

ВЕСТНИК СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИМЕНИ М.К. АММОСОВА.  
VESTNIK OF NORTH-EASTERN FEDERAL UNIVERSITY.  
СЕРИЯ “НАУКИ О ЗЕМЛЕ. EARTH SCIENCES”

Сетевое научное периодическое издание  
Издается с 2016 года  
Издание выходит 4 раза в год

Учредитель и издатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова»

№ 1 (41) 2026

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

Главный редактор  
*А.Н. Николаев*, д. б. н.

Заместитель главного редактора  
*Е.Э. Соловьев*, к. г. - м. н.  
Выпускающий редактор  
*С.Н. Левина*, к.г.н.

#### Члены редакционной коллегии:

*Верчеба А. А., доктор геолого-минералогических наук; Витченко А. Н., доктор географических наук; Данилов Ю. Г. кандидат географических наук; Лопух П. С., доктор географических наук; Мартынов В. Л., доктор географических наук; Михно В. Б., доктор географических наук; Нестеров Ю. А., кандидат географических наук; Никифорова З. С., доктор геолого-минералогических наук; Носонов А. М., доктор географических наук; Округин А. В., доктор геолого-минералогических наук; Полуфунтикова Л. И., кандидат геолого-минералогических наук; Присяжный М. Ю., доктор географических наук; Саввинова А. Н., кандидат географических наук; Семенов Ю. М., доктор географических наук; Скоринцева И. Б., доктор географических наук; Тесленок С. А., кандидат географических наук; Толстов А. В., доктор геолого-минералогических наук; Фридовский В. Ю., доктор геолого-минералогических наук; Часовский В. И., доктор географических наук.*

Адрес учредителя и издателя: 677000, г. Якутск, ул. Белинского, 58

Адрес редакции: 677010, г. Якутск, ул. Кулаковского, 46, каб. 307  
Тел./факс: +7 (4112) 36-15-18. e-mail: [vestnik\\_geo@mail.ru](mailto:vestnik_geo@mail.ru). <https://vfuzeml.elpub.ru/jour/index>  
Северо-Восточный федеральный университет  
<http://s-vfu.ru/universitet/rukovodstvo-i-struktura/strukturnye-podrazdeleniya/unir/vestnik-svfu/>

VESTNIK OF NORTH-EASTERN FEDERAL UNIVERSITY.  
«EARTH SCIENCES»

Network scientific periodical

Published since 2016

The frequency of publication is 4 times a year

The founder and publisher is Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education  
“The M. K. Ammosov North-Eastern Federal University”

№ 1 (41) 2026

EDITORIAL BOARD OF THE SERIES

Editor-in-Chief

*A. N. Nikovaev*, Doctor of Biological Sciences

Deputy Editor-in-Chief

*E. E. Solovyov*, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences

*S.N. Levina*, Candidate of Geographical Sciences

Members of the Editorial Board of the Series:

*A. A. Vercheba*, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences; *Vitchenko A.N.*, Doctor of Geographical Sciences; *Y. G. Danilov*, Candidate of Geographical Sciences; *Lopuh P. C.*, Doctor of Geographical Sciences; *V. L. Martynov*, Doctor of Geographical Sciences; *V. B. Mikhno*, Doctor of Geographical Sciences; *Y. A. Nesterov*, Candidate of Geographical Sciences; *Z. S. Nikiforova*, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences; *A. M. Nosonov*, Doctor of Geographical Sciences; *A. V. Okrugin*, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences; *L. I. Polufuntikova*, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences; *M. Y. Prisyazny*, Doctor of Geographical Sciences; *A. N. Savvinova*, Candidate of Geographical Sciences; *Y.M. Semenov*, Doctor of Geographical Sciences; *I.B. Skorintseva*, Doctor of Geographical Sciences; *S. A. Teslenok*, Candidate of Geographical Sciences; *A. V. Tolstov*, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences; *V. Y. Fridovsky*, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences; *V. I. Chasovsky*, Doctor of Geographical Sciences.

Founder and publisher address: The North-Eastern Federal University, Belinsky str, 58, Yakutsk, 677000.

Editors Office address: The North-Eastern Federal University, Kulakovskogo st, 46, room 307, Yakutsk, 677010

Telephone/Fax: +7 (4112) 36-15-18. e-mail: [vestnik\\_geo@mail.ru](mailto:vestnik_geo@mail.ru). <https://vfuzeml.elpub.ru/jour/index>

<http://s-vfu.ru/universitet/rukovodstvo-i-struktura/strukturnye-podrazdeleniya/unir/vestnik-svfu/>

---

---

## СОДЕРЖАНИЕ

---

### ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

- Muratov S.M., Fazilova D.Sh.* Monitoring Forest fund lands using remote sensing combined with CollectEarth point data ..... 5
- Пригара А.М., Татаркин А.В., Середин В.В.* Геолого-геофизические модели и методики оценки устойчивости природно-технических систем при подземной разработке месторождений солей ..... 19
- Соловьев Е.Э., Саввинов И.И.* Глубинное строение Западно-Верхоянского сектора Верхоянского складчато-надвигового пояса по геофизическим данным ..... 37

### ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ, ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ И ГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТОВ

- Данилов К.П., Христофоров И.И., Лебедева Л.С., Горохов И.В.* Георадарные исследования субаэральных таликов вдоль федеральных автодорог «Лена» и «Виллой» в криолитозоне Центральной Якутии ..... 49
- Ефремов П.В.* Геокриологическое состояние пахотных земель Лено-Амгинского междуречья при потеплении климата ..... 63
- Ядрихинский И.В., Егорова Т.Р., Власенко В.В., Егорова С.Р., Денисова А.А., Захаров Д.Г.* Механизмы взаимодействия в природно-технических геосистемах «промышленный объект-окружающая среда» ..... 74

---

---

## CONTENT

---

### **GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERALOGY**

*Муратов С.М., Фазилова Д.Ш.* Мониторинг земель лесного фонда с помощью дистанционного зондирования в сочетании с точечными данными CollectEarth ..... 5

*Prigara A.M., Tatarkin A.V., Seredin V.V.* Geological and geophysical models and methods for assessing the stability of natural-technical systems in the underground mining of salt deposits ..... 19

*Solovyov E.E., Savvinov I.I.* The deep structure of the Western Verkhoyansk sector of the Verkhoyansk fold and thrust belt according to geophysical data..... 37

### **PHYSICAL GEOGRAPHY AND BIOGEOGRAPHY, SOIL GEOGRAPHY, AND LANDSCAPE GEOCHEMISTRY**

*Danilov K. P., Khristoforov I. I., Lebedeva L. S., Gorokhov I. V.* GPR research of subaerial taliks along the federal highways “Lena” and “Vilyuy” in the permafrost of Central Yakutia ..... 49

*Efremov P.V.* Geocryological state of croplands in the Lena–Amga interfluve in a warming climate..... 63

*Yadrikhinsky I.V., Egorova T.R., Vlasenko V.V., Egorova S.R., Denisova A.A., Zakharov D. G.* Interactions mechanisms in natural-technical geosystems “industrial facility – environment” ..... 74

# ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

УДК 528.94: 630.17

<https://doi.org/10.25587/2587-8751-2026-1-5-18>

Scientific original article

## MONITORING FOREST FUND LANDS USING REMOTE SENSING COMBINED WITH COLLECTEARTH POINT DATA

*Sanjarbek M. Muratov<sup>1</sup>\*, Dilbarkhon Sh. Fazilova<sup>2</sup>*<sup>1</sup>Mirzo Ulugbek National University of Uzbekistan,  
Tashkent, Uzbekistan<sup>2</sup>Ulugh Beg Astronomical Institute of Uzbekistan Academy of Sciences,  
Tashkent, Uzbekistan

\*murotovs@gmail.com

### Abstract

Uzbekistan's mountainous forests, particularly within the Gissar Range, provide vital ecosystem services such as soil erosion control and biodiversity conservation. However, these semi-arid ecosystems are increasingly pressured by anthropogenic activities, necessitating efficient monitoring tools. This study develops a robust methodology for forest area evaluation in the Dekhkanabad forestry organization using a multi-source remote sensing approach. The methodology integrates Sentinel-2 multispectral imagery with high-resolution Kompsat-3 data and topographic variables derived from an ALOS PALSAR Digital Elevation Model (DEM). To address the spectral heterogeneity of the mountainous terrain, an Object-Based Image Analysis (OBIA) framework was employed. Ground truth data were established using the FAO's Collect Earth tool, through which 1,980 plots were classified according to IPCC and FAO Forest Resources Assessment guidelines. A supervised classification model was implemented using a 70/30 training-to-validation split. The results yielded an overall accuracy of 76 % and a Kappa coefficient of 0.66. While Pasture and Cropland classes showed high reliability, the Forest class (0.198 error) experienced spectral confusion with pastures due to the "open-canopy" nature of local juniper forests, where the understory influences the spectral signature. Settlements presented the highest classification challenge (0.731 error) due to spectral mixing with rural vegetation. Despite these challenges, the OBIA approach significantly reduced "salt-and-pepper" noise and improved boundary definition compared to pixel-based methods. This study provides a cost-effective, statistically reliable baseline for the Dekhkanabad State Forest Fund, offering a scalable workflow for sustainable forest management and conservation planning in Central Asia's semi-arid regions.

**Keywords:** Remote sensing, object-based image analysis (OBIA), land cover mapping, forest types, forest fund lands, Uzbekistan, Dekhkanabad, Sentinel-2, Kompsat 3, CollectEarth

**For citation:** Muratov S.M., Fazilova D.Sh. Monitoring forest fund lands using remote sensing combined with CollectEarth point data. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*. 2026;(1):5-18. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-5-18

## МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ ЛЕСНОГО ФОНДА С ПОМОЩЬЮ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В СОЧЕТАНИИ С ТОЧЕЧНЫМИ ДАННЫМИ COLLECTEARTH

С.М. Муратов<sup>1\*</sup>, Д.Ш. Фазилова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный университет Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

\*murotovs@gmail.com

<sup>2</sup>Астрономический институт им. Улугбека Академии наук Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

### Аннотация

Горные леса Узбекистана, особенно в пределах Гиссарского хребта, играют ключевую роль в предоставлении жизненно важных экосистемных услуг, таких как предотвращение эрозии почвы и сохранение биоразнообразия. Однако эти полуаридные экосистемы подвергаются растущему антропогенному воздействию, что обуславливает необходимость внедрения эффективных инструментов мониторинга. В данном исследовании разработана надежная методология оценки лесных площадей Дехканабадского государственного лесного хозяйства с использованием многосенсорного подхода дистанционного зондирования. Методология интегрирует мультиспектральные снимки Sentinel-2 с данными высокого разрешения Kompsat-3 и топографическими переменными, полученными на основе цифровой модели рельефа (ЦМР) ALOS PALSAR. Для учета спектральной неоднородности горной местности был применен объектно-ориентированный анализ изображений (ОВИА). Опорные данные были собраны с помощью инструмента Collect Earth (ФАО), в рамках которого 1980 участков были классифицированы в соответствии с руководящими принципами МГЭИК и Глобальной оценки лесных ресурсов (FRA) ФАО. Модель контролируемой классификации была реализована с разделением данных на обучающую и валидационную выборки в соотношении 70/30. Результаты показали общую точность классификации 76 % при коэффициенте Каппа 0,66. В то время как классы «Пастбища» и «Пахотные земли» продемонстрировали высокую надежность, класс «Лес» (ошибка 0,198) подвергался спектральному смешению с пастбищами. Это объясняется редколесной структурой местных арчовых лесов, где травянистый покров под пологом деревьев влияет на спектральную сигнатуру. Наибольшие трудности вызвал класс «Населенные пункты» (ошибка 0,731) из-за смешения спектральных характеристик строений и сельской растительности. Несмотря на это, подход ОВИА значительно снизил уровень цифрового шума и улучшил определение границ объектов по сравнению с попиксельными методами. Данное исследование формирует экономически эффективную и статистически надежную базу для мониторинга Дехканабадского лесного фонда.

**Ключевые слова:** Дистанционное зондирование, объектно-ориентированный анализ изображений (ОВИА), картирование растительного покрова, типы лесов, земли лесного фонда, Узбекистан, Дехканабад, Sentinel-2, Kompsat 3, CollectEarth

**Для цитирования:** Муратов С.М., Фазилова Д.Ш. Мониторинг земель лесного фонда с помощью дистанционного зондирования в сочетании с точечными данными CollectEarth. *Вестник СВФУ*. 2026;(1): 5-18. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-5-18

### 1. Introduction

A landlocked country in Central Asia, Uzbekistan possesses diverse landscapes, including arid plains, mountainous regions, and riverine ecosystems. While traditionally known for its vast deserts, Uzbekistan also harbors significant forest resources, particularly in its mountainous areas (e.g., Western Tien Shan, Gissar-Alai ranges) and along river floodplains (e.g., Amu Darya and Syr Darya river basins) [3]. Though often fragmented and under pressure from anthropogenic activities such as agriculture, urbanization, and fuelwood collection, these forests provide critical ecological services, including biodiversity conservation, soil erosion control, water regulation, and carbon sequestration.

Accurate and regular assessment of forest cover is a prerequisite for effective forest management and conservation. Traditional ground-based surveys are labor-intensive, time-consuming, and often

logistically challenging, especially in remote or inaccessible areas. Remote sensing technologies, particularly satellite imagery, offer a cost-effective and efficient alternative for large-scale and repetitive forest monitoring [1,3]. The advent of free and openly accessible satellite data, such as that provided by the European Space Agency’s (ESA) Sentinel-2 mission, has revolutionized land cover mapping and environmental monitoring [2].

Sentinel-2, with its multispectral instrument (MSI) capturing data across 13 spectral bands with spatial resolutions ranging from 10 to 60 meters, provides a rich source of information for vegetation analysis. Its frequent revisit time (5 days at the equator with two satellites) ensures the availability of cloud-free imagery, crucial for monitoring dynamic forest environments. This study aims to leverage Sentinel-2 data and various index-based methods to develop a robust methodology for forest area evaluation and mapping in Uzbekistan. The objective is to provide a comprehensive and accurate assessment of forest distribution, aiding in the sustainable management and conservation of these vital ecosystems.

**2. Materials**

**2.1. Study Area**

This study evaluates forestry areas within the Dekhkanabad forestry organization in Uzbekistan’s Kashkadarya region. Located in the southeast of the region, within the Dekhkanabad district, the forestry spans the slopes of the Gissar Range. The territory is mountainous with diverse altitudes and natural conditions, featuring three relief types: low-mountain (dissected ridges and adyrs up to 1,500 meters, of denudation-tectonic origin), mid-mountain (slopes of denudation-tectonic origin), and high-mountain (alpine areas above 3,000 meters, occupying relatively small areas).

The total land area of the Dehkanabad State Forest Fund is 109,392 hectares, of which 55,689 hectares are forested, 28,068.9 hectares are pastures, and 33,467.7 hectares are other non-agricultural lands. Forests account for 73.6 % of the total forest area, or 55,689 hectares. 36.3 % of the area is non-forested, or 20,229.5 hectares. Cultivated forests account for 1.2 % of the forest area, or 671.7 hectares.

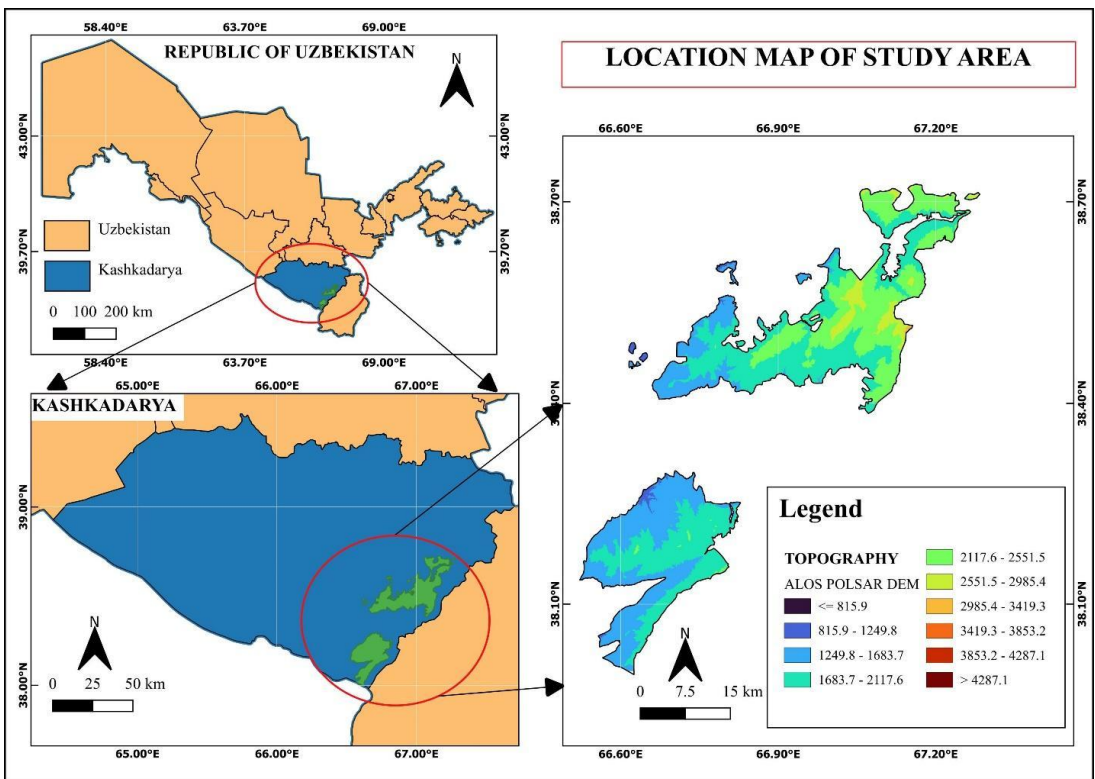


Fig. 1. Study area location

Рис. 1. Местоположение области исследования

The forest plantation region of the forestry enterprise is favorable for the successful growth of tree species such as juniper, walnut, hawthorn, and fruit trees, allowing for the creation of highly productive plantations of these species on the territory of the forestry enterprise.

2.2. Satellite Data Acquisition

Effective use of remote sensing data from multiple sources relies on rigorous pre-processing methodologies to ensure data quality, geometric accuracy, and spectral consistency, thereby optimizing their usefulness for subsequent analysis. In this study, Sentinel-2 and Komsat-3 imagery, augmented with an ALOS PALSAR-derived digital elevation model (DTM) and auxiliary GIS data, underwent a series of specialized pre-processing steps. Sentinel-2 Level-2A data, already atmospherically corrected, were initially subjected to an atmospheric correction check through visual inspection and comparison with ground truth data; where inconsistencies were detected, the FLAASH module in ENVI was used for re-calibration. Subsequent refinement of the geometric correction involved the use of ground control points (GCPs) derived from high-resolution orthorectified imagery and GIS layers, achieving a root mean square error (RMSE) below 0.5 pixels to ensure accurate spatial alignment. The corresponding spectral bands were then stacked to create a multispectral image, after which all bands were resampled to a uniform 10-meter spatial resolution using the nearest neighbor method to preserve the original spectral values.

Complementing Sentinel-2, Komsat-3 images, offering improved spatial resolution, were processed using rigorous geometric correction, again aiming for an RMSE below 0.5 pixels, after

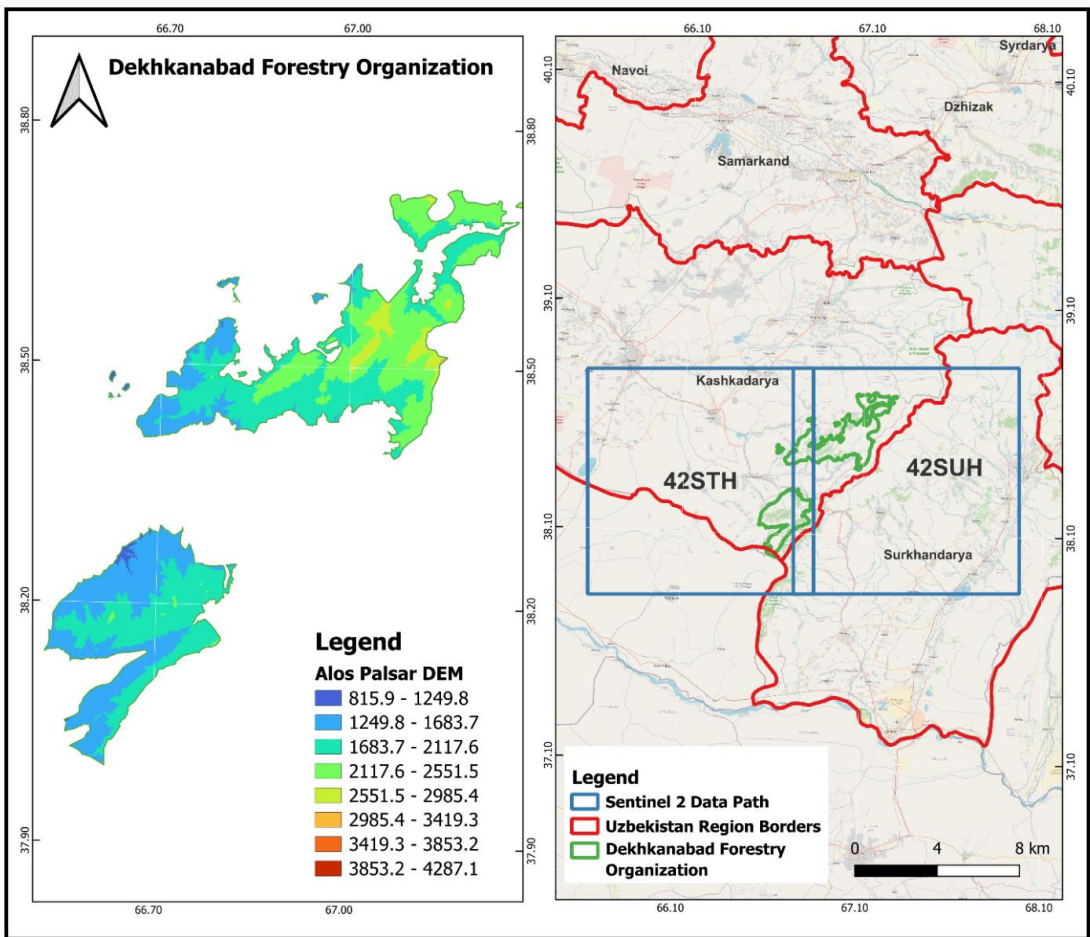


Fig. 2. Location of the area of interest and Sentinel 2 data path

Рис. 2. Расположение исследуемой территории и путь доступа к данным Sentinel-2

which atmospheric correction was performed using the FLAASH module to obtain surface reflectivity values. In addition, the Gram-Schmidt pan-sharpening technique was applied to merge the multispectral and panchromatic bands, resulting in a high-resolution multispectral image.

The ALOS PALSAR L1.1 data, critical for obtaining topographic information, are radiometrically calibrated and geometrically corrected using Range-Doppler terrain correction, followed by interferometric processing to create an interferogram and a wrapped phase image. The phase unwrapping resolves phase ambiguities, and the wrapped phase image is geocoded to create a georeferenced DEM. This original DEM is then filtered to reduce noise, smoothed to minimize artifacts, and void filled using interpolation techniques to ensure a complete and accurate representation of the terrain. The culmination of these pre-processing steps is a carefully prepared dataset ready for subsequent feature extraction, image classification, and spatial analysis.

### 2.3. Pre-processing

Sentinel-2 Level-2A data are already atmospherically corrected [2,6,7,9]. Resampling bands with different spatial resolutions to a common resolution (10m) for consistent analysis was done [5].

### 2.4. Training data

This study leverages Collect Earth, an open-source tool developed by the Food and Agriculture Organization (FAO) and Google, for collecting ground truth data within the Dekhkanabad forestry area. Collect Earth allows for efficient and systematic visual interpretation of high-resolution satellite imagery, facilitating the creation of a spatially explicit database of land cover types. A total of 1,980 Collect Earth plots were interpreted and classified according to a predefined classification scheme, aligning with both Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) and FAO Forest Resources Assessment (FRA) guidelines (Fig 3). This robust dataset provides the necessary ground truth for training and validating the supervised object-based classification model. The classification stage used 70 % of the training data, with the remaining 30 % reserved for validation.

The classification scheme used in Collect Earth incorporated the following land cover categories:

1. Forest: Land covered with forest, characterized by a dominance of tree vegetation.

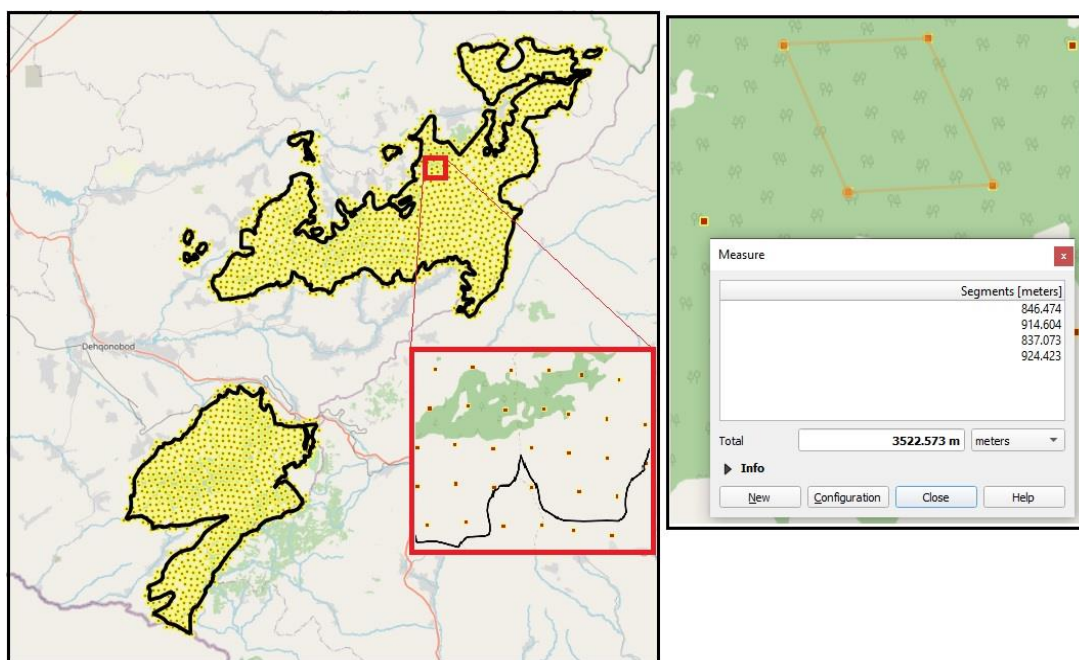


Fig. 3. Generated 0.8 by 0.8 km grid points CollectEarth

Рис. 3. Сгенерированные CollectEarth точки сетки размером 0,8 на 0,8 км

2. Cropland: Land that is regularly cultivated for the purpose of growing crops. This includes both annual and perennial crops.

3. Pasture: Areas of land covered with perennial grasses or forbs. Pastures and permanent pastures include both manicured and unmanicured areas used for grazing livestock.

4. Wetlands: Land covered or saturated with water in whole or in part throughout the year. This category encompasses marshes, swamps, bogs, and similar ecosystems.

5. Settlement: Land that is part of an urban or rural residential setting. This includes buildings, roads, and associated infrastructure within residential areas.

6. Other Land: Land not included in other categories. This residual category encompasses a diverse range of land cover types such as barren land, rock outcrops, and sparsely vegetated areas (Fig 3).

The use of Collect Earth enabled a systematic and consistent approach to ground truth data collection. The tool's ability to overlay high-resolution imagery (e.g., from Google Earth) with plot boundaries and pre-defined classification schemes ensured that the interpreter could accurately and efficiently assign land cover classes to each plot. Furthermore, the integration with Open Foris facilitates data management and analysis, streamlining the process of utilizing ground truth data for land cover mapping and monitoring. The reliance on the IPCC and FAO FRA classification types ensures the comparability of the results with international standards and reporting frameworks.

### 3. Methodology

#### 3.1. Justification of Spectral Indices and Topographic Data Selection

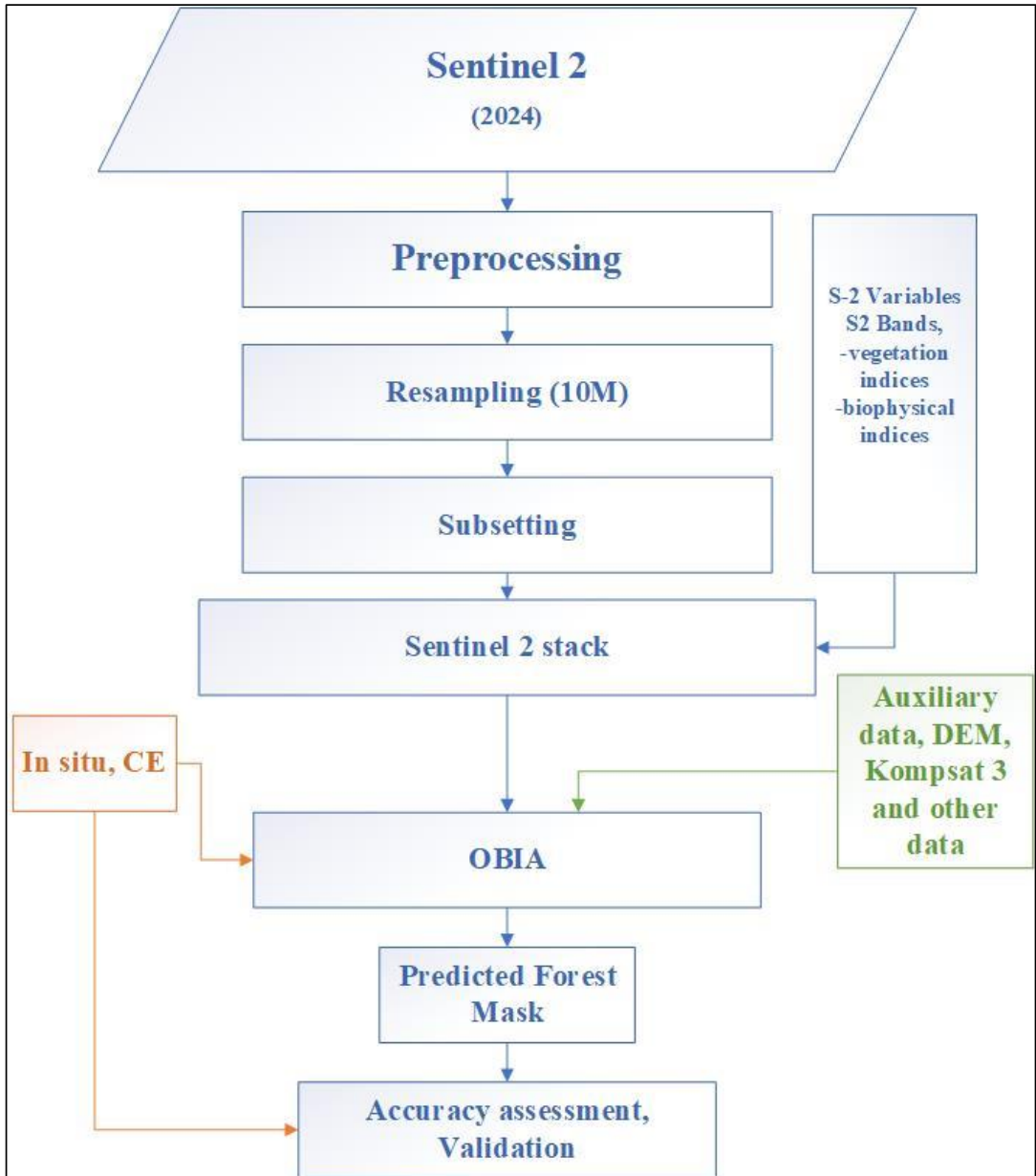
The landscape of Uzbekistan presents a complex challenge for Land Use and Land Cover (LULC) classification due to its semi-arid environment, where spectral confusion frequently occurs between sparse natural forests, shrublands, and irrigated agriculture. To address the spectral heterogeneity of these classes, this study moves beyond standard spectral bands by integrating a specific suite of vegetation indices [10] and topographic data derived from ALOS PALSAR.

