

Analysis of water surface changes in Arga Island (the Lena Delta), based on remote sensing data

Original Article

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Kartoziiia A.A.*

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Koptyug ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia

ABSTRACT. Recent climate change has led to an acceleration of permafrost melting in Arctic regions, causing significant landscape transformations through thermokarst processes. This study focuses on water surface dynamics in Arga Island (the Lena Delta), by analyzing satellite imagery from Sentinel-2 (2019-2024) and topographical data. We used a multi-method approach that combined median composite generation, spectral indices (MNDWI, NDVI, and Tasseled Cap), and supervised classification to quantify changes in water bodies and soil moisture. We also used the topographic position index (TPI), derived from the ArcticDEM data, to contextualize these changes within areas prone to thermokarst processes. The results indicate stable areas of water bodies over a six-year period with no significant changes in size (e.g., an area of 388 km² in depressions in 2019 versus 390 km² in 2024). However, an analysis of the MNDWI values between 2019 and 2024 has revealed localized moisture increases in upland areas, suggesting the emergence of thermokarst hotspots. These areas, which are characterized by positive TPI values and rising wetness indices, may represent early stages of degradation. Methodologically, the study demonstrates the effectiveness of cloud-based platforms, such as Google Earth Engine, for processing medium-resolution images. However, longer time series and higher resolution data are required to detect subtle trends. The use of spectral indices and topographic metrics in conjunction provides a reproducible framework for monitoring thermokarst activity in Arctic regions.

Keywords: thermokarst, the Lena Delta, lakes, machine learning, remote sensing

For citation: Kartoziiia A.A. Analysis of water surface changes in Arga Island (the Lena Delta), based on remote sensing data // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - P. 1039-1051. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-1039

1. Introduction

Contemporary observations confirm unprecedented global temperature rise, with the last decade representing the warmest period in recorded history (Lee and Romero, 2023). This warming is amplified in Arctic regions, where surface temperatures increase at approximately twice the global rate (Cohen et al., 2014), triggering profound transformations in permafrost landscapes. Thermokarst processes are characterized by ground subsidence resulting from the thawing of ice-rich permafrost, and they have emerged as a significant driver of landscape reorganization in the Arctic region (Jorgenson, 2013). These processes are manifested through the dynamic formation, expansion, and drainage of water bodies, altering the hydrological connectivity, biogeochemical cycles, and ecosystem pathways (Streletskiy et al., 2015; Nitze et al., 2018).

Surface water dynamics serve as a primary indicator of thermokarst activity. The expansion of lakes and soil moisture can indicate the initial melting of ground ice (Grosse et al., 2011; Liljedahl et al., 2016; French, 2017). Numerical quantification of changes in the area of water bodies and soil moisture is crucial for: assessing the stability thresholds of permafrost, projecting hotspots of methane emissions, evaluating the vulnerability of infrastructure, and modeling shifts in hydrological regimes (Grosse et al., 2011; Jorgenson, 2013; Kokelj and Jorgenson, 2013; Schuur and Mack, 2018).

Today, the analysis of remote sensing (RS) data has become a crucial method for assessing changes in the Arctic landscape. Recent advances in cloud-based geospatial platforms like Google Earth Engine (GEE) have transformed our capacity to monitor Arctic hydrological dynamics (Gorelick et al., 2017). This unprece-

*Corresponding author.

E-mail address: andrei.kartoziiia@igm.nsc.ru (A.A. Kartoziiia)

Received: July 31, 2025; **Accepted:** August 20, 2025;

Available online: August 31, 2025

© Author(s) 2025. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



dented analytical capability arises from the integration of three critical technological advances: (1) multi-sensor satellite archives, (2) automated processing workflows, and (3) scalable cloud-computing infrastructure.

In this study, we have focused on assessing water surface changes on Arga Island, located in the Lena Delta region, over the past six years. This island is a unique site for the analysis of landscape dynamics resulting from climate change (Kartoziiia, 2024; 2025). In order to conduct this assessment, we have completed the following tasks. Firstly, we have prepared a dataset consisting of satellite images from the Sentinel-2 mission (2019–2024) and a digital elevation model (DEM). We have utilized satellite imagery to generate the median composite and have created a topographic position index (TPI) map from the DEM. Secondly, we have estimated the dynamics of water surface changes. This was done by identifying water bodies in each year's median composites using supervised classification technique. Thirdly, we have identified areas that are vulnerable to thermokarst processes through a simultaneous analysis of terrain moisture and topographic features.

2. Materials and methods

2.1. Study area

The study area, which is rectangular in shape, is located in the central part of Arga Island (73.4°N, 124.1°E) and has an approximate area of 2,000 square kilometers (Fig. 1). The island lies in the northwestern portion of the Lena Delta, occupying a second terrace, which is elevated between 10 and 30 meters above sea level (Schwamborn et al., 2002b). The island is characterized by continuous, ice-rich permafrost at depths ranging from 400 to 1000 meters, and it has an active layer that is between 20 and 40 centimeters thick (Grigoriev, 1993; Zaplavnova et al., 2024). The cryostructure of the island's sediment is massive, with thin ice wedges (Grigoriev, 1993; Schwamborn et al., 2002a). Arga serves as an ideal natural setting

for the study of thermokarst processes, due to several factors. Firstly, the terrain is characterized by a uniform pattern of thermokarst features, with submeridional lakes occupying depressions and thermal erosion valleys, facilitating the detection of landscape changes (Grigoriev, 1993). Secondly, active neotectonic activity intersects with degraded permafrost, leading to noticeable changes in surface hydrology, in particular (Imaeva et al., 2019; Zaplavnova et al., 2024). Thirdly, dwarf shrub-herbaceous communities provide a means of monitoring landscape changes through the analysis of RS data (Lisovski et al., 2025). Finally, extreme inaccessibility necessitates RS approaches, while providing critical insights into the marine-continental transition zones that are experiencing rapid Arctic warming.

2.2. Data processing and Methods

We have analyzed 38 Sentinel-2 satellite images from the period 2019 to 2024 (2019 – 4, 2020 – 8, 2021 – 4, 2022 – 6, 2023 – 9, 2024 – 7). Cloudless images (less than 5%) were selected from summer seasons through filtering. Additionally, the clouds were masked using the QA60 band, which is a cloud mask. First, we applied Principal Component Analysis (PCA) to generate a single band (PCA1) from the original Sentinel-2 bands, which comprehensively characterizes all of them. Then we have added the following spectral indices to the composite, which were calculated from the original satellite imagery bands: NDVI, MNDWI (Gao, 1996), and tasseled-cap greenness (TSG) and wetness (TSW) indices (Shi and Xu, 2019). The original Sentinel-2 satellite image channels were used to create the PCA1 channel. The average variance of the first PCA conversion channel was 95.5. In other words, this band, which is calculated for each composite and included in the analyzed composite, comprehensively describes all of the original satellite image bands. Subsequently, we generate median annual composites from the processed imagery. These median annual composites comprised

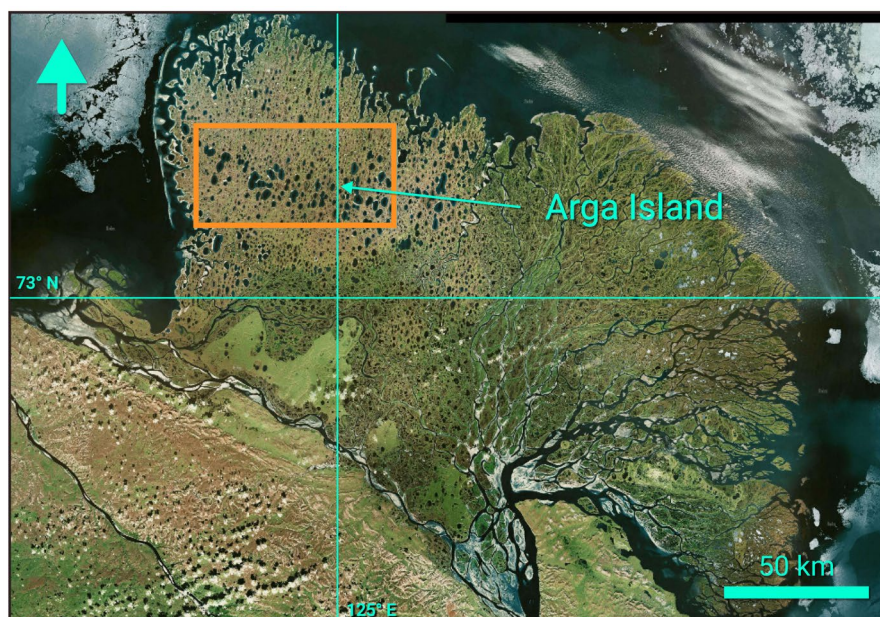


Fig.1. The area of interest, as indicated by the orange square, in a mosaic of Sentinel-2 satellite images of the Lena River delta.

normalized original Sentinel-2 bands and PCA1, as well as NDVI, MNDWI, TSG, TSW. In addition to this, we have utilized topography data from ArcticDEM in our study. ArcticDEM is a detailed and precise digital elevation model of the Arctic.

