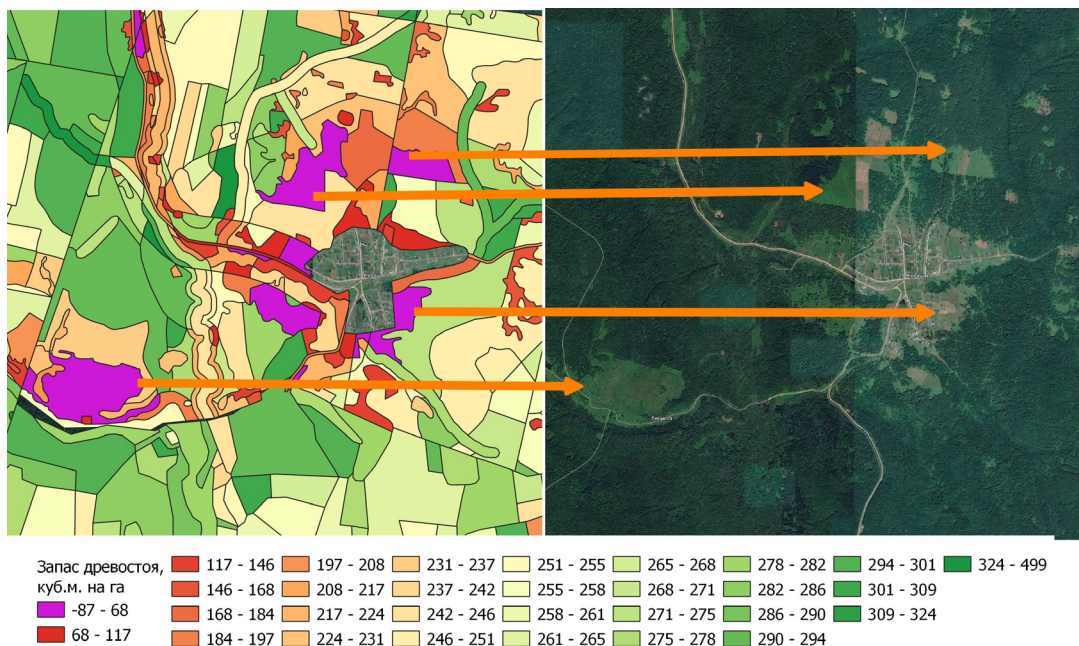


Рис. 6. Соответствие месторасположения вырубок участкам с отрицательным значениям запаса по данным ALOS Palsar

Fig. 6. Correspondence of clearcut locations to areas with negative stock values according to ALOS Palsar data

Обсуждение результатов

Леса в хорошо управляемых заповедниках и охраняемых зонах, как правило, характеризуются высокой степенью биоразнообразия и более низким уровнем антропогенного воздействия по сравнению с другими районами [15]. Деревья на таких территориях могут испытывать меньше стрессовых факторов и конкуренции, что может способствовать более быстрым темпам роста и общему оздоровлению деревьев, чем леса на незащищенных или нарушенных территориях. Например, Замолодчиков и др., 2011 [16], сообщили, что поглощение углерода российскими лесами увеличилось с 80 млн тонн углерода в год в 1988 году до 230-240 млн тонн углерода в год в конце 2000-х годов из-за сокращения лесозаготовок и борьбы с пожарами, начавшегося в 1990-х годах. В случае геопарка «Торатау» мы также отмечаем рост запаса древостоя в восточной его части и связываем это явление с уменьшением рубок.

Радиолокационные снимки ALOS Palsar используются для пространственного анализа в разных сферах: гидрологические исследования [17, 18], мониторинг криогенных процессов [19], построение цифровой модели рельефа [20], оценке лесного покрова [21].

Исследование [22] показало, что большое количество поляриметрических характеристик ALOS Palsar могут служить маркерами лесной и безлесной среды.

Результаты исследования [23] свидетельствуют о существенном потенциале радиолокационных средств космического наблюдения за состоянием лесных покровов, типовых для центра Европейской части России.

Вместе с тем следует учитывать, что представленные методы имеют определенные ограничения. В частности, в работе [24] показано, что в среднем, ошибки оценок биомассы на основе оптических и радиолокационных данных составляют примерно 25 %.