For many years, remote sensing imagery has played an essential role in forest inventory and mapping practices, especially in numerous developed nations. The information gleaned from these images has become indispensable for understanding and managing forest resources. The application of automated processing techniques to these images offers the potential for considerable cost reductions, particularly within the increasingly digital data interpretation environment that is becoming standard practice. As data analysis shifts toward digital platforms, the efficiency and economy provided by automation become increasingly significant. Reference [9] highlights the importance of these cost savings and their connection to the growing digitalization of data interpretation workflows.

However, automated procedures that rely solely on analyzing individual pixels often fall short of achieving the desired level of accuracy. This limitation stems from their failure to account for the spatial arrangement and textural characteristics of the landscape. While spectral information is important, the context provided by spatial relationships and textural patterns is equally crucial for accurate classification. To achieve effective automated classification of landscape structures, it is necessary to identify and incorporate the spectral, textural, and geometric features that characterize different land cover classes. The unique combination of these features allows for better differentiation between various land cover types.

One of the challenges in this process is the potential for overlapping spectral curves between different land cover classes. This spectral similarity can make it difficult to distinguish accurately between these classes based solely on their spectral signatures. Differentiating between species or forest types based on spectral signature can be particularly challenging. Nevertheless, with a well-defined, confident methodology, coupled with the appropriate level of experience and expertise, this problem can be effectively addressed and overcome. Careful analysis and nuanced approaches are required to leverage spectral information effectively in the face of these challenges.

The creation of meaningful objects within the image analysis process fundamentally involves identifying and analyzing changes in the heterogeneity or homogeneity of the image features.



**Fig. 4.** Overall flowchart of the study

**Рис.4.** Общая блокхема исследования

By detecting shifts in these characteristics, it becomes possible to delineate distinct objects and extract valuable information. Over time, several sophisticated segmentation methods have been developed to facilitate this process [11, 12]. Common approaches within these segmentation methods typically involve techniques such as thresholding, which separates pixels based on intensity values, or area enhancement algorithms, which highlight regions of similar characteristics. Different types of texture segmentation algorithms are also frequently employed, leveraging the patterns and variations in image texture to delineate objects.

Beyond these automated techniques, knowledge-based approaches also play a vital role in operational applications. These approaches incorporate expert knowledge and contextual information to guide the segmentation and classification processes. Baatz and Schepe [11] introduced a multi-

resolution segmentation algorithm, a key innovation in the field. This algorithm was first implemented in the commercial object-oriented image analysis software known as eCognition [12, 13], showcasing its practical application and impact. The object classification procedure implemented in this software considers not only the spectral and texture properties of image objects, but also their size and behavior across different scale levels. This multi-scale analysis allows for a more comprehensive and robust classification process.

The core principle of the algorithm is to build image objects in a stepwise manner, systematically minimizing their weighted heterogeneity. This ensures that the resulting objects are as internally consistent as possible. Current object-based approaches are typically based on the creation of initial object primitives. These primitives are then subjected to a step-by-step reconstruction process, utilizing region-specific supervised methods at multiple levels. This iterative refinement process allows for the creation of highly accurate and meaningful image objects.

The supervised object-based classification approach leverages several key data sources. These include spectral information derived from Sentinel-2 and Kompsat 3 imagery, elevation data obtained from a digital terrain model (DTM) generated from ALOS PalSAR data, and auxiliary GIS data, which provides additional contextual information. Combining these diverse data sources enables a more comprehensive and accurate classification process [14,15,16,17,18,19].

High spatial resolution satellite imagery, particularly that with four bands in the near-infrared electromagnetic region and two additional bands in the shortwave infrared region, can serve as a sufficient data source for automated forest boundary delineation [20,21]. The level of detail captured by these images allows for precise identification of forest boundaries. To demonstrate this capability, several Sentinel-2 scenes from the summers of 2024, encompassing the territory of Dehkanabad forestry, were processed and analyzed. These images provided valuable data for mapping and monitoring forest resources in the region.

**3.3. Accuracy Assessment**

The accuracy of the resulting forest maps was assessed using validation points, representing 30 % of the total number of points used in training, compared with the classification results. Validation yielded an overall accuracy of 76 %, indicating a high match between the predicted forest types and actual site conditions. Further analysis revealed that user accuracy for individual forest classes ranged from 83 % to 92 %, with the lowest accuracy observed for deciduous forests, likely due to their spectral similarity to other land-use types. The kappa coefficient, a measure of agreement accounting for chance, was calculated as 0.66, indicating a significant level of agreement between the classification results and the validation data. These accuracy metrics demonstrate the reliability and usefulness of the resulting forest maps for a variety of applications, including forest management, conservation planning, and environmental research.

Table 1

**Confusion Matrix for Land Cover Classification and CollectEarth Points**

Таблица 1

**Матрица ошибок для классификации типов землепользования и точек CollectEarth**

<i>Land Cover Class</i>	<i>Cropland</i>	<i>Forest</i>	<i>Pasture</i>	<i>Settlement</i>	<i>Other land</i>	<i>Wetland</i>	<i>Classification Class Error</i>
<i>Cropland</i>	448	0	50	3	2	1	0.111
<i>Forest</i>	2	514	120	5	0	0	0.198
<i>Pasture</i>	33	74	1372	31	1	0	0.091
<i>Settlement</i>	21	27	313	133	1	0	0.731
<i>Otherland</i>	28	1	26	2	64	0	0.471
<i>Wetland</i>	4	1	7	2	1	0	1.000

### 3.3.1. High-Performing Classes (Pasture and Cropland)

The model demonstrated its highest reliability in identifying Pasture (0.091 error) and Cropland (0.111 error).

Pasture had the highest number of correctly classified points (1,372), indicating that its spectral signature is well-defined in the study area.

Cropland also showed strong stability, with only minor confusion with Pasture, likely due to the similar greenness of irrigated crops and mountain grasses.

### 3.3.2. The Forest-Pasture Overlap

The Forest class achieved a respectable error rate of 0.198, but the matrix reveals a specific challenge: 120 forest points were misclassified as Pasture.

This confusion is likely due to the “open-canopy” nature of the Dekhkanabad juniper forests. In these areas, the satellite captures a “mixed pixel” containing both tree cover and the grass/pasture growing underneath, leading the classifier to misidentify sparse woodlands as open grassland.

### 3.3.3. Challenges with Settlements and Other Land

The Settlement class faced significant difficulty with a high error rate of 0.731.

The matrix shows that 313 settlement points were misclassified as Pasture. In rural Uzbekistan, settlements often consist of houses interspersed with large gardens and grazing patches. This “spectral mixing” makes it difficult for a 10-meter resolution sensor (Sentinel-2) to distinguish a sparse village from a grassy field.

Other Land (barren/rocky) also showed high error (0.471), frequently being confused with Cropland and Pasture, likely due to sparse vegetation growing on rocky soils.

### 3.3.4. Statistical Limitations (Wetland)

The Wetland class had a 100 % error rate. This is primarily a result of a very low sample size (only 15 total points across all categories). In a semi-arid mountainous region like Dekhkanabad, wetlands are rare and small; the model likely lacked enough training data to create a distinct spectral profile for this class.

## 4. Results and Discussion

### 4.1. Land Cover Classification Performance

The implemented workflow (Figure 3) integrates Sentinel-2 multispectral data (2024), preprocessing (atmospheric verification, geometric correction), 10 m resampling, subsetting, and band stacking, followed by feature integration (vegetation indices, biophysical variables), auxiliary DEM and Kompsat-3 data, and supervised OBIA classification using Collect Earth reference samples.

The object-based framework successfully delineated spatially coherent land cover patches across heterogeneous mountainous terrain. Compared to pixel-based classification approaches, OBIA reduced salt-and-pepper noise and improved boundary definition, particularly along forest–pasture transition zones.

The resulting **forest mask** spatially corresponds to juniper-dominated mountainous slopes and valley forest fragments, consistent with known ecological distribution patterns of the Gissar Range.

### 4.2. Synthesis of Classification Failures

The analysis of the classification accuracy reveals that the Settlement and Wetland classes experienced the highest error rates, with values of 0.731 and 1.000, respectively. These results highlight fundamental methodological and data-related limitations when using 10-meter resolution multispectral satellite imagery, such as data from the Sentinel-2, in heterogeneous and semi-arid landscapes.

#### Settlement Class: Spectral Fragmentation and Mixed Pixels

The high error rate observed in the Settlement class is primarily attributed to the phenomenon known as spectral fragmentation. In semi-arid environments, rural settlements typically consist of small, dispersed buildings surrounded by vegetation patches, bare soil, and agricultural land. At a spatial resolution of 10 meters, a single pixel often contains a mixture of several land-cover components, resulting in mixed spectral signatures.

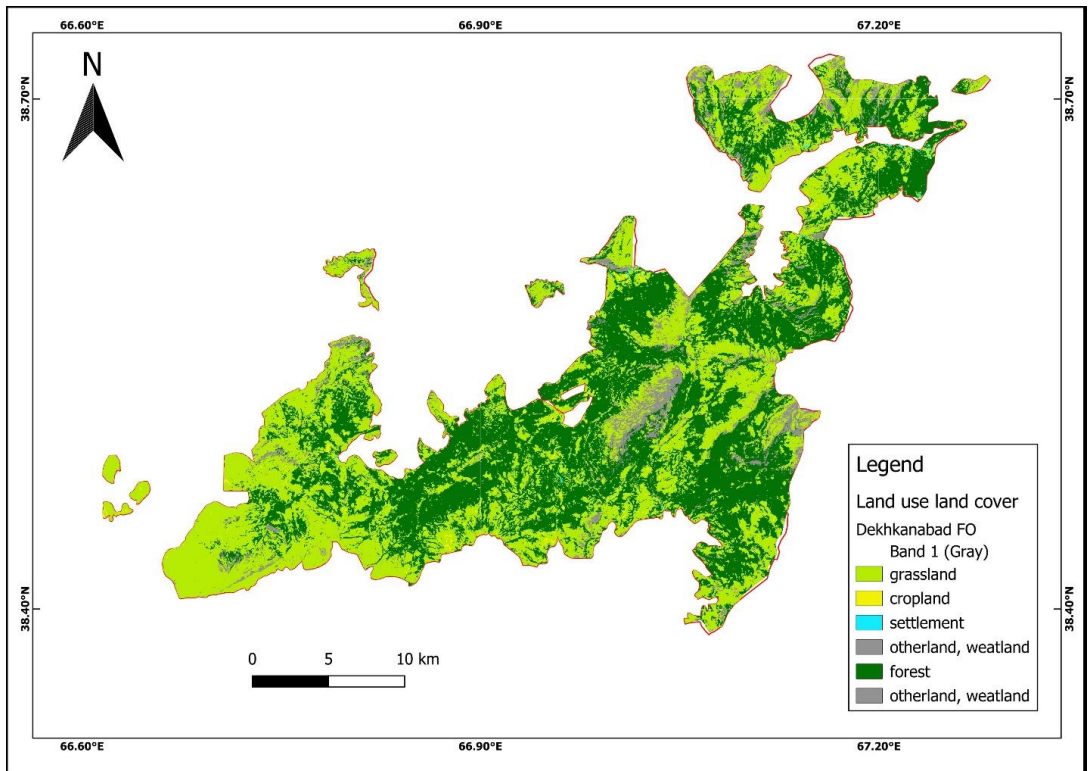


Fig. 5. Classification results (north part of the forestry organization)

Рис. 5. Результаты классификации (северная часть лесохозяйственной организации)

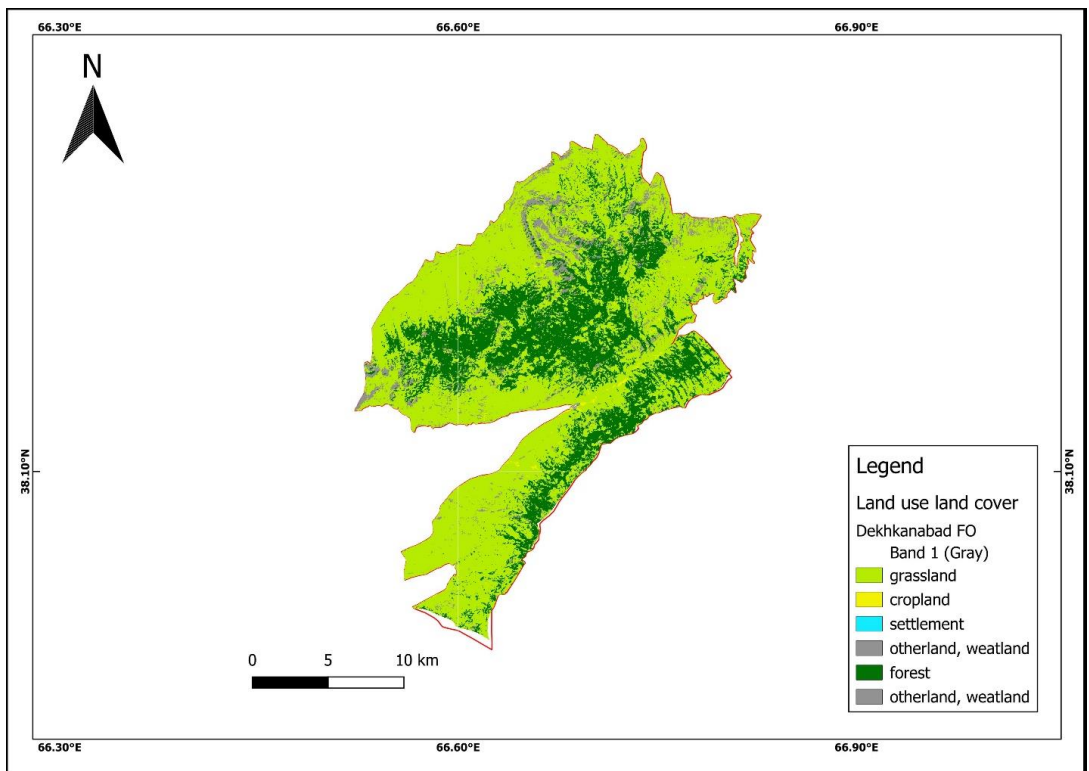


Fig. 6. Classification results (south part of the forestry organization)

Рис. 6. Результаты классификации (южная часть лесохозяйственной организации)

In the study area, building materials such as clay, brick, or concrete exhibit spectral characteristics that are frequently similar to surrounding bare soil or dry vegetation. Consequently, the classifier struggles to distinguish settlement pixels from adjacent land-cover classes. This issue becomes more pronounced in rural mountainous landscapes where settlements are small and spatially fragmented. The classification algorithm therefore tends to misclassify settlement areas as bare land, cropland, or sparse vegetation, leading to significant omission and commission errors.

Another contributing factor is the limited representation of settlement features in the training dataset. When training samples do not adequately capture the variability of settlement surfaces (e.g., roofs, roads, courtyards), the classifier cannot construct a stable statistical model for this class.

#### Wetland Class: Statistical Insufficiency and Sample Scarcity

The Wetland class exhibited the highest error rate, reaching 1.000, indicating that the classifier failed to correctly identify wetland pixels. This failure is primarily due to insufficient training data. With only 15 training points, the model lacked enough examples to establish a reliable statistical representation of wetland spectral characteristics.

Wetlands in semi-arid regions are typically spatially limited and highly dynamic, often appearing as small riparian zones along rivers, seasonal marshes, or temporary water-logged areas. Such environments are difficult to capture using sparse ground reference points. In addition, the spectral signature of wetlands may overlap with other classes such as dense vegetation or irrigated agricultural fields, further complicating classification.

### 4.3. Potential Improvements for Future Classification

#### Integration of Ancillary Vector Data

One effective strategy for improving settlement detection is the incorporation of ancillary vector datasets. External spatial datasets can provide explicit structural information that is not detectable through spectral reflectance alone. For instance, settlement areas can be enhanced by integrating building footprints or road networks derived from the collaborative mapping platform OpenStreetMap.

#### 2. Hydrological Indicators for Wetland Detection

For improving wetland classification, it is essential to integrate hydrologically sensitive indices derived from multispectral imagery. One widely used index is the Normalized Difference Water Index, which enhances the spectral contrast between water bodies and surrounding land surfaces.

The NDWI exploits differences in reflectance between the green and near-infrared bands, allowing the detection of water-rich surfaces even when they occupy a small proportion of the pixel. Incorporating NDWI as an additional input band in the classification process can significantly improve the identification of wetlands and other water-related features.

Additionally, existing hydrographic vector datasets—including river networks and permanent water bodies—can be integrated into the classification framework. These datasets provide spatial constraints that help guide the model toward areas where wetlands are more likely to occur.

#### 3. Increasing Training Sample Density

Another critical improvement involves expanding the training dataset, particularly for underrepresented classes such as wetlands and settlements. Increasing the number of training points allows the classifier to better capture intra-class variability and improve statistical robustness.

#### 4. Incorporating Multi-Temporal and Multi-Source Data

Future studies may also benefit from integrating multi-temporal satellite observations, which capture seasonal variations in vegetation and moisture conditions. This approach can improve the discrimination of wetlands that appear only during certain periods of the year.

Furthermore, combining optical data with radar observations from missions such as Sentinel-1 can enhance classification performance. Radar imagery is particularly useful for detecting surface moisture and water bodies, even under vegetation cover or cloud conditions.

The generated map and statistics provide a vital baseline for the Dekhkanabad State Forest Fund. With forests officially accounting for 73.6 % of the forest fund area (as noted in Section 2.1), the

ability to monitor these resources remotely is crucial. The current methodology offers a cost-effective alternative to labor-intensive ground surveys.

## 5. Conclusion

The proposed workflow demonstrates that combining Sentinel-2 multispectral imagery, DEM-derived terrain variables, and Collect Earth validation within an OBIA framework provides a statistically reliable and ecologically interpretable approach for forest land monitoring in semi-arid mountainous regions.

The achieved overall accuracy (76.6 %) and substantial Kappa agreement (0.66) confirm the operational suitability of the method, while the identified error patterns provide a clear roadmap for methodological refinement in future studies.

## References

1. Abdurakhmanov A, Giese E, Gessner U. Land Cover Classification and Change Detection in the Aral Sea Basin Using Multi-Temporal Landsat Satellite Data. *Journal of Environmental Management*. 2017;200:310–322.
2. European Space Agency (ESA). Sentinel-2 User Handbook. 2015. Available at: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi>
3. Gulomjonov B, Abdullaev K, Mukhammadiev N. Assessment of Forest Resources in Uzbekistan: Challenges and Perspectives. *Journal of Environmental Science and Engineering A*. 2020;9(1):1–10.
4. Huete AR. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. 1988;25(3):295–309.
5. Jensen JR. *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective (2nd ed.)*. Prentice Hall. 2007.
6. Kogan FN. Global Drought Watch from Space. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1997;78(9):1913–1922.
7. Rosenqvist A, Shimada M, Ito N, Watanabe M. ALOS PALSAR: A Pathfinder mission for global-scale monitoring of the environment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2007;45(11):3307–3316.
8. Rouse JW, Haas RH, Schell JA, Deering DW. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Special Publication*. 1974;351:309–317.
9. Vermote EF, Justice CO, Claverie M, Franch L. Preliminary Analysis of the Sentinel-2 Level-1C Data for Land Applications. *Remote Sensing of Environment*. 2016;181:1–13.
10. Xue J, Su B. Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *Journal of Sensors*. 2017;2017:1353691.
11. Baatz M, Schepe A. Multi-resolution segmentation: An approach to optimize high-quality multiscale image segmentation. *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII*. 2000.
12. Khatami R, Mountrakis G, Stehman SV. A meta-analysis of remote sensing research on supervised pixel-based land cover image classification processes. *Remote Sensing of Environment*. 2016;177:89–100.
13. LONG Chao, Zhang KPP, Xia JSW. Forestry development and best practices of forest management in Uzbekistan. *China Forestry Publishing House*. 2018. Available at: <https://www.apfnet.cn/uploads/media/221209/1-221209113600.pdf>
14. Immitzer M, Vuolo F, Atzberger C. First Experience with Sentinel-2 Data for Crop and Tree Species Classifications in Central Europe. *Remote Sensing*. 2016;8(3):166.
15. Mountrakis, G., Im, J., & Ogole, C. Support Vector Machines in Remote Sensing: A Review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2011;66(3):247–259.
16. Jiang Z, Huete AR, Didan K, Miura T. Development of a Two-Band Enhanced Vegetation Index Without a Blue Band. *Remote Sensing of Environment*. 2008;112(10):3833–3845.
17. Olofsson P, Foody GM, Herold M, et al. Good Practices for Estimating Area and Assessing Accuracy of Land Change. *Remote Sensing of Environment*. 2014;148:42–57.
18. Xiaoyong Zhang, Weiwei Jia, Dandan Li, Fan Wang, Haotian Guo, Yuepeng Liang, Lei Liu, Xin Li, Forest landscape restoration is a key factor in recovering ecological quality, *Journal of Cleaner Production*, 2025;486.144619, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144619>.
19. Anusheema Ch., Aniruddha G., Kamna S., P.K. Joshi, Characterizing fragmentation trends of the Himalayan forests in the Kumaon region of Uttarakhand, India, *Ecological Informatics*. 2017;38:95–109.

20. Chernikhovsky D.M. Theory and Methods of Forest Inventory Based on Remote Sensing, Digital Terrain Modeling, and GIS Technologies: Dissertation ... Doctor of Agricultural Sciences: 06.03.02. S. M. Kirov Saint Petersburg State Forest Engineering University, 2020 (in Russian).

21. Munzer Nur. Development of a methodology for using space imagery data for forest monitoring”: abstract of a dissertation for the degree of candidate of technical sciences: specialty 25.00.34 Aerospace research of the Earth, photogrammetry (in Russian).

### Литература

1. Abdurakhmanov A, Giese E, Gessner U. Land Cover Classification and Change Detection in the Aral Sea Basin Using Multi-Temporal Landsat Satellite Data. *Journal of Environmental Management*. 2017;200:310–322.
2. European Space Agency (ESA). Sentinel-2 User Handbook. 2015. Available at: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi>
3. Gulomjonov B, Abdullaev K, Mukhammadiev N. Assessment of Forest Resources in Uzbekistan: Challenges and Perspectives. *Journal of Environmental Science and Engineering A*. 2020;9(1):1–10.
4. Huete AR. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. 1988;25(3):295–309.
5. Jensen JR. Remote Sensing of the Environment: *An Earth Resource Perspective (2nd ed.)*. Prentice Hall. 2007.
6. Kogan FN. Global Drought Watch from Space. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1997;78(9):1913–1922.
7. Rosenqvist A, Shimada M, Ito N, Watanabe M. ALOS PALSAR: A Pathfinder mission for global-scale monitoring of the environment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2007;45(11):3307–3316.
8. Rouse JW, Haas RH, Schell JA, Deering DW. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Special Publication*. 1974;351:309–317.
9. Vermote EF, Justice CO, Claverie M, Franch L. Preliminary Analysis of the Sentinel-2 Level-1C Data for Land Applications. *Remote Sensing of Environment*. 2016;181:1–13.
10. Xue J, Su B. Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *Journal of Sensors*. 2017;2017:1353691.
11. Baatz M, Schepe A. Multi-resolution segmentation: An approach to optimize high-quality multiscale image segmentation. *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII*. 2000.
12. Khatami R, Mountrakis G, Stehman SV. A meta-analysis of remote sensing research on supervised pixel-based land cover image classification processes. *Remote Sensing of Environment*. 2016;177:89–100.
13. LONG Chao, Zhang KPP, Xia JSW. Forestry development and best practices of forest management in Uzbekistan. *China Forestry Publishing House*. 2018. Available at: <https://www.apfnet.cn/uploads/media/221209/1-221209113600.pdf>
14. Immitzer M, Vuolo F, Atzberger C. First Experience with Sentinel-2 Data for Crop and Tree Species Classifications in Central Europe. *Remote Sensing*. 2016;8(3):166.
15. Mountrakis, G., Im, J., & Ogole, C. Support Vector Machines in Remote Sensing: A Review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2011;66(3):247–259.
16. Jiang Z, Huete AR, Didan K, Miura T. Development of a Two-Band Enhanced Vegetation Index Without a Blue Band. *Remote Sensing of Environment*. 2008;112(10):3833–3845.
17. Olofsson P, Foody GM, Herold M, et al. Good Practices for Estimating Area and Assessing Accuracy of Land Change. *Remote Sensing of Environment*. 2014;148:42–57.
18. Xiaoyong Zhang, Weiwei Jia, Dandan Li, Fan Wang, Haotian Guo, Yuepeng Liang, Lei Liu, Xin Li, Forest landscape restoration is a key factor in recovering ecological quality, *Journal of Cleaner Production*, 2025;486.144619, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144619>.
19. Anusheema Ch., Aniruddha G., Kamna S., P.K. Joshi, Characterizing fragmentation trends of the Himalayan forests in the Kumaon region of Uttarakhand, India, *Ecological Informatics*. 2017;38:95–109.
20. Черниковский Дмитрий Михайлович. Теория и методы инвентаризации лесов на основе данных дистанционного зондирования земли, цифрового моделирования рельефа и ГИС-технологий: диссертация ... доктора Сельскохозяйственных наук: 06.03.02 / Черниковский Дмитрий Михайлович; [Место защиты: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова»], 2020

21. Мунзер Нур «Разработка методики применения данных космических съемок для мониторинга лесов» диссертация Разработка методики применения данных космических съемок для мониторинга лесов: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: специальность 25.00.34 Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрии.

#### About the authors

*Sanjarbek M. Muratov* – PhD student, Mirzo Ulugbek National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan, ORCID 0000-0002-7403-5287, ResearcherID: rid144431, e-mail [murotovs@gmail.com](mailto:murotovs@gmail.com)

*Dilbarxon Sh. Fazilova* – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Ulugh Beg Astronomical Institute of Uzbekistan Academy of Sciences, Tashkent, Uzbekistan, ORCID 0000-0002-7002-189X, e-mail: [dil\\_faz@yahoo.com](mailto:dil_faz@yahoo.com)

#### Сведения об авторах

*МУРАТОВ Санжарбек Мухторбек оглы* – аспирант, Национальный университет Узбекистана им. Мирзо Улугбека, г. Ташкент, Узбекистан, ORCID 0000-0002-7403-5287, ResearcherID: rid144431, e-mail [murotovs@gmail.com](mailto:murotovs@gmail.com)

*ФАЗИЛОВА Дилбархон Шамуродовна* – доктор физико-математических наук, профессор, Астрономический институт им. Улугбека Академии наук Узбекистана, г. Ташкент, Узбекистан, ORCID 0000-0002-7002-189X, e-mail [dil\\_faz@yahoo.com](mailto:dil_faz@yahoo.com)

#### Authors' contribution

*Muratov S.M.* – methodology, conceptualization, writing – original draft

*Fazilova D.Sh.* – writing – review & editing, validation

#### Вклад авторов

*Муратов С.М.* – методология, разработка концепции, создание черновика рукописи

*Фазилова Д.Ш.* – редактирование рукописи, верификация данных

#### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

#### Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Поступила в редакцию / Submitted 02.03.2026*

*Поступила после рецензирования / Revised 11.03.2026*

*Принята к публикации / Accepted 27.03.2026*

## ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СОЛЕЙ

А. М. Пригара<sup>1,2\*</sup>, А. В. Татаркин<sup>2,3</sup>, В. В. Середин<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>АО «ВНИИ Галургии», Пермь, Россия

<sup>2</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

<sup>3</sup>ООО НИПППД «Недра», Пермь, Россия

\*prandra@yandex.ru

### Аннотация

В мире насчитывается более 80 соляных рудников, затопленных в аварийном режиме, в основном из-за недостаточно полной информации об инженерно-геологических условиях. В этой связи весьма актуальной является проблема формирования благоприятных сценариев развития устойчивости природно-технических систем (ПТС) при подземной разработке соляных месторождений. Цель работы – разработка научно-методических основ оценки и прогноза устойчивости ПТС при подземной разработке соляных месторождений. Идея работы – оценка и прогноз устойчивости ПТС на основе установленных закономерностей распространения упругих волн в массиве, находящемся под техногенным воздействием. Для достижения цели использованы методы физического и численного моделирования, эксперименты, статистический анализ. В качестве материалов исследований использованы результаты опытных и научно-исследовательских работ. Разработанные научно-методические основы базируются на геофизических и инженерно-геологических моделях ПТС, позволяющих выявлять опасные инженерно-геологические процессы, и на методиках оценки инженерно-геологических условий водозащитной толщи и прогноза устойчивости гидроизолирующих целиков. Сформированная методология позволяет выполнить оценку и прогноз устойчивости ПТС для обеспечения безопасного строительства и эксплуатации сооружений при подземной разработке соляных месторождений. Результаты исследований реализованы в методиках и программных продуктах, которые используются в производственном процессе для обеспечения устойчивости подземных сооружений и ПТС в целом. Полученные новые геологические сведения учтены при построении инженерно-геологических моделей, проектировании проходческих и закладочных работ, при разработке и реализации проектов на разведку и доразведку различных участков Верхнекамского месторождения солей, реализации проектов по ликвидации участков шахтных полей.

**Ключевые слова:** инженерно-геологические условия, соляные месторождения, природно-технические системы, устойчивость, опасные процессы, геофизика, сейсморазведка, подземные сооружения, шахты, горные выработки

**Для цитирования:** Пригара А.М., Татаркин А.В., Середин В.В. Геолого-геофизические модели и методики оценки устойчивости природно-технических систем при подземной разработке месторождений солей. *Вестник СВФУ*. 2026;(1):19-36. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-19-36

## GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL MODELS AND METHODS FOR ASSESSING THE STABILITY OF NATURAL-TECHNICAL SYSTEMS IN THE UNDERGROUND MINING OF SALT DEPOSITS

*Andrey M. Prigara*<sup>1,2\*</sup>, *Aleksey V. Tatarkin*<sup>2,3</sup>, *Valery V. Seredin*<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>VNII Galurgii JSC, Perm, Russian Federation

<sup>2</sup>Perm State National Research University, Perm, Russian Federation

<sup>3</sup> NIPPPD Nedra LLC, Perm, Russian Federation

\*prandra@yandex.ru

### Abstract

There are more than 80 salt mines in the world that have been flooded in emergency mode, mainly due to insufficient information about engineering and geological conditions. In this regard, the problem of forming favorable scenarios for the development of the sustainability of natural-technical systems (NTS) during the underground development of salt deposits is very relevant. The purpose of the work was to develop scientific and methodological foundations for assessing and predicting the stability of NTS during underground mining of salt deposits. The idea of the work was to evaluate and forecast the stability of the NTS based on the established patterns of propagation of elastic waves in an array under man-made influence. To achieve this goal, methods of physical and numerical modeling, experiments, and statistical analysis were used. The results of experimental and scientific research works were used as research materials. The developed scientific and methodological foundations are based on geophysical and engineering-geological models of NTS, which make it possible to identify dangerous engineering-geological processes, and on methods for assessing the engineering-geological conditions of the water barrier and predicting the stability of waterproofing structures. The developed methodology makes it possible to assess and forecast the stability of the NTS to ensure the safe construction and operation of facilities during the underground development of salt deposits. The research results are implemented in methods and software products that are used in the production process to ensure the stability of underground structures and substations in general. The new geological information obtained was taken into account in the construction of engineering and geological models, the design of sinking and laying operations, the development and implementation of projects for exploration and additional exploration of various sections of the Verkhnekamskoye salt deposit, and the implementation of projects to eliminate sections of mine fields.