We have conducted an analysis of changes in water surface area. To this end, we identified water bodies in median composites using supervised classification technique. We used only the following bands of the composite data for the classification: PCA1, NDVI, MNDWI, TSG, TSW, B8, B11 and B12. The minimum distance algorithm was used in classification mode (Jensen, 2016), which returns the closest class. The distance metric was "cosine". It was spectral angle from the unnormalized class mean. We have recognized 15 training data polygons for water and land surface classes in median composite image from 2021. We have chosen the year 2021 for selecting training and validation data based on its equal distance from 2019 and 2024. These polygons were subsequently converted into 41,654 sample points with unique values, which were then randomly divided into two groups: one for training (65%), and one for testing (35%). The analysis of the mean spectral characteristics of water and land classes revealed notable differences between them in the selected bands (Fig. 2).

After that, we classified the median composite image for 2021 and assessed the accuracy of the model. The confusion matrix and relevant metrics (overall accuracy, recall, precision) were used to evaluate the accuracy. All metrics yielded a 100% accuracy score. High levels of statistical accuracy in classification into two categories are typical for such studies (Amani et al., 2019; Merchant et al., 2023; Yu et al., 2024). This is because the reference polygons, which are used for training and validating the models, are collected by researchers at terrains that clearly correspond to a specific land or water surfaces. As a result, the classifier accurately classifies the validation data. In the future, during the process of classifying a composite image, the model might experience difficulty assigning ambiguous pixels to a particular class. This occurs, for example, where shallow bodies of water have overgrown. Therefore, additional visual analysis is a standard

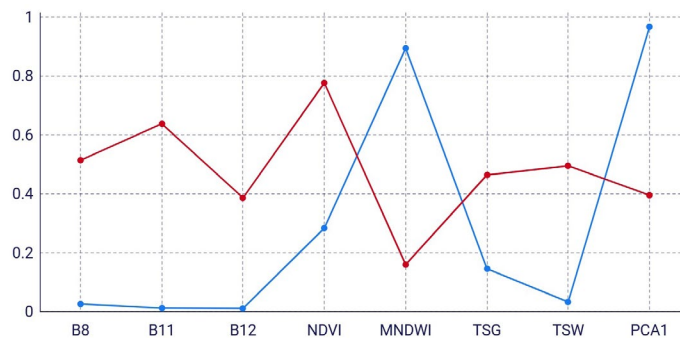


Fig.2. Spectral signatures of water (blue line) and land (red line) classes. The y-axis represents normalized reflectance for the Sentinel-2 bands, as well as index values for the indices.

practice to verify the accuracy of the results. In this instance, such analysis confirmed the high precision of the water body identification, which is in line with previous studies (Kartozia, 2024; 2025) (Fig. 3). Finally, the median composite data from other study years were classified and we have obtained the areas of the water bodies for each analyzed year.

Additionally, topographical data was used to distinguish water bodies and independently estimate their area within thermokarst depressions and uplands. We used the TPI to identify the depressions (negative values) and elevations (positive values) (De Reu et al., 2013). The TPI was calculated as the difference between the values from a two mean DEMs, obtained from the original DEM using moving windows of radii 100 m and 1000 m.

All work within the scope of this study was conducted using the Google Earth Engine cloud platform.

3. Results and Discussion

As previously mentioned, there has been a steady increase in average annual temperatures in Arctic territories (Lee and Romero, 2023). This trend has led to various consequences in different regions of the Arctic. For example, it has resulted in active melting of permafrost (Romanovsky et al., 2017) and the formation of thermokarst landforms (Kanevskiy et al.,

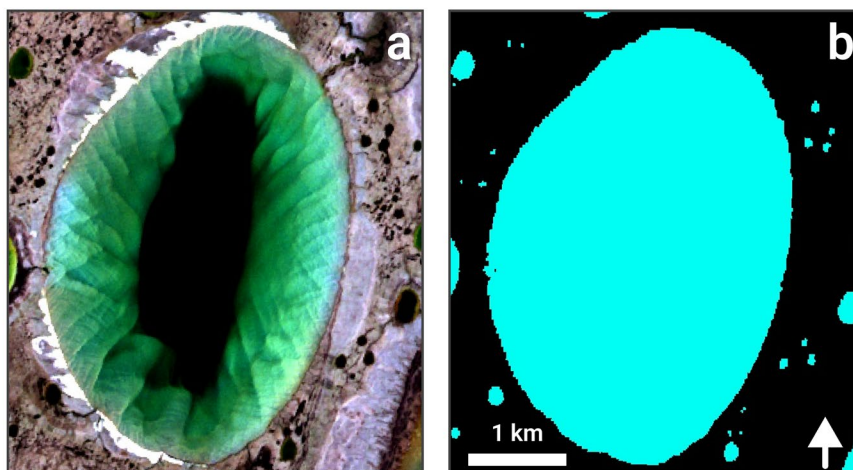


Fig.3. A fragment of the study area in the satellite image of 2021 (a) and the result of the classification of the median composite image for the same year (b; water surfaces are highlighted in blue, land is black).

2017). Additionally, the thickness of active layer has increased (Farquharson et al., 2019), as has the area of lakes (Lee and Romero, 2023). These changes have been observed both in remote sensing data and in data from weather stations and field studies. The area of thermokarst lakes in the Arctic tends to increase slowly (Chen et al., 2022). However, the local dynamics of change in different regions may vary. Furthermore, even within a single region, different studies can produce different results. For instance, in the case of the Kolyma Lowland, one study found a 0.51% reduction in lake area between 1999 and 2014 (Nitze et al., 2017), whereas another study concluded that lake areas had increased by 0.89% between 1999 and 2013 and 4.15% between 1999 and 2018 (Veremeeva et al., 2021).

According to the latest analysis of data on environmental changes collected at the scientific station on Samoilov Island during the period 2002–2017, it was found that the temperature of the permafrost at a depth of approximately 21 meters increased by 1.3°C (Boike et al., 2019). However, the depth of the active layer has shown significant fluctuations from year to year (Boike et al., 2019). In another study (Nitze and Grosse, 2016), researchers analyzed changes to the Earth’s surface within the delta, using satellite image data from the period 1999–2014. They found that most lakes in the area had expanded, while approximately 40 other lakes had dried up. The exact sizes of these water bodies were not determined. When compiling the latest habitat map, based on remote sensing data and long-term field research, the authors correctly point out that water bodies, especially smaller ones, are highly variable (Lisovski et al., 2025). Therefore, given the global trend towards warming and the increasing area of thermokarst lakes, as well as local data on changes to the natural environment within the Lena Delta, we attempted to determine whether these changes have been reflected in the dynamics of water body areas. Besides the study provides an assessment of changes to the surface areas of water bodies within the considerable part of Lena River Delta for the first time.

The results of the analysis of changes in the water surface area are presented in Table 1. According to our estimates, the area of water bodies has remained largely unchanged. Even uplands, which are particularly susceptible to thermokarst, have not shown significant changes. The lack of a clear trend in the water surface indicates that six years may not be sufficient to identify significant trends. Additionally, the spatial resolution of 10 meters for the Sentinel-2 data, while it is the best available among free satellite imagery, is not sufficient for detailed analysis. However, the obtained results clearly denoted the absence of rapid catastrophic landscape changes and a sudden increase in water bodies.

In the next phase of the research, we identified areas that are prone to thermokarst processes. We identified areas that are vulnerable to thermokarst processes by simultaneously analyzing terrain moisture and topographic characteristics. The MNDWI bands of the median composites of 2019 and 2024 have been analyzed. We have subtracted the values of the 2024

Table 1. The area of water bodies within the study area during the years 2019-2024.