В исследовании [25] при оценке возможности использования радиолокационных снимков Sentinel-1 для проведения лесотаксационных работ выявлено, что при моделировании запаса древостоя наибольшие погрешности отмечаются для насаждений средней полноты с запасом от 100 до 300 м³ на га. В этой же работе отмечена сложность прогнозирования запаса древостоя в молодняках, в связи с их незначительной полнотой и наличием просветов. Вместе с тем в работе [26] для Саяно-Шушенского заповедника, показана возможность достоверного определения запаса древостоя с использованием снимков Sentinel-1 – $R^2 = 0,74$.

Некоторые исследователи считают, что использования данных ALOS Palsar для определения запаса древостоя имеет ограничения, связанные с пространственным разрешением в 25 м [27]. Также важным аспектом являются условия съемки: температура, влажность и т.д. [24]. Также следует отметить значительное влияние на полученный результат точности геопривязки и результатов наземной таксации.

В целом наши исследования также выявили связь данных пикселей ALOS Palsar и данных о запасах древостоя. Вероятно, что использование методов машинного обучения позволит построить более точную модель прогнозирования запаса древостоя.

Заключение

Геопарк Торатау, хоть и не является особо охраняемой природной территорией, но вместе с тем должен обеспечивать устойчивое развитие собственной территории. В ключе проблемы глобального изменения климата, оперативный мониторинг за состоянием лесного покрова посредством данных дистанционного зондирования Земли является актуальным инструментом устойчивого управления территорией геопарка.

Изображения ALOS Palsar (HV поляризация) продемонстрировали достоверную связь с запасом древостоя геопарка. Предложенный подход может быть использован для мониторинга за рубками, фитосанитарным состоянием древостоя и воздействия рекреации на леса геопарка «Торатау».

Литература

1. Базилевич Н.И. *Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии*. Москва: Наука; 1993: 293.
2. Базилевич Н. И. Методы изучения биологического круговорота в различных природных зонах. Москва: Мысль; 1978: 181.
3. Volkov A., Belan L., Bogdan E. et al. Spatio-Temporal Analysis of Forest Growing Stock Volume and Carbon Stocks: A Case Study of Kandry-Kul Natural Park, Russia. *Land*. 2023;12(7):1441. DOI: 10.3390/land12071441
4. Belan L., Suleymanov A., Bogdan E. et al. Assessing and Mapping Changes in Forest Growing Stock Volume over Time in Bashkiriya Nature Reserve, Russia. *Forests*. 2023;14(11):2251. DOI: 10.3390/f14112251
5. Fedorov N., Tuktamyshev I., Bikbaev I. et al. Spatiotemporal Dynamics of Betula pendula Crown Cover on Abandoned Arable Land in a Broad-Leaved Forest Zone of Bashkir Cis-Ural. *Forests*. 2024;15(1):34. DOI: 10.3390/f15010034
6. Suleymanov A., Bogdan E., Gaysin I. et al. Spatial high-resolution modelling and uncertainty assessment of forest growing stock volume based on remote sensing and environmental covariates. *Forest Ecology and Management*. 2024;554:121676. DOI: 10.1016/j.foreco.2023.121676
7. Suleymanov A., Shagaliev R., Belan L. et al. Forest growing stock volume mapping with accompanying uncertainty in heterogeneous landscapes using remote sensing data. *Earth Science Informatics*. 2024; 17(6):5359-5369. DOI: 10.1007/s12145-024-01457-6
8. Santoro M., Cartus O.; Mermoz St. et al. A detailed portrait of the forest aboveground biomass pool for the year 2010 obtained from multiple remote sensing observations, Geophysical Research Abstracts, 20, EGU2018-18932. *Geophys, Res, Abstr*. 2018; 20(1):18932. DOI: 10.1594/PANGAEA.894711