**Keywords:** engineering and geological conditions, salt deposits, natural-technical systems, stability, hazardous processes, geophysics, seismic exploration, underground structures, mines, mining

**For citation:** Prigara A.M., Tatarkin A.V., Seredin V.V. Geological and geophysical models and methods for assessing the stability of natural-technical systems in the underground mining of salt deposits. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*. 2026;(1):19-36. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-19-36

### Введение

Изучением инженерно-геологических условий (ИГУ) и вопросами устойчивости природно-технических систем (ПТС), в том числе в рамках месторождений полезных ископаемых, занимались многие ученые [1-5]. Важную роль при этом играют и геофизические методы, результаты которых достаточно широко освещены в научной печати [6-8]. Тем не менее, мировая практика показывает, что подземная разработка соляных месторождений сопровождается многочисленными аварийными ситуациями из-за отсутствия эффективных методик для построения детальных инженерно-геологических моделей (ИГМ) горного массива [9, 10]. Высоким потенциалом совершенствования научно-методических основ оценки и прогноза устойчивости ПТС обладают геофизические методы, в частности шахтная сейсморазведка [11]. Она обеспечивает возможность изучения физико-механических и прочностных характеристик горного массива. Таким образом, существует и необходимость, и перспектива разработки новых подходов,

обеспечивающих достоверность формируемых геофизических и инженерно-геологических моделей и оценок устойчивости ПТС. Настоящая статья описывает результаты многолетних исследований, проводимых в период с 1997 по 2025 годы. За это время пройден сложный путь, в ходе которого было опробовано значительное количество подходов к получению объективной информации об ИГУ и устойчивости ПТС соляных месторождений. В качестве объекта исследований выбрано одно из крупнейших в мире Верхнекамское месторождение солей (ВКМС), расположенное на севере Пермского края. В рамках статьи описываются результаты шахтных исследований, которые проводились в пределах продуктивных пластов АБ, В, КрII, КрIII и в пределах подстилающей каменной соли.

### **Методология исследований**

Если обратиться к *общему* подходу, реализованному в ходе выполненных многолетних исследований, то он является методологией формирования рационального научно-практического подхода к построению эффективной системы оценки и мониторинга устойчивости ПТС в условиях соляных месторождений. Термин *методология* здесь используется в наиболее распространенном смысле – как научное итеративное и интерактивное исследование методов и методик, которые применяются в определенной области знаний. Термин «итеративность» здесь обозначает цикличность, когда поиск перспективных подходов выполняется путем многократного повторения экспериментов на разных этапах исследований с учетом текущего уровня развития технологий и глубины понимания исследуемых явлений и процессов. «Интерактивность», в свою очередь, означает учет результатов и знаний, полученных на предыдущих итерациях, для поиска и обоснования направлений дальнейших исследований и реализации последующих итераций на новом научном и техническом уровне. Основным инструментом реализации методологии являлось математическое моделирование и натурные эксперименты в различных условиях с последующей оценкой их эффективности путем корреляции с данными объективного контроля – результатами бурения, опробования, проходки горных выработок. Конкретные же методы, технологии и методики, разработанные авторами для решения определенных задач, описаны в статье, и являются, по сути дела, результатом практической реализации описанной выше *общей* методологии исследований.

### **Применяемое оборудование и программное обеспечение**

В рамках настоящих исследований применялось специализированное серийное геофизическое оборудование, созданное для выполнения инженерных сейсморазведочных работ. На заре исследований, в 1990-е и в начале 2000-х, использовались относительно малоканальные аналоговые сейсмостанции – от 24 до 48 каналов, такие как IS-48 (Латвия). Данное оборудование, хотя и обладало рядом недостатков, но для своего времени было вполне современным, и позволяло выполнять исследования на довольно высоком уровне. В середине 2000-х появилась возможность расширить базу регистрации до 96 и более каналов, с одновременным переходом от аналоговой регистрации к цифровой. К числу таких станций относятся актуальный и по сей день IS-96 (ООО «Интромаг», г. Пермь), и ТЕЛСС-3 (ООО «Геосигнал», г. Москва). Это позволило значительно снизить влияние промышленных помех и аппаратных шумов, с одновременным увеличением объема регистрируемой информации. В качестве источника упругих волн опробованы различные средства, в том числе взрывчатые вещества типа аммонита, пороховые заряды, падающий груз, и ударный источник. В качестве наиболее эффективного в наземных условиях признан взрывной источник, а в шахтных условиях – ударный.

Программное обеспечение (ПО) использовано как сторонней, так и собственной разработки. К стороннему ПО относятся ANSYS, RadExpro, SeisPro, Excel, Statistica, Surfer и другие. Программ собственной разработки на момент написания данной статьи создано уже более 50 – это средства для решения прямой и обратной задачи сейсморазведки, как для поверхностных, так и для шахтных условий, а также вспомогательное ПО.

### Результаты и обсуждение

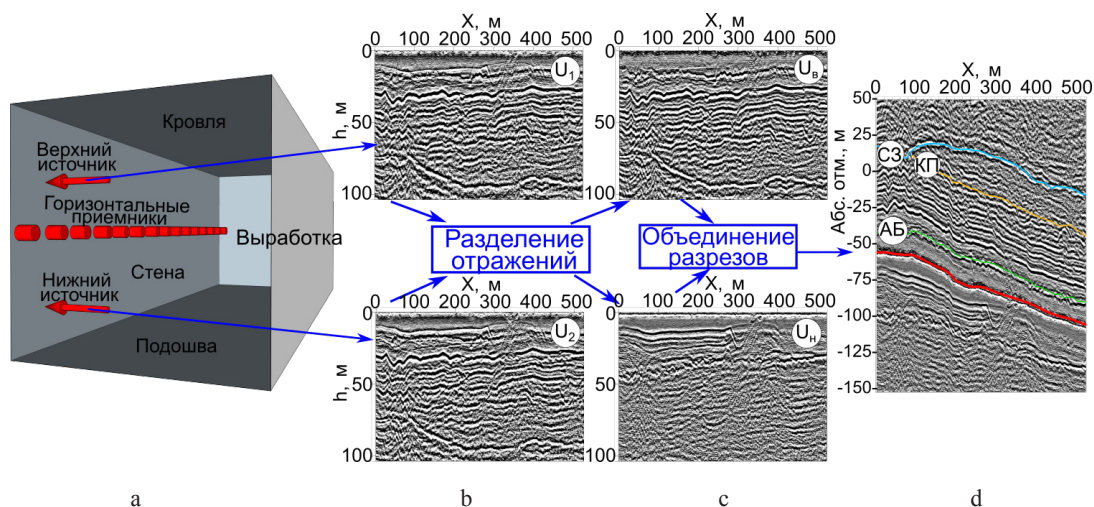
В результате практической реализации описанной выше методологии исследований авторами разработаны научно-методические основы оценки и прогноза устойчивости природно-технических систем соляных месторождений. Данные основы включают в себя *геофизические и инженерно-геологические модели ПТС, а также методики прогноза ИГУ ВЗСТ и прогноза устойчивости гидроизолирующих целиков.*

*Геофизические модели природно-технических систем.* Проведен значительный объем численных экспериментов и физического моделирования [11, 12], что позволило оценить особенности возбуждения, распространения и приема упругих колебаний в условиях полного пространства, и получить следующие *основные* выводы:

- при использовании вертикально-направленного источника упругих колебаний отраженные волны от геологических границ не фиксируются;
- использование горизонтально-направленного источника приводит к появлению четко выраженных отражений на S-волнах от целевых границ.

На основании полученных результатов разработан высокоразрешающий метод шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений (ПВРО) [11], подразумевающий использование горизонтальных сейсмоприемников, совместно с горизонтально-направленным источником упругих волн, с двумя линиями возбуждения (рисунок 1, а). В рамках метода сформирована методика обработки, которая учитывает особенности регистрируемых данных и интерференцию отражений, приходящих из разных полупространств. (рисунок 1, b, c) [11].

Разработанный метод обеспечивает построение детальных геофизических моделей ПТС (рисунок 1, d), которые позволяют получать новые сведения об ИГУ и неоднородностях массива горных пород, и, тем самым, существенно повысить безопасность строительства и эксплуатации сооружений при подземной разработке соляных месторождений.



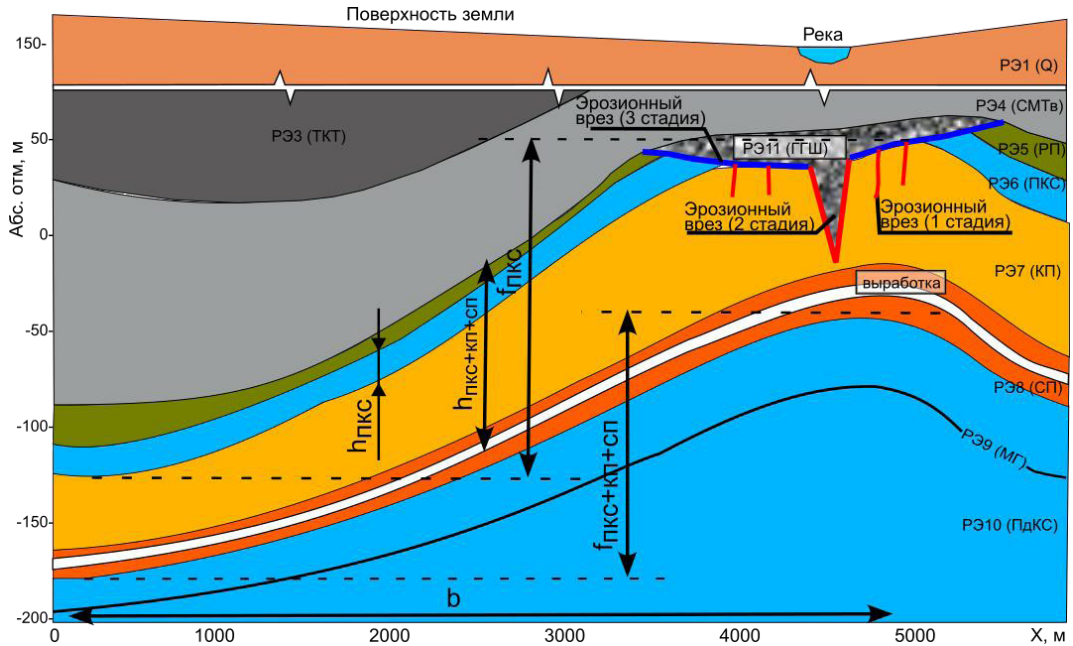
**Рис. 1.** Блок-схема разработанного метода шахтной сейсморазведки: а – схема выполнения полевых работ, b – разрезы для верхней и нижней линий возбуждения, c – разрезы после разделения отражений из нижнего и верхнего полупространства, d – геофизическая модель ПТС

**Fig. 1.** Flowchart of the developed mine seismic exploration method: a – field work scheme, b – sections for the upper and lower excitation lines, c – sections after separation of reflections from the lower and upper half-space, d – geophysical model of the NTS

*Инженерно-геологические модели природно-технических систем.* На месторождениях солей устойчивость ПТС определяется, в первую очередь, строением и составом водозащитной

толщи (ВЗТ), которая является естественным водоупором, предотвращающим проникновение пресных вод в рудники.

Одним из наиболее опасных геологических явлений в ВЗТ на соляных месторождениях с точки зрения устойчивости ПТС является инверсионный рельеф (ИР), отмечаемый в кровле солей на куполах соляных поднятий. Кроме того, в ходе промышленного опробования метода шахтной сейсморазведки ПВРО, также на куполах соляных поднятий были выявлены неизвестные ранее на ВКМС геологические структуры, называемые каньонообразными эрозионными врезами (ЭВ) [11]. Опасность ЭВ заключается в том, что он может нарушить целостность ВЗТ значительно глубже, чем ИР (рисунок 2), что несет серьезную опасность для всей ПТС.



**Рис. 2.** Структурно-тектоническая модель соляного поднятия в пределах ВКМС (f – высота изгиба пластины, h – толщина пластины, b – длина пластины)

**Fig. 2.** Development of a structural and tectonic model of salt uplift within the VKSD (f is the bending height of the plate, h is the thickness of the plate, b is the length of the plate)

Каньонообразные эрозионные врезы всегда обнаруживаются в пределах инверсионного рельефа, что говорит об их тесной генетической связи друг с другом. С геологической точки зрения, вероятнее всего, первой стадией формирования ЭВ являются трещины отрыва, которые возникают в кровле солей при образовании поднятий. Далее эти трещины достаточно быстро, в геологическом понимании, выщелачиваются до размеров каньонообразных ЭВ. Для обоснования данной гипотезы выполнены геомеханические расчеты, основанные на известных соотношениях, приближенно определяющих радиальные ( $\sigma_r/E$ ) и окружные ( $\sigma_\varphi/E$ ) деформации в центре пластины [11]. Анализ расчетных деформаций показывает, что они достигают и превышают предельные значения, полученные в лабораторных условиях (таблица 1), что дает возможность включить изучаемые опасные процессы в ИГМ ПТС.

Таблица 1

Результаты геомеханических расчетов деформаций для модели ПТС, представленной на рисунке 2

Table 1

Results of geomechanical calculations of deformations for the NTS model shown in Fig. 2

Деформация		Расчет для ПКС		Расчет для ПКС+КП+СП	
		Центр поднятия	Контур поднятия	Центр поднятия	Контур поднятия
Расчетная $\sigma_{\text{радиальная}}$		0,24–0,95 %	0,18–0,41 %	0,37–1,48 %	0,44–1,77 %
Расчетная $\sigma_{\text{окружная}}$		0,24–0,95 %	0,054–0,22 %	0,37–1,48 %	0,13–0,53 %
Пред. по лабораториям	Для кам. соли	0,18–0,35 %			
	Для карналлита	0,032–0,072 %			
	Для сильвинита	0,2–0,25 %			

Разработана трехстадийная технология построения ИГМ ПТС. На первом этапе с использованием результатов бурения поверхностных скважин формируется ИГМ ПТС с линейными границами инженерно-геологических элементов (ИГЭ) (рисунок 3, а). На втором этапе ИГМ ПТС уточняется по данным проходки горных выработок с учетом корреляции между литологическими и структурными характеристиками основных ИГЭ (рисунок 3, б). Несмотря на значительное уточнение моделей, полученных на втором этапе, на их основе весьма сложно предсказать наличие опасных геологических процессов. Дальнейшее повышение детальности

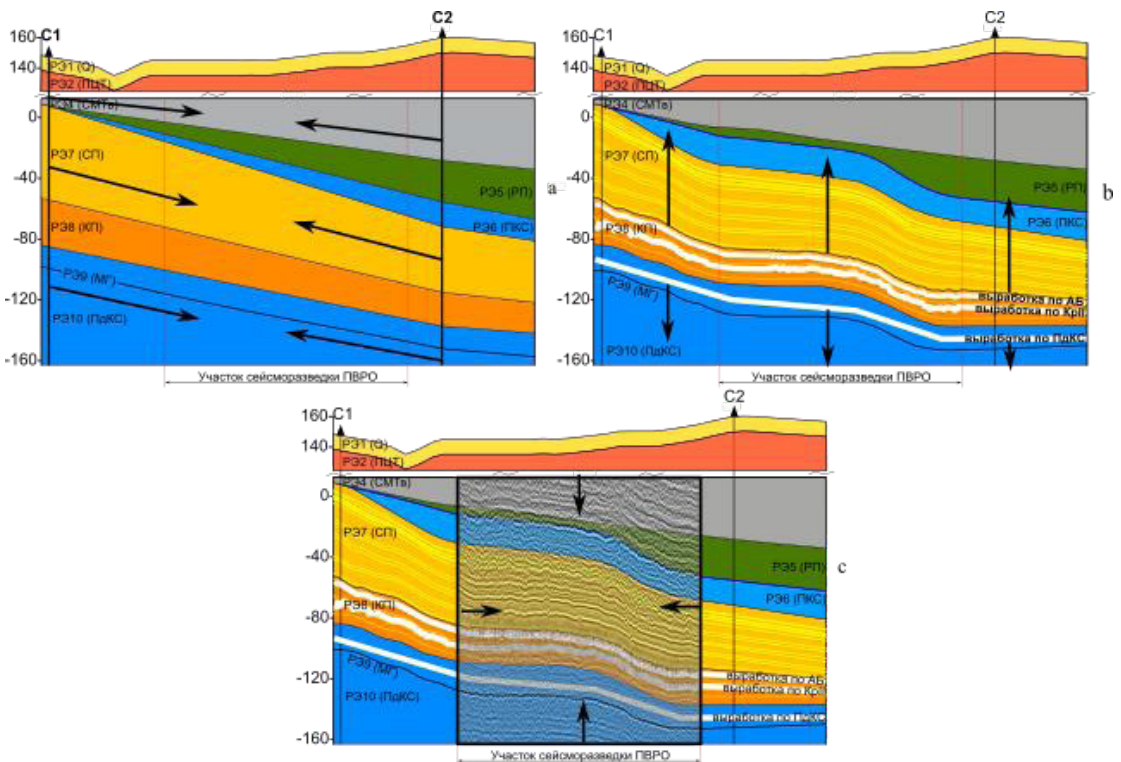


Рис. 3. Этапы построения ИГМ ПТС: а – по данным бурения скважин, б – с учетом результатов проходки горных выработок, в – с учетом результатов шахтных сейсмозащитных работ ПВРО

Fig. 3. Stages of construction of engineering and geological models of the NTS: а – based on drilling data, б – taking into account the results of mining, в – taking into account the results of mine seismic surveys of the air defense

ИГМ обеспечивает метод шахтной сейсмозонировки ПВРО (рисунок 3, с), который привлекается для уточнения геологического строения, обнаружения зон замещения, ЭВ, ИВ, и определения параметров складчатости (рисунок 4).

*Методика прогноза ИГУ ВЗТ.* В ходе анализа условий, сопутствующих ЭВ и ИР, выявлены ряд закономерностей в структурных характеристиках геологического разреза, коррелируемых с наличием опасных процессов в ВЗТ и устойчивостью ПТС. К выявленным закономерностям относятся: наличие гипсово-глинистой шляпы (ГГШ), наличие поднятия по кровле солей, угол падения крыльев поднятия, мощность ритмопачек (РП), мощность ПКС, наличие понижения рельефа над соляным поднятием, расстояние от оси поднятия, наличие замещения верхних карналлитовых пластов.

С целью формализованного вычисления риска наличия ИР и ЭВ, выявленные закономерности выражены в виде нормированных признаков наличия опасных процессов соответствующими формулами (таблица 2).

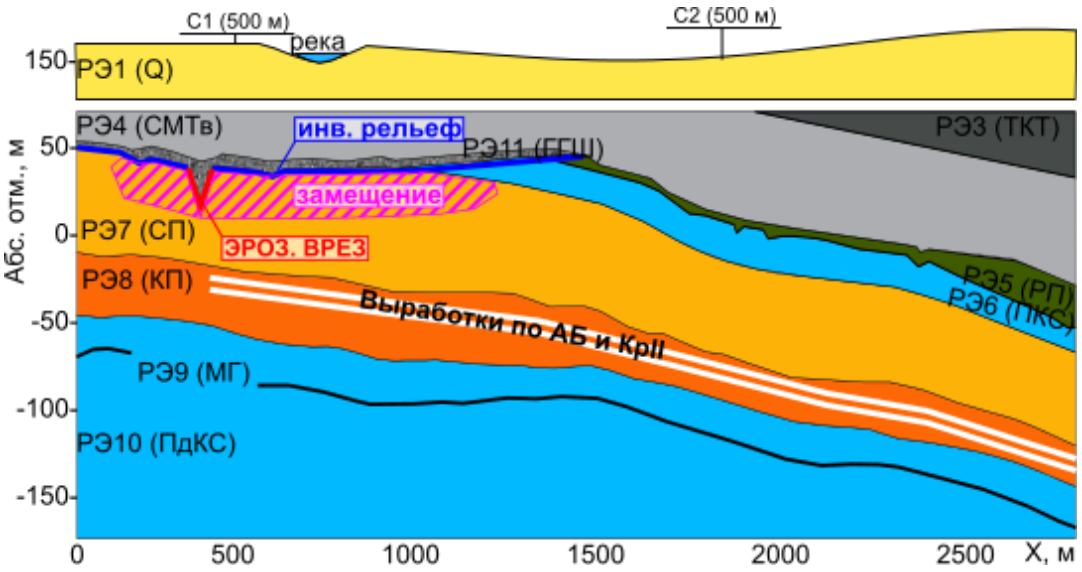


Рис. 4. Итоговая ИГМ ПТС с выявленными опасными процессами

Fig. 4. The final engineering and geological model of the NTS with identified hazardous processes

Итоговый показатель риска наличия опасных процессов вычисляется по формуле:

$$P = \begin{cases} 1, & P_{\Gamma} = 1 \\ \frac{\sum_{i=1}^N P_i}{N}, & P_{\Gamma} = 0 \end{cases}, (3)$$

где  $P_i$  – один из нормированных геологических признаков наличия опасных процессов согласно таблице 2,  $N$  – количество нормированных геологических признаков.

Таблица 2

Признаки наличия опасных процессов для условий ВКМС

Table 2

Signs of the presence of dangerous processes for VKSD condition

Таксон	Признак	Формула
Литологический	Наличие ГГШ	$P_{\Gamma} = \begin{cases} 1, M_{\Gamma} > 0 \\ 0, M_{\Gamma} = 0 \end{cases}$
	Наличие замещения карналлитов	$P_3 = \begin{cases} 1, M_3 > 0 \\ 0, M_3 = 0 \end{cases}$
Структурный	Наличие поднятия по кровле солей	$P_A = \begin{cases} 1, \text{антиклиналь} \\ 0.5, \text{склон} \\ 0, \text{синклиналь} \end{cases}$
	Угол падения крыльев поднятия	$P_{\alpha} = \frac{\alpha}{\alpha_{\max}}; \alpha = \tan^{-1} \left( \frac{L_c}{H_c} \right)$
	Мощность РП	$P_{\text{рп}} = 1 - \frac{H_{\text{рп}}}{H_{\text{рп\_макс}}}$
	Мощность ПКС	$P_{\text{пкс}} = 1 - \frac{H_{\text{пкс}}}{H_{\text{пкс\_макс}}}$
Морфологический	Расстояние от оси поднятия	$P_P = 1 - \frac{L}{L_{\max}}$
	Понижение рельефа	$P_{\Pi} = \begin{cases} 1, \text{понижение} \\ 0.5, \text{склон} \\ 0, \text{поднятия} \end{cases}$

где  $M_{\Gamma}$  – мощность ГГШ,  $L_c$  – длина участка крыла поднятия,  $H_c$  – перепад высот участка крыла поднятия,  $H_{\text{рп}}$  – мощность ритмопачек,  $H_{\text{рп\_макс}}$  – максимальная мощность ритмопачек,  $H_{\text{пкс}}$  – мощность ПКС,  $H_{\text{пкс\_макс}}$  – максимальная мощность ПКС,  $L$  – расстояние от оси поднятия,  $L_{\max}$  – максимальное расстояние от оси поднятия,  $M_3$  – мощность зоны замещения карналлитов.

На основе анализа более 1000 поверхностных скважин, пробуренных для разведки ВКМС выполнено районирование ВКМС по риску наличия ИР и ЭВ. Это дает возможность определить области, в пределах которых проведение детализационных работ для подтверждения или исключения наличия опасных процессов необходимо в обязательном порядке, а также области, где риск наличия опасных процессов минимален. На основе полученных сведений разработана классификация состояния ПТС, которая позволяет ранжировать участки ведения горных работ по условиям устойчивости ПТС. Разработанная классификация играет важную роль в обеспечении безопасного строительства и эксплуатации подземных сооружений при подземной разработке соляных месторождений, однако она не обладает всей полнотой возможностей, так как в ней учтены только результаты буровых и горнопроходческих работ.

Исследование закономерностей распределения характеристик отражений, связанных с ЭР и ИР, позволило выявить сейсмические атрибуты, реагирующие на рассматриваемые геологические аномалии. Выяснено, что некоторые из атрибутов четко реагируют на искомые объекты

выходом за пределы  $2\sigma$ , что дает возможность использовать их для построения карты районирования и классификации состояний ПТС. Совместное использование атрибутов различной физической природы значительно повышает надежность выявления объектов поиска, поэтому они объединяются в суммарный сейсмический атрибут (ССА).

С учетом выявленных закономерностей и критериев устойчивости, разработана классификации состояний изучаемых ПТС (таблица 3), которых выделено три – устойчивое, неустойчивое, и критическое (нарушенное). Отнесение ПТС к тому или иному состоянию выполняется по наихудшему из условий устойчивости. На основе разработанной классификации выполнено районирование ВКМС по наличию ИР и ЭВ, и сформирована соответствующая карта (рисунок 5, а). Основным уточняющим фактором явились данные шахтной сейсморазведки, проведенной на большинстве из действующих на ВКМС рудников. Эти данные позволили фактически установить, что наличие ЭВ и ИР по кровле соляных поднятий фиксируется, начиная с признака  $P > 0.5$ .

Итогом представленных разработок является методика оценки устойчивости ПТС, основанная на установленных морфологических характеристиках геологического разреза и закономерностях распределения сейсмических атрибутов (рисунок 5, б).

Таблица 3

**Оценка состояния ПТС с учетом геолого-геофизических признаков**

Table 3

**Assessment of the state of the NTS, taking into account geological and geophysical features**

Условия устойчивости ВЗТ	Состояние природно-технической системы «инженерно-геологический массив – подземное сооружение»		
	1 – устойчивое	2 – неустойчивое	3 – критическое
Риск наличия опасных процессов в ВЗТ	$P < 0.5$	$0.75 > P > 0.5$	$P > 0.75$
Выход атрибутов за пределы $2\sigma$	Отсутствует	Инверсионный разрез, ЭВ до КП	Инверсионный разрез, ЭВ до СП
Мощность ВЗТ по данным ПВРО, м	Есть КП и ПКС $H > 70$ м	ПКС отсутствует $70 \text{ м} > H > 20 \text{ м}$	КП отсутствует $H < 20$ м
Аномалии в ВЗТ по данным бурения и проходки	Отсутствуют, либо 4 группы	Косвенные признаки разломов, сухие трещины, зоны замещения, аномалия 2 или 3 группы	Разломы, трещины с течью рассолов, обширные зоны замещения, отсутствие ПКС, аномалия 1 группы
Мощность ненарушенных слоев КС в ВЗТ	$H > 20$ м	$H = 20$ м	$H < 20$ м
Степень нагружения целиков	Степень нагружения $< 0.3$	Степень нагружения = 0.3	Степень нагружения $> 0.3$
Поступление флюидов в выработки	Отсутствует	Приток насыщенных флюидов	Приток ненасыщенных флюидов

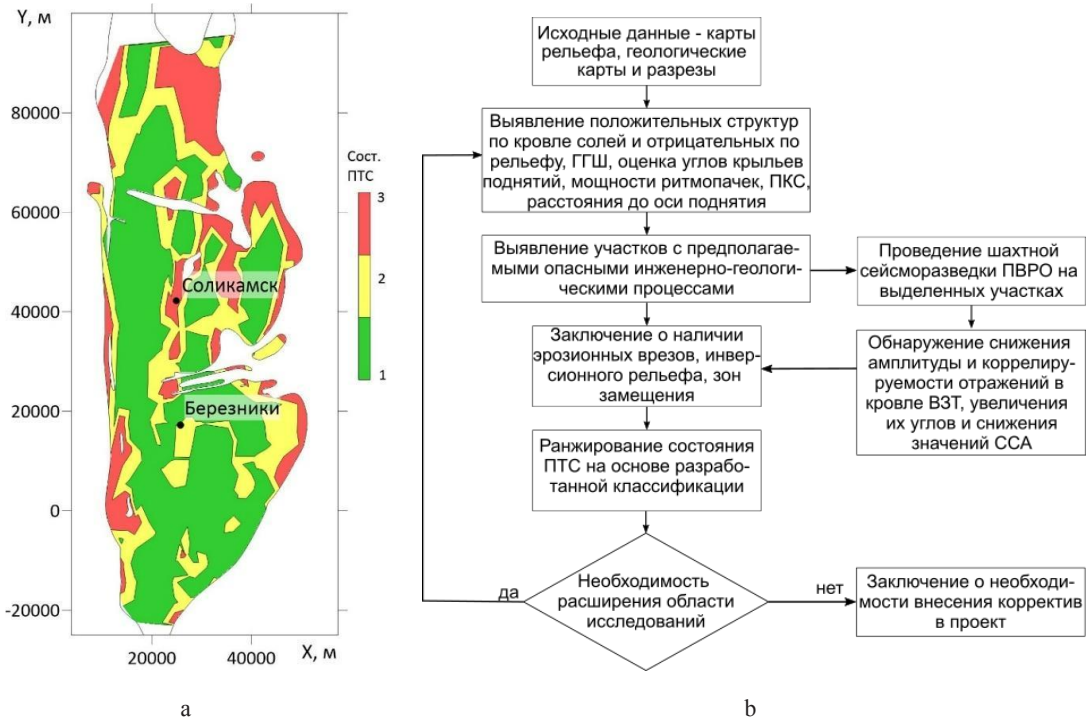


Рис. 5. а – карта районирования ВКМС по состоянию ПТС, б – методика оценки ИГУ ВЗТ, обеспечивающей безопасность подземных сооружений

Fig. 5. a – map of the VKSD zoning according to the state of the NTS, b – methodology for assessing the engineering and geological conditions of the water protection layer that ensures the safety of underground structures

Методика учитывает:

- геотехнические параметры – степень нагружения целиков, мощность ненарушенных слоев каменной соли (КС) в ВЗТ, поступление флюидов в выработки;
- геологические параметры – аномалии в ВЗТ по данным бурения и проходки, аномалии в ВЗТ на основе выявленных закономерностей;
- геофизические признаки – выход сейсмических атрибутов за пределы  $2\sigma$ , и мощность ВЗТ по результатам шахтной сейсмозондировки ПВРО.

Согласно методике, вся имеющаяся геологическая, геотехническая и геофизическая информация анализируется и ранжируется согласно разработанной классификации (таблица 3). В случае, если выявлено наличие опасных процессов, и состояние ВЗТ признано неустойчивым или критическим, для обеспечения ее сохранности и снижения риска опасных динамических горных процессов, связанных с ее нарушением, разработаны практические рекомендации, согласно которым в проект строительства подземных сооружений вносятся необходимые коррективы. Основным способом снижения рисков нарушения ВЗТ является исключение из проектов отработки очистных работ на участках с неустойчивым, и тем более с критическим состоянием ВЗТ, при необходимости – строительство гидроизолирующих перемычек с последующим постоянным мониторингом их строения и ширины. Для максимально же эффективной профилактики рисков активизации опасных процессов предприятиям-недропользователям рекомендуется:

- учет предложенной карты районирования ВКМС при формировании проектов отработки шахтных полей, либо, если речь идет о других месторождениях, разработанной на основе предложенной методики аналогичной карты районирования;

– обязательная реализация на практике предложенной методики оценки и прогноза ИГУ ВЗТ на площадях, относящихся к участкам неустойчивого или критического состояния ПТС, в том числе проходка для этого специальных разведочных выработок по подстилающей каменной соли;

– выборочная или полная, по выбору предприятия-недропользователя, реализация предложенной методики на всех участках, безотносительно степени устойчивости ПТС, такой подход является более затратным, но гарантирует резкое снижение рисков активизации опасных процессов.