Year	Area of water bodies in uplands (km²)	Area of water bodies in depressions (km²)
2019	13	388
2020	14	403
2021	14	398
2022	15	400
2023	14	398
2024	13	390

composite image from those of the 2019 image. The positive values in the resulting raster indicate areas that have experienced an increase in soil moisture. Then, we discovered these terrains located on the uplands with flat surfaces (Fig. 4). We can assume that these identified areas will be hot spots of thermokarst activity in the future. Furthermore, these areas have a great potential for landscape change, in contrast to near-by areas in the depressions, where significant changes have already occurred.

The obtained results demonstrate the main possibilities for monitoring the condition of landscapes and assessing thermokarst activity based on the analysis of water bodies and soil moisture estimates. The presented approach generally allows for the collection of comprehensive information on the Arctic landscape using freely available data. This could assist government agencies and commercial enterprises in developing long-term, sustainable development plans that are based on numerical estimations.

However, the presented approach does have some limitations. Firstly, the analysis of medium-scale data, such as Sentinel and Landsat imagery, requires a longer time series in order to identify significant trends in landscape changes that are conditioned by global climate change. It requires addressing a number of challenges related to the differences between space missions and the characteristics of their imagery. Moreover, the identification of water bodies is a relatively simple task, but the analysis of soil moisture based on spectral indices requires more complex statistical methods, which can help to analyze the trends in changes of each pixel. Additionally, such studies can be complemented by an analysis of correlations between RS data and atmospheric data. Finally, it is worth noting that the conduct of these studies would not have been possible without ground-based observations.

We intend to continue our research into the analysis of water surface changes and their relationships with thermokarst activity across other areas of the Lena Delta. We will primarily focus on islands that are relevant to the third terrace, as they (1) comprise ice-complex deposits, which are particularly susceptible to permafrost degradation; and (2) have been comprehensively described during numerous previous international expeditions. In particular, there is a wealth of geological, geomorphological, geocryological and botanical data available.

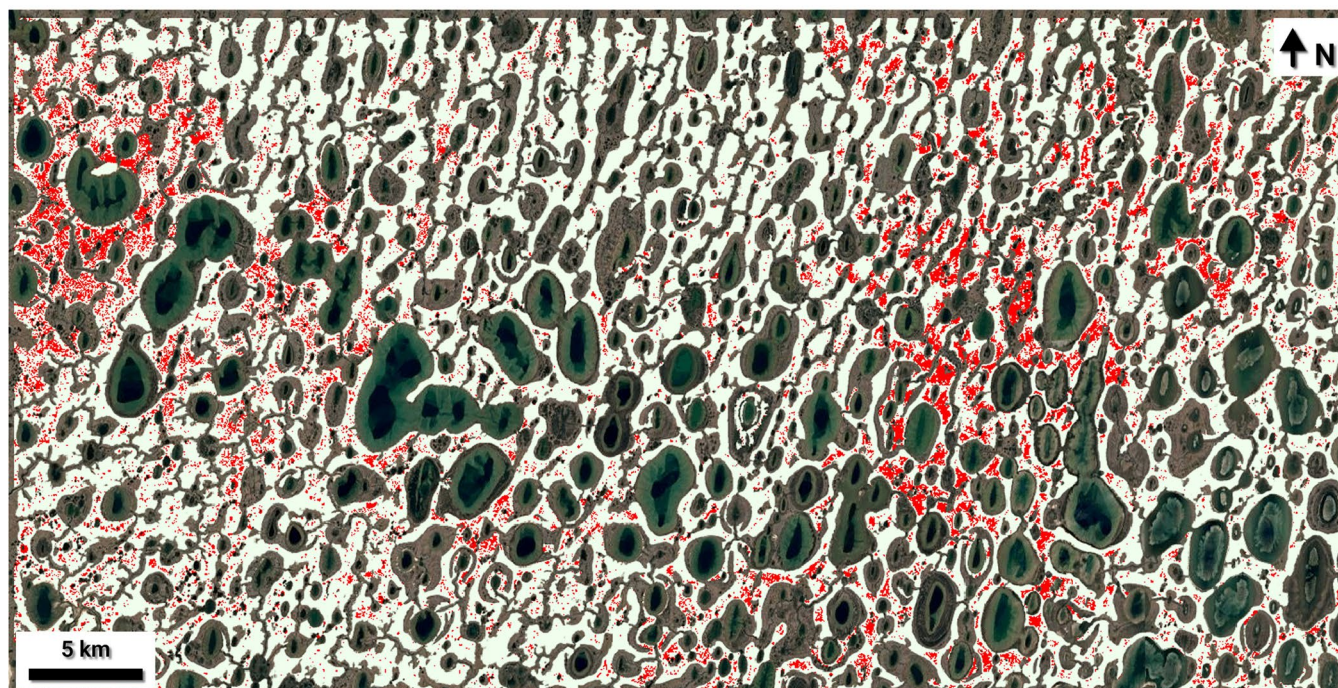


Fig.4. The positive TPI values indicate uplands (white areas) and terrain with positive differences between the 2019 and 2024 MNDWI bands (red areas).

4. Conclusions

Despite the accelerated warming in the Arctic region, Arga Island has not shown a statistically significant change in the extent of its water bodies between 2019 and 2024. This stability is in contrast to the wider pan-Arctic trends, and may be attributed to the unique characteristics of the island and the limited time frame of the analyzed data set. MNDWI analysis has identified upland areas with increasing soil moisture, which are likely precursors to future thermokarst development. The combination of spectral indices, such as MNDWI and Tasseled Cap, and TPI was effective in identifying thermokarst-susceptible areas. However, the 10-meter resolution of Sentinel-2 data limited the detection of smaller water bodies, highlighting the need for additional data from UAVs or high-resolution satellites. Extended monitoring ($\geq$ decadal) and cross-validation with ground-based permafrost metrics (for example, active layer thickness) is essential to distinguish climate-driven changes from local geomorphic feedback. The framework developed in this study is scalable to other regions affected by thermokarst, particularly where field access may be limited. This research enhances our ability to monitor permafrost degradation using remote sensing techniques, providing a valuable baseline for assessing the impacts of climate change on the Arctic.

Acknowledgements

Work is done on state assignment of IGM SB RAS (№122041400252-1).

Conflict of interest

The author declares no conflicts of interest.

References

- Amani M., Brisco B., Afshar M. et al. 2019. A generalized supervised classification scheme to produce provincial wetland inventory maps: an application of Google Earth Engine for big geo data processing. *Big Earth Data* 3(4): 378–394. DOI: [10.1080/20964471.2019.1690404](https://doi.org/10.1080/20964471.2019.1690404)
- Boike J., Nitzbon J., Anders K. et al. 2019. A 16-year record (2002–2017) of permafrost, active-layer, and meteorological conditions at the Samoylov Island Arctic permafrost research site, Lena River delta, northern Siberia: an opportunity to validate remote-sensing data and land surface, snow, and permafrost models. *Earth System Science Data* 11: 261–299. DOI: [10.5194/essd-11-261-2019](https://doi.org/10.5194/essd-11-261-2019)
- Chen Y., Liu A., Cheng X. 2022. Landsat-based monitoring of landscape dynamics in Arctic permafrost region. *Journal of Remote Sensing* 2022: 9765087. DOI: [10.34133/2022/9765087](https://doi.org/10.34133/2022/9765087)
- Cohen J., Screen J., Furtado J. et al. 2014. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nature Geoscience* 7(9): 627–637. DOI: [10.1038/ngeo2234](https://doi.org/10.1038/ngeo2234)
- De Reu J., Bourgeois J., Bats M. et al. 2013. Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes. *Geomorphology* 186: 39–49. DOI: [10.1016/j.geomorph.2012.12.015](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.12.015)
- Farquharson L.M., Romanovsky V.E., Cable W.L. et al. 2019. Climate change drives widespread and rapid thermokarst development in very cold permafrost in the Canadian high Arctic. *Geophysical Research Letters* 46: 6681–6689. DOI: [10.1029/2019GL082187](https://doi.org/10.1029/2019GL082187)
- French H.M. 2017. The periglacial environment. Fourth edition. Chichester, UK: John Wiley & Sons. DOI: [10.1002/9781119132820](https://doi.org/10.1002/9781119132820)
- Gao B. 1996. NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment* 58(3): 257–266. DOI: [10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Gorelick N., Hancher M., Dixon M. et al. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Big Remotely Sensed Data: tools, applications and experiences* 202: 18–27. DOI: [10.1016/j.rse.2017.06.031](https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031)