9. Martini G., Zouros N., Zhang J. et al. UNESCO Global Geoparks in the «World after»: a multiple-goals roadmap proposal for future discussion. *Episodes*. 2021;3:1-7. DOI: 10.18814/epiiugs/2021/021002
10. Федоров Н.И., Мартыненко В.Б., Жигунова С.Н. и др. Изменение распространения широколиственных древесных видов в центральной части Южного Урала со второй половины XX в. *Экология*. 2021; 2: 103-111. DOI: 10.31857/S0367059721020050
11. Мулдашев А.А., Маслова Н.В., Галеева А.Х. и др. Редкие виды растений на территории перспективного памятника природы «Гора Бикмаш» (Республика Башкортостан). *Экобиотех*. 2020; 3 (2). 280-291. DOI: 10.31163/2618-964X-2020-3-2-280-291
12. Абрамова Л. М., Баишева Э.З., Габбасова И.М и др. *Уникальные памятники природы – шиханы Тратау и Юрактау*. Уфимский Институт биологии РАН; Ботанический сад-институт Уфимского НЦ РАН; Академия наук республики Башкортостан. Уфа: Издательство «Гилем»; 2014: 312.
13. Давыдычев А.Н., Горичев Ю.П., Кулагин А.Ю. и др. Возобновительные процессы под пологом широколиственно-темнохвойных лесов Южного Урала. *Лесоведение*. 2011; 2: 51-61.
14. Самсонова И.Д., Нуркаева М.Р., Саттаров В.Н. и др. Оценка биоресурсного потенциала насаждений *Tilia cordata* геопарка Торатау Республики Башкортостан с использованием цифровых технологий. *Известия Горского государственного аграрного университета*. 2022; (59)-4: С. 191-197. DOI: 10.54258/20701047_2022_59_4_191
15. Law B.E., Berner L.T., Buotte P.C., et al. Strategic Forest Reserves Can Protect Biodiversity in the Western United States and Mitigate Climate Change. *Commun. Earth Environ.* 2021;2:254. DOI:10.1038/s43247-021-00326-0
16. Zamolodchikov D.G., Grabovskii V.I., Kraev G.N. A Twenty Year Retrospective on the Forest Carbon Dynamics in Russia. *Contemp. Probl. Ecol.* 2011;4:706-715. DOI: 10.1134/S1995425511070022
17. Смирнова И.О., Русанова А.А., Камышников Н.В. Анализ характеристик ледяного покрова озер Большеземельской тундры по радиолокационным данным ALOS PALSAR. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017; 14(7):198-209. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-198-209
18. Чимитдоржиев Т.Н., Кирбижекова И.И., Леонов А.С. и др. Формирование и развитие становых трещин ледового покрова озера Байкал по данным ALOS PALSAR. *Известия вузов. Физика*. 2012; (55) 8-2. – С. 276-277.
19. Кирбижекова И.И., Чимитдоржиев Т.Н., Дворников Ю.А. и др. Мониторинг криогенных процессов полуострова Ямал на основе радарных данных TANDEM-X и ALOS-2 PALSAR-2. *Вычислительные технологии*. 2018; 23(4): С. 50-64.
20. Баранов Ю.Б., Кантемиров Ю.И., Киселевский Е.В. Построение ЦМР по результатам интерферометрической обработки радиолокационных изображений ALOS PALSAR. *Геоматика*. 2008; (1): 37-45.
21. Кирбижекова И.И., Батуева Е.В. Исследование сезонных изменений лесной растительности Байкальского региона по поляриметрическим данным ALOS PALSAR. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2016; 327 (3): 103-110.
22. Кирбижекова И.И., Чимитдоржиев Т.Н., Гармаев А.М. и др. Картография лесных ресурсов Республики Бурятия на основе поляриметрических данных ALOS PALSAR и мультиспектральных данных SPOT5. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2013; 4 (1): 129-133.
23. Саворский В.П., Захаров А.И., Захарова Л.Н. и др. Комплексный анализ результатов оптических и радиолокационных наблюдений лесных покровов. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2013; 10(4): 213-223.
24. Бабий И.А., Им С.Т., Харук В.И. Оценка надземной биомассы лесов радиолокационными методами. *Сибирский экологический журнал*. 2022; 29(5):487-506. DOI 10.15372/SEJ20220501
25. Сидоренков В.М., Кушнырь О.В., Бадак Л.В. и др. Возможности таксации лесов на основе данных радиолокационной спутниковой съемки. *Исследование Земли из космоса*. 2021; (5): 72-84. DOI 10.31857/S0205961421050080
26. Сидоренков В.М., Астапов Д.О., Ачиколова Ю.С. и др. Методы лесотаксационного дешифрирования радиолокационной спутниковой съемки в горных лесах Южной Сибири. *Лесохозяйственная информация*. 2024; (1): 67-80. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2024.1.05
27. Hernández-Stefanoni J.L., Castillo-Santiago M.Á., Mas J.F. et al. Improving aboveground biomass maps of tropical dry forests by integrating LiDAR, ALOS PALSAR, climate and field data. *Carbon Balance Manage* 2020; 15:15. DOI: 10.1186/s13021-020-00151-6