Как показывает широкое практическое опробование методики, она позволяет надежно прогнозировать устойчивость ПТС за счет детальной информации об ИГУ ВЗТ, и, тем самым, обеспечить безопасную эксплуатацию подземных сооружений.

*Методика прогноза устойчивости гидроизолирующих целиков.* В ряде случаев по геологическим и горнотехническим причинам возникает необходимость ликвидации отдельных частей шахтных полей путем заполнения их рассолами. Это приводит к снижению действующих напряжений и интенсивности смещений породного контура и подработанной толщи, что приводит к формированию квазисплошной системы, при которой исключается влияние концентраторов напряжений [10]. При этом действующая часть шахтного поля отделяется от заполняемой рассолами так называемыми гидроизолирующими целиками (ГЦ). Выработки, соединяющие действующую часть шахтного поля с ликвидируемой, перекрываются гидроизолирующими перемычками, которые препятствуют проникновению закладочных рассолов в функционирующие подземные сооружения.

В целях обеспечения устойчивости ПТС и безопасной эксплуатации действующих подземных сооружений необходим строгий контроль за строением и состоянием ГЦ. Гидроизолирующие перемычки делаются абсолютно глухими, и возможность установки в ликвидируемой части шахтного поля каких-либо контролирующих устройств полностью исключена. Поэтому контроль за строением и состоянием ГЦ возможен только с использованием дистанционных методов, среди которых шахтная сейсморазведка играет ведущую роль. Применимость шахтной сейсморазведки для целей исследования и мониторинга строения, ширины и физических свойств целика обоснована специально проведенным для этого численным и физическим моделированием [11, 12]

На основе результатов выполненных исследований разработана методика прогноза устойчивости ГЦ, основанная на комплексном мониторинге физических характеристик горного массива, получаемых по результатам шахтной сейсморазведки ПВРО в горизонтальной плоскости (рисунок 6). Для реализации описанной методики выполнена адаптация разработанного метода ПВРО к условиям работы в горизонтальной плоскости и на двух типах волн – на продольных и поперечных.

Совместное использование продольных и поперечных волн открывает возможность для расчета физико-механических свойств горного массива с использованием формул теории упругости [13] и корреляционных связей, полученных другими исследователями [14] (рисунок 7). Далее через корреляционные связи [15] возможен переход к районированию целика по таким геомеханическим характеристикам, как предел прочности на сжатие и степень нагружения (рисунок 8).

Совместный анализ перечисленных характеристик и сравнение их с предельно допустимыми значениями, представляет собой модель оценки степени устойчивости целика (таблица 4). Она дает полноту сведений о строении и состоянии целика на момент выполнения исследований, достаточную для обеспечения устойчивости ПТС и безопасной эксплуатации подземных сооружений.

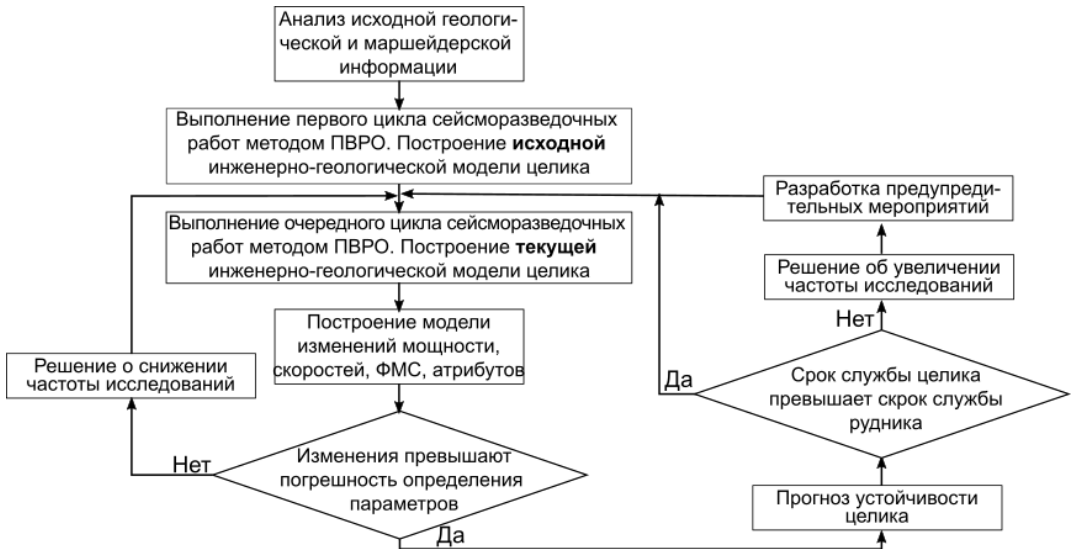


Рис. 6. Методика комплексного изучения и мониторинга гидроизолирующих целиков

Fig. 6. Methodology for the comprehensive study and monitoring of waterproofing pillars

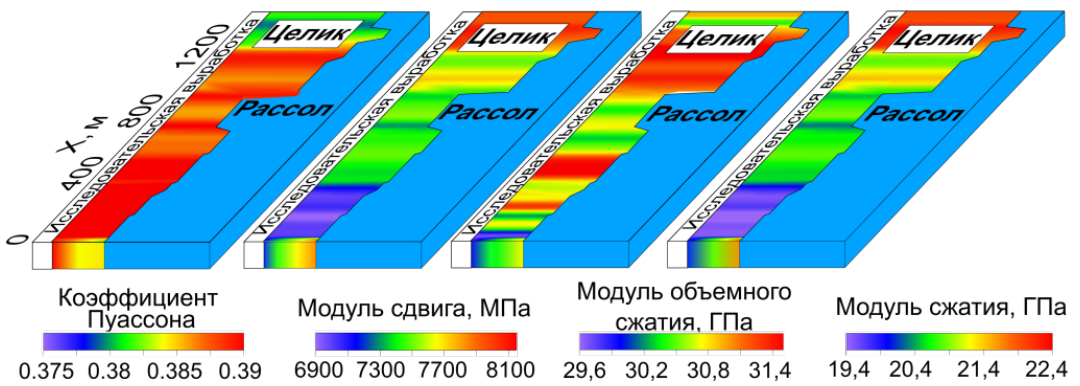
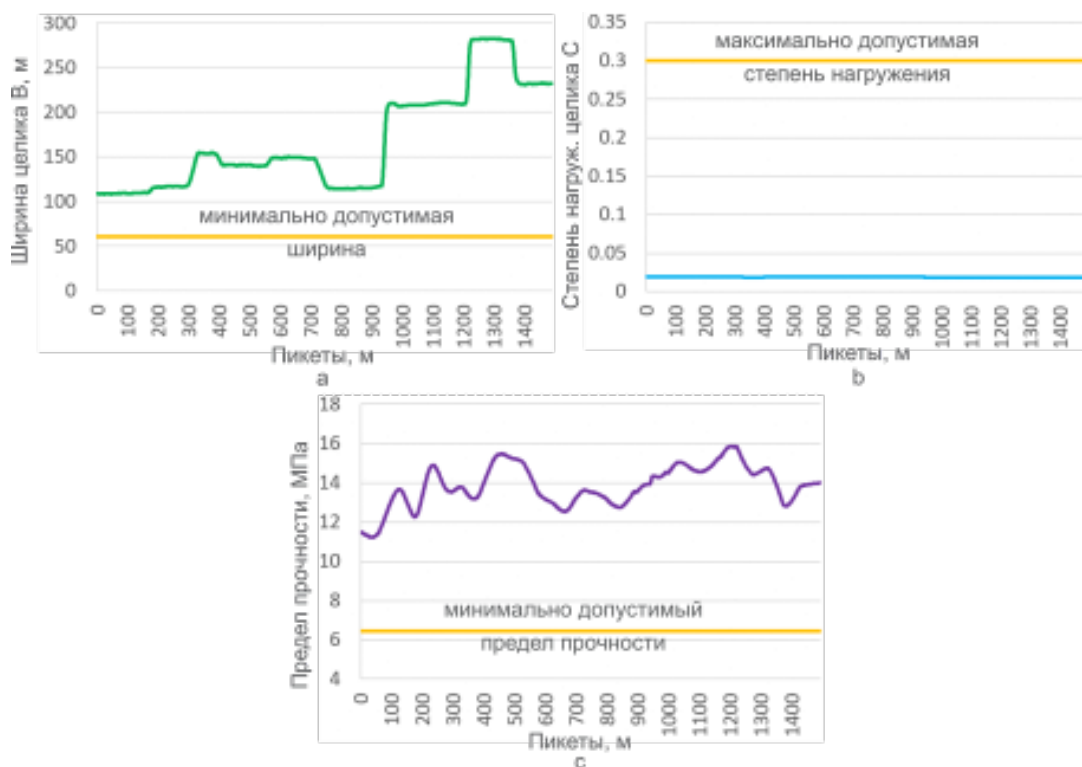


Рис. 7. Физико-механическая модель гидроизолирующего целика, полученная на основе пересчета сейсмических атрибутов

Fig. 7. Physico-mechanical model of the waterproofing pillar, obtained based on the recalculation of seismic attributes



**Рис. 8.** Районирование по условиям безопасности целика: а – фактическая и минимально допустимая мощности, б – фактическая и максимально допустимая степени нагружения, с – фактический и минимально допустимый предел прочности

**Fig. 8.** Zoning according to the safety conditions of the waterproofing pillar: а – actual and minimum permissible capacity, б – actual and maximum permissible degree of loading, с – actual and minimum permissible tensile strength

Таблица 4

**Модель оценки степени устойчивости гидроизолирующего целика**

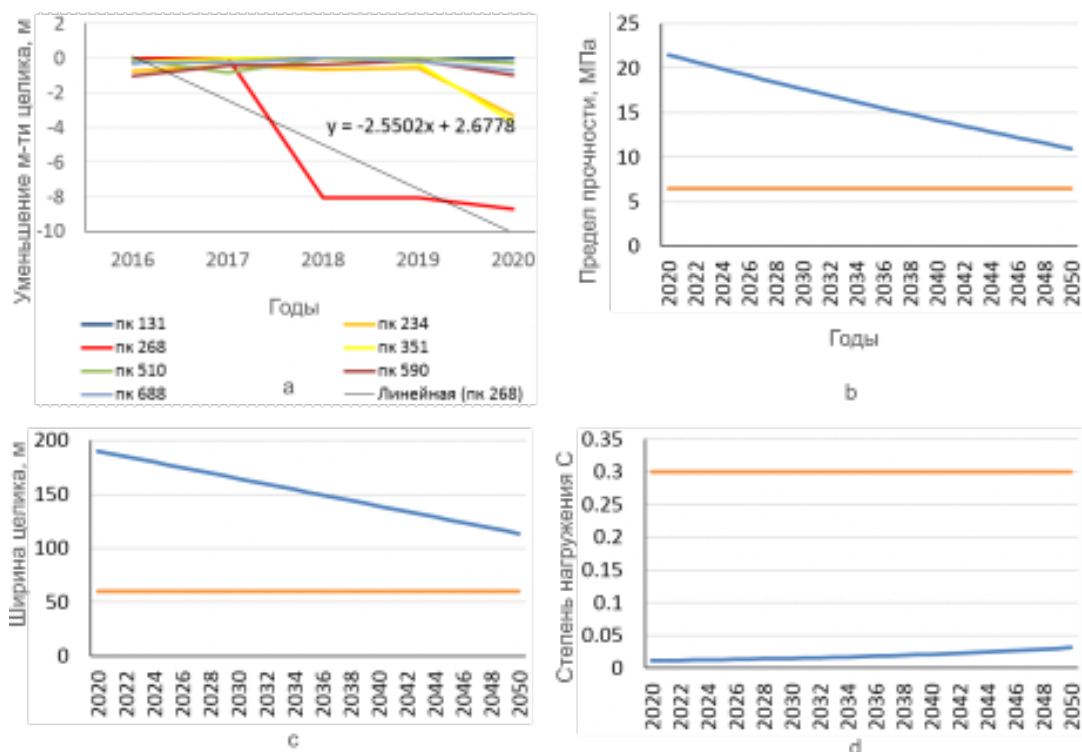
Table 4

**Model for assessing the degree of stability of a waterproofing rear sight**

Условия безопасности ГЦ для сальвинита)	Состояние целика (сильвиниты)		
	Устойчивое	Неустойчивое	Критическое
Ширина ГЦ – В, м (по данным сейсморазведки)	$V < V_p$	$V = V_p$	$V > V_p$
Признаки нарушения сплошности (ССА) (по данным сейсморазведки)	$ССА \ll 1$	ССА локально приближается к 1	ССА обширно приближается к 1
Степень нагружения целика С (по данным сейсморазведки)	$C < 0.3$	$C = 0.3$	$C > 0.3$
Значение предела длительной прочности $s_{дл}$ (по данным сейсморазведки)	$s_{дл} > 0.3s_{ск}$	$s_{дл} = 0.3s_{ск}$	$s_{дл} < 0.3s_{ск}$
Поступление воды сквозь целик	Нет	Увлажнение стенок	Поступает вода

Мониторинг изменения геомеханических характеристик, в свою очередь, открывает путь к прогнозу состояния ГЦ и устойчивости ПТС. Так, на одном из ГЦ мониторинговые сейсморазведочные работы позволили установить факт заметного уменьшения его мощности, которое локально достигло девяти метров (рисунок 9, а), что превышает погрешность определения геометрических характеристик и должно быть принято во внимание. Прогноз устойчивости выполняется по участку максимальных изменений путем экстраполяции изменения предела прочности на сжатие (рисунок 9, б), ширины целика (рисунок 9, с), и степени его нагружения (рисунок 9, d) на необходимый период, в данном случае до 2050 года. Выполненный прогноз позволяет оценить перспективы дальнейшей эксплуатации ГЦ при сохранении установленных темпов их изменений. В случае, если темпы изменений изменяются, соответственно меняются и прогнозные оценки изменения характеристик целика.

Таким образом, на основании анализа сейсмических атрибутов в горизонтальной плоскости выполняется комплексный прогноз устойчивости гидроизолирующих целиков, с оценкой динамики их ширины, внутренней структуры и геомеханических характеристик. В результате реализуется группа сценариев развития состояния ПТС с дистанционным контролем состояния гидроизолирующих целиков.



**Рис. 9.** Прогнозная оценка характеристик целика: а – результаты мониторинга целика за период 5 лет, б, с, d – прогнозная оценка характеристик целика на участке наибольших изменений соответственно для предела прочности на сжатие, ширины целика и максимальной степени нагружения

**Fig. 9.** Predictive assessment of rear sight characteristics: а – results of rear sight monitoring over a period of 5 years, б, с, d – predictive assessment of rear sight characteristics at the site of the greatest changes, respectively, for the ultimate compressive strength, rear sight width and maximum degree of loading

### Заключение

Созданные геофизические, инженерно-геологические и динамические модели природно-технических систем базируются на комплексной геологической, горнотехнической и геофизической информации о строении и физических свойствах ИГМ, и необходимы для проектной, изыскательской, образовательной и научно-исследовательской деятельности в плоскости решения задач инженерной геологии.

Получен ряд новых сведений об ИГУ ВЗТ, в том числе впервые установлено наличие на ВКМС каньонообразных эрозионных врезов, представляющих угрозу безопасности подземным сооружениям. Выполнено геомеханическое обоснование природы эрозионных врезов, создана динамическая модель их возникновения, и комплексный анализ условий, в которых они зафиксированы, обнаружены закономерности, сопутствующие их возникновению, предложен подход к формализованному вычислению показателя наличия инверсионного рельефа и эрозионных врезов, учитывающего литологический, структурный и морфологический факторы.

Произведено районирование ВКМС по признаку наличия опасных геологических процессов, сформирована классификация состояния ПТС «ИГМ – подземное сооружение» на основе геологических и горнотехнических параметров. Установлена связь наличия эрозионных врезов и инверсии соляных поднятий с распределением ряда амплитудных, частотных и корреляционных характеристик сейсмических разрезов, выполнена классификация состояния ПТС с учетом поведения сейсмических атрибутов.

Разработан научный подход к переходу от упругих характеристик к структурной и физико-механической моделям целиков, и далее – к степени нагружения целиков и пределу прочности на сжатие слагающих их пород. На основе установленных связей, закономерностей и разработанных подходов сформированы методики оценки и прогноза устойчивости природно-технических систем при подземной разработке соляных месторождений, обеспечивающие безопасное строительство и эксплуатацию подземных сооружений.

Представленные научно-методические основы оценки и прогноза устойчивости природно-технических систем апробированы и внедрены на рудниках ВКМС, где показали высокую эффективность при решении геологических и горнотехнических задач, и рекомендуются для практического использования при строительстве и эксплуатации сооружений при подземной разработке соляных месторождений.

Таким образом, в ходе исследований решена актуальная научная проблема оценки устойчивости природно-технических систем при подземной разработке соляных месторождений, имеющая важное социально-экономическое и хозяйственное значение. Изложены новые научно-обоснованные технические и методические решения, а также разработаны рекомендации по их практической реализации для повышения безопасности горнодобывающих комплексов и сохранности запасов ископаемых солей, что вносит значительный вклад в экономическое развитие Российской Федерации.

### Литература

1. Абатурова И. В., Савинцев И. А., Стороженко Л. А. и др. Этапность изучения инженерно-геологических условий месторождений полезных ископаемых от разведки до отработки. *Известия вузов. Горный журнал*. 2020;(7):83–91. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-7-83-91
2. Батракова Г. М., Савина О. В. Оценка природных и техногенных рисков для территорий нового строительства. *Актуальные проблемы природопользования и природообустройства*: Сборник статей II Международной научно-практической конференции, 25-26 декабря 2019 г. Пенза: Изд-во Пензенского государственного аграрного университета. 2019:55-58.
3. Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А., Пономаренко М.Р., Кутепов Ю.Ю. Геомеханический мониторинг устойчивости бортов разрезов и отвалов при разработке угольных месторождений. *Горный журнал*. 2023;(5):69-74.

4. Олянский Ю. И., Щекочихина Е. В., Кузьменко Д. А. и др. Основные закономерности изменения состава и свойств незасоленных и засоленных глинистых пород при диффузионном выщелачивании. *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура*. 2023;3-4(92):27-38.
5. Латыпов А. И., Гараева А. Н., Колчина Ю. Н. Оценка суффозионной опасности территории Восточного Закамья. *Карст и пещеры*. 2024: Сборник научных трудов по материалам Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 28 мая – 01 июня 2024 г. Пермь: Изд-во Пермского государственного национального исследовательского университета. 2024:85-91.
6. Якимов А.А., Ефремов В.Н., Христофоров И.И. и др. Мерзлотные условия участка эксплуатации гидроузла на реке Магга по данным электроразведки. *Устойчивость природных и технических систем криолитозоны в условиях изменения климата*: Материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 150-летию М.И. Сумгина, 22-24 марта 2023 г. Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. 2023:169-172.
7. Кулагов Е.В., Хвесеня С.С., Иванов С.В. и др. Возможности шахтных сейсмических исследований на примере месторождения калийных солей. *Инженерная и рудная геофизика 2024. Инженерная и рудная геология 2024*: Материалы 20-й научно-практической конференции и выставки, 13-16 мая 2024 г. Казань: Изд-во ООО «Геомодель Развитие». 2024:358-362.
8. Бабкин А. И. Оперативный прогноз изменчивости физико-механических свойств продуктивных пластов по данным шахтных сейсмоакустических исследований. *Горное эхо*. 2019;4(77):67-72.
9. Зубов В. П., Ковальский Е. Р., Антонов С. В. И др. Повышение безопасности рудников при отработке Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(5):22-33. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-22-33
10. Барях А. А., Евсеев А. В. Ликвидация калийных рудников и соляных шахт: обзор и анализ проблемы. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(9):5-29. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-5-29.
11. Пригара А.М., Царев Р. И., Ворошилов В.А. и др. *Шахтная сейсморазведка на месторождениях солей (на примере ВКМС)*. Пермь: ООО «Меркурий-каталог». 2024:184.
12. Пригара А.М., Аптуков В.Н., Ворошилов В.А. и др. Исследование процесса распространения волн при сейсмоакустических воздействиях в породном массиве методами математического моделирования. *«Инженерная и рудная геофизика 2020»*: Материалы конференции EAGE, 14-18 сентября 2020 г. Пермь: Изд-во ООО «EAGE Геомодель»; 2020:38.
13. Новацкий В. *Теория упругости*. Москва: Мир; 1975:872.
14. Кашников Ю.А., Ермашов А.О., Шустов Д.В. и др. Создание геолого-геомеханической модели Верхнекамского месторождения калийных солей. *Маркшейдерский вестник*. 2019;1(128):40-46.
15. Лебедева О.О. Прогноз деформационных процессов междушахтных целиков калийного месторождения на основе комплекса натурных исследований: Дис. ... канд. техн. наук. СПб:2024:131.

## References

1. Abaturova I.V., Savintsev I.A., Storozhenko L.A., et al. The stages of studying the engineering and geological conditions of mineral deposits from exploration to mining. *University News. Mining Magazine*. 2020;(7):83–91 (in Russian). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-7-83-91.
2. Batrakova G.M., Savina O.V. Assessment of natural and man-made risks for the territories of new construction. In: *Actual problems of nature management and environmental management: Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference*, December 25–26, 2019 Penza: Publishing House of Penza State Agrarian University; 2019:55–58 (in Russian).
3. Kutepov Yu.I., Kutepova N.A., Ponomarenko M.R., Kutepov Yu.Y. Geomechanical monitoring of stability of sides of sections and dumps during the development of coal deposits. *Mining Magazine*. 2023;(5):69–74 (in Russian).
4. Olyansky Yu.I., Shchekochikhina E.V., Kuzmenko D.A., et al. The main patterns of changes in the composition and properties of unsalted and saline clay rocks during diffusion leaching. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2023;3–4(92):27–38 (in Russian).

5. Latypov A.I., Garayeva A.N., Kolchina Yu.N. Assessment of the suffusion hazard of the territory of Eastern Zakamye. In: *Karst and Caves. 2024: Collection of scientific papers based on the materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation*, May 28 – June 01, 2024, Perm. Perm: Publishing House of Perm State National Research University; 2024:85–91 (in Russian).
6. Yakimov A.A., Efremov V.N., Khristoforov I.I., et al. Permafrost conditions at the site of operation of the hydroelectric power plant on the Matta River according to electrical survey data. In: *Sustainability of natural and technical cryolithozone systems in the face of climate change: Proceedings of the All-Russian Conference with International Participation dedicated to the 150th anniversary of M.I. Sumgin, March 22-24, 2023*. Yakutsk: Publishing House of the P.I. Melnikov Institute of Permafrost Science SB RAS; 2023:169–172 (in Russian).
7. Kulagov E.V., Khvesenya S.S., Ivanov S.V., et al. The possibilities of mine seismic research using the example of a deposit of potash salts. In: *Engineering and Ore Geophysics 2024. Engineering and Ore Geology 2024: Proceedings of the 20th scientific and practical conference and exhibition*, May 13-16, 2024. Kazan: Publishing House of Geomodel Razvitie LLC; 2024:358–362 (in Russian).
8. Babkin A.I. Operational forecast of variability of physical and mechanical properties of productive formations according to mine seismic and acoustic studies. *The Mountain Echo*. 2019;4(77):67–72 (in Russian).
9. Zubov V.P., Kovalsky E.R., Antonov S.V., et al. Improving mine safety during the development of the Verkhnekamskoye deposit of potassium and magnesium salts. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2019;(5):22–33 (in Russian). DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-22-33.
10. Baryakh A.A., Evseev A.V. Liquidation of potash mines and salt mines: a review and analysis of the problem. *Mining information and analytical bulletin*. 2019;(9):5–29 (in Russian). DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-5-29.
11. Prigara A.M., Tsarev R. I., Voroshilov V.A., et al. Mine seismic exploration in salt deposits (using the example of the VKMS). Perm: Mercury Catalog LLC; 2024:184 (in Russian).
12. Prigara A.M., Aptukov V.N., Voroshilov V.A., et al. *Investigation of the wave propagation process during seismic and acoustic impacts in a rock mass by mathematical modeling methods. "Engineering and Ore Geophysics 2020": Proceedings of the EAGE conference*, September 14-18, 2020. Perm: Publishing House of EAGE Geomodel LLC; 2020:38 (in Russian).
13. Novatsky V. *Theory of elasticity*. Moscow: Mir; 1975:872 (in Russian).
14. Kashnikov Yu.A., Ermashov A.O., Shustov D.V., et al. Creation of a geological and geomechanical model of the Verkhnekamskoye potash salt deposit. *The Surveyor's bulletin*. 2019;1(128):40–46 (in Russian).
15. Lebedeva O.O. Forecast of deformation processes of inter-shaft pillars of a potash deposit based on a complex of field studies: Dis. ... Candidate of Technical Sciences. St. Petersburg; 2024:131 (in Russian).

#### Сведения об авторах

**ПРИГАРА Андрей Михайлович** – к.т.н., руководитель направления АО «ВНИИ Галургии», г. Пермь, Российская Федерация, ORCID 0000-0003-0129-6133, Scopus Author ID 12789555800

E-mail andrey.prigara@uralkali.com.

**ТАТАРКИН Алексей Викторович** – д.т.н., проф. кафедры инженерной геологии и охраны недр ФГАОУ ВО «ПГНИУ», зав. лабораторией геофизики ООО НИПППД «Недра», г. Пермь, Российская Федерация, ORCID 0000-0003-4446-5507, Scopus Author ID 55937468700

E-mail vsto08@mail.ru.

**СЕРЕДИН Валерий Викторович** – д. г.-м. н., проф., зав. кафедрой инженерной геологии и охраны недр ФГАОУ ВО «ПГНИУ», г. Пермь, Российская Федерация, Scopus Author ID 56974744000.

#### About the authors

**Andrey M. Prigara** – Cand. Sci. (Engineering), Head of the Department, VNI Galurgii JSC, Perm, Russian Federation, ORCID 0000-0003-0129-6133, Scopus Author ID 12789555800

E-mail andrey.prigara@uralkali.com

**Alexey V. Tatarkin** – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Department of Engineering Geology and Subsoil Protection, Perm State National Research University; Head of the Laboratory of Geophysics, NIPPPD Nedra LLC, Perm, Russian Federation, ORCID 0000-0003-4446-5507, Scopus Author ID 55937468700

E-mail vsto08@mail.ru

*Valery V. Seredin* – Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Head of the Department of Engineering Geology and Subsoil Protection, Perm State National Research University, Perm, Russian Federation, Scopus Author ID 56974744000.

#### **Вклад авторов**

*Пригара А.М.* – разработка концепции, выполнение численного и физического моделирования, разработка метода ПВРО и моделей, программно-алгоритмического обеспечения, методик, научных подходов, научно-методических основ, апробация и внедрение разработок.

*Татаркин А.В.* – консультации, обсуждение идей.

*Середин В.В.* – консультации, обсуждение идей.

#### **Authors' contribution**

*Andrey M. Prigara* – concept development, numerical and physical modeling, model development, software and algorithmic support, methods, scientific approaches, scientific and methodological foundations.

*Alexey V. Tatarkin* – consultations, discussion of ideas.

*Valery V. Seredin* – consultations, discussion of ideas.

#### **Информация о конфликте интересов**

Один из авторов – Пригара А.М. заявляет о финансовом конфликте интересов с Горным институтом УрО РАН (г. Пермь), который, как и АО «ВНИИ Галургии», являются подрядчиками одного генерального заказчика, в связи с чем авторы просят редакцию не отправлять данную рукопись на рецензирование лицам, аффилированным с Горным институтом УрО РАН.

#### **Conflict of interests**

One of the authors, Prigara A.M., claims a financial conflict of interest with the Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Perm), which, like VNI Galurgii JSC, are contractors of the same general customer, and therefore the authors ask the Editorial Board not to send this manuscript for review to persons affiliated with the Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

*Поступила в редакцию / Submitted 19.02.2026*

*Поступила после рецензирования / Revised 04.03.2026*

*Принята к публикации / Accepted 27.03.2026*

## ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ ЗАПАДНО-ВЕРХОЯНСКОГО СЕКТОРА ВЕРХОЯНСКОГО СКЛАДЧАТО-НАДВИГОВОГО ПОЯСА ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

*Е.Э. Соловьев\*, И.И. Саввинов*

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,

г. Якутск, Российская Федерация

\*solov.evg@yandex.ru

### Аннотация

Верхоянский складчато-надвиговый пояс (ВСНП) является крупнейшей геологической структурой Верхояно-Колымской орогенной области. Несмотря на многолетние изучения Верхоянского складчато-надвигового пояса, глубинное строение региона остается слабо изученным. Существующие модели и схемы строения литосферы региона основываются, в основном, на интерпретации опорных сейсмических профилей, расположенных в северном окончании и Южно-Верхоянском секторе складчато-надвигового пояса. Целью настоящей работы является обобщение имеющихся данных и анализ аномальных геопотенциальных полей и их трансформант для уточнения глубинного строения.

В работе представлены результаты геофизических исследований Западно-Верхоянского сектора и смежных территорий Верхоянского складчато-надвигового пояса. Для получения информации о распределении магнитных и плотностных неоднородностей выполнены пересчет высших производных в геоинформационной системе Oasis Montaj, двумерная энергетическая фильтрация с разделением полей на средне- и низкочастотные составляющие в автоматизированной программе COSCAD 3D. Для изучения глубинного строения рассматриваемой территории посредством решения обратной задачи в программе COSCAD 3D рассчитаны магнитные и гравитационные модели, позволяющие оценить параметры аномалеобразующих объектов.

Полученные данные позволили уточнить тектоническое строение и особенности размещения магматических образований, оценить глубины источников магнитных и плотностных неоднородностей Западно-Верхоянского сектора Верхоянского складчато-надвигового пояса. Установлены скрытые тектонические нарушения субдолготного и восток-северо-восточного простирания. Показано положение Западно-Верхоянского погребенного рифтового грабена. Построенные геофизические модели выявили три структурных этажа, с различным уровнем положения источников магнитных и плотностных масс, коррелирующие с осадочным чехлом, верхней и нижней корой.

**Ключевые слова:** Западно-Верхоянский сектор ВСНП, магнитные аномалии, гравитационные аномалии, трансформация геопотенциальных полей, геофизические модели, глубинное строение

**Для цитирования:** Соловьев Е.Э., Саввинов И.И. Глубинное строение Западно-Верхоянского сектора Верхоянского складчато-надвигового пояса по геофизическим данным. *Вестник СВФУ*. 2026;(1):37-48. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-37-48

## THE DEEP STRUCTURE OF THE WESTERN VERKHUYANSK SECTOR OF THE VERKHUYANSK FOLD AND THRUST BELT ACCORDING TO GEOPHYSICAL DATA

*Evgeny E. Solovyov\**, *Innokenty I. Savvinov*

M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

\*solov.evg@yandex.ru

### Abstract

The Verkhoyansk fold and thrust belt (VFTB) is the largest geological structure in the Verkhoyansk–Kolyma orogenic region. Despite decades of study of the Verkhoyansk fold and thrust belt, the region's deep structure remains poorly understood. Existing models and schematics of the region's lithospheric structure are based primarily on the interpretation of key seismic profiles located in the northern end and South Verkhoyansk sector of the fold and thrust belt. The aim of this study is to summarize the available data and analyze anomalous geopotential fields and their transforms to clarify the deep structure.