- Grigoriev M.N. 1993. Criomorphogenesis in the Lena Delta. Yakutsk, USSR: Permafrost Institute Press. (in Russian)
- Grosse G., Harden J., Turetsky M. et al. 2011. Vulnerability of high-latitude soil organic carbon in North America to disturbance. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 116: G00K06. DOI: [10.1029/2010JG001507](https://doi.org/10.1029/2010JG001507)
- Imaeva L.P., Gusev G.S., Imaev V.S. 2019. Dynamics of the relief and sismotectonic activity of the modern structures in the delta of the river Lena. *Geotectonics* 5: 62–77. DOI: [10.31857/S0016-853X2019562-77](https://doi.org/10.31857/S0016-853X2019562-77)
- Jensen J.R. 2016. Introductory digital image processing: a remote sensing perspective. Upper Saddle River: Prentice-Hall Inc.
- Jorgenson M.T. 2013. Thermokarst Terrains. In: Shroder J.F. (Ed.), *Treatise on Geomorphology*. San Diego: Academic Press, pp. 313–324. DOI: [10.1016/B978-0-12-374739-6.00215-3](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00215-3)
- Kanevskiy M., Shur Y., Jorgenson T. et al. 2017. Degradation and stabilization of ice wedges: Implications for assessing risk of thermokarst in northern Alaska. *Geomorphology* 297: 20–42. DOI: [10.1016/j.geomorph.2017.09.001](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.09.001)
- Kartozia A. 2024. Using Google Earth Engine to assess the current state of thermokarst terrain on Arga Island (the Lena Delta) *Earth* 5(2):228–243. DOI: [10.3390/earth5020012](https://doi.org/10.3390/earth5020012)
- Kartozia A. 2025. Machine learning and morphometric analysis for evaluating the vulnerability of tundra landscapes to thermokarst hazards in the Lena Delta: A Case Study of Arga Island. *GeoHazards* 6(2): 31. DOI: [10.3390/geoHazards6020031](https://doi.org/10.3390/geoHazards6020031)
- Kokelj S.V., Jorgenson M.T. 2013. Advances in thermokarst research. *Permafrost and Periglacial Processes* 24(2):108–119. DOI: [10.1002/ppp.1779](https://doi.org/10.1002/ppp.1779)
- Lee H., Romero J. 2023. Climate Change 2023: Synthesis report. Contribution of working groups i, ii and iii to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Geneva, Switzerland: IPCC. DOI: [10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.00](https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.00)
- Liljedahl A., Boike J., Daanen R. et al. 2016. Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology. *Nature Geoscience* 9(4): 312–318. DOI: [10.1038/ngeo2674](https://doi.org/10.1038/ngeo2674)
- Lisovski S., Runge A., Shevtsova I. et al. 2025. A new habitat map of the Lena Delta in Arctic Siberia based on field and remote sensing datasets. *Earth System Science Data Discussions* 17(4): 1707–1730. DOI: [10.5194/essd-17-1707-2025](https://doi.org/10.5194/essd-17-1707-2025)
- Merchant M., Brisco B., Mahdianpar M. et al. 2023. Leveraging google earth engine cloud computing for large-scale arctic wetland mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 125: 103589. DOI: [10.1016/j.jag.2023.10358](https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.10358)
- Nitze I., Grosse G. 2016. Detection of landscape dynamics in the Arctic Lena Delta with temporally dense Landsat time-series stacks. *Remote Sensing of Environment* 181: 27–41. DOI: [10.1016/j.rse.2016.03.038](https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.03.038)
- Nitze I., Grosse G., Jones B.M. et al. 2017. Landsat-based trend analysis of lake dynamics across northern permafrost regions. *Remote Sensing* 9(7): 640. DOI: [10.3390/rs9070640](https://doi.org/10.3390/rs9070640)
- Nitze I., Grosse G., Jones B.M. et al. 2018. Remote sensing quantifies widespread abundance of permafrost region disturbances across the Arctic and Subarctic. *Nature Communications* 9(1): 5423. DOI: [10.1038/s41467-018-07663-3](https://doi.org/10.1038/s41467-018-07663-3)
- Romanovsky V.E., Smith S.L., Shiklomanov N.I. et al. 2017. Terrestrial permafrost. In Blunden J. and Arndt D. (Ed.), *State of the Climate in 2016*. Boston: Bulletin of the American Meteorological Society. pp. S147-S151.
- Schuur E.A.G., Mack M.C. 2018. Ecological Response to Permafrost Thaw and Consequences for Local and Global Ecosystem Services. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 49: 279–301. DOI: [10.1146/annurev-ecolsys-121415-032349](https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-121415-032349)
- Schwamborn G., Andreev A.A., Rachold V. et al. 2002. Evolution of Lake Nikolay, Arga Island, western Lena River Delta, during Late Pleistocene and Holocene time. *Polarforschung* 70: 69–82.
- Schwamborn G., Rachold V., Grigoriev M.N. 2002. Late Quaternary sedimentation history of the Lena Delta. *Quaternary International* 89(1): 119–134. DOI: [10.1016/S1040-6182\(01\)00084-2](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(01)00084-2)
- Shi T., Xu H. 2019. Derivation of tasseled cap transformation coefficients for Sentinel-2 MSI at-sensor reflectance data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 12(10): 4038–4048. DOI: [10.1109/JSTARS.2019.2938388](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2938388)
- Streletskiy D., Anisimov O., Vasiliev A. 2015. Permafrost degradation. In: Shroder J.F., Haeberli W., Whiteman C. (Ed.), *Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters*. San Diego: Academic Press, pp. 303–344. DOI: [10.1016/B978-0-12-394849-6.00010-X](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394849-6.00010-X)
- Veremeeva A., Nitze I., Günther F. et al. 2021. Geomorphological and climatic drivers of thermokarst lake area increase trend (1999–2018) in the Kolyma Lowland yedoma region, North-Eastern Siberia. *Remote Sensing* 13(2): 178. DOI: [10.3390/rs13020178](https://doi.org/10.3390/rs13020178)
- Yu Y., Hui F., Zhou Y. et al. 2024. The first 10 m resolution thermokarst lake and pond dataset for the Lena Basin in the 2020 thawing season. *Big Earth Data* 8: 302–332. DOI: [10.1080/20964471.2023.2280279](https://doi.org/10.1080/20964471.2023.2280279)
- Zaplavnova A.A., Deev E.V., Potapov V.V. 2024. Structure of the Upper Part of the Earth's Crust in the Area of the Lena River Delta: The First Magnetotelluric Data. *Doklady Earth Sciences* 514: 249–254. DOI: [10.1134/S1028334X23602833](https://doi.org/10.1134/S1028334X23602833)

Анализ изменений водной поверхности на острове Арга (дельта Лены) на основе данных дистанционного зондирования

Оригинальная статья

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Картозия А.А.*

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, пр. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, 630090, Россия

АННОТАЦИЯ. Современный тренд изменения климата приводит к интенсификации деградации подземных льдов в арктических регионах, которая выражается в значительной трансформации геолого-геоморфологических условий. В данном исследовании изучена динамика водной поверхности на острове Арга (дельта реки Лены), путем анализа спутниковых снимков Sentinel-2 (2019-2024 гг.) и цифровой модели рельефа. Применен комплексный подход, сочетающий анализ медианных композитов, рассчитанных спектральных индексов (MNDWI, NDVI, Tasseled Cap) и управляемую классификацию для количественной оценки изменений водных объектов и влажности почв. Индекс топографической позиции (TPI), рассчитанный на основе ArcticDEM, позволил выявить участки, которые особенно подвержены термокарстовым процессам. Результаты свидетельствуют о стабильности площадей водных объектов за шестилетний период без значительных изменений. Например, 388 км² в понижениях рельефа в 2019 г. против 390 км² в 2024 г.). Однако анализ значений MNDWI между 2019 и 2024 гг. выявил локальное увеличение влажности на плоских возвышенных участках, указывающее на интенсификацию термокарста в их пределах. Эти зоны, характеризующиеся положительными значениями TPI и ростом значений индекса увлажнения, представляют собой участки особенно уязвимые к будущим трансформациям рельефа из-за деградации многолетнемерзлых пород. Проведенное исследование демонстрирует эффективность и удобство облачных технологий (Google Earth Engine) для обработки данных дистанционного зондирования. Однако для выявления трендов на более детальном уровне требуются более длинные временные ряды и данные высокого разрешения. Совместное использование спектральных индексов и морфометрических характеристик рельефа создает воспроизводимую основу для мониторинга термокарстовой активности в труднодоступных арктических регионах.