References

1. Bazilevich N.I. *Biological productivity of ecosystems of Northern Eurasia*. Moscow: Nauka; 1993:293 (in Russian).
2. Bazilevich N.I., et al. *Methods of studying the biological cycle in various natural zones*. Moscow: Mysl; 1978:181.
3. Volkov A., Belan L., Bogdan E., et al. Spatio-Temporal Analysis of Forest Growing Stock Volume and Carbon Stocks: A Case Study of Kandry-Kul Natural Park, Russia. *Land*. 2023;12(7):1441. DOI: 10.3390/land12071441
4. Belan L., Suleymanov A., Bogdan E., et al. Assessing and Mapping Changes in Forest Growing Stock Volume over Time in Bashkiriya Nature Reserve, Russia. *Forests*. 2023;14(11):2251. DOI: 10.3390/f14112251
5. Fedorov N., Tukhtamyshev I., Bikbaev I. et al. Spatiotemporal Dynamics of *Betula pendula* Crown Cover on Abandoned Arable Land in a Broad-Leaved Forest Zone of Bashkir Cis-Ural. *Forests*. 2024;15(1):34. DOI: 10.3390/f15010034
6. Suleymanov A., Bogdan E., Gaysin I. et al. Spatial high-resolution modelling and uncertainty assessment of forest growing stock volume based on remote sensing and environmental covariates. *Forest Ecology and Management*. 2024;554:121676. DOI: 10.1016/j.foreco.2023.121676
7. Suleymanov A., Shagaliev R., Belan L. et al. Forest growing stock volume mapping with accompanying uncertainty in heterogeneous landscapes using remote sensing data. *Earth Science Informatics*. 2024; 17(6):5359–5369. DOI: 10.1007/s12145-024-01457-6
8. Santoro M., Cartus O.; Mermoz St. et al. A detailed portrait of the forest aboveground biomass pool for the year 2010 obtained from multiple remote sensing observations, Geophysical Research Abstracts, 20, EGU2018-18932. *Geophys. Res. Abstr.* 2018; 20(1):18932. DOI: 10.1594/PANGAEA.894711
9. Martini G., Zouros N., Zhang J. et al. UNESCO Global Geoparks in the “World after”: a multiple-goals roadmap proposal for future discussion. *Episodes*. 2021;3:1–7. DOI: 10.18814/epiugs/2021/021002
10. Fedorov N.I., Martynenko V.B., Zhigunova S.N., et al. Changes in the distribution of broad-leaved tree species in the central part of the Southern Urals since the second half of the 20th century. *Ecology*, 2021;2:103–111 (in Russian). DOI: 10.31857/S0367059721020050
11. Muldashev A.A., Maslova N.V., Galeeva A.Kh., et al. Rare plant species on the territory of the promising natural monument Mount Bikmash (Republic of Bashkortostan). *Ecobiotech* 2020;3(2):280-291 (in Russian). DOI: 10.31163/2618-964X-2020-3-2-280-291
12. Abramova L.M., Baisheva E.Z., Gabbasova I.M., et al. Unique natural monuments – the Tratau and Yuraktau shikhans. Ufa Institute of Biology of the Russian Academy of Sciences; Botanical Garden-Institute of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan. Ufa: Gilem Publishing House, 2014:312 (in Russian).
13. Davydychev A.N., Gorichev Yu.P., Kulagin A.Yu. et al. Renewal processes under the canopy of broad-leaved-dark coniferous forests of the Southern Urals. *Forest Science*. 2011;2:51–61 (in Russian).
14. Samsonova I.D., Nurkaeva M.R., Sattarov V.N. et al. Assessment of the bioresource potential of *Tilia cordata* plantings in the Toratau Geopark of the Republic of Bashkortostan using digital technologies. *Bulletin of the Gorsk State Agrarian University*. 2022; 59-4:191-197 (in Russian). DOI: 10.54258/20701047_2022_59_4_191
15. Law B.E., Berner L.T., Buotte P.C. et al. Strategic Forest Reserves Can Protect Biodiversity in the Western United States and Mitigate Climate Change. *Commun. Earth Environ.* 2021;2:254. DOI:10.1038/s43247-021-00326-0
16. Zamolodchikov D.G., Grabovskii V.I., Kraev G.N. A Twenty Year Retrospective on the Forest Carbon Dynamics in Russia. *Contemp. Probl. Ecol.* 2011;4:706–715. DOI: 10.1134/S1995425511070022
17. Smirnova I.O., Rusanova A.A., Kamyshnikova N.V. Analysis of ice cover characteristics of lakes in Bolshezemelskaya tundra based on ALOS PALSAR radar data. *Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space*. 2017;14(7):198–209 (in Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-198-209
18. Chimitdorzhiev T.N., Kirbizhekova I.I., Leonov A.S. et al. Formation and development of permanent cracks in the ice cover of Lake Baikal according to ALOS PALSAR data. *News of universities. Physics*. 2012;55(8-2):276–277 (in Russian).
19. Kirbizhekova I.I., Chimitdorzhiev T.N., Dvornikov Yu.A. et al. Monitoring of cryogenic processes of the Yamal Peninsula based on TANDEM-X and ALOS-2 PALSAR-2 radar data. *Computational technologies*. 2018;23(4):50–64 (in Russian).