This paper presents the results of geophysical surveys of the West Verkhoyansk sector and adjacent territories of the Verkhoyansk fold and thrust belt. To obtain information on the distribution of magnetic and density heterogeneities, higher-order derivatives were recalculated in the Oasis Montaj geoinformation system, and two-dimensional energy filtering with separation of fields into mid- and low-frequency components was performed in the automated COSCAD 3D program. To study the deep structure of the study area by solving an inverse problem in COSCAD 3D, magnetic and gravity models were calculated to estimate the parameters of anomaly-forming objects.

The data obtained allowed us to clarify the tectonic structure and distribution of igneous formations and estimate the depths of magnetic and density heterogeneity sources in the West Verkhoyansk sector of the Verkhoyansk fold and thrust belt. Hidden tectonic faults with sublongitudinal and east-northeast strikes were identified. The position of the West Verkhoyansk buried rift graben was demonstrated. The resulting geophysical models revealed three structural stages, with different magnetic and density mass source positions, correlating with the sedimentary cover and the upper and lower crust.

**Keywords:** West Verkhoyansk sector of VFTB, magnetic anomalies, gravitational anomalies, transformation of geopotential fields, geophysical models, deep structure

**For citation:** Solovyov E.E., Savvinov I.I. The deep structure of the Western Verkhoyansk sector of the Verkhoyansk fold and thrust belt according to geophysical data. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*. 2026;(1):48-37. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-37-48

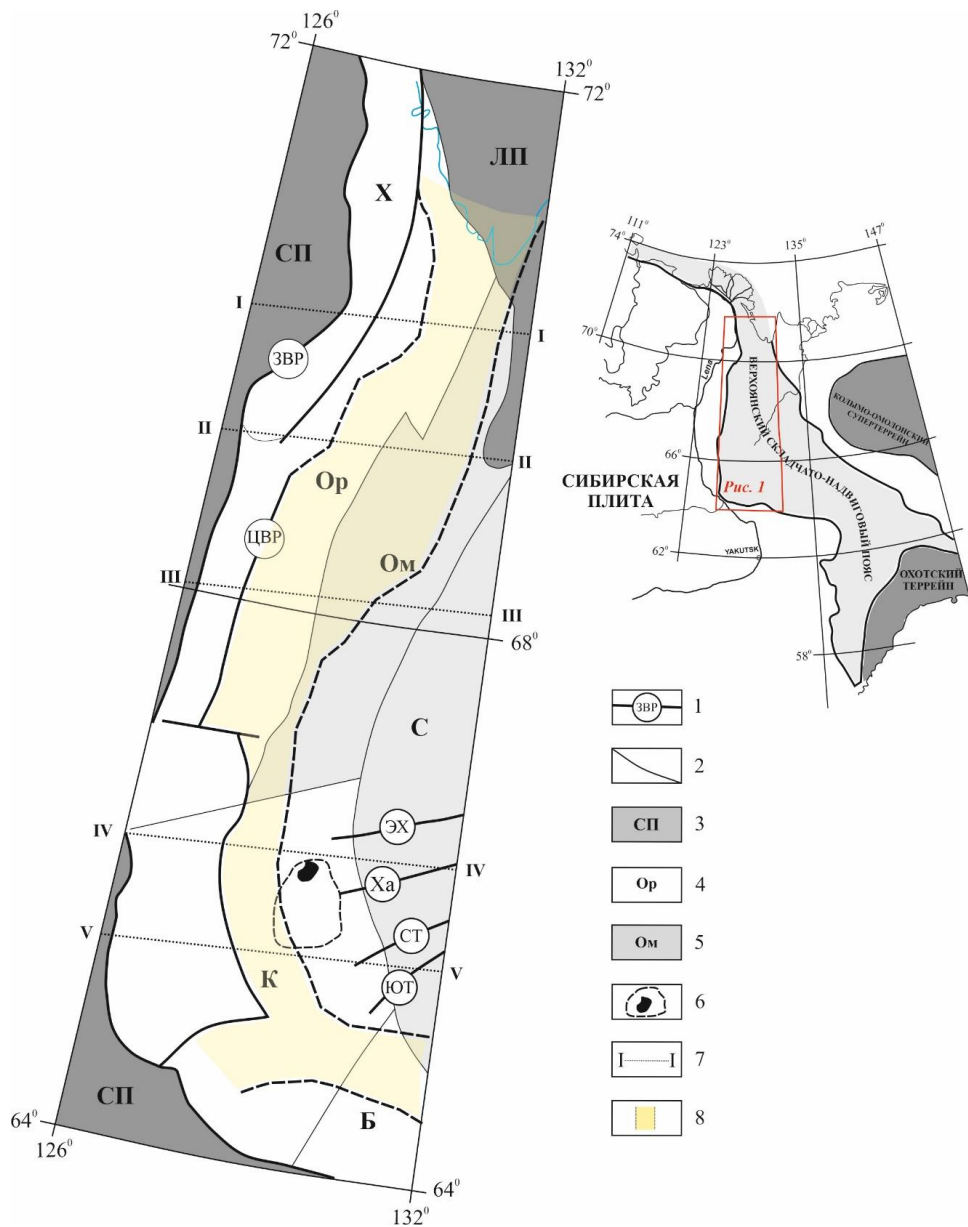
### Введение

Верхоянский складчато-надвиговый пояс (ВСНП) является крупнейшей геологической структурой Верхояно-Колымской орогенной области и представляет собой сложный комплекс различных тектонических зон, сформированных в результате масштабных аккреционно-коллизийных событий на Северо-Востоке Азии в позднем мезозое [1]. По современным представлениям структуры ВСНП образовались в результате аккумуляции разновозрастных осадочных комплексов на восточной опущенной окраине Сибирского кратона и последующей их интенсивной деформацией [2]. Несмотря на многолетние изучения региона, глубинное строение ВСНП остается слабо изученным [2, 3, 4, 5, 6]. Существующие модели и схемы строения литосферы региона основываются, в основном, на интерпретации опорных сейсмических профилей серии ЛАРГЕ и 3-ДВ, оставляя дискуссионными вопросы о глубинной архитектуре основных тектонических структур складчатого пояса [6, 7].

Целью настоящей работы является обобщение имеющихся данных и качественный анализ аномальных геопотенциальных полей и их трансформант для уточнения глубинного строения Западно-Верхоянского сектора и смежных территорий Верхоянского складчато-надвигового пояса.

**Объект исследований**

Исследуемая территория охватывает приплатформенную часть Западно-Верхоянского сектора ВСНП и смежные территории (рис. 1). В Западно-Верхоянском секторе ВСНП выделяются различающиеся геологическим строением Хараулахский, Орулганский, Куранахский, и



**Рис. 1.** Тектоническая схема Западно-Верхоянского сектора и смежных территорий Верхоянского складчато-надвигового пояса

1 – разломы и их наименование: ЗВР – Западно-Верхоянский, ЦВР – Центрально-Верхоянский, ЭХ – Эге-Хайский, Ха – Халтысинский, СТ – Северо-Тирехтянский, ЮТ – Южно-Тирехтянский; 2 – границы тектонических зон; 3 – Сибирская платформа (Приверхоянский краевой прогиб); 4 – тектонические сегменты Западно-Верхоянского сектора ВСНП: X – Хараулахский, Op – Орулганский, К – Куранахский, Б – Барайнский; 5 – синклинали тыловой зоны ВСНП: Om – Омолойская, С – Сартангская; 6 – Хобойоту-Эчийский гранитоидный массив и положение скрытого плутона по геофизическим данным; 7 – положение геофизических разрезов магнитных и плотностных масс, 8 – положение Западно-Верхоянского погребенного грабена по геофизическим данным

**Fig. 1.** Tectonic scheme of the Western Verkhoyansk sector and adjacent territories of the Verkhoyansk fold and thrust belt

1 – faults and their names: ЗВР – West Verkhoyansk, ЦВ – Central Verkhoyansk, ЭХ – Ege-Khaisky, Ха – Khaltysinsky, СТ – North Tirekhtyakhsky, ЮТ – South Tirekhtyakhsky; 2 – boundaries of tectonic zones; 3 – Siberian platform (Priverkhoyansk foredeep); 4 – tectonic segments of the West Verkhoyansk sector of the VFTB: Х – Kharaulakhsky, Ор – Orulgansky, К – Kuranakhsky, Б – Barainsky; 5 – synclines of the rear zone of the VFTB: Ом – Omoloyskaya, С – Sartangskaya; 6 – Khoboyotu-Echiysky granitoid massif and the position of the hidden pluton according to geophysical data; 7 – position of geophysical sections of magnetic and density masses, 8 – position of the West Verkhoyansk buried graben according to geophysical data

Бараинский сегменты [2]. К востоку расположены Омолойский и Сартангский синклиналии, входящие в тыловую зону ВСНП. Основанием пояса является домезопротерозойский метаморфический фундамент, перекрытый мощными от 6 до 21 км верхнепротерозойскими, палеозойскими и нижнемезозойскими осадочными толщами [4, 5, 8]. На западе тектонические зоны ограничены Западно-Верхоянским разломом. Магматические образования в регионе проявлены незначительно. Здесь выделены палеозойские и мезозойские магматические комплексы основного, среднего и кислого составов. Преобладают породы кислого и среднего состава, имеющие позднемезозойский возраст и представленные многочисленными дайками, редкими массивами и штоками [9, 10].

#### **Методика исследований**

В качестве опорных материалов использованы: карты гравитационного поля масштаба 1:2 500 000 в редукции Буге, цифровые модели гравитационного поля Земли GOCO2025s, а также карты магнитного поля масштаба 1:2 500 000 [11, 12, 13]. Исходные материалы переведены в автоматизированную программу COSCAD 3D, где произведены операции – восполнение отсутствующих значений и сплайн интерполяция данных. После указанных итераций получены цифровые матрицы 1×1 км магнитного и гравитационного (в редукции Буге с плотностью промежуточного слоя 2.67 г/см<sup>3</sup>) полей изучаемой территории.

Для получения информации о распределении магнитных и плотностных неоднородностей и связи их с геологическими структурами выполнены следующие трансформации геофизических полей – пересчет высших производных в геоинформационной системе Oasis Montaj, двумерная энергетическая фильтрация с разделением полей на средне- и низкочастотные составляющие в автоматизированной программе COSCAD 3D [14].

Для изучения глубинного строения рассматриваемой территории посредством решения обратной задачи в программе COSCAD 3D рассчитаны магнитные и гравитационные модели, позволяющие оценить параметры аномалеобразующих объектов [15]. Выбранная глубина расчетной модели с учетом существующих представлений о мощности земной коры составила 50 км.

#### **Результаты и обсуждение**

*Магнитные аномалии.* Магнитное поле исследуемой территории характеризуется неоднородным строением. На западе, вдоль границы ВСНП и Приверхоянского прогиба выделяются крупные высокоинтенсивные магнитные аномалии положительного знака. Магнитные максимумы вытянуты в субмеридиональном направлении на расстояние свыше 800 км при ширине около 120 км на севере и 72 км на юге. Высокая магнитная интенсивность объясняется широким развитием магматических образований (силлов и даек) основного состава и присутствием в осадочных толщах горизонтов, обогащенных магнетитом и пирротинном, возникших в результате размыва траппов [10]. Высокоинтенсивные положительные магнитные аномалии в Хараулахском сегменте связаны с выступами платформенного основания.

В центральной части Западно-Верхоянского сектора ВСНП, отделяясь от магнитных максимумов, цепочкой сближенных малоамплитудных аномалий, отмечается узкая протяженная полоса отрицательного магнитного поля интенсивностью от -100 до -150 Нтл. Протяженность

выделенной магнитной полосы составляет свыше 800 км, при ширине на севере до 96 км, на юге – около 35 км. В структурном отношении, здесь фрагментарно располагаются Хараулахский, Орулганский, Куранахский сегменты и Омолойский синклиниорий. Низкий уровень аномального магнитного поля соответствует погруженному Западно-Верхоянскому погребенному рифтовому грабену [4].

В восточной части исследуемой территории, преимущественно в пределах Сартангского синклинория, фиксируется область слабоотрицательных и близнулевых значений магнитного поля. В районе распространения магматических образований поперечного гранитного пояса и контактово-измененных пород, окружающих гранитоидные интрузивные тела, структура магнитного поля осложняется вытянутыми в восток-север-восточном направлении локальными изометричными аномалиями положительного знака.

В целом, на характер аномального магнитного поля приплатформенной части ВСНП влияют глубинные неоднородности – приподнятые и опущенные блоки земной коры, магматические образования различного состава и площади контактово-измененных пород.

*Гравитационные аномалии.* Гравитационное поле исследуемой территории типично для зоны сочленения складчатой системы и континентальной платформы с развитием крупных интрузивных образований. Тектонические выступы и поднятия выделяются повышенными значениями гравитационных аномалий, прогибы и впадины – пониженными, магматические образования – в зависимости от их вещественного состава. Наблюдается преимущественно субдолготный характер изоаномал, коррелирующий с основным простиранием геологических структур. Западно-Верхоянский разлом, ограничивающий структуры ВСНП, трассируется серией высокоградиентных линейных гравитационных аномалий.

Гравитационные максимумы обусловлены выступом в платформенном основании Хараулахского сегмента и, вероятно, с существенным сокращением мощности перекрывающих отложений на севере. В центральной части изучаемой площади гравитационные аномалии коррелируют с магнитными. Наблюдается вытянутая в субдолготном направлении полоса длиной более 800 км, характеризующаяся отрицательным уровнем гравитационного поля. Таким образом, по геофизическим данным крупный погребенный грабен прослеживается через всю изучаемую территорию.

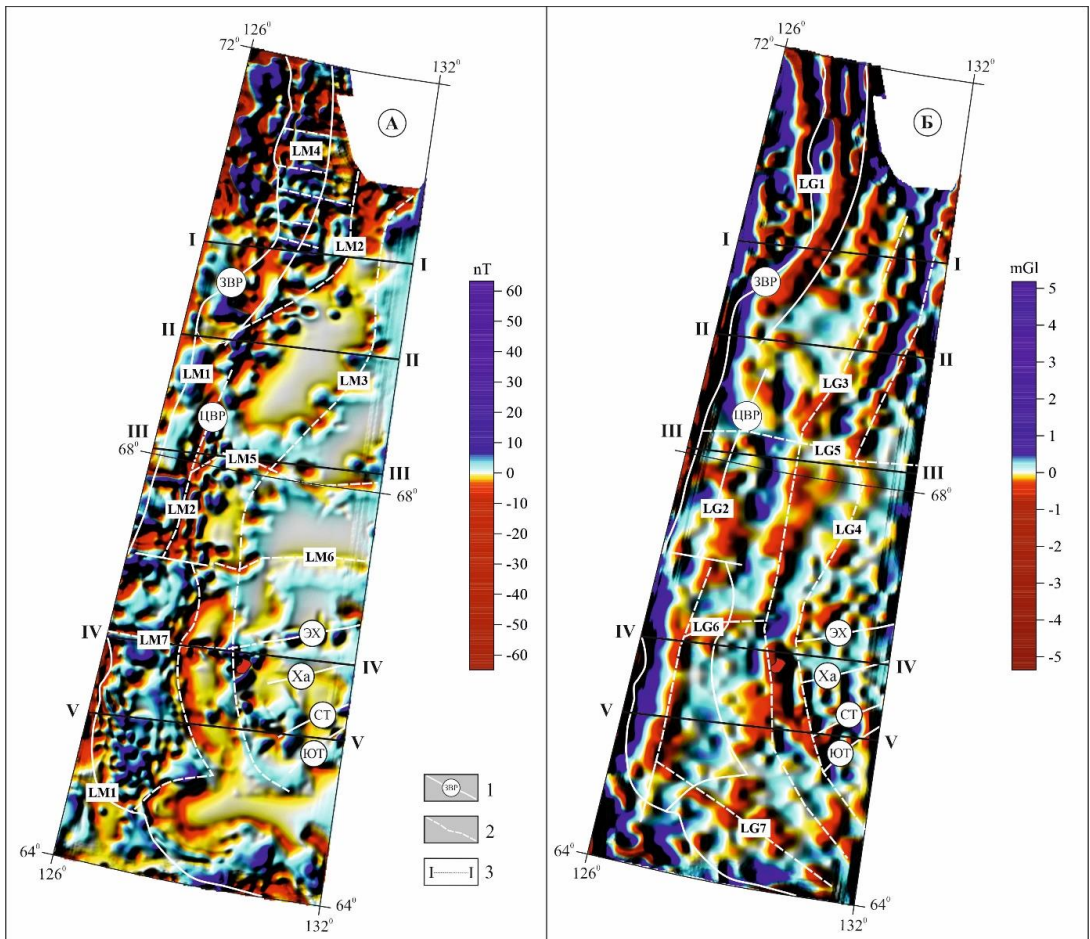
Выделенную аномальную полосу осложняет ряд минимумов. Гравитационные минимумы обусловлены сочетанием тектонических впадин и скрытых интрузий, предположительно, основного и кислого составов. В пределах плотностной неоднородности размещается Хобойоту-Эчийский гранитоидный массив, что позволяет предположить наличие на глубине крупного плутона.

Гравитационное поле территории обусловлено взаимоотношением структур Сибирской платформы и ВСНП, наличием рифтового грабена протяженностью свыше 800 км, разрывных нарушений различного простирания и кинематики, а также крупных скрытых магматических образований.

*Трансформированные геофизические поля. Высокочастотные аномалии.* При интерпретации магнитных и гравитационных аномалий принято считать, что низкочастотные (региональные) компоненты геопотенциальных полей связаны с глубинными геологическими структурами, высокочастотные (локальные) – с возмущающими объектами в верхних слоях земной коры.

Расчет вертикальных производных магнитного поля позволил определить положение локальных возмущающих неоднородностей. В результате анализа трансформированного магнитного поля по протяженным линейно-вытянутым и интенсивным аномалиям установлены скрытые разрывные нарушения субдолготного и субширотного простирания. Линейные магнитные структуры осложнены локальными изометричными аномалиями, коррелирующимися с магматическими телами.

Согласно магнитным аномалиям, тектонические нарушения субмеридиональной ориентировки субпараллельны и имеют дугообразный характер (рис. 2А). Они сопоставляются с известными региональными разломами – Западно-Верхоянским и Центрально-Верхоянским.



**Рис. 2.** Высоочастотные магнитные (А) и гравитационные (Б) аномалии исследуемой территории 1 – установленные разломы: ЗВР – Западно-Верхоянский, ЦВР – Центрально-Верхоянский, ЭХ – Эге-Хайский, Ха – Халтысинский, СТ – Северо-Тирехтяхский, ЮТ – Южно-Тирехтяхский; 2 – оси геофизических линейных аномалий: LM – магнитных, LG – гравитационных; 3 – положение геофизических разрезов магнитных и плотностных масс

**Fig. 2.** High-frequency magnetic (A) and gravitational (B) anomalies of the studied area 1 – established faults: ЗВР – West Verkhoyansk, ЦВР – Central Verkhoyansk, ЭХ – Ege-Khaisky, Ха – Khaltysinsky, СТ – North Tirkhtyakhsky, ЮТ – South Tirkhtyakhsky; 2 – axes of geophysical linear anomalies: LM – magnetic, LG – gravitational; 3 – position of geophysical sections of magnetic and density masses

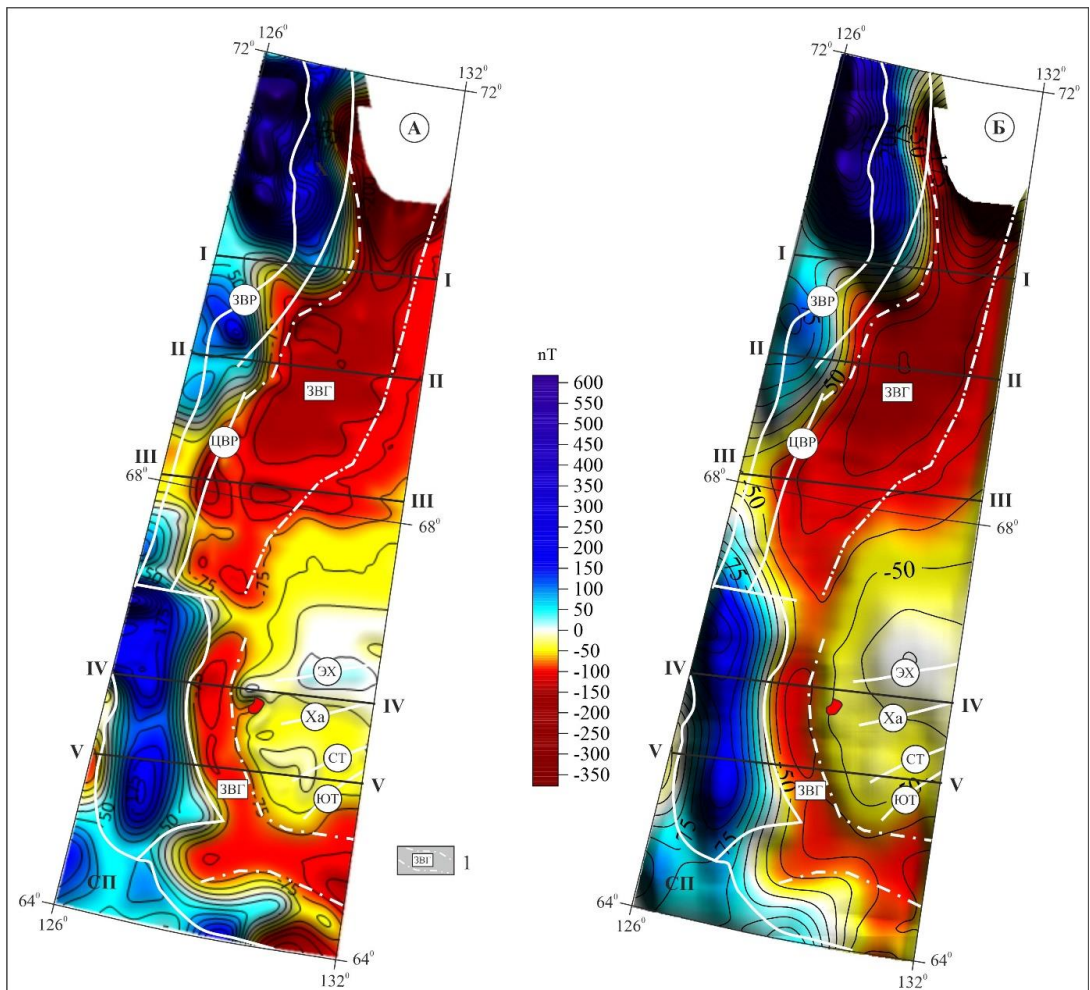
Разлом LM2 сегментирован субширотными разрывными нарушениями (LM5, LM6, LM7) (рис. 2А). Амплитуда латеральных сдвигов здесь достигает по геофизическим данным до 6 км. Предполагаемый разлом LM3 выделяется по резкой смене характера трансформированного магнитного поля и цепочке локальных изометричных аномалий, вероятно, соответствует фронтальной границе поперечного магматического пояса. Фиксируемые здесь субширотные линейные магнитные аномалии маркируют Эге-Хайский, Халтысинский, Северо-Тирехтяхский, Южно-Тирехтяхский зоны разломов.

Трансформированное высоочастотное гравитационное поле имеет ярко выраженный линейный характер с чередованием положительных и отрицательных аномалий (рис. 2Б). Простираение и конфигурация аномалий согласуется со строением выходящих на дневную поверхность геологических структур. Отрицательные линейные аномалии коррелируют с осями синклиналиных складок, положительные – антиклинальных. Региональные разломы Западно-

Верхоянский и Центрально-Верхоянский трассируются линейными аномалиями LG1 и LG2. Выделенные в магнитном поле магматические пояса отражаются слабо и фрагментарно, что указывает на их незначительный объем.

*Средне- и низкочастотные аномалии.* Анализ средне- и низкочастотной компонент магнитного поля рассматриваемой территории указывает на быстрое затухание локальных аномалий и несущественное изменение характера региональных аномалий с глубиной (рис. 3). Контрастно выделяется ряд крупных положительных магнитных максимумов высокой интенсивности на границе Приверхоянского прогиба и Западно-Верхоянского сектора ВСНП.

В центральной части изучаемой площади выделяется дугообразный региональный минимум магнитного поля протяженностью более 800 км, связанный с Западно-Верхоянским погребенным грабеном. Структура региональной аномалии неоднородна. На севере магнитный минимум характеризуется шириной до 110 км, интенсивностью до -300 нТл и выраженным корытообразным строением. К югу аномалия резко сужается до 40 км и приобретает линейный характер, уровень значений магнитного поля поднимается до -120 нТл.



**Рис. 3.** Средне- (А) и низкочастотное (Б) аномальные магнитные поля исследуемой территории. Условные обозначения см. рис. 2.

1 – предполагаемые границы Западно-Верхоянского погребенного грабена

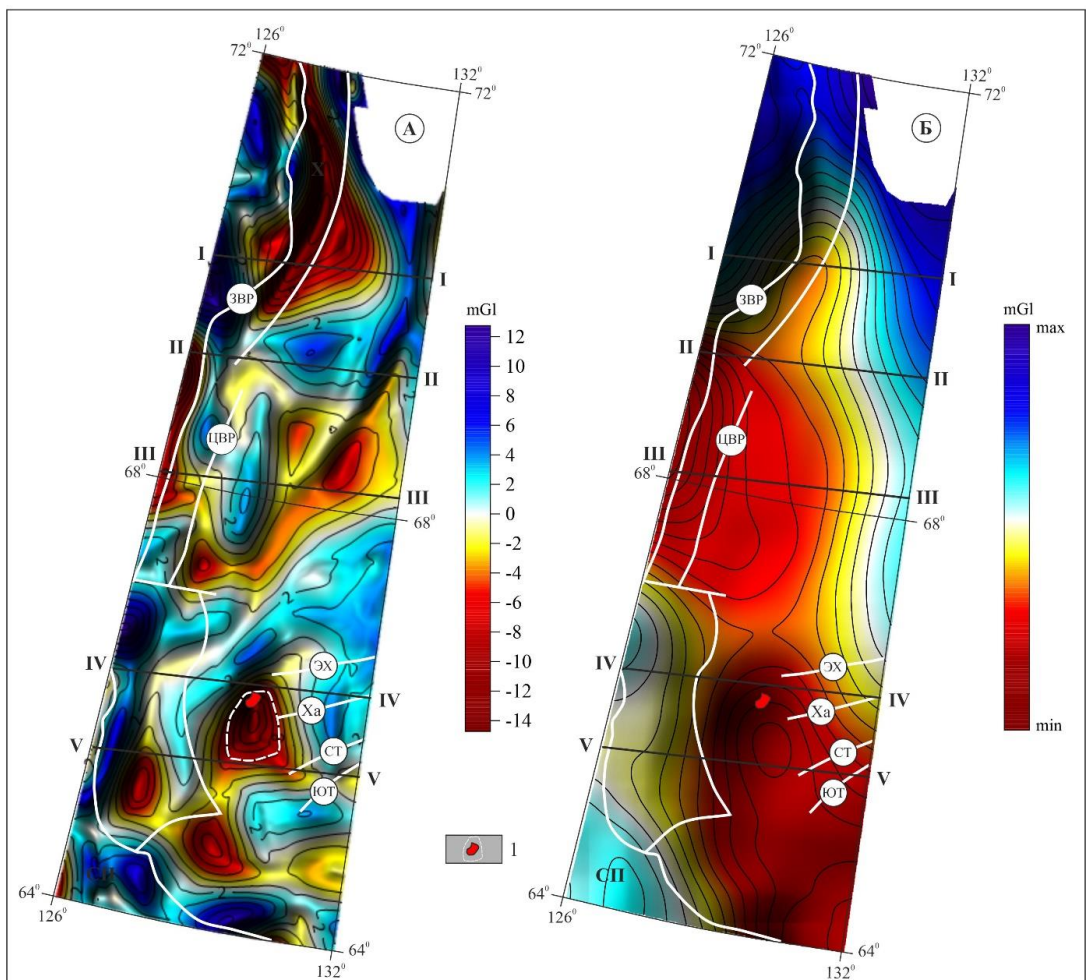
**Fig. 3.** Medium- (A) and low-frequency (B) anomalous magnetic fields of the studied area

See Fig. 2 for the legend

1 – assumed borders of West Verkhoyansk buried graben

Следующая региональная магнитная аномалия в южной части Сартангского синклинали шириной до 230 км приурочена к поперечному гранитному поясу и имеет восток-северо-восточную ориентировку. Она фиксируется слабоинтенсивными значениями магнитного поля в диапазоне от -50 до 15 нТл.

Средне- и низкочастотные компоненты поля силы тяжести имеют существенные различия. Структура среднечастотных аномалий состоит из гравитационных максимумов и минимумов различной конфигурации и протяженности (рис. 4А). Известные региональные тектонические нарушения коррелируют с зонами градиентов гравитационного поля. Для Западно-Верхоянского разлома характерно резкое изменение амплитуды аномалий, указывающее на его субвертикальное строение с падением на восток на данном глубинном срезе. Разлом, выделенный восточнее, по геофизическим свойствам, представлен пологим срывом с западной вергентностью. Комплексы пород в его крыльях различаются аномальной плотностью.



**Рис. 4.** Средне- (А) и низкочастотное (Б) аномальные гравитационные поля исследуемой территории 1 – Хобойоту-Эчийский гранитоидный массив и положение скрытого плутона по геофизическим данным. Условные обозначения см. рис. 2.

**Fig. 4.** Medium- (A) and low-frequency (B) anomalous gravitational fields of the studied area See Fig. 2 for the legend  
1 – Khoboyotu-Echiysky granitoid massif and hidden plutonium location according to geophysical data

Наиболее интенсивные отрицательные аномалии связаны с прогибом в Хараулахском сегменте и магматическими телами в пределах Куранахского сегмента. Крупный гравитационный минимум позволяет предполагать наличие скрытого батолита размером 63x45 км под Хобойоту-Эчийским гранитным массивом.

Низкочастотная компонента гравитационного поля отражает глубокие плотностные неоднородности земной коры и показывает общее тектоническое строение изучаемого региона, связанное с рельефом кристаллического фундамента (рис. 4Б). По данным гравиметрии, фундамент приплатформенной части Западно-Верхоянского сектора ВСНП осложнен крупной депрессией субдолготного простирания, сопоставимой с Западно-Верхоянским грабеном. Погребенный грабен, протягивается через всю исследуемую площадь, и ограничивается воздыманием фундамента на севере. Выделенная структура на глубинном уровне характеризуется крутым субвертикальным западным и наклонным восточным бортами, о чем свидетельствуют градиенты низкочастотных гравитационных аномалий.