Ключевые слова: термокарст, дельта Лены, озера, машинное обучение, дистанционное зондирование

Для цитирования: Картозия А.А. Анализ изменений водной поверхности на острове Арга (дельта Лены) на основе данных дистанционного зондирования // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - С. 1039-1051. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-1039

1. Введение

Современные данные указывают на рост глобальной температуры земной поверхности, причем последнее десятилетие стало самым теплым за всю историю наблюдений (Lee and Romero, 2023). Данное потепление усиливается в арктических регионах, где рост температур примерно в два раза быстрее средних мировых значений (Cohen et al., 2014), что обуславливает глубокие изменения экосистем Арктики. Термокарстовые процессы, характеризующиеся просадкой поверхности вследствие таяния льдистых грунтов, выступают значимым фактором трансформации рельефа в Арктике (Jorgenson, 2013). Эти процессы находят свое отра-

жение в увеличении влажности почв, количества и площади водных объектов, изменении гидросети территории, а также резком изменении растительного и почвенного покрова (Streletskiy et al., 2015; Nitze et al., 2018).

Динамика поверхностных вод служит ключевым индикатором термокарстовой активности. Увеличение площади озер и рост влажности почв могут свидетельствовать о начальной стадии формирования термокарстовых понижений (Grosse et al., 2011; Liljedahl et al., 2016; French, 2017). Количественная оценка изменений площади водных объектов и влажности почв критически важна для: определения порогов стабильности многолетнемерзлых пород (ММП), прогнозирования очагов

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: andrei.kartozia@igm.nsc.ru (А.А. Kartozia)

Поступила: 31 июля 2025; Принята: 20 августа 2025;

Опубликована online: 31 августа 2025

© Автор(ы) 2025. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



выбросов метана, оценки уязвимости инфраструктуры, моделирования сдвигов гидрологического режима (Grosse et al., 2011; Jorgenson, 2013; Kokelj and Jorgenson, 2013; Schuur and Mack, 2018).

В настоящее время анализ данных дистанционного зондирования (ДДЗ) стал одним из основных методов оценки изменений арктических территорий. Современные облачные платформы, такие как Google Earth Engine (GEE), вывели на новый уровень мониторинг окружающей среды Арктики (Gorelick et al., 2017). Облачные технологии позволили накопить значительный набор спутниковых данных мультисенсорных систем в открытом доступе, а также автоматизировать и значительно ускорить процессы обработки и анализа ДДЗ.

В данном исследовании мы оценили изменения площади водных объектов на острове Арга (дельта реки Лены) за последние шесть лет. Этот остров представляет собой уникальный полигон для анализа термоденудационных процессов и их связи с геологическим и геоморфологическим строением местности (Kartozia, 2024; 2025). Для решения поставленной задачи были выполнены следующие работы. (1) Подготовка набора данных, включающего снимки Sentinel-2 (2019-2024 гг.) и цифровую модель рельефа (ЦМР), с генерацией медианных композитов и расчетом индекса топографической позиции (TPI). (2) Оценка динамики водной поверхности путем идентификации водных объектов в ежегодных медианных композитах методом управляемой классификации. (3) Выявление участков, уязвимых к термокарстовым процессам, путем анализа увлажнения почв и рельефа территории.

2. Материалы и Методы

2.1. Территория исследований

Район исследований прямоугольной формы расположен в центральной части острова Арга (73.4° с.ш., 124.1° в.д.) и обладает площадью приблизительно 2000 км² (Рис. 1). Остров занимает северо-западную часть дельты Лены, относясь ко

второму надпойменному геоморфологическому уровню с абсолютными отметками 10–30 м над ур. м. (Schwamborn et al., 2002b). Вопросы генезиса четвертичных отложений, которые слагают острова дельты, в данной работе не рассматриваются. Для территории характерны: сплошное распространение ММП на глубину 400–1000 м и сезонно-талый слой толщиной 20–40 см (Григорьев, 1993; Zaplavnova et al., 2024). Отложения, слагающие остров, характеризуются массивной криотекстурой и в них распространены тонкие повторно-жильные льды (Григорьев, 1993; Schwamborn et al., 2002a). Уникальность острова для изучения термоденудационных процессов обусловлена следующими факторами. Рельеф территории в значительной степени однообразен. В пределах острова распространены термокарстовые котловины и термоэрозионные долины. Это значительно упрощает анализ рельефа местности. В котловинах обычно располагаются удлинённые озера субмеридионального простирания (Григорьев, 1993). В пределах дельты активны неотектонические процессы, обуславливающие разно-амплитудные движения блоков, которые, в свою очередь, выражаются в рельефе островов (Imaeva et al., 2019; Zaplavnova et al., 2024). Тундровая растительность позволяет изучать рельеф без необходимости учета влияния растительности, а отличия отражательной способности различных ботанических сукцессий помогает проследить этапность формирования криогенного рельефа (Lisovski et al., 2025). Также отметим, что территория острова практически недоступна для полевых исследований, что требует применения дистанционных методов анализа для получения данных.

2.2. Обработка данных и методы

В ходе исследования было проанализировано 38 спутниковых снимков Sentinel-2 за период с 2019 по 2024 год (2019 – 4 снимка, 2020 – 8, 2021 – 4, 2022 – 6, 2023 – 9, 2024 – 7). Безоблачные снимки летних сезонов были отобраны путем фильтрации (менее

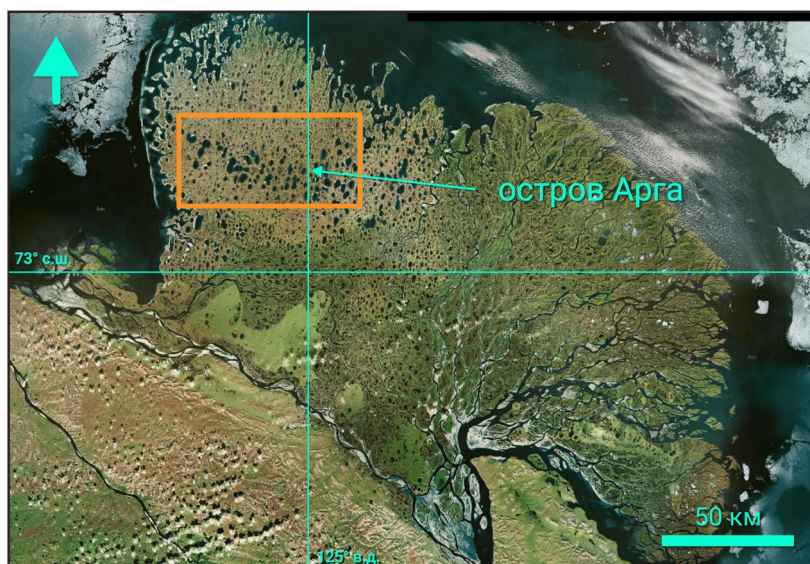


Рис.1. Территория исследований (оранжевый квадрат) на мозаике спутниковых снимков Sentinel-2.

5% облачности). Имеющийся на снимках облачный покров маскировался с использованием канала QA60. На первом этапе обработки данных был применен метод главных компонент (PCA). Для генерации канала PCA1 использовались исходные каналы спутниковых снимков Sentinel-2. Средняя дисперсия первого канала преобразования PCA составила 95,5. Другими словами, данный канал, рассчитанный для каждого снимка и вошедший в анализируемые композиты, комплексно характеризует все исходные каналы спутниковых изображений. Затем к композиту были добавлены следующие спектральные индексы, рассчитанные на основе исходных каналов спутниковых изображений: NDVI, MNDWI (Gao, 1996), а также индексы «зелености» (TSG) и «влажности» (TSW) из преобразования Tasseled Cap (Shi and Xu, 2019). Эти индексы широко используются для анализа Арктики и характеризуют растительный покров и гидрологические условия территории. Эти процедуры были выполнены для всех отобранных снимков. Впоследствии были сгенерированы ежегодные медианные композиты из обработанных изображений. Эти медианные композиты включали нормализованные исходные каналы Sentinel-2, PCA1, а также индексы NDVI, MNDWI, TSG и TSW. Дополнительно в исследовании использовалась цифровая модель рельефа (ЦМР) ArcticDEM, представляющая собой самую детальную ЦМР свободного доступа на территорию Арктики.