20. Baranov Yu.B., Kantemirov Yu.I., Kiselevsky E.V. et al. Construction of DEM based on the results of interferometric processing of ALOS PALSAR radar images. *Geomatics*. 2008;1:37–45 (in Russian).
21. Kirbizhekova I.I., Batueva E.V. Study of seasonal changes in forest vegetation of the Baikal region based on ALOS PALSAR polarimetric data. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering*. 2016;327(3):103–110 (in Russian).
22. Kirbizhekova I.I., Chimitdorzhiev T.N., Garmaev A.M. et al. Cartography of forest resources of the Republic of Buryatia based on polarimetric data ALOS PALSAR and multispectral data SPOT5. *Inter Expo Geo-Siberia*. 2013;4(1):129–133 (in Russian).
23. Savorsky V.P., Zakharov A.I., Zakharova L.N., et al. Complex analysis of the results of optical and radar observations of forest covers. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2013;10(4):213–223 (in Russian).
24. Babiy I.A., Im. S.T., Kharuk V.I. Assessment of aboveground biomass by forest radar methods. *Siberian Ecological Journal*. 2022; 29(5):487–506 (in Russian). DOI 10.15372/SEJ20220501
25. Sidorenkov V.M., Kushnyr O.V., Badak L.V. et al. Forest taxing capabilities based on radar satellite survey data. *Exploring the Earth from space*. 2021; (5): 72–84 (in Russian). DOI 10.31857/S0205961421050080
26. Sidorenkov V.M., Astapov D.O., Achikolova Yu.S., et al. Methods of forest-based decoding of radar satellite imagery in the mountain forests of Southern Siberia. *Forestry information*. 2024; (1): 67–80 (in Russian). DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2024.1.05
27. Hernández-Stefanoni J.L., Castillo-Santiago M.Á., Mas J.F. et al. Improving aboveground biomass maps of tropical dry forests by integrating LiDAR, ALOS PALSAR, climate and field data. *Carbon Balance Manage*. 2020; 15:15. DOI: 10.1186/s13021-020-00151-6

Сведения об авторах

БОГДАН Екатерина Александровна – к.э.н., в.н.с. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», доц., ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологии», ORCID: 0000-0003-0566- 2639, ResearcherID: ACM-8732-2022, Scopus Author ID: 57807449000, SPIN: 1764-5816