*Магнитные и гравитационные модели.* Расчёт эквивалентного распределения магнитных масс показал, что основная часть высокочастотных (локальных) аномалий размещается на глубинах от 1.3 до 7 км. Необходимо отметить, что приведенные здесь оценки глубин залегания отнесены к центрам магнитных масс. Серия локальных аномалий, маркирующих тектоническое

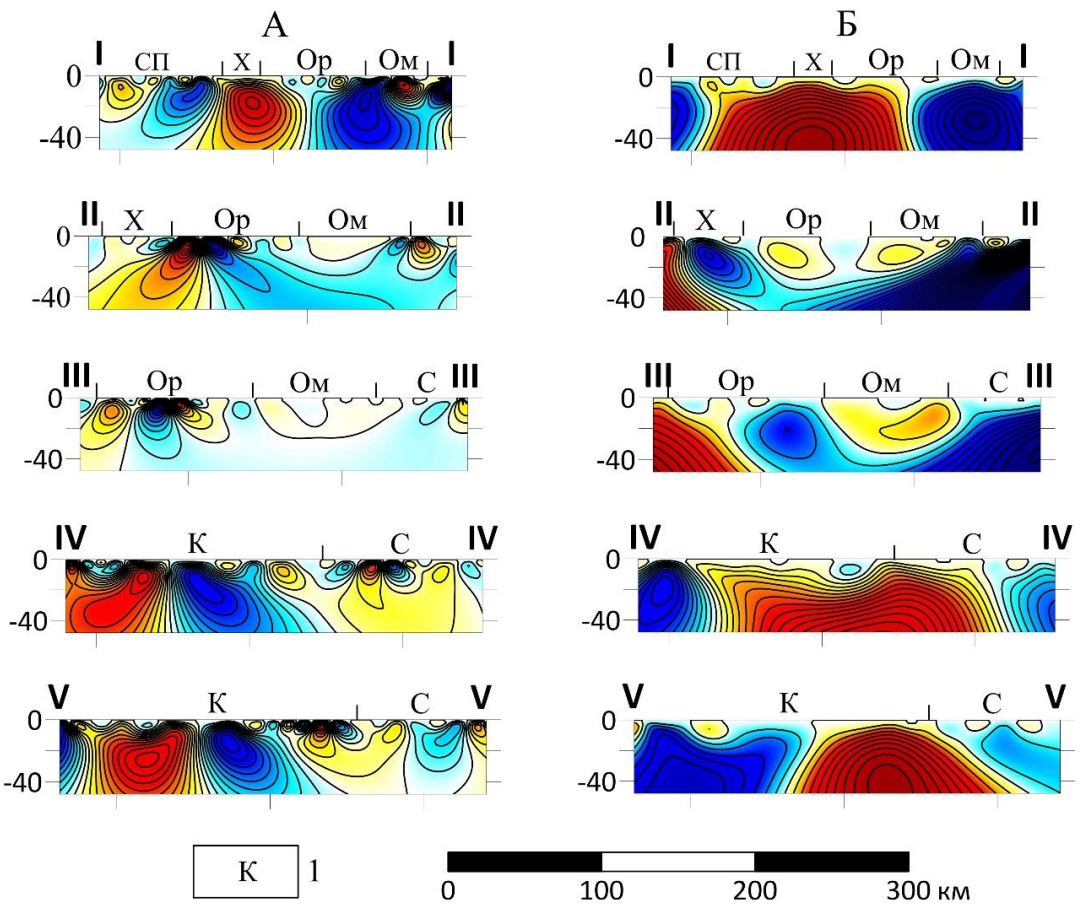


Рис. 5. Магнитные (А) и гравитационные (Б) модели исследуемой территории

1 – тектонические зоны, наименования см. рис. 1

Fig. 5. Magnetic (A) and gravitational (B) models of the studied area

1 – tectonic zones, see Fig. 1 for the names

нарушение в центральной части изучаемой площади и вызванных интрузиями, фиксируются на глубинах 4.2-5.1 км. Неоднородности, обусловленные гранитоидами поперечного магматического пояса расположены на уровнях от 3.7 до 6.6 км.

Следующий горизонт магнитных источников, связанный со среднечастотными аномалиями, установлен на глубинах 9-10 км. Наиболее глубокие центры источников магнитных аномалий ограничены верхней кромкой на уровне 15 км и нижней кромкой 24 км.

Источники локальных плотностных объектов фиксируются в диапазоне глубин 1.3-6 км. Центры масс среднечастотных гравитационных аномалий размещены на глубинах 12.5-20.7 км, низкочастотных – 25-41 км. Согласно существующим геолого-геофизическим моделям, можно предположить, что источники локальных геофизических аномалий обусловлены тектоническими и магматическими неоднородностями в терригенно-карбонатном слое с плотностью 2.52-2.67 г/см<sup>3</sup> (Прокопьев, 1998, Щербаков, Кропачев, Гамянин, 2008, Третьяков, 2017). Глубины источников среднечастотных аномалий соответствуют верхней коре фундамента ( $\sigma=2.80$  г/см<sup>3</sup>), низкочастотные – наиболее плотной нижней ( $\sigma=2.95$  г/см<sup>3</sup>).

### Заключение

В результате проведенных исследований построены схемы трансформированных геопотенциальных полей и геофизические модели Западно-Верхоянского сектора Верхоянского складчато-надвигового пояса и смежных территорий. Полученные данные позволили уточнить тектоническое строение и особенности размещения магматических образований, оценить глубины источников магнитных и плотностных неоднородностей. Аномалии магнитного поля обусловлены приподнятыми и опущенными блоками земной коры, магматическими образованиями различного состава и сопутствующими контактово-измененными породами. Гравитационные аномалии, в основном, вызваны влиянием протяженного погребенного грабена, разрывными нарушениями и крупными скрытыми магматическими образованиями.

Установлены скрытые тектонические нарушения субдолготной и восток-северо-восточной ориентировок, трассируемые магматическими образованиями. Протяженная более 800 км разрывная дислокация выделена к востоку от Центрально-Верхоянского разлома на расстоянии 55-105 км. По геофизическим данным, подтверждается наличие Западно-Верхоянского погребенного рифтового грабена. Отмечается сложная конфигурация депрессии. Она имеет корытообразную форму на севере и узкую линейную на юге. Грабен асимметричен, с крутым субвертикальным западным бортом и наклонным – восточным.

Особенности средне- и низкочастотных аномалий позволяют предположить наличие на глубине под Эчийским массивом крупного гранитного плутона.

Построенные геофизические модели выявили три структурных этажа, с различным уровнем положения источников магнитных и плотностных масс. Высокочастотные геопотенциальные аномалии обусловлены тектоническими и магматическими неоднородностями в верхнем осадочном слое 1.3-6 км. Глубины размещения источников средне- и низкочастотных аномалий коррелируют с верхней (12.5-20.7 км) и нижней корой (25-41 км).

### Литература

1. Парфенов Л.М. Тектонический анализ. В кн. *Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республика Саха (Якутия)*. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. С. 69-80.
2. Прокопьев А.В., Дейкуненко А.В. Деформационные структуры складчато-надвиговых поясов. В кн. *Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республика Саха (Якутия)*. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. С. 156-198.
3. Solovyov E.E, Fridovsky V.Yu. Deep structure of the Eastern margin of the Siberian Craton, NE Russia: evidence from analysis of an anomalous gravitational field // IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*. 6. Ser. «6th World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium» 2020. С. 012036. DOI 10.1088/1755-1315/609/1/012036.

4. Третьяков Ф.Ф. Некоторые аспекты строения консолидированной коры Верхоянского складчато-надвигового пояса // *Региональная геология*. 2017. С. 116-122.
5. Третьяков Ф.Ф. Террейны Верхоянского складчато-надвигового пояса (Восточная Якутия) // *Природные ресурсы Арктики и субарктики*, 2019. Т. 24, № 4. С. 67-78. DOI 10.31242/2618-9712-2019-24-4-5/
6. Кунгурцев Л.В., Гошко Е.Ю. Глубинное строение и модель формирования континентальной коры Верхоянского складчато-надвигового пояса в позднем мезозое // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2023. Volume 14. Issue 3. С. 1-30. DOI: 10.5800/GT-2023-14-3-0706.
7. Драчев С.С. О тектонике фундамента шельфа моря Лаптевых // *Геотектоника*. 2002. № 6, с. 60-76.
8. Соловьев Е.Э., Саввин Д.В., Кычкин В.А. Глубинные структуры и размещение полезных ископаемых на границе Адыча-Эльгинской и Аллах-Юньской тектонических зон по региональным геофизическим данным // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России*. Материалы XI Всероссийской научно-практической конференции. Якутск, 2021. С. 242-244.
9. Щербаков О.И., Кропачев А.П., Гамянин Г.Н. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист Q-52 – Верхоянские цепи. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. 2008. 335 с.
10. Герцева М. В., Борисова Т. П., Чибисова Е. Д. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист R-52 – Тикси. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. 2016. 312 с.
11. Гравиметрическая карта России и прилегающих акваторий. Актуализированная версия базовой карты «Гравиметрическая карта СССР». Масштаб 1:250000. Редукция Буге ( $\sigma=2.67$  г/см<sup>3</sup>). СПб.: ВСЕГЕИ, 2016.
12. Карта аномального магнитного поля России и прилегающих акваторий (Актуализированная версия). Эпоха 1965 г. (Модель ВСЕГЕИ). Масштаб 1:2500000. СПб.: ВСЕГЕИ, 2016.
13. International Centre for Global Earth Models (ICGEM). <https://icgem.gfz.de>
14. Никитин А.А. Энергетическая фильтрация геофизических полей // *Геофизика*, 2014. № 3. С. 2-13.
15. Петров А.В., Демура Г.В., Зиновкин С.В. Компьютерная технология статистического и спектрально-корреляционного анализа данных «КОСКАД 3D» и практические результаты // *Недропользование XXI век*. 2017. № 1 (64). С. 44-59.

## References

1. Parfenov L.M. Tectonic analysis. In: *Tectonics, geodynamics and metallogeny of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia)*. Moscow: MAIK Nauka/Interperiodics; 2001:69–80 (in Russian).
2. Prokopyev A.V., Deikunenko A.V. Deformation structures of folded thrust belts. In: *Tectonics, geodynamics and metallogeny of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia)*. Moscow: MAIK Nauka/Interperiodics; 2001:156–198 (in Russian).
3. Solovyov E.E., Fridovsky V.Yu. Deep structure of the Eastern margin of the Siberian Craton, NE Russia: evidence from analysis of an anomalous gravitational field. IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science. Series 6. 6th World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium; 2020:012036*. DOI 10.1088/1755-1315/609/1/012036.
4. Tretyakov F.F. Some aspects of the structure of the consolidated crust of the Verkhoyansk fold-thrust belt. *Regional geology*. 2017:116–122 (in Russian).
5. Tretyakov F.F. Terranes of the Verkhoyansk folded thrust belt (Eastern Yakutia). *Natural Resources of the Arctic and Subarctic*. 2019;Vol. 24(4):67–78 (in Russian). DOI 10.31242/2618-9712-2019-24-4-5/
6. Kungurtsev L.V., Goshko E.Y. Deep structure and model of formation of the continental crust of the Verkhoyansk fold-thrust belt in the Late Mesozoic. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2023;14(3):1–30 (in Russian). DOI: 10.5800/GT-2023-14-3-0706.
7. Drachev S.S. On the tectonics of the Laptev Sea shelf foundation. *Geotectonics*. 2002;6:60–76 (in Russian).
8. Solovyov E.E., Savvin D.V., Kychkin V.A. Deep structures and placement of minerals on the border of the Adycha-Elgin and Allah-Yun tectonic zones according to regional geophysical data. In: *Geology and mineral resources of the North-East of Russia: Proceedings of the XI All-Russian Scientific and Practical Conference*. Yakutsk; 2021:242–244 (in Russian).

9. Shcherbakov O.I., Kropachev A.P., Gamyanin G.N., et al. The State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Verkhoyano-Kolyma series. Sheet Q-52 – Verkhoyansk chains. An explanatory note. St. Petersburg: Cartographic factory VSEGEI; 2008:335 (in Russian).

10. Gertseva M. V., Borisova T. P., Chibisova E. D., et al. The State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1 : 1,000,000 (third generation). Verkhoyano-Kolyma series. Sheet R-52 – Tiksi. An explanatory note. St. Petersburg: Cartographic factory VSEGEI; 2016:312 (in Russian).

11. Gravimetric map of Russia and adjacent water areas. Updated version of the base map «Gravimetric map of the USSR». Scale 1:250000. Bugey reduction ( $\sigma=2.67$  g/cm<sup>3</sup>). St. Petersburg: VSEGEI; 2016 (in Russian).

12. Map of the anomalous magnetic field of Russia and adjacent water areas (Updated version). The 1965 era (The model is ALWAYS there). Scale 1:2500000. St. Petersburg: VSEGEI, 2016 (in Russian).

13. International Centre for Global Earth Models (ICGEM). <https://icgem.gfz.de>

14. Nikitin A.A. Energy filtration of geophysical fields. *Geophysics*. 2014;3:2–13 (in Russian).

15. Petrov A.V., Demura G.V., Zinovkin S.V. Computer technology of statistical and spectral correlation analysis of KOSKAD 3D data and practical results. *Subsoil use of the XXI century*. 2017;1(64):44–59 (in Russian).

#### Сведения об авторах

*СОЛОВЬЕВ Евгений Эдуардович* – к.г.-м.н., проректор по научной и инновационной деятельности, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация, ORCID 0000-0002-3596-2272; Scopus ID: 57208142215; SPIN-код: 7748-1230, AuthorID: 144694

*САВВИНОВ Иннокентий Иннокентьевич* – ст. преп., Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация, SPIN-код: 1021-9050, AuthorID: 1072638

#### About the authors

*Evgeny E. Solovyov* – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Vice-Rector for Research and Innovation, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, ORCID 0000-0002-3596-2272; Scopus ID: 57208142215; SPIN code: 7748-1230, AuthorID: 144694

*Innokenty I. Savvinov* – Senior lecturer, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, SPIN code: 1021-9050, AuthorID: 1072638

#### Вклад авторов

*Соловьев Е.Э.* – разработка концепции, проведение исследования, редактирование рукописи.

*Саввин И.И.* – проведение статистического анализа, визуализация/представление данных.

#### Authors' contribution

*Evgeny E. Solovyov* – concept development, research, manuscript editing.

*Innokenty I. Savvinov* – conducting statistical analysis, visualization/presentation of data.

#### Конфликт интересов

Один из авторов – Соловьев Евгений Эдуардович является членом редакционного совета журнала «Вестник СВФУ им. М.К. Аммосова». Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой рукописью.

#### Conflict of interests

One of the authors, Evgeny Solovyov, is a member of the editorial board of the journal “Vestnik of North-Eastern Federal University”. The authors are unaware of any other potential conflict of interest related to this manuscript.

*Поступила в редакцию / Submitted 06.03.2026*

*Поступила после рецензирования / Revised 16.03.2026*

*Принята к публикации / Accepted 27.03.2026*

# ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ, ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ И ГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТОВ

УДК 550.372; 550.379; 551.345

<https://doi.org/10.25587/2587-8751-2026-1-49-62>

Научная оригинальная статья

## ГЕОРАДАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СУБАЭРАЛЬНЫХ ТАЛИКОВ ВДОЛЬ ФЕДЕРАЛЬНЫХ АВТОДОРОГ «ЛЕНА» И «ВИЛЮЙ» В КРИОЛИТОЗОНЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

*К. П. Данилов<sup>1</sup>, И. И. Христофоров<sup>1\*</sup>, Л. С. Лебедева<sup>1</sup>, И. В. Горохов<sup>2</sup>*<sup>1</sup>Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского Отделения Российской Академии Наук,  
г. Якутск, Российская Федерация<sup>2</sup>Якутский научный центр Сибирского Отделения Российской Академии Наук,  
г. Якутск, Российская Федерация

\*zodik@mail.ru

### Аннотация

В работе представлены результаты георадиолокационных исследований, выполненных на ключевых участках Центральной Якутии, расположенных вдоль федеральных автодорог «Виллой» и «Лена». Основной целью исследований являлось выявление надмерзлотных субаэральные таликов, которые характеризуются сложной структурой и высокой сезонной и годовой изменчивостью их геометрических и физических параметров. Исследования проводились с использованием георадаров ОКО-3 с частотами 150 МГц, 250 МГц и 400 МГц методом георадарного профилирования. Глубина исследований составила более 25 метров в песчаных отложениях криолитозоны. Полученные данные показали, что основным диагностическим признаком таликов является наличие границы «талое-мерзлое», расположенной ниже сезонно-талого слоя. Эта граница, обусловленная разницей в коэффициентах диэлектрической проницаемости, четко фиксируется на радарограммах в виде контрастного отражения. На 22 из 76 георадарных профилей (28 %) были обнаружены надмерзлотные субаэральные талики мощностью от 5 до 20 метров. При этом глубина сезонно-талого слоя варьировалась от 2,3 до 4,0 метров. Разработанная в ходе исследований таликов бассейна реки Шестаковка георадарная методика позволяет эффективно выявлять таликовые зоны на территории Центральной Якутии. В рамках данной методики для поиска надмерзлотных субаэральные таликов в песчаных отложениях региона были определены оптимальные частотные диапазоны георадиолокационных исследований. Наиболее эффективными для решения поставленных задач оказались частоты в диапазоне 75÷225 МГц, который соответствует частотному диапазону по энергетическому уровню спектра сигнала антенного блока с центральной частотой 150 МГц.

**Ключевые слова:** георадиолокация, георадар, сплошная криолитозона, субаэральный талик, надмерзлотный талик, водоносный талик, Центральная Якутия, автомобильные дороги, термосуффозионные процессы

**Для цитирования:** Данилов К.П., Христофоров И.И., Лебедева Л.С., Горохов И.В. Георадарные исследования субаэральные таликов вдоль федеральных автодорог «Лена» и «Виллой» в криолитозоне Центральной Якутии. *Вестник СВФУ.* 2026;(1):49-62. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-49-62

## GPR RESEARCH OF SUBAERIAL TALIKS ALONG THE FEDERAL HIGHWAYS “LENA” AND “VILYUY” IN THE PERMAFROST OF CENTRAL YAKUTIA

Kencheeri P. Danilov<sup>1</sup>, Ivan I. Khristoforov<sup>1\*</sup>, Lyudmila S. Lebedeva<sup>1</sup>, Ivan V. Gorokhov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Yakutsk Science Centre, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

\*zodik@mail.ru

### Abstract

The paper presents the results of GPR sounding of key areas in Central Yakutia along the federal highways “Vilyuy” and “Lena” to search for suprapermafrost subaerial taliks. Suprapermafrost taliks are characterized by complex structures and dynamic seasonal and annual variations in geometric and physical parameters. The measurements were carried out using 150 MHz, 250 MHz, and 400 MHz OKO-3 GPRs with the GPR profiling technique. The survey depth exceeded 25 meters in sandy frozen rocks. The data show that the main indicator of taliks is the presence of a thaw-frozen boundary below the seasonally thawed layer. This boundary is clearly visible on radarograms due to the contrast in dielectric permittivity coefficients. Suprapermafrost subaerial taliks with thicknesses ranging between 5 and 20 meters were detected in 28 % of the GPR profiles. The depth of the seasonally thawed layer varied from 2.3 to 4.0 meters. The GPR technique for detecting and mapping talik zones, tested in the Shestakovka River basin, proved effective for identifying taliks in Central Yakutia. The most effective frequencies for solving the assigned tasks turned out to be in the range of 75–225 MHz, which corresponds to the frequency range of the energy level of the signal spectrum of the antenna unit with a central frequency of 150 MHz.

**Keywords:** GPR, georadar, continuous permafrost zone, subaerial talik, suprapermafrost talik, aquifer talik, Central Yakutia, roads, thermosuffusion processes

**For citation:** Danilov K. P., Khristoforov I. I., Lebedeva L. S., Gorokhov I. V. GPR research of subaerial taliks along the federal highways “Lena” and “Vilyuy” in the permafrost of Central Yakutia. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*. 2026;(1):49-62. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-49-62

### Введение

Многолетнемерзлые породы (ММП) занимают свыше 60 % территории России, формируя уникальные геокриологические условия, особенно в Центральной Якутии – одном из крупнейших и наиболее освоенных регионов криолитозоны. Здесь, в междуречьях Лены и Вилюя, проживает около полумиллиона человек, а устойчивость инфраструктуры напрямую зависит от состояния мерзлотного основания.

Сплошность ММП может нарушаться таликами различного строения и генезиса. Наиболее распространенным типом таликов в Центральной Якутии считаются субаквальные, формирующиеся под водоемами. Гидрогенные сквозные или несквозные талики встречаются под реками и озерами, которые не промерзают до дна, а также под некоторыми промерзающими водными объектами. В литературе (Бойцов, 1985; Мониторинг..., 2002; Подземные воды..., 2003) описаны единичные случаи надмерзлотных субаэральных таликов в Центральной Якутии, связанные с фильтрацией подземных вод в песчаных массивах. Подобные объекты были обнаружены на сухих пологих склонах невысоких водоразделов в бассейне реки Шестаковки, примерно в 20 км к югу от Якутска (Мониторинг..., 2002; Лебедева и др., 2019; Попов и др., 2025), на четвертой (бестяхской) надпойменной террасе правого берега реки Лены (Подземные воды..., 2003; Гагарин и др., 2019; Павлова и др., 2020), а также в массивах перевеваемых песков

(тукуланах) (Пономарева, 1999). В бассейне р. Шестаковки (170 км<sup>2</sup>) надмерзлотные талики занимают 23 % территории основных лесов и 9,5 % всего водосбора (Лебедева и др., 2025). Площадь этих таликов варьирует от нескольких квадратных метров до десятков тысяч квадратных метров. В песчаных отложениях средневысотных террас рек Лены и Вилюя распространены уникальные водоносные горизонты надмерзлотно-межмерзлотных вод, не имеющие аналогов. На правом берегу реки Лены естественные выходы этих вод на поверхность часто представлены группами источников, приуроченных к подножию бестяхской террасы (Павлова и др., 2020).

Несмотря на единичные случаи, описанные в литературе, масштабное выявление субэкральных таликов вдоль автодорог ранее не проводилось. Актуальность изучения субэкральных таликов обусловлена их потенциальным влиянием на развитие опасных геокриологических процессов, таких как термосуффозия, образование провалов и оврагов, что представляет серьёзную угрозу для транспортной и иной инфраструктуры региона. Выявление таликов затруднено неоднозначностью трактовки отражённых электромагнитных сигналов, высокой изменчивостью мерзлотных ландшафтов и отсутствием универсальных критериев интерпретации геофизических данных. Это требует применения комплексных подходов, интегрирующих методы георадиолокации с термометрическими данными и литологическим анализом.

Целью настоящей работы является изучение пространственного распределения и морфологии субэкральных таликов в Центральной Якутии с использованием георадиолокации, а также оценка влияния литологического состава и частотного диапазона антенн на точность интерпретации их границ. Полученные результаты важны для своевременного выявления зон риска при проектировании и эксплуатации объектов в условиях сплошной криолитозоны и могут быть использованы при разработке систем мониторинга состояния мерзлых грунтов.

#### **Район исследований**

Для оценки потенциально опасных процессов, связанных с развитием таликов вблизи федеральных автомобильных дорог, в 2020 и 2021 годах проведены масштабные георадиолокационные исследования, направленные на выявление и оконтуривание талых зон.

В Центральной Якутии расположены федеральные автомобильные дороги (ФАД) – «Лена» и «Вилюй», расходящиеся от г. Якутска в южном и западном направлениях соответственно. В 500 м от ФАД «Лена» в районе ручья Улахан-Тарын зафиксированы свежие термосуффозионные воронки (Гагарин и др., 2019), которые могут угрожать устойчивости дорожного полотна.

Для выявления таликов вдоль ФАД А360 «Лена» и А331 «Вилюй» было выполнено 76 георадарных профилей длиной в среднем по 300 метров каждый на ключевых участках, соответствующих следующим критериям:

- растительный покров: сосновое редколесье или горельник соснового леса;
- геологический состав: песчаные отложения;
- транспортная доступность: удобство подъезда и проведения исследований;
- рельеф: небольшие уклоны местности до 4-5°.

Исследования вдоль ФАД А331 «Вилюй» проводились в период максимального протаивания сезонно-талого слоя (СТС), что обеспечивало наилучшие условия для выявления таликов. Протяженность участка работ составила около 500 км (рис. 1). В рамках исследований выполнено 37 георадарных профилей длиной по 300 м каждый. Общая протяженность профилей составила 11 км.

Исследования вдоль ФАД А360 «Лена» были проведены в октябре, в период максимального протаивания сезонно-талого слоя, в схожих условиях растительности и рельефа. Протяженность исследуемого участка составила около 300 километров, где было выполнено 39 георадарных профилей по 300 метров (рис.2). Общая протяженность профилей составила 10,4 км.



Рис. 1. Участок работ ФАД А331 «Вилуй»

Fig. 1. Work section of the federal highway A331 "Vilyui"



Рис. 2. Участок работ ФАД А360 «Лена»

Fig. 2. Work section of the federal highway A360 "Lena"

### Метод исследования

Исследования проводились с использованием сертифицированных георадаров серии ОКО-3 производства ООО «Логис-Геотех» (г. Москва) с центральными частотами 150 МГц, 250 МГц и 400 МГц. Перед началом съемки были определены ключевые параметры записи, включая временной диапазон, фильтры, усиление и плотность сканирования. В процессе выполнения работ на профилях отмечались характерные точки, пикеты и скважины. Калибровка одометра выполнялась в зависимости от типа покрытия.

Наиболее оптимальным для выявления надмерзлотных таликов в песчаных отложениях на глубине до 25 метров оказался антенный блок с центральной частотой 150 МГц. Использование одометра ДПИ и GPS-навигатора Garmin GPS 64st обеспечило достаточную точность измерений и привязки данных.

*Обработка и интерпретация данных*

Основная задача обработки георадиолокационных данных заключается в выявлении и оцифровке целевых границ. Это достигается с помощью различного программного обеспечения. Хорошие результаты достигаются использованием программы GeoScan32 (ООО «Логические системы», г. Раменское). В ней имеется возможность выделения полезных сигналов и представление данных в виде временных георадарных разрезов.

Обработка включала следующие этапы:

1. Фильтрация и усиление сигналов: выполнение процедур фильтрации, усиления и сжатия полученных сигналов.
2. Статические поправки: ввод статических поправок для корректировки данных.
3. Определение диэлектрической проницаемости: расчет приблизительных значений диэлектрической проницаемости для пластов с различными электрофизическими свойствами. При этом учитывались методики, применяемые для исследования обводненных геологических сред (Омельяненко и др., 2013; Khristoforov, 2018), а также опыт, описанный в монографиях (Владов и др., 2017; Старовойтов А.В., 2008).

Применение описанной методики обработки и интерпретации данных георадиолокационных исследований позволяет эффективно выявлять и анализировать глубинные границы, а также исключать ложные сигналы. Это обеспечивает высокую точность построения георадиолокационных разрезов, что является важным для изучения структуры грунтов и выявления талых зон в условиях криолитозоны. На рисунке 3 представлены фотографии выполнения работ в различные сезоны, демонстрирующие условия проведения исследований.



Рис. 3. Фотографии выполнения работ в разные сезоны  
 Fig. 3. Photos of work performance in different seasons

### Результаты и обсуждение

Георадарное профилирование продемонстрировало высокую эффективность в выявлении таликов, формирующихся в криолитозоне. Нами было выполнено множество георадарных профилей для поиска субаэральнх таликов на участках со схожими условиями: сосновое редколесье, слабо задернованная поверхность и небольшие уклоны местности. Заблаговременное определение наличия или отсутствия таликов исключительно на основе анализа рельефа местности или характера растительности невозможно (рис. 4а). Эти признаки не являются однозначными индикаторами, так как формирование таликов и связанных с ними процессов зависит от комплекса факторов, включая гидрогеологические условия и динамику мерзлотных процессов. Образование термосуффозионных воронок, а в дальнейшем и оврагов, происходит в относительно короткие сроки – в течение 3–5 лет. Это связано с интенсивным развитием термосуффозионных процессов, которые включают механический вынос тонкодисперсных частиц пород при их оттаивании (рис. 4б). Такие процессы могут приводить к значительным изменениям рельефа и представлять угрозу для инфраструктуры.



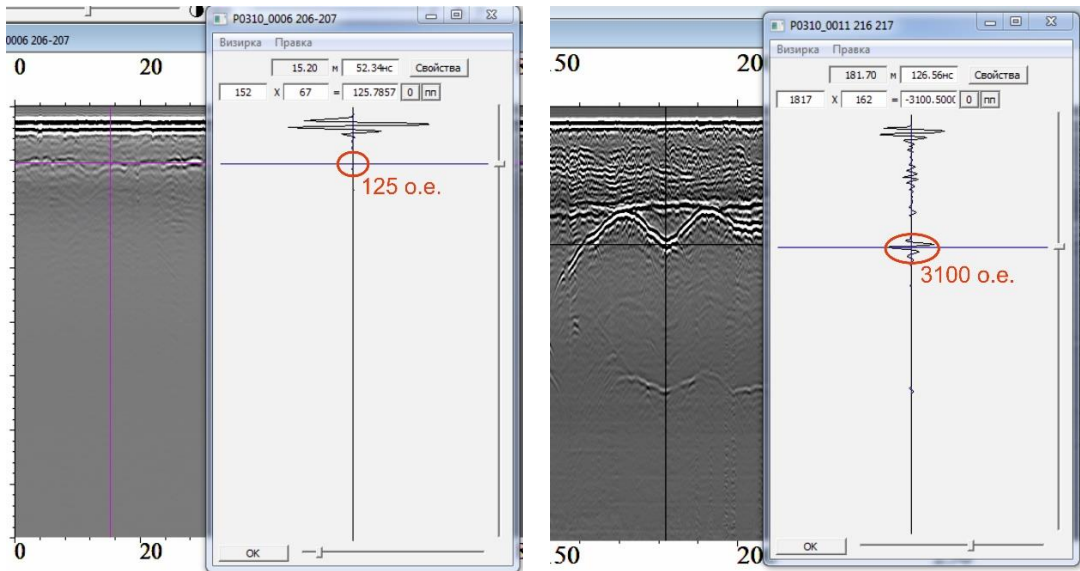
а



б

**Рис. 4.** Образование воронок. Фото Гагарина Л.А. Сентябрь 2017 г.  
**Fig. 4.** Funnel formation. Photo by Gagarin L.A. September 2017.

Сравнение данных, полученных на участках со схожими ландшафтными, геологическими и криогенными условиями, но различающихся наличием и отсутствием таликов, демонстрирует существенные различия в амплитудах отраженных сигналов на временных георадиолокационных разрезах (рис. 5). Амплитудные значения отражений от границ таликов на радарограммах значительно превышают амплитуду отражений от границы СТС. Граница талика характеризуется резким контрастом физических свойств среды, таких как диэлектрическая проницаемость, в отличие от более плавного перехода на границе сезонно-талого слоя. Это обусловлено наличием в талике зоны с высокой влажностью, где наблюдается резкая смена водоносных талых пород на мерзлые. Подобный контраст вызывает интенсивное отражение электромагнитных волн, что фиксируется на радарограммах в виде высокоамплитудных сигналов, в частности амплитуда отраженного сигнала равна 3100 относительных единиц (о.е.). В то же время граница СТС менее контрастна, так как переход между талыми и мерзлыми породами в этом случае более плавный, что приводит к меньшей амплитуде отражений, как показано на рисунке 5, где амплитуда отраженного сигнала составляет 125 о.е. Таким образом, разница в амплитудах подтверждает наличие талика и позволяет выделить его на фоне СТС.