Анализ изменений площади водной поверхности проводился путем идентификации водных объектов на медианных композитах с использованием метода управляемой классификации. Для классификации использовались следующие каналы композитных данных: PCA1, NDVI, MNDWI, TSG, TSW, B8, B11 и B12. В качестве алгоритма классификации применялся метод минимального расстояния (Jensen, 2016), который возвращает ближайший класс с использованием косинусной метрики расстояния. Для обучения модели было выделено 15 тренировочных полигонов для классов «вода» и «земля» на медианном композите за 2021 год. Выбор медианного композита 2021 года для обучения модели обусловлен его равноудаленностью от 2019 и 2024 гг. Затем тренировочные полигоны впоследствии были преобразованы в 41 654 точки с уникальными значениями, которые затем случайным образом были разделены на две группы: 65% для обучения и 35% для тестирования. Анализ средних спектральных характеристик классов «вода» и «земля» выявил значимые различия между ними в выбранных каналах (Рис. 2).

После была выполнена классификация медианного композита за 2021 год и оценена точность модели. Для оценки точности были рассчитаны матрица ошибок и метрики качества: общая точность (OA), полнота (recall), точность (precision). Все метрики дали 100% результат точности. Высокие показатели статистической точности во время классификации на два класса обычны для подобных исследований (Amani et al., 2019; Merchant et al., 2023; Yu et al., 2024). Это связано с

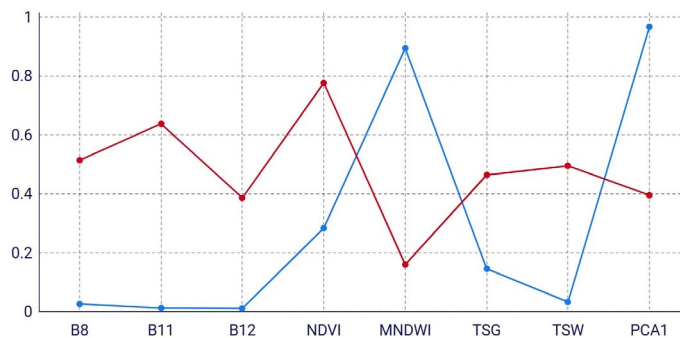


Рис.2. Спектральные характеристики поверхностей водных объектов (синяя линия) и земли (красная линия). По оси Y нормализованные значения каналов Sentinel-2 и индексов.

тем, что эталонные полигоны, т.е. данные для тренировки и валидации моделей, для поверхностей земли и воды берутся исследователями на участках, которые визуальным образом однозначно относятся к одному или другому классу. Поэтому классификатору не составляет труда правильно классифицировать данные для валидации. В дальнейшем при классификации всего композитного изображения у модели могут возникать трудности с отнесением неоднозначных пикселей к тому или иному классу. Например, при классификации участков заросших мелких водоемов. Поэтому для подтверждения адекватности результатов общепринятой практикой является дополнительный визуальный анализ. В данном случае такой анализ подтвердил высокую точность выделения водных объектов, что согласуется с предыдущими исследованиями (Kartozia, 2024; 2025) (Рис. 3). На завершающем этапе были классифицированы медианные композиты за другие годы исследования, что позволило получить данные о площадях водных объектов для каждого анализируемого года.

Дополнительно для дифференциации водных объектов и оценки их площадей в пределах термокарстовых впадин и еще недеградировавших возвышенностей использовалась ЦМР. Мы вычислили индекс топографической позиции (ТПИ) для определения впадин (отрицательные значения) и возвышенностей (положительные значения) (De Reu et al., 2013). Индекс ТПИ рассчитывался как разность между значениями двух усредненных ЦМР, полученных из исходной цифровой модели рельефа с использованием скользящих окон радиусом 100 м и 1000 м.

Все работы в рамках исследования были выполнены в облачном сервисе Google Earth Engine.

3. Результаты и обсуждения

Как уже упоминалось ранее, в арктических территориях наблюдается устойчивый тренд повышения среднегодовых температур (Lee and Romero, 2023). В разных регионах Арктики этот тренд привел к активному таянию ММП (Romanovsky et al., 2017), образованию термоденудационных форм

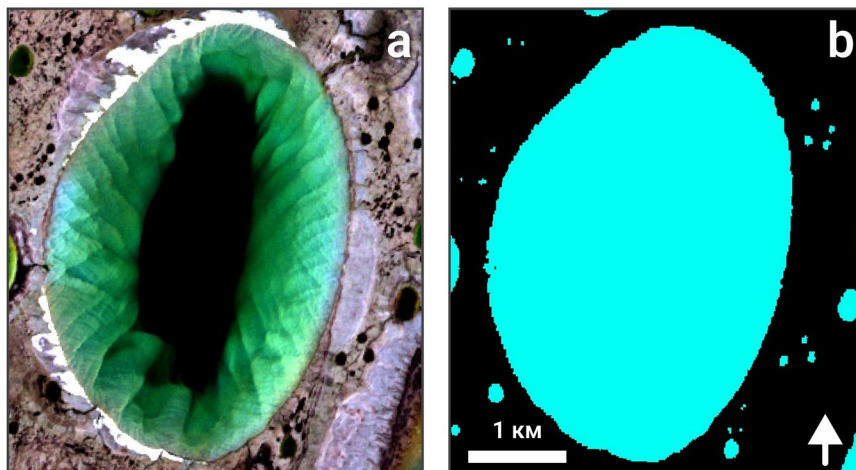


Рис.3. Фрагмент территории исследования на спутниковом снимке 2021 года (a) и результате классификации медианного композитного изображения за тот же год (b; голубым цветом выделены водные поверхности, черным – земля).

рельефа (Kanevskiy et al., 2017), увеличению мощности сезонно-талого слоя (СТС) (Farquharson et al., 2019) и увеличению площади озер (Lee and Romero, 2023). Эти изменения наблюдаются как на данных дистанционного зондирования, так и на данных с метеостанций и полевых исследований. Непосредственно площади термокарстовых озер в Арктике как правило медленно увеличиваются (Chen et al., 2022). Однако локальная динамика изменений в разных регионах может отличаться. Более того, даже в рамках одного региона разные исследования могут давать различные результаты. Например, при исследовании Колымской низменности в рамках одного исследования сообщается о сокращении площади озер с 1999 по 2014 год на 0,51% (Nitze et al., 2017), а в рамках другого исследователи пришли к выводу, что площади озер увеличиваются на 0,89% (1999–2013) и 4,15% (1999–2018) (Veremeeva et al., 2021).

Согласно последнему детальному анализу данных об изменении природной среды, собранных на научной станции на острове Самойловский в период 2002-2017 гг., температура ММП на глубине около 21 м увеличилась на 1,3°C (Boike et al., 2019). Однако глубина СТС демонстрировала значительные колебания год к году (Boike et al., 2019). В другом исследовании (Nitze and Grosse, 2016) были проанализированы изменения земной поверхности в пределах дельты по данным космических изображений за период 1999-2014 гг. В результате исследователи выявили расширение большинства озер, а также иссушение около 40 озер. Площади водных объектов не подсчитывались. При составлении последней детальной карты растительного покрова по данным дистанционного зондирования и многолетним полевым исследованиям, авторы справедливо отмечают, что водные объекты, особенно небольшого размера, крайне изменчивы (Lisovski et al., 2025). Таким образом, учитывая глобальный тренд потепления и увеличения площади термокарстовых озер, а также локальные данные об изменении природной среды в пределах дельты, мы пытались выяснить проявились ли эти изменения в динамике площади водных объектов. Также

отметим, что в исследовании впервые представлена оценка изменения площадей поверхности водных объектов в пределах дельты реки Лены.