E-mail: eavolkova@bk.ru

БЕЛАН Лариса Николаевна – д.г.-м.н., дир. «Центр технологий декарбонизации» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», проф. ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологии», ORCID: 0000-0003-3098-7881, ResearcherID: AAD-2968-2022, Scopus Author ID: 56671294600, SPIN: 6752-0990

E-mail: belan77767@mail.ru

БАХТИЯРОВА Роза Сагитовна – к.т.н., доц., ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Scopus ID: 59487296300, SPIN-код: 4156-9852

E-mail: rozaishakova@yandex.ru

ВИТЦЕНКО Анастасия Юрьевна – асс. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», ORCID: 0009-0001-9867-0760, ResearcherID: CAF-0307-2022, Scopus ID: 59487259600, SPIN-код: 8875-3255

E-mail: nastya-vitcenko@mail.ru

ТУКТАРОВА Ирэн Ольвертовна – к.т.н., зав. каф., ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», ORCID: 0000-0003-4731-1394, ResearcherID: H-6747-2017, Scopus Author ID: 6701446968, SPIN-код: 7878-0414

E-mail: umrko@mail.ru

ГУМЕРОВ Ринат Русланович, инженер, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

E-mail: lestrigonna@yandex.ru

About the authors

Ekaterina Alexandrovna BOGDAN – Cand. Sci. (Economics), Leading Researcher, Ufa State Petroleum Technological University; Associate Professor, Ufa University of Science and Technology, ORCID: 0000-0003-0566- 2639, ResearcherID: ACM-8732-2022, Scopus Author ID: 57807449000, SPIN: 1764-5816

E-mail: eavolkova@bk.ru.

Larisa Nikolaevna BELAN – Dr. Sci. (Geological and Mineralogy), Director, Center for Decarbonization Technologies, Ufa State Petroleum Technological University; Professor, Ufa University of Science and Technology, ORCID: 0000-0003-3098-7881, ResearcherID: AAD-2968-2022, Scopus Author ID: 56671294600, SPIN: 6752-0990

E-mail: belan77767@mail.ru

Roza Sagitovna BAKHTIYAROVA – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Ufa State Petroleum Technological University, ORCID: -, ResearcherID: -, Scopus ID: 59487296300, SPIN-код: 4156-9852

E-mail: rozaiskhakova@yandex.ru

Anastasia Yuryevna VITSSENKO – Assistant Lecturer, Ufa State Petroleum Technological University, ORCID: 0009-0001-9867-0760, ResearcherID: CAF-0307-2022, Scopus ID: 59487259600, SPIN-код: 8875-3255

E-mail: nastya-vitcenko@mail.ru

Irene Olvertovna TUKTAROVA – Cand. Sci. (Engineering), Head of the Department, Ufa State Petroleum Technological University, ORCID: 0000-0003-4731-1394, ResearcherID: H-6747-2017, Scopus Author ID: 6701446968, SPIN-код: 7878-0414

E-mail: umrko@mail.ru

Rinat Ruslanovich GUMEROV – engineer, Ufa State Petroleum Technological University

E-mail: lestrigonna@yandex.ru

Вклад авторов

Богдан Е.А. – разработка концепции, методология, проведение исследования, верификация данных, создание черновика рукописи

Белан Л.Н. – руководство исследованием, проведение исследования, верификация данных, получение финансирования

Бахтиярова Р.С. – проведение исследования, проведение статистического анализа, редактирование рукописи

Витценко А.Ю. – проведение исследования, верификация данных, визуализация

Туктарова И.О. – администрирование проекта, ресурсное обеспечение исследования

Гумеров Р.Р. – проведение исследования

Authors' contribution

Bogdan E.A. – conceptualization, methodology, investigation, validation, writing – original

Belan L.N. – supervision, investigation, validation, funding acquisition.

Bakhtiyarova R.S. – investigation, formal analysis, writing – review & editing

Vitsenko A.Y. – investigation, validation, visualization

Tuktarova I.O. – project administration, resources

Gumerov R.R. – investigation

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest

Поступила в редакцию / Submitted 13.05.25

Принята к публикации / Accepted 27.05.25