**Рис. 5.** Сравнение амплитудных характеристик отраженных сигналов от границы сезонно-талого слоя и границы талика. О.е. – относительная единица  
**Fig. 5.** Comparison of amplitude characteristics of reflected signals from the boundary of the seasonally thawed layer and the talik boundary. O.e. – relative unit

Высокоамплитудные контрастные границы, имеющие форму желобов с чередующимися понижениями и поднятиями на радарограммах, могут указывать на наличие водоносных таликов. Высокая амплитуда сигналов отражения от границы таликов обусловлена резким изменением диэлектрической проницаемости на контакте талых и мерзлых пород. Диэлектрическая проницаемость талых влагонасыщенных песков может достигать 25–30 единиц, тогда как для мерзлых песков этот показатель составляет 4–6 единиц. (рис. 6). Скорость распространения электромагнитных волн снижается в водонасыщенных средах, поэтому в областях с талыми водоносными породами время регистрации отраженного сигнала увеличивается. В результате границы талика на радарограммах приобретают вытянутую вниз форму. На радарограммах талики имеют форму желобов, что свидетельствует об их приуроченности к зонам латеральной миграции подземных вод. Мерзлые породы выполняют роль водоупора, ограничивая вертикальное движение воды и способствуя ее горизонтальному перемещению. Талые дисперсные породы, обладающие высокой фильтрационной способностью, активно пропускают воду, которая мигрирует в пределах таликов под воздействием гравитационных сил. Это приводит к формированию протяженных зон повышенной влажности, которые фиксируются на радарограммах в виде характерных аномалий.

Еще одной особенностью выявления таликов является эффект затенения ниже их границы. Высокий коэффициент отражения на контрастной границе приводит к практически полному отражению сигнала, в результате чего ниже таликов на радарограммах наблюдаются лишь остаточные переотражения.

В нижних горизонтах таликов зафиксированы аномалии в виде дифракционных гипербол и кратных волн, которые интерпретируются как признаки повышенной влажности. На профиле (рис. 6), на расстояниях 29, 144, 176, 186, 197, 220 и 273 метров, выявлены зоны понижения подошвы талика, где данные аномалии выражены наиболее ярко. Дифрагированные и кратные волны, характерные для трубопроводов, в данном случае возникают на переувлажненных участках таликов. Это связано с тем, что локальные зоны высокой влажности в таликах создают

эффекты, схожие с теми, которые наблюдаются при наличии трубопроводов: дифрагированные волны формируются из-за огибания радиоволнами границ водонасыщенных участков, а кратные волны – за счет многократных отражений сигнала внутри обводненных зон. Наблюдаемые явления подтверждают наличие зон аккумуляции воды, что согласуется с данными бурения, вскрывшего водонасыщенные талые породы, где подземные воды в некоторые сезоны имеют криогенный напор. Эти аномалии интерпретируются как индикаторы линейных водоносных зон, формирующихся за счёт латеральной миграции подземных вод.

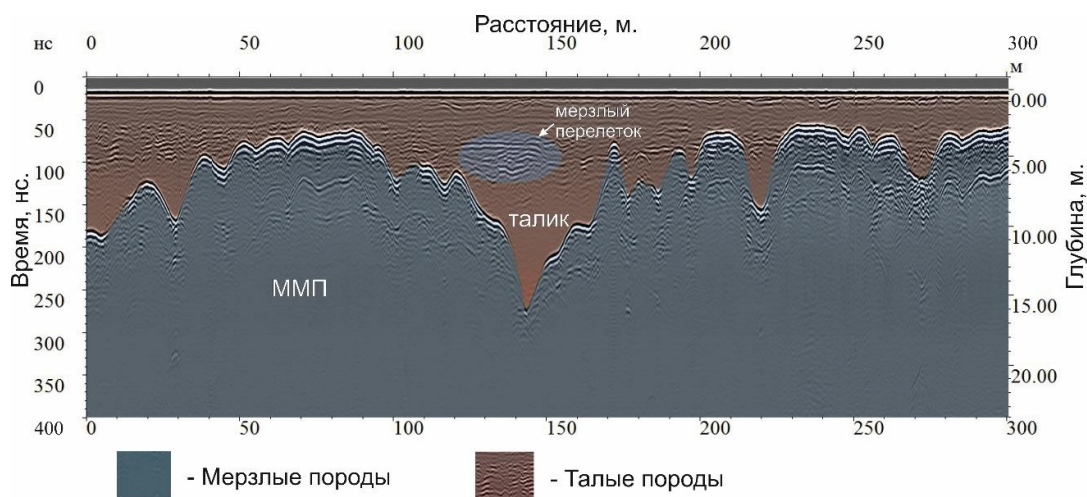


Рис. 6. Радарограмма 289\_0004

Fig. 6. Radarogram 289\_0004

В случаях, когда талики на исследуемом профиле отсутствуют, полученные радарограммы, как правило, не содержат высокоамплитудных контрастных границ (рис. 7). Граница СТС в таких условиях характеризуется прямолинейным горизонтальным залеганием без резких перепадов или отклонений. На радарограмме 249 граница СТС прослеживается на глубине от 2,5 до 3,5 метров. Однако на некоторых участках граница СТС отсутствует, что может быть связано с низкой влажностью вмещающих пород. Сухие талые песчаные отложения обладают диэлектрической проницаемостью, близкой к мерзлым пескам, что затрудняет выделение границы СТС на радарограммах.

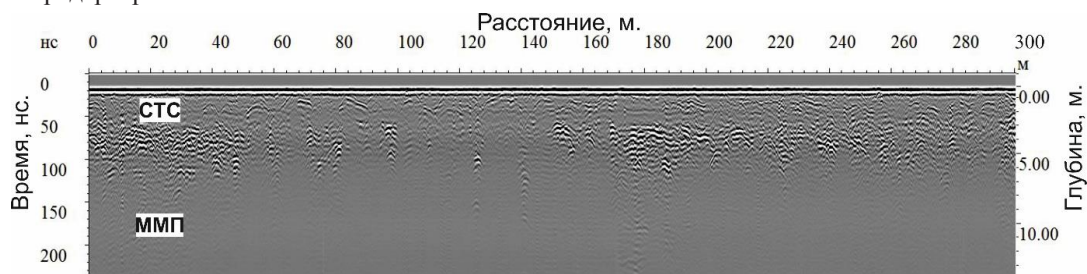


Рис. 7. Радарограмма 249\_0000

Fig. 7. Radarogram 249\_0000

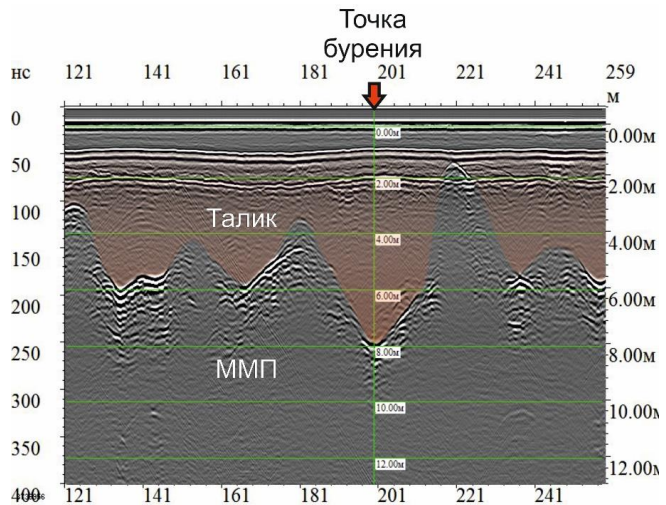
Для верификации результатов, полученных в ходе георадиолокационных исследований, в апреле 2022 года на участке ФАД «Виллой» было проведено повторное георадарное профилирование. На данном участке ранее был выявлен надмерзлотный субаэральный талик.

На профиле была выбрана точка для заверочного бурения, которое подтвердило наличие талых водоносных пород мощностью 8 метров. Вскрытый талик характеризовался криогенным

напором, что согласуется с данными георадиолокации (рис. 8). На рисунке представлена радарограмма с обозначенной точкой бурения; область талика выделена красным цветом (рис. 9).

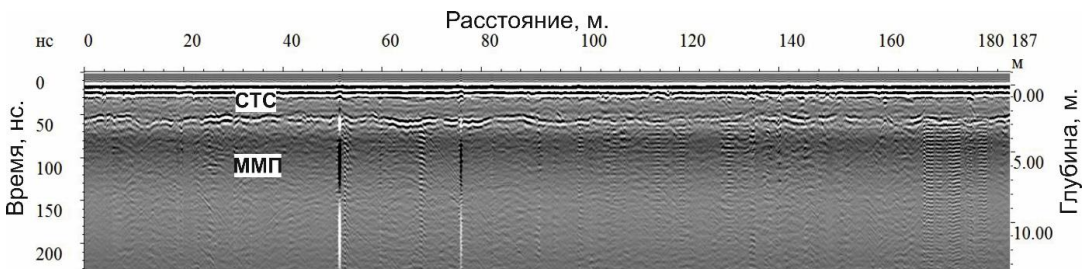


**Рис. 8.** Вскрытие талика бурением скважины  
**Fig. 8.** Opening of the talik by drilling a borehole



**Рис. 9.** Радарограмма 214\_0000  
**Fig. 9.** Radarogram 214\_0000

На рисунке 10 представлен результат георадиолокационного профилирования, выполненного на подучастке 3, где признаки таликов отсутствуют. На радарограмме СТС чётко идентифицируется по всему профилю, демонстрируя горизонтальное залегание с мощностью около 1,5 м. Отсутствие аномальных отражений и деформаций в структуре сигналов подтверждает, что исследуемый участок характеризуется наличием мерзлых пород под подошвой СТС без развития таликовых зон. Такие данные свидетельствуют о равномерном распределении диэлектрических свойств грунтов, типичном для ненарушенных криогенных условий.



**Рис. 10.** Радарограмма 310\_0006  
**Fig. 10.** Radarogram 310\_0006

На рисунке 11 представлена радарограмма, на которой зафиксирован талик на 4-м подучастке. Талик выделяется контрастными, высокоамплитудными границами, что свидетельствует о водонасыщенности породы в области его подошвы. Мощность талика в отдельных местах превышает 14–15 метров. Кроме того, на радарограмме четко прослеживается граница СТС на глубинах от 2,5 до 5 метров. В данном случае граница СТС контрастно выделяется из-за наличия остаточного мерзлого слоя, который не успел оттаять к моменту проведения исследо-

ваний. Наличие таких характеристик подтверждает активное развитие криогенных процессов на данном участке, что требует дальнейшего мониторинга и анализа для оценки изменений.

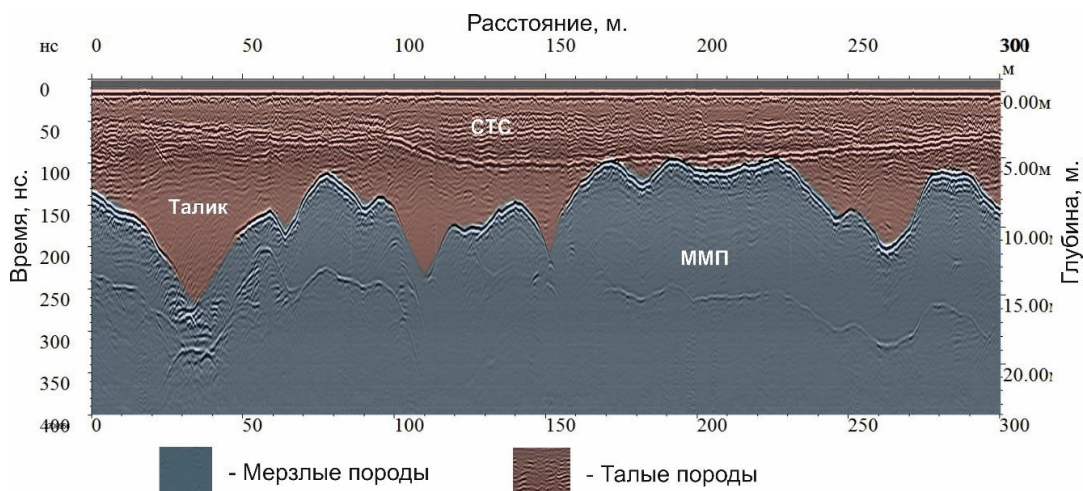


Рис. 11. Радарограмма 310\_0011

Fig. 11. Radarogram 310\_0011

В результате георадарных исследований на участках ФАД «Лена» из 39 профилей талики были выявлены на 13 профилях. Максимальная глубина подошвы таликов достигает 18 метров. Все обнаруженные талики локализованы на 4-м подучастке, что, вероятно, обусловлено особыми геокриологическими и ландшафтными условиями данной территории.

На участках ФАД «Виллюй» из 37 георадарных профилей протяженностью 300 метров каждый талики были зафиксированы на 9 профилях. Мощность таликов в этом районе достигает 20 метров.

Результаты подтверждают, что георадарное профилирование является эффективным методом для выявления таликов и изучения их характеристик. Высокая амплитуда отражений и четкие границы на радарограммах позволяют точно определять местоположение и мощность таликов.

Наличие таликов может оказывать значительное влияние на устойчивость дорожного полотна и инфраструктуры. Водонесные талики способны вызывать просадки грунта, образование воронок и другие деформации, что требует учета при проектировании и эксплуатации дорог.

### Заключение

Выполненные георадиолокационные исследования вдоль федеральных автодорог «Лена» и «Виллюй» в Центральной Якутии позволили впервые на большом фактическом материале выявить широкое распространение надмерзлотных субэдральных таликов в условиях сплошной криолитозоны. Общая протяженность 76 профилей составила 21,4 км, из которых на 22 профилях (28 %) обнаружены талики мощностью от 5 до 20 метров, что существенно превышает ранее опубликованные оценки и свидетельствует о необходимости пересмотра представлений о редкости и локальности подобных объектов в регионе.

Оптимальным для поиска и оконтуривания таликов в песчаных отложениях Центральной Якутии оказался диапазон частот 75÷225 МГц, который соответствует частотному диапазону уровню по энергии спектра антенны с центральной частотой 150 МГц, что обеспечивает необходимый баланс между глубинностью зондирования и разрешающей способностью. Ключевым диагностическим признаком таликов является выраженная граница «талое-мерзлое», четко фиксируемая на радарограммах благодаря контрасту диэлектрических свойств.

Показано, что традиционные ландшафтные и растительные признаки недостаточны для надёжной идентификации таликов, так как их формирование определяется комплексом гидрогеологических и мерзлотных факторов, а также современными климатическими тенденциями. Выявленные талики связаны с зонами потенциального развития термосуффозионных процессов, что подчёркивает их важную роль как индикаторов инженерно-геологических рисков для транспортной инфраструктуры.

Разработанная методика георадиолокационного поиска и анализа таликов может быть рекомендована для инженерных изысканий и мониторинга в районах сплошной мерзлоты, а также для прогноза опасных геокриологических процессов. Полученные результаты формируют основу для дальнейших комплексных исследований, направленных на уточнение механизмов формирования таликов и их влияния на устойчивость инфраструктуры в условиях изменяющегося климата.

### Литература

1. Бойцов А.В. Условия формирования и режим склоновых таликов в Центральной Якутии. *Криогидрогеологические исследования*. Якутск: Изд-во ИМЗ СО АН СССР; 1985: 44–55.
2. Шепелев В.В., Бойцов А.В., Оберман Н.Г. и др. *Мониторинг подземных вод криолитозоны*. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН; 2002: 172с.
3. Балобаев В.Т., Иванова Л.Д., Никитина Н.М. и др. *Подземные воды Центральной Якутии и перспективы их использования*. Новосибирск: Академическое издательство «Гео»; 2003: 117с.
4. Лебедева Л.С., Бажин К.И., Христофоров И.И. и др. Надмерзлотные субэдральные талики в бассейне реки Шестаковка (Центральная Якутия). *Криосфера Земли*. 2019; XXIII (1):40–50. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-1\(40-50\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-1(40-50)).
5. Попов С.В., Кашкевич М.П., Романова Н.Е., Малышева А.М., Лебедева Л.С. Выявление субэдральных таликов геофизическими методами в средней части бассейна р. Лена, Центральная Якутия. *Записки Горного института*. 2025. С. 1-13. № 16396. EDN YEEPZM
6. Гагарин Л.А., Бажин К.И., Оленченко В.В. и др. Выявление участков потенциального термосуффозионного разуплотнения грунтов вдоль федеральной автодороги А-360 «Лена» в Центральной Якутии. *Криосфера Земли*. 2019; XXIII (3): 61–68. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-3\(61-68\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-3(61-68)).
7. Павлова Н.А., Шепелев В.В., Галанин А.А. и др. Гидрохимия подземных вод надмерзлотно-межмерзлотного стока на участках их разгрузки (Центральная Якутия). *Водные ресурсы*. 2020; 47 (4): 391–401.
8. Пономарева О.Е. Водоносные талики в песчаных отложениях бассейна нижнего течения р. Вилюй. *Криосфера Земли*. 1999; III (4): 84-89.
9. Лебедева Л.С., Шамов В.В., Христофоров И.И., Павлова Н.А., Данилов К.П. Роль надмерзлотных субэдральных водоносных таликов в питании двух малых притоков реки Лены по данным натурных наблюдений. *Криосфера Земли*. 2025; 29(1): 37-51.
10. Омеляненко А.В., Христофоров И.И. Метод двухспектральной георадиолокации для зондирования обводненных геологических сред. *Наука и образование*. 2013; (1): 33–38.
11. Khristoforov I.I., Omelyanenko A.V. Improving the Efficiency of Hydrological Investigations by Submersible Ground Penetrating Radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2018;15 (3): 335-339. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2786858>.
12. Владов М.Л., Судакова М.С. *Георадиолокация: от физических основ до перспективных направлений*. Москва: Изд-во Геос; 2017: 240.
13. Старовойтов А.В. *Интерпретация георадиолокационных данных*. Москва: Изд-во МГУ; 2008: 188.
14. Попов С.В., Боронина А.С., Лебедева Л.С. Основные факторы формирования субэдральных таликов в рамках одномерной математической модели на примере района реки Шестаковка, Центральная Якутия. *Лёд и снег*. 2023. 63 (4): 597-611. <https://doi.org/10.31857/S2076673423040130> EDN FQDPWS.
15. Гагарин, Л.А. Современные условия развития субэдральных таликов в песчаных отложениях Центральной Якутии. В кн.: Д. М. Шестернев, Л. А. Гагарин (отв. ред.). *Современные проблемы и будущее геокриологии : тезисы докладов IV Всероссийского научного молодежного геокриологического форума с международным участием, посвященного 200-летию со дня рождения академика А. Ф. Миддендорфа*

(29 июня – 12 июля 2015 г., г. Якутск, Россия) Якутск : Изд-во Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН; 2015: 57-59.

16. Лебедева Л.С., Христофоров И.И., Бажин К.И. (и др.) Распространение и динамика надмерзлотных субэаральных таликов в центральной Якутии. *Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике, Салехард, 03–12 ноября 2021 года.* – Салехард: Изд-во: Б. и.; 2021: 243-245. <https://doi.org/10.7868/9785604610848065> EDN PPPDJK.

17. Данилов К.П., Христофоров И.И., Горохов И.В. Изучение надмерзлотных таликов Центральной Якутии методом георадиолокации. *Электроразведка 2022: сборник тезисов научно-практической конференции, Москва, 26–28 октября 2022 года.* Москва: Издательский Дом «Академия Естествознания», 2023: 219-225. EDN GFAWLM.

18. Arcone S.A., Chacho E.F., Delaney A.J. Seasonal structure of taliks beneath arctic streams determined with ground-penetrating radar. *Proceedings of the seventh International Permafrost Conference. Ottawa ON, Canada: International Permafrost Association, Canadian National Committee, 1998:19-24.*

19. O’Neill H.B. et al. Recent advances (2010–2019) in the study of taliks. *Permafrost and Periglacial Processes.* 2020. 31 (3): 346-357.

### References

1. Boytsov A.V. Conditions for the formation and regime of slope taliks in Central Yakutia. *Cryohydrogeological research.* Yakutsk: IMZ SB AN USSR; 1985:44–55 (in Russian).

2. Shepelev V.V., Boytsov A.V., Oberman N.G., et al. *Monitoring of groundwater in the permafrost zone.* Yakutsk: Publishing House IMZ SB RAS; 2002:172 (in Russian).

3. Balobaev V.T., Ivanova L.D., Nikitina N.M., et al. *Underground waters of Central Yakutia and prospects for their use.* Novosibirsk: Publishing House SB RAS, phil. “Geo”; 2003:117 (in Russian).

4. Lebedeva L.S., Bazhin K.I., Khristoforov I.I., et al. Suprapermafrost subaerial taliks in the Shestakovka River basin (Central Yakutia). *Cryosphere of the Earth.* 2019; XXIII (1): 40–50 (in Russian). [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-1\(40-50\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-1(40-50)).

5. Popov S.V., Kashkevich M.P., Romanova N.E., et al. Detection of subaerial taliks by geophysical methods in the middle part of the Lena River basin, Central Yakutia. *Notes of the Mining Institute.* 2025;16396:1–13 (in Russian).

6. Gagarin L.A., Bazhin K.I., Olenchenko V.V., et al. Identification of sites of potential thermosuffosion soil decompaction along the federal highway A-360 “Lena” in Central Yakutia. *Cryosphere of the Earth.* 2019; XXIII (3):61–68 (in Russian). [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-3\(61-68\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-3(61-68)).

7. Pavlova N.A., Shepelev V.V., Galanin A.A., et al. Hydrochemistry of groundwater suprapermafrost-interpermafrost runoff in their discharge areas (central Yakutia). *Water Resources.* 2020;47(4):391–401 (in Russian).

8. Ponomareva O.E. Water-bearing taliks in sandy deposits of the lower reaches of the Vilyuy River basin. *Cryosphere of the Earth.* 1999; III(4):84–89 (in Russian).

9. Lebedeva L.S., Shamov V.V., Khristoforov I.I., et al. The role of permafrost subaerial aquifers in feeding two small tributaries of the Lena River according to field observations. *Cryosphere of the Earth.* 2025;29(1):37–51 (in Russian).

10. Omelyanenko A.V. Khristoforov I.I. Method of dual-spectrum ground penetrating radar for probing flooded geological environments. *Science and Education.* 2013;(1):33–38 (in Russian).

11. Khristoforov I.I., Omelyanenko A.V. Improving the Efficiency of Hydrological Investigations by Submersible Ground Penetrating Radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters.* 2018;15(3):335–339. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2786858>.

12. Vladov M.L., Sudakova M.S. *Georadiolocation: from physical foundations to promising directions.* Moscow: Geos; 2017:240 (in Russian).

13. Starovoitov A.V. *Interpretation of ground penetrating radar data.* Moscow: Publishing House MSU; 2008:188 (in Russian).

14. Popov S.V., Boronina A.S., Lebedeva L.S. Main factors of subaerial talik formation within the framework of one-dimensional mathematical model on the example of the Shestakovka River area, Central Yakutia. *Ice and Snow.* 2023. 63 (4):597–611 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S2076673423040130> EDN FQDPWS.

15. Gagarin, L.A. Modern conditions of development of subaerial taliks in sandy sediments of Central Yakutia. In: D. M. Shesternev, L. A. Gagarin (eds.). *Modern problems and future of geocryology: abstracts of reports of the IV All-Russian Scientific Youth Geocryological Forum with international participation, dedicated to the 200th anniversary of the birth of Academician A. F. Middendorf*, June 29 – July 12, 2015, Yakutsk, Russia. Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2015:57–59 (in Russian).

16. Lebedeva L.S., Khristoforov I.I., Bazhin K.I., et al. Distribution and dynamics of suprapermafrost subaerial taliks in central Yakutia. In: *Modern Studies of Cryosphere Transformation and Issues of Geotechnical Safety of Structures in the Arctic, Salekhard, November 03–12, 2021*. Salekhard: Publishing House: B. i.; 2021: 243–245 (in Russian). <https://doi.org/10.7868/9785604610848065> EDN PPPDJK.

17. Danilov K.P., Khristoforov I.I., Gorokhov I.V. Study of permafrost taliks of Central Yakutia by the method of georadiolocation. In: *Electrorazvedka 2022: Proceedings of the scientific and practical conference, Moscow, October 26–28, 2022*. Moscow: Academy of Natural Science; 2023:219–225 (in Russian).

18. Arcone S.A., Chacho E.F., Delaney A.J. Seasonal structure of taliks beneath arctic streams determined with ground-penetrating radar. *Proceedings of the seventh International Permafrost Conference. Ottawa ON, Canada: International Permafrost Association, Canadian National Committee, 1998:19–24.*

19. O'Neill H.B., et al. Recent advances (2010–2019) in the study of taliks. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2020;31(3):346–357.

### Сведения об авторах

*ДАНИЛОВ Кэнчээри Петрович* – м.н.с., ФГБУН Институт Мерзлотоведения им. М.П. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-3558-9655, ResearcherID: AAO-6870-2021, Scopus Author ID: 57191610594, SPIN: 3405-2879

e-mail: dkp84@mail.ru

*ХРИСТОФОРОВ Иван Иванович* – к.т.н., в.н.с., ФГБУН Институт Мерзлотоведения им. М.П. Мельникова СО РАН, ORCID: 0000-0003-2478-4172, ResearcherID: P-7306-2016, Scopus Author ID: 56458735300, SPIN: 6296-0055

e-mail: zodik@mail.ru

*ЛЕБЕДЕВА Людмила Сергеевна* – к.г.н., в.н.с., ФГБУН Институт Мерзлотоведения им. М.П. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-7498-9902, ResearcherID: J-6959-2016, Scopus Author ID: 7103194247, SPIN: 6441-4823

e-mail: lyudmilaslebedeva@gmail.com

*ГОРОХОВ Иван Викторович* – м.н.с., ФГБУН ФИЦ Якутский научный центр СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация, ORCID: 0000-0001-6142-0103, ResearcherID: ABS-7844-2022, Scopus Author ID: 57246238500, SPIN: 3836-4281

e-mail: gorokhovivan1996@gmail.com

### About the authors

*Kencheeri P. DANILOV* – Junior Researcher, Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-3558-9655, ResearcherID: AAO-6870-2021, Scopus Author ID: 57191610594, SPIN: 3405-2879

e-mail: dkp84@mail.ru

*Ivan I. KHRISTOFOROV* – Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher, Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-2478-4172, ResearcherID: P-7306-2016, Scopus Author ID: 56458735300, SPIN: 6296-0055

e-mail: zodik@mail.ru

*Lyudmila S. LEBEDEVA* – Cand. Sci. (Geography), Leading Researcher, Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-7498-9902, ResearcherID: J-6959-2016, Scopus Author ID: 7103194247, SPIN: 6441-4823

e-mail: lyudmilaslebedeva@gmail.com

*Ivan V. GOROKHOV* – Junior Researcher, Yakutsk Science Centre, SB RAS, Yakutsk, Russian Federation, ORCID: 0000-0001-6142-0103, ResearcherID: ABS-7844-2022, Scopus Author ID: 57246238500, SPIN: 3836-4281

e-mail: gorokhovivan1996@gmail.com

### Вклад авторов

*Данилов К.П.* – проведение исследования, визуализация, создание черновика рукописи, верификация данных, редактирование рукописи.

*Христофоров И.И.* – методология, верификация данных, администрирование данных, редактирование рукописи, ресурсное обеспечение исследования, руководство исследованием.

*Лебедева Л.С.* – разработка концепции, проведение статистического анализа, администрирование проекта, получение финансирования.

*Горохов И.В.* – проведение исследования, визуализация, редактирование рукописи.

### Authors' contribution

*Kencheeri P. DANILOV* – investigation, visualization, writing – original draft, validation, writing – review & editing.

*Ivan I. KHRISTOFOROV* – methodology, validation, data curation, writing – review & editing, resources, supervision.

*Lyudmila S. LEBEDEVA* – conceptualization, formal analysis, project administration, funding acquisition.

*Ivan V. GOROKHOV* – investigation, visualization, writing – review & editing.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

*Поступила в редакцию / Submitted 20.02.2026*

*Поступила после рецензирования / Revised 21.03.2026*

*Принята к публикации / Accepted 27.03.2026*

## ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПАХОТНЫХ ЗЕМЕЛЬ ЛЕНО-АМГИНСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ ПРИ ПОТЕПЛЕНИИ КЛИМАТА

*П.В. Ефремов*

Институт мерзлотоведения СО РАН им. П.И. Мельникова  
Якутск, Российская Федерация  
pvefremov@mpi.ysn.ru

### Аннотация

В статье рассмотрено влияние потепления климата на развитие термокарстовых процессов на пахотных землях Лено-Амгинского междуречья. В итоге многие пашни из сельхозугодий превращаются в заброшенные земли. И с каждым годом их количество увеличивается. Основная цель работы – оценить геокриологическое состояние этих заброшенных пахотных земель. Исторически на Лено-Амгинском междуречье, в основном, пашни создаются путем вырубki и раскорчевки лиственничного леса на межлесных участках местности, которые отличаются высокой льдистостью литогенной основы. Основным мониторинговым полигоном Института мерзлотоведения для исследования стала пашня «Дыргыабай», которая является типичным для Тюнгюлюнской террасы р. Лены. Повышение температуры воздуха привело к росту глубины протаивания почвогрунтов на пашне и деградации ледового комплекса. За годы исследований верхняя кромка многолетнемерзлых грунтов опустилась от 1,8 м до 2,7 м. На сильно увлажненных участках глубина протаивания увеличилась до 3,5 – 4,5 м. На поверхности заброшенной пашни образовались многочисленные термокарстовые явления вплоть до былларов и озер различной стадии развития. Сделана оценка состояния заброшенных пахотных земель в пяти административных районах региона по трем категориям: 1) нарушенные термокарстом земли; 2) не нарушенные термокарстом; 3) не нарушенные термокарстом пахотные земли, но зарастающие кустарниками и древесостоем. В данное время в регионе поверхность 33 % заброшенных пахотных земель нарушена остаточно-полигональным рельефом и зачаточными термокарстовыми озерами, 57 % поверхности земель не нарушена, а 10 % зарастает древесной и кустарниковой растительностью. При дальнейшем потеплении климата в регионе доля нарушения поверхности криогенными процессами еще увеличится.

**Ключевые слова:** потепление климата, криогенные процессы, сезонно-талый слой, деятельный слой, многолетнемерзлые грунты, термокарст, повторно-жильный лед, среднегодовая температура воздуха, западинно-бугристый рельеф, ледовый комплекс

**Финансирование.** Работа выполнена за счет базового проекта Института мерзлотоведения СО РАН «Эволюция и устойчивость мерзлотных ландшафтов Восточной Сибири» (рег. № 126020516688-9)

**Для цитирования.** Ефремов П.В. Геокриологическое состояние пахотных земель Лено-Амгинского междуречья при потеплении климата. *Вестник СВФУ*. 2026;(1):63-73. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-63-73

*Original article*

## GEOCRYOLOGICAL STATE OF CROPLANDS IN THE LENA–AMGA INTERFLUVE IN A WARMING CLIMATE

*Pyootr V. Efremov*

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russian Federation  
pvefremov@mpi.ysn.ru

### Abstract

This article examines the climate warming effects on thermokarst development on cropland surfaces in the Lena–Amga interfluve. An increasing number of cropland fields have to be abandoned due to enhanced

thermokarst. The main purpose of this study is to assess the condition of the abandoned lands. Historically, land for agriculture in the Lena–Amga interfluvium was cleared by clear-cutting larch forests in inter-alar terrain underlain by ice-rich permafrost. Monitoring observations by the Melnikov Permafrost Institute have been conducted mainly in the Dyrgyabai field which is representative of the Tyungyulyu terrace of the Lena River. Increasing air temperatures have resulted in deeper soil thawing and degradation of the Ice-Complex permafrost. During the monitoring period, the permafrost table has lowered from 1.8 m to 2.7 m. In wet areas, thawing has reached the depths of 3.5–4.5 m. The abandoned cropland surface is now dotted by numerous thermokarst features, including byllars and incipient to mature thaw lakes. An assessment of abandoned cropland condition is provided for five administrative districts in the region by three categories: 1) land disturbed by thermokarst; 2) land unaffected by thermokarst; 3) undisturbed land overgrown with shrubs and trees. Presently, 33 % of the abandoned croplands in the region is distorted by residual polygonal landforms and incipient thermokarst lakes, 57 % is undisturbed, and 10 % is overgrown with trees and shrubs. Further warming in the region will increase the percentage of disturbed land.

**Keywords:** climate warming, cryogenic processes, active layer, permafrost, thermokarst, ice wedge, mean annual air temperature, hummock-and-hollow topography, Ice Complex

**Funding:** This study was supported by the state-funded project of the Melnikov Permafrost Institute “Evolution and stability of permafrost landscapes in Eastern Siberia” (No. 126020516688-9)

**For citation:** Efremov P.V. Geocryological state of croplands in the Lena–Amga interfluvium in a warming climate. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*. 2026;(1):63-73. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-63-73

## Введение

За последние 25–30 лет состояние большинства пахотных земель Лено-Амгинского междуречья, созданных в 50–60-х годах прошлого века, ухудшилось из-за развития на их поверхности различных термокарстовых процессов и явлений под влиянием потепления климата. При увеличении глубины протаивания сезонно-талого слоя (СТС) происходит деградация ледового комплекса с мощными повторно-жильными льдами (ПЖЛ). При оттаивании льдистых грунтов со временем на поверхности образуются остаточный полигональный рельеф (быллары) и в деятельном слое подземные пустоты. Местами на поверхности пашни появляются небольшие термокарстовые озера. В итоге многие пашни выводятся из севооборота и превращаются в бросовые земли. Цель работы: оценить геоэкологическое состояние заброшенных пахотных земель региона.

Ранее криогенное строение рассматриваемой территории и развитие здесь термокарстовых процессов изучали Соловьев П.А. [1], Гаврильев П.П. [2, 3], Босиков Н.П. [4], Босиков Н.П. и др. [5], Гаврильев П.П. и др. [6], Угаров И.С., Мандаров А.А. [7], Федоров А.Н. [8], Варламов С.П. и др. [9], Abe et al. [10], Varlamov et al. [11] и многие другие.

В Мегино-Кангаласском районе из множества пахотных земель была выбрана пашня «Дыргыбай» для создания мониторингового полигона. Она являлась типичной для Тюнгюлюнской террасы р. Лены. Основной причиной для выбора пашни была близость от г. Якутска и наличие хорошей дороги в любое время года. Пашня была образована в 1956 г. на межаласье в 2-х км юго-западнее от с. Чюйя и имела площадь 159 га. Мониторинговый полигон был создан в 1992 г. под руководством д.г.н. Гаврильева П.П. при участии к.г.н. Угарова И.С., Аргунова Р.Н. и автора статьи. По мере исследования территории пашни были обнаружены многочисленные ПЖЛ, которые залегают на глубине 1,8 м. Пробурили скважину механическим буром глубиной 12 м. Не выявили нижнюю кромку ПЖЛ. Рядом с пашней находятся аласы Майя, Чюйя, Улуу-Сыһы, Мооро, глубина которых изменяется от 15 до 20 м. Следовательно, мощность ПЖЛ может также варьировать от 15 до 20 м. Выявили границы кровли льда, которая изменяется от 0,8 до 3,0 м. Объемная льдистость грунта пашни составила 0,6 доли единиц с учетом этих размеров ПЖЛ. При отборе проб грунта на влажность и при проходке шурфов встречались многочисленные рыхлые грунты и подземные пустоты на месте оттаявшего льда.

Со временем на поверхности пашни стали проявляться многочисленные термопросадки. В результате этого пашня была заброшена в 1996 г. И с тех пор она превратилась в залежь и стала использоваться как пастбище для скота. Иногда грунт полигона берут для ремонта автодороги. Сейчас поверхность полигона имеет, в основном, западинно-бугристый рельеф.

#### **Материалы и методы исследования**

Для удобства изучения на полигоне «Дыргыбай» были организованы 6 мониторинговых площадок. Площадка 1 была создана в лиственничном лесу с разнотравно-брусничным покровом на юго-восточной части пашни в 100 м от его края. Высота верхнего яруса составляет 15-17 м, среднего – 7-8 м. Диаметр стволов древостоя изменяется от 0,25 до 0,50 м. Сомкнутость крон – 0,5-0,7. Мощность лесной подстилки составляет 0,02 м. Ниже до 0,04 м – слой перепревших корней травы. Мощность гумусового слоя 0,15 м. Почвы площадки состоят из мерзлотных палевых среднеосолоделых суглинков. Остальные 5 площадок были выбраны на различных участках пашни. В 2002 г. вдобавок этим была создана площадка 7 в восточной части полигона в тонкоствольном лиственничном лесу с бруснично-зеленомошным покровом. В данное время мониторинговые исследования проводятся на 4 площадках: в двух лесных (площадки 1 и 7) и в двух на открытом участке, где прогрессируют термокарстовые явления (площадки 4 и 5).

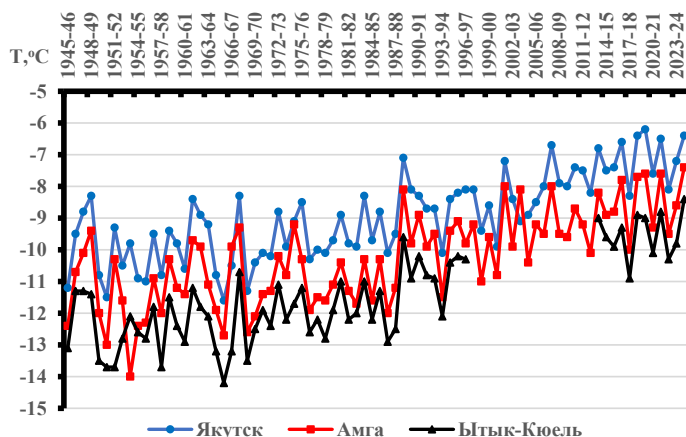
На полигоне был создан комплекс гидротермических и мерзлотных исследований на мониторинговых площадках. Для проведения температурных наблюдений были установлены термисторные гирлянды на глубинах от 2 до 10 м. Погрешность измерения температуры не выходила за пределы  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ . Температура поверхностного слоя грунтов до 0,2 м определялась с помощью термометров Савинова. В 2002 г. на площадке 7 был установлен логгер TP-52 японского производства с датчиком на глубине 1,6 м, который нормально работает до настоящего времени. Глубина протаивания почвогрунтов измеряется при помощи железного щупа, трубчатых измерителей протаивания и во время проходки шурфов. Для определения влажности грунтов проводился отбор проб почвенным и механическим буром. Грунты высушивали в термостате при температуре  $105^{\circ}\text{C}$ . Объемный вес грунта определялся методом режущих колец, а удельный вес, гранулометрический состав, пластичность грунтов определялись в аналитической лаборатории Института мерзлотоведения СО РАН. Все проводимые работы соответствовали методикам, принятым в мерзлотоведении, почвоведении, экологии и мелиорации [12, 13, 14].

#### **Результаты и обсуждение**

Как известно, температура воздуха является главным показателем климата, и чаще всего изменение климата характеризуют по изменению именно этого климатического параметра [15]. Другие элементы климата, такие как осадки и снежный покров, также важны. Но они имеют несколько подчиненное значение. В наших исследованиях средние годовые температуры воздуха определялись по методу А.В. Павлова [16]. В расчет брали данные с октября предыдущего года, когда температура грунта достигает устойчивого отрицательного значения, по сентябрь последующего года. При этом весь холодный период оказывается внутри одного расчетного (геокриологического) года.

За последние 80 лет данные температуры воздуха по метеостанции г. Якутска показали, что до середины 60-х годов прошлого столетия потепления не было. Начиная с 1966 г. стала незначительно повышаться. Потепление зимних температур повлияло на резкое повышение средней годовой температуры в 1988-1989 гг. (рис. 1). Это привело к развитию термокарстовых процессов и явлений на пашне «Дыргыбай» в начале 90-х годов прошлого столетия. Вклад летних месяцев (май-сентябрь) незначителен [15]. Температуру воздуха в Лено-Амгинском междуречье рассматривал по трем метеостанциям: г. Якутск, с. Амга и с. Ытык-Кюель. На метеостанции г. Якутска в период с 2019 по 2020 годы было зафиксировано максимальное значение среднегодовой температуры воздуха  $-6,2^{\circ}\text{C}$ . В период с 1961 по 1990 гг. средняя многолетняя температура воздуха считалась  $-10^{\circ}\text{C}$ . По сравнению с этим периодом она повысилась на  $3,8^{\circ}\text{C}$ . На метеостанциях, расположенных в сёлах Амга и Ытык-Кюель, максимальные значения средне-

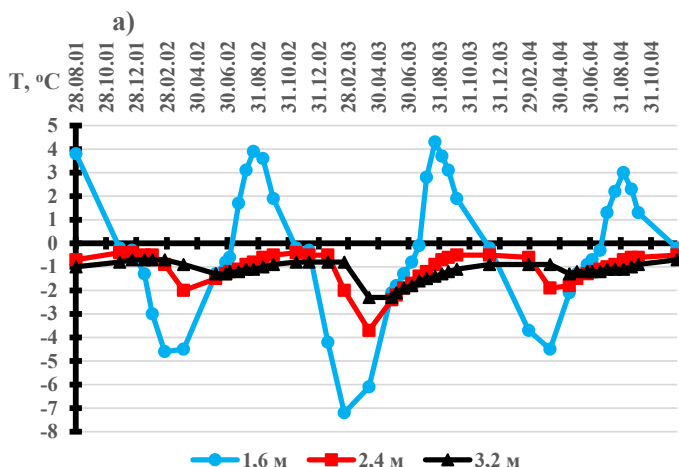
годовой температуры достигнуты в более поздний период – с 2024 по 2025 годы, и составили  $-7,4^{\circ}\text{C}$  и  $-8,4^{\circ}\text{C}$  соответственно, что значительно превышает данные метеостанции г. Якутска.

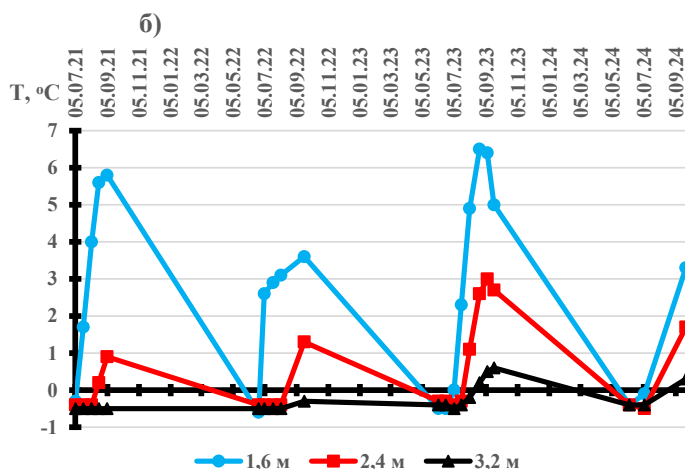


**Рис. 1.** Многолетняя изменчивость средней годовой температуры воздуха (гидрологического года) по данным метеостанций, 1945–2025 гг.

**Fig. 1.** Long-term variability in mean annual (hydrologic year) air temperature according at weather stations data, 1945-2025

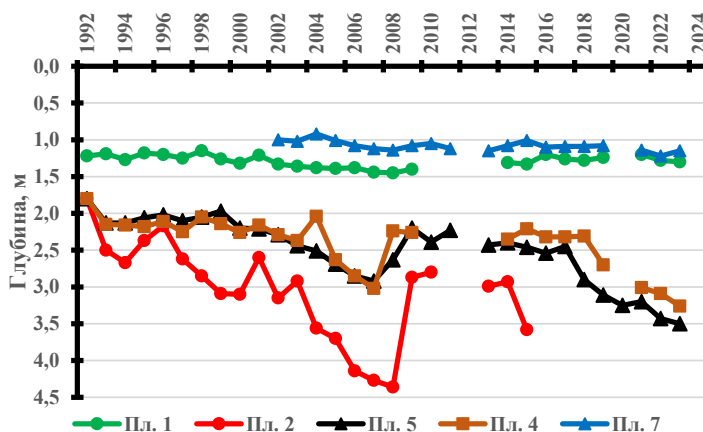
В начале исследования на площадке 1 (в лиственничном лесу) температура грунта на глубине 7 м составила  $-2,6^{\circ}\text{C}$ , а на глубине 10 м  $-2,8^{\circ}\text{C}$ . А на самой пашне в 1993 г. на площадках 2, 3 и 5 температура по глубине была одинакова. Так, на глубине годовых теплооборотов (10 м) составила  $-2,2^{\circ}\text{C}$ , а на глубине 7 м  $-1,8^{\circ}\text{C}$ . Потепление климата привело к повышению температуры грунтов на безлесном участке полигона «Дыргыабай». За годы исследований на площадке 2 температура многолетнемерзлых пород (ММП) на глубине 10 м повысилась с  $-2,2^{\circ}\text{C}$  в 1993 г. до  $-0,9^{\circ}\text{C}$  в 2006 г. На площадке 5, где образовался зрелый быллар, на глубине 7 м температура грунта повысилась с  $-0,8^{\circ}\text{C}$  в 2009 г. до  $-0,5^{\circ}\text{C}$  в 2024 г. На площадке 4 на ровном участке в 2001-2004 гг. минимальная температура грунта на глубине 2,4 м повысилась от  $-3,7^{\circ}\text{C}$  до  $-1,9^{\circ}\text{C}$  (рис. 2а). А в 2021-2024 гг. температура грунта на той же глубине варьировала от  $-0,4^{\circ}\text{C}$  до  $+3,0^{\circ}\text{C}$  (рис. 2б). Максимальная температура была достигнута в 2023 г. Даже на глубине 3,2 м температура грунта с 2023 г. с отрицательной повысилась до положительного, максимально до  $+0,6^{\circ}\text{C}$  (см. рис. 2б).





**Рис. 2.** Изменчивость температуры грунтов на площадке 4 по годам: а) 2001–2004 гг.; б) 2021–2024 гг.  
**Fig. 2.** Variability of soil temperature at plot 4 over the years: a) 2001-2004; б) 2021-2024

На лесных площадках на глубину протаивания грунтов влияют затеняющая роль деревьев, толщина лесной подстилки, наличие мха, высокая начальная влажность почвы. За исследуемый период на площадке 1 мощность СТС изменялась от 1,15 до 1,45 м (рис. 3). В одно время местное население провело частичную вырубку деревьев для строительства изгороди. И это повлияло на некоторое увеличение мощности СТС. Растительность на площадке 7 представлена, в основном, лиственничником тонкоствольным бруснично-зеленомошным. Высота верхнего яруса 14-16 м. Диаметр деревьев варьирует от 0,08 до 0,15 м. Имеются единичные лиственницы толщиной до 0,45-0,55 м. Сомкнутость крон – 0,7-0,8. Лесная подстилка на площадке 7 толще на 3-4 см, чем на площадке 1. Глубина протаивания за годы исследования изменялась от 0,92 до 1,22 м. В последние годы идет тенденция к увеличению, но за счет мощной лесной подстилки за все время измерений мощность СТС была меньше, чем на площадке 1.



**Рис. 3.** Динамика СТС на различных площадках полигона «Дыргыбай» по годам  
**Fig. 3.** Variation in active layer thickness at several plots, Dyrgyabay monitoring site

На пашне в начале мониторингового исследования на всех площадках глубина протаивания грунтов была 1,80 м (см. рис. 3). С 1993 г. она стала постепенно возрастать, но неравномерно по

площадкам. На площадке 2 в конце 90-х годов первым на полигоне «Дыргыабай» образовался быллар, который со временем значительно увеличил свои размеры. За счет высокой влажности грунтов глубина протаивания в 2008 г. увеличилась до 4,36 м, т.е. возросла в 2,5 раза. На этом месте в настоящее время за счет накопления талых снеговых и дождевых вод, и поступающих вод от таяния мощных ПЖЛ образовалась дюёда – термокарстовое озеро. На площадке 5 криогенные процессы стали развиваться чуть позже. Быллар образовался в начале 2000-х годов. Уже с 2008 г. стала скапливаться вода до начала июня, но быстро испарялась. В настоящее время по мере углубления проседания вода держится уже до конца июля месяца (рис. 4). Соответственно влажность грунтов в СТС становится высокой, т.е. не ниже 30 % от объема. В 2023 г. грунты протаяли на глубину 3,5 м. Площадка 4 была создана на ровном участке пашни недалеко от термокарстовой просадки. Позже на месте той термопросадки образовался быллар с меньшими размерами по площади. Но глубина протаивания на площадке 4 постепенно возрастала и сейчас достигла 3,26 м. Значит быллар продолжает усиленно развиваться и увеличивать свою площадь в сторону ровного участка. Еще в начале 1990-х годов профессор Гаврильев П.П. писал, что грунты верхней части ледового комплекса полигона «Дыргыабай» на участках без лесного покрова перешли из устойчивого состояния в неустойчивое [3]. При этом исчез так называемый «защитный грунтовый слой», под которым понимается мерзлый слой грунта, расположенный ниже максимальной глубины протаивания до уровня верхних оголовок ПЖЛ. Защитный слой раньше предохранял от таяния верхнюю часть ПЖЛ, поэтому в то время не было просадок поверхности. Сейчас даже при относительно небольшом повышении средней годовой температуры воздуха увеличивается глубина протаивания грунтов и происходит таяние верхней кровли ММП с ПЖЛ.



Рис. 4. Быллар с талой и дождевой водой, площадка 5, июнь 2023 г.

Fig. 4. A byllar with melt- and rainwater, plot 5, June 2023

Осадки приведены по данным метеостанции г. Якутска за август и сентябрь, так как выпавшие в августе дожди не успевают испариться полностью, и оказывают большое влияние на влажность грунтов в сентябре месяце. Минимальные осадки выпали в 2020 г. и составили всего 15 мм (9 и 6 мм соответственно) (рис. 5). Максимальные осадки были в 2006 году (205 мм). В августе выпали 151 мм осадков, а в сентябре – 54 мм. Влагозапас метрового слоя грунтов на ровном участке площадки 4 изменялся от 144 (2018 г.) до 255 мм (2006 г.). А двухметрового

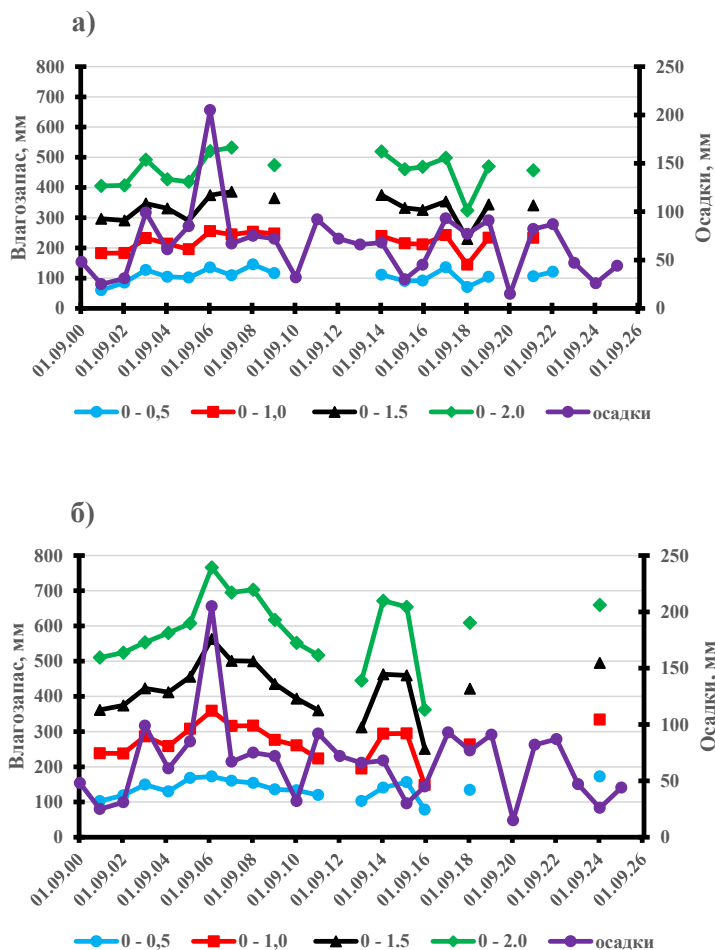


Рис. 5. Межгодовая изменчивость осеннего влагозапаса почвогрунтов на полигоне «Дыргыабай» по слоям: а) площадка 4; б) площадка 5

Fig. 5. Interannual variability of autumn soil moisture content at the Dyrgyabay test site by layers: a) site 4; b) site 5

слоя варьировал от 234 (2018 г.) до 532 мм (2007 г.). На площадке 5 влагозапас грунтов намного выше из-за западинно-бугристого микрорельефа, где накапливаются талые и дождевые воды, которые в последние годы испаряются только в конце июля месяца. В метровом слое грунтов запас влаги изменяется от 148 (2016 г.) до 359 мм (2006 г.), а в двухметровом слое – от 362 (2016 г.) до 766 мм (2006 г.). Максимальная разница 2-хметрового слоя между площадками была в 2006 г. и составила 246 мм.

В 2023 г. по данным съемок квадрокоптером DJI Phantom 4 полигона «Дыргыабай» была сделана оценка состояния его поверхности. По его результатам была составлена карта-схема геокриологического состояния поверхности данного полигона (рис. 6). Определили какие основные элементы рельефа сколько площадей занимают. Оказалось, что наибольшую площадь из них занимают полигонально-бугристые просадочные формы рельефа – быллары. Они занимают 66 % от всей территории полигона. Наименьшую площадь имеют участки, где образовались термокарстовые озера в различной стадии развития: иё, дюёдя, тымпы. Всего они составили 3 % от всей территории полигона.

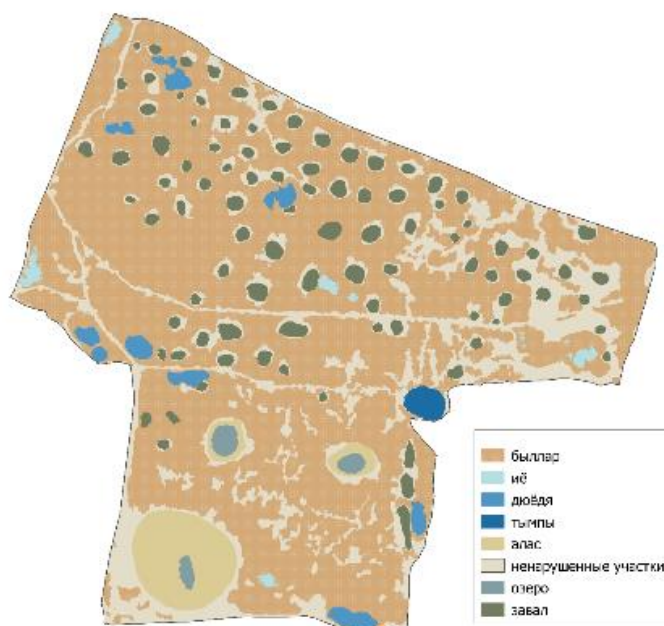


Рис. 6. Карта-схема геокриологического состояния полигона «Дыргыабай»

Fig. 6. Schematic map of the geocryological state, Dyrgyabay site

Территория Лено-Амгинского междуречья разделена на 5 административных районов: Мегино-Кангаласский, Усть-Алданский, Амгинский, Чурапчинский и Таттинский. И по каждому району была сделана оценка территории пахотных земель по трем категориям: 1) нарушенные термокарстом земли, где образовались многочисленные быллары и термокарстовые озера; 2) не нарушенные термокарстовыми процессами; 3) не нарушенные термокарстом земли, но зарастающие древесной и кустарниковой растительностью (таблица).

Таблица

Состояние пахотных земель по административным районам ( % )

Table

Condition of arable lands by administrative districts ( % )

Районы	Нарушенные термокарстом	Не нарушенные термокарстом	Заросшие древесной растительностью
Таттинский	61,5	32,3	6,2
Чурапчинский	42,5	48,1	9,4
Амгинский	33,6	59,9	6,5
Мегино-Кангаласский	15,5	67,3	17,2
Усть-Алданский	7,4	74,2	18,4
Итого	32,8	57,0	10,2

По итогам оценки выявились районы, где площади заброшенных пахотных земель наименее подвержены криогенным процессам. Это Мегино-Кангаласский и Усть-Алданский районы, у которых доля по первой категории (нарушенные термокарстом земли) составляет 15,5 % и 7,4 % соответственно. Также выявились в регионе районы, у которых территория пахотных земель наиболее подвержена термокарстовым процессам. Опережает всех Таттинский район – 61,5 %. Чуть отстает Чурапчинский район, где криогенным процессам подвержена 42,5 % пло-

щадя заброшенных сельскохозяйственных земель. А в Амгинском районе чуть больше трети заброшенных пахотных земель подвержена к различным термокарстовым процессам. В данное время в регионе поверхность 33 % заброшенных пахотных земель нарушена многочисленными термокарстовыми процессами, 57 % поверхности земель относительно нормальная, а 10 % за-растает древесной и кустарниковой растительностью. При дальнейшем потеплении климата в таком темпе некоторая часть заброшенных земель с ровной поверхностью может превратиться в нарушенные из-за активизации термокарста.

### Заключение

Исследование в мониторинговом полигоне «Дыргыабай» показывает, что при продолжении потепления климата региона доля нарушенных пахотных земель термокарстом будет расти. В ближайшем будущем при проектировании пахотных земель необходимо исключить создание новых пашен в межлассном типе местности, где грунты отличаются большой льдистостью. Была проведена площадная оценка состояния заброшенных пахотных земель на Лено-Амгинском междуречье по административным районам. В условиях современного потепления климата актуальной является задача оценки всех сельскохозяйственных земель Центральной Якутии на предмет возможной деградации от активизации криогенных процессов.

### Литература

1. Соловьев П.А. *Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья*. М.: Изд-во АН СССР; 1959:144.
2. Гаврильев П.П. Термопросадки и деформация поверхности поля при мелиорации долины р. Амги. *Криогидрогеологические исследования*. Якутск: Изд-во ИМЗ СО АН СССР; 1985:148-161.
3. Гаврильев П.П. О развитии криогенных процессов и устойчивости агроземель в Якутии. *Закономерности развития и дифференциации мерзлотных ландшафтов*. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН; 1993:98-110.
4. Босиков Н.П. Влияние антропогенных факторов на интенсивность криогенных процессов. *Использование и охрана сельскохозяйственных ресурсов Якутии*. Якутск; 1988:11-17.
5. Босиков Н.П., Васильев И.С., Федоров А.Н. *Мерзлотные ландшафты зоны освоения Лено-Алданского междуречья*. Якутск: Изд-во ИМЗ СО АН СССР; 1985:124.
6. Гаврильев П.П., Угаров И.С., Ефремов П.В. *Мерзлотно-экологические особенности таежных агроландшафтов Центральной Якутии*. Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН; 2001:196.
7. Угаров И.С., Мандаров А.А. *Орошение дождеванием кормовых культур в Центральной Якутии*. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН; 2000:127.
8. Федоров А.Н. Роль вырубок в развитии мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии. *Региональные и инженерные геокриологические исследования*. Якутск; 1985:111-117.
9. Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н. Современная изменчивость термического режима грунтов тунгюлюнской террасы долины р. Лены. *Вопросы географии Якутии*. Вып. 11: Влияние изменений климата на природные процессы криолитозоны. Якутск: Изд-во «СМИК-МАСТЕР»; 2013:38-43.
10. Abe, T., Iwahana, G., Efremov, P.V., Desyatkin, A.R., Kawamura, T., Fedorov, A., Zhegusov, Y., Yanagiya, K., Tadono, T. Surface displacement revealed by L-band InSAR analysis in the Mayya area, Central Yakutia, underlain by continuous permafrost. *Earth, Planets and Space*. 2020;72(1):138. DOI: 10.1186/s40623-020-01266-3
11. Varlamov, S.P., Skachkov, Y.B., Skryabin, P.N. Influence of Climate Change on the Thermal Condition of Yakutia's Permafrost Landscapes (Chabyda Station). *Land*. 2020;9(5):132. DOI: 10.3390/land9050132
12. Павлов А.В. *Теплофизика ландшафтов*. Новосибирск: Наука; 1979:285.
13. Гаврильев П.П., Мандаров А.А. *Лиманное орошение лугов в Центральной Якутии*. Новосибирск: Наука; 1976:165.
14. *Полевые геокриологические (мерзлотные) исследования (методическое руководство)*. М.: Изд-во АН СССР; 1961:424.
15. Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н. *Мониторинг теплового режима грунтов Центральной Якутии*. Якутск: Изд-во ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И.Мельникова СО РАН; 2021:156.
16. Павлов А.В. *Теплообмен промерзающих и протаивающих грунтов с атмосферой*. М.: Изд-во АН СССР; 1965:254.

## References

1. Soloviev P.A. *Cryolithozone of the northern part of the Lena-Amga interfluvium*. Moscow: USSR Academy of Sciences; 1959:144 (in Russian).
2. Gavriliev P.P. Thermal subsidence and deformation of the field surface during melioration of the Amga River valley. *Cryohydrogeological Studies*. Yakutsk: Permafrost Institute SB USSR Academy of Sciences; 1985:148–161 (in Russian).
3. Gavriliev P.P. On the development of cryogenic processes and the stability of agricultural lands in Yakutia. *Patterns of development and differentiation of permafrost landscapes*. Yakutsk: Permafrost Institute SB RAS; 1993:98–110 (in Russian).
4. Bosikov N.P. Influence of anthropogenic factors on the intensity of cryogenic processes. *Use and protection of agricultural resources of Yakutia*. Yakutsk; 1988:11–17 (in Russian).
5. Bosikov N.P., Vasiliev I.S., Fedorov A.N. *Permafrost landscapes in the development zone of the Lena–Aldan Watershed*. Yakutsk: Permafrost Institute, SB USSR Academy of Sciences; 1985:124 (in Russian).
6. Gavriliev P.P., Ugarov I.S., Efremov P.V. *Permafrost-ecological characteristics of taiga agricultural landscapes, Central Yakutia*. Yakutsk: Permafrost Institute SB RAS; 2001:196 (in Russian).
7. Ugarov I.S., Mandarov A.A. *Overhead irrigation of fodder crops in Central Yakutia*. Yakutsk: Permafrost Institute SB RAS; 2000:127 (in Russian).
8. Fedorov A.N. The role of clearings in the development of permafrost landscapes in Central Yakutia. *Regional and Engineering Geocryological Studies*. Yakutsk; 1985:111–117 (in Russian).
9. Varlamov S.P., Skachkov Y.B., Skryabin P.N. Current variation in the the ground thermal regime in the Tyungyulyu terrace, Lena River valley. *Voprosy Geografii Yakutii*. Vol. 11: Effects of Climate Change on Natural Processes in the Permafrost