Результаты анализа изменений площади поверхности водных объектов представлены в Таблице 1. Согласно нашим оценкам, они оставались практически неизменными в течение всего анализируемого периода. Даже на возвышенностях, особо подверженных термокарстовым процессам, значимых изменений не зафиксировано. Отсутствие четкого тренда в динамике водной поверхности указывает на то, что шестилетний период может быть недостаточен для выявления статистически значимых тенденций. Кроме того, пространственное разрешение данных Sentinel-2 (10 м), являясь наилучшим среди бесплатных спутниковых продуктов, возможно, недостаточно для детального анализа. Тем не менее, полученные результаты свидетельствуют об отсутствии катастрофических изменений территории и резкого увеличения площади водных объектов.

На следующем этапе исследования были выявлены территории, подверженные термокарстовым процессам. Уязвимые зоны идентифицированы посредством совместного анализа увлажнённости территории и рельефа. Проведен анализ значений индекса MNDWI медианных композитов за 2019 и 2024 гг. Вычитание значений композита 2024 г.

Таблица 1. Площадь водной поверхности в пределах района исследований в 2019-2024 гг.

Год	Площадь водной поверхности на возвышенностях (км ²)	Площадь водной поверхности в понижениях рельефа (км ²)
2019	13	388
2020	14	403
2021	14	398
2022	15	400
2023	14	398
2024	13	390

из данных 2019 г. позволило выделить области с положительной разницей значений, указывающей на увеличение влажности почв. Далее эти участки были оконтурены в пределах положительных значений индекса TPI (Рис. 4). Можно предположить, что данные участки претерпят максимальное воздействие термокарста в будущем. Примечательно, что эти зоны обладают наиболее высоким потенциалом для трансформации рельефа в отличие от прилегающих территорий во впадинах, где значительные изменения уже произошли.

Полученные результаты демонстрируют возможности мониторинга состояния криогенного рельефа и оценки активности термокарста на основе анализа водных поверхностей и влажности почв. Представленный подход позволяет получать комплексную информацию об арктических ландшафтах с использованием общедоступных данных, что может способствовать разработке долгосрочных планов устойчивого развития государственными и коммерческими организациями.

Тем не менее, представленный подход имеет ряд ограничений. Во-первых, анализ данных среднего разрешения (снимки Sentinel, Landsat) требует более длительных временных рядов для выявления значимых трендов, обусловленных глобальным изменением климата. Это предполагает решение проблем, связанных с различиями между космическими миссиями и характеристиками их данных. Во-вторых, если идентификация водных объектов относительно проста, то анализ влажности почв на основе спектральных индексов требует применения сложных статистических методов для оценки изменений на уровне отдельных пикселей. Дополнительным направлением исследований может стать анализ корреляций между данными дистанционного зондирования и климатическими

данными. Наконец, проведение подобных исследований затруднительно без проведения полевых наблюдений.

В дальнейшем мы планируем расширить исследования динамики водной поверхности и ее связи с термокарстовой активностью на другие территории в пределах дельты реки Лены. Основное внимание будет уделено островам третьего надпойменного геоморфологического уровня, поскольку они: (1) сложены ледовыми отложениями, особо уязвимыми к деградации мерзлоты; (2) хорошо изучены в ходе предыдущих международных экспедиций. В частности, по ним накоплены обширные геологические, геоморфологические, геокриологические и ботанические данные.

4. Выводы

Несмотря на наблюдающийся тренд повышения температур поверхности Земли в Арктике, на острове Арга не выявлено статистически значимых изменений площади водных объектов в период 2019-2024 гг. Эта стабильность контрастирует с выявленной для Арктики тенденцией повышения температур и может объясняться уникальными характеристиками изученной территории и ограниченной продолжительностью анализируемого временного ряда. Анализ MNDWI позволил идентифицировать участки возвышенностей с растущей влажностью почв, которые, вероятно, в ближайшем будущем претерпят воздействие термокарста. Сочетание спектральных индексов (NDVI, MNDWI, Tasseled Cap) и TPI доказало эффективность в выявлении участков, которые наиболее уязвимы для процессов деградации подземных льдов. Пространственное разрешение снимков Sentinel-2 (10 м) не позволяет изучать малые водные объекты,

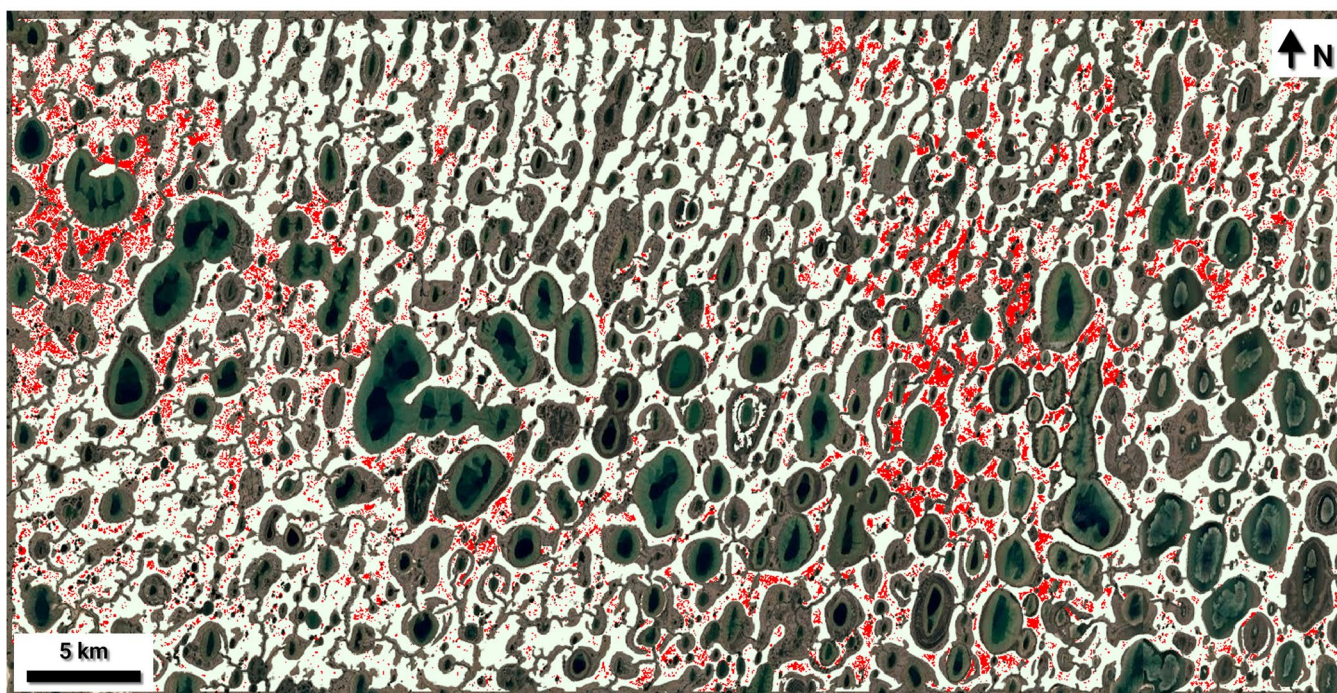


Рис.4. Положительные значения TPI соответствуют возвышенностям (белые области). Красным цветом выделены территории с положительной разницей значений MNDWI (2019 г. минус 2024 г.).

что подчеркивает необходимость привлечения данных с беспилотных летательных аппаратов или высокодетальных спутниковых изображений. Для выделения климатически обусловленных изменений рельефа и водных объектов важен продолжительный мониторинг (≥ 10 лет) и валидация наземными измерениями. Разработанный подход может быть масштабируем на другие районы, испытывающие воздействие термоденудационных процессов, особенно труднодоступные для полевых исследований. Выполненная работа расширяет возможности мониторинга деградации подземных льдов средствами дистанционного зондирования, формируя базис для оценки климатических воздействий на арктические экосистемы.

Благодарности

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН (№122041400252-1).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Григорьев М.Н. 1993. Криоморфогенез устьевой области р. Лены Якутск: ИМЗ СО РАН.
- Amani M., Brisco B., Afshar M. et al. 2019. A generalized supervised classification scheme to produce provincial wetland inventory maps: an application of Google Earth Engine for big geo data processing. *Big Earth Data* 3(4): 378–394. DOI: [10.1080/20964471.2019.1690404](https://doi.org/10.1080/20964471.2019.1690404)
- Boike J., Nitzbon J., Anders K. et al. 2019. A 16-year record (2002–2017) of permafrost, active-layer, and meteorological conditions at the Samoylov Island Arctic permafrost research site, Lena River delta, northern Siberia: an opportunity to validate remote-sensing data and land surface, snow, and permafrost models. *Earth System Science Data* 11: 261–299. DOI: [10.5194/essd-11-261-2019](https://doi.org/10.5194/essd-11-261-2019)
- Chen Y., Liu A., Cheng X. 2022. Landsat-based monitoring of landscape dynamics in Arctic permafrost region. *Journal of Remote Sensing* 2022: 9765087. DOI: [10.34133/2022/9765087](https://doi.org/10.34133/2022/9765087)
- Cohen J., Screen J., Furtado J. et al. 2014. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nature Geoscience* 7(9): 627–637. DOI: [10.1038/ngeo2234](https://doi.org/10.1038/ngeo2234)
- De Reu J., Bourgeois J., Bats M. et al. 2013. Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes. *Geomorphology* 186: 39–49. DOI: [10.1016/j.geomorph.2012.12.015](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.12.015)
- Farquharson L.M., Romanovsky V.E., Cable W.L. et al. 2019. Climate change drives widespread and rapid thermokarst development in very cold permafrost in the Canadian high Arctic. *Geophysical Research Letters* 46: 6681–6689. DOI: [10.1029/2019GL082187](https://doi.org/10.1029/2019GL082187)
- French H.M. 2017. The periglacial environment. Fourth edition. Chichester, UK: John Wiley & Sons. DOI: [10.1002/9781119132820](https://doi.org/10.1002/9781119132820)
- Gao B. 1996. NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment* 58(3): 257–266. DOI: [10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Gorelick N., Hancher M., Dixon M. et al. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Big Remotely Sensed Data: tools, applications and experiences 202*: 18–27. DOI: [10.1016/j.rse.2017.06.031](https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031)
- Grosse G., Harden J., Turetsky M. et al. 2011. Vulnerability of high-latitude soil organic carbon in North America to disturbance. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 116: G00K06. DOI: [10.1029/2010JG001507](https://doi.org/10.1029/2010JG001507)
- Imaeva L.P., Gusev G.S., Imaev V.S. 2019. Dynamics of the relief and sesmotectonic activity of the modern structures in the delta of the river Lena. *Geotectonics* 5: 62–77. DOI: [10.31857/S0016-853X2019562-77](https://doi.org/10.31857/S0016-853X2019562-77)
- Jensen J.R. 2016. Introductory digital image processing: a remote sensing perspective. Upper Saddle River: Prentice-Hall Inc.
- Jorgenson M.T. 2013. Thermokarst Terrains. In: Shroder J.F. (Ed.), *Treatise on Geomorphology*. San Diego: Academic Press, pp. 313–324. DOI: [10.1016/B978-0-12-374739-6.00215-3](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00215-3)
- Kanevskiy M., Shur Y., Jorgenson T. et al. 2017. Degradation and stabilization of ice wedges: Implications for assessing risk of thermokarst in northern Alaska. *Geomorphology* 297: 20–42. DOI: [10.1016/j.geomorph.2017.09.001](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.09.001)
- Kartozia A. 2024. Using Google Earth Engine to assess the current state of thermokarst terrain on Arga Island (the Lena Delta) *Earth* 5(2):228–243. DOI: [10.3390/earth5020012](https://doi.org/10.3390/earth5020012)
- Kartozia A. 2025. Machine learning and morphometric analysis for evaluating the vulnerability of tundra landscapes to thermokarst hazards in the Lena Delta: A Case Study of Arga Island. *GeoHazards* 6(2): 31. DOI: [10.3390/geohazards6020031](https://doi.org/10.3390/geohazards6020031)
- Kokelj S.V., Jorgenson M.T. 2013. Advances in thermokarst research. *Permafrost and Periglacial Processes* 24(2):108–119. DOI: [10.1002/ppp.1779](https://doi.org/10.1002/ppp.1779)
- Lee H., Romero J. 2023. Climate Change 2023: Synthesis report. Contribution of working groups i, ii and iii to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Geneva, Switzerland: IPCC. DOI: [10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.00](https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.00)
- Liljedahl A., Boike J., Daanen R. et al. 2016. Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology. *Nature Geoscience* 9(4): 312–318. DOI: [10.1038/ngeo2674](https://doi.org/10.1038/ngeo2674)
- Lisovski S., Runge A., Shevtsova I. et al. 2025. A new habitat map of the Lena Delta in Arctic Siberia based on field and remote sensing datasets. *Earth System Science Data Discussions* 17(4): 1707–1730. DOI: [10.5194/essd-17-1707-2025](https://doi.org/10.5194/essd-17-1707-2025)
- Merchant M., Brisco B., Mahdianpar M. et al. 2023. Leveraging google earth engine cloud computing for large-scale arctic wetland mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 125: 103589. DOI: [10.1016/j.jag.2023.103589](https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103589)
- Nitze I., Grosse G. 2016. Detection of landscape dynamics in the Arctic Lena Delta with temporally dense Landsat time-series stacks. *Remote Sensing of Environment* 181: 27–41. DOI: [10.1016/j.rse.2016.03.038](https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.03.038)
- Nitze I., Grosse G., Jones B.M. et al. 2017. Landsat-based trend analysis of lake dynamics across northern permafrost regions. *Remote Sensing* 9(7): 640. DOI: [10.3390/rs9070640](https://doi.org/10.3390/rs9070640)
- Nitze I., Grosse G., Jones B.M. et al. 2018. Remote sensing quantifies widespread abundance of permafrost region disturbances across the Arctic and Subarctic. *Nature Communications* 9(1): 5423. DOI: [10.1038/s41467-018-07663-3](https://doi.org/10.1038/s41467-018-07663-3)
- Romanovsky V.E., Smith S.L., Shiklomanov N.I. et al. 2017. Terrestrial permafrost. In Blunden J. and Arndt D. (Ed.), *State of the Climate in 2016*. Boston: Bulletin of the American Meteorological Society. pp. S147-S151.

Schuur E.A.G., Mack M.C. 2018. Ecological Response to Permafrost Thaw and Consequences for Local and Global Ecosystem Services. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 49: 279–301. DOI: [10.1146/annurev-ecolsys-121415-032349](https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-121415-032349)

Schwamborn G., Andreev A.A., Rachold V. et al. 2002. Evolution of Lake Nikolay, Arga Island, western Lena River Delta, during Late Pleistocene and Holocene time. *Polarforschung* 70: 69–82.

Schwamborn G., Rachold V., Grigoriev M.N. 2002. Late Quaternary sedimentation history of the Lena Delta. *Quaternary International* 89(1): 119–134. DOI: [10.1016/S1040-6182\(01\)00084-2](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(01)00084-2)

Shi T., Xu H. 2019. Derivation of tasseled cap transformation coefficients for Sentinel-2 MSI at-sensor reflectance data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 12(10): 4038–4048. DOI: [10.1109/JSTARS.2019.2938388](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2938388)

Streletskiy D., Anisimov O., Vasiliev A. 2015. Permafrost degradation. In: Shroder J.F., Haeberli W., Whiteman C. (Ed.), *Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters*. San Diego: Academic Press, pp. 303–344. DOI: [10.1016/B978-0-12-394849-6.00010-X](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394849-6.00010-X)

Veremeeva A., Nitze I., Günther F. et al. 2021. Geomorphological and climatic drivers of thermokarst lake area increase trend (1999–2018) in the Kolyma Lowland yedoma region, North-Eastern Siberia. *Remote Sensing* 13(2): 178. DOI: [10.3390/rs13020178](https://doi.org/10.3390/rs13020178)

Yu Y., Hui F., Zhou Y. et al. 2024. The first 10 m resolution thermokarst lake and pond dataset for the Lena Basin in the 2020 thawing season. *Big Earth Data* 8: 302–332. DOI: [10.1080/20964471.2023.2280279](https://doi.org/10.1080/20964471.2023.2280279)

Zaplavnova A.A., Deev E.V., Potapov V.V. 2024. Structure of the Upper Part of the Earth's Crust in the Area of the Lena River Delta: The First Magnetotelluric Data. *Doklady Earth Sciences* 514: 249–254. DOI: [10.1134/S1028334X23602833](https://doi.org/10.1134/S1028334X23602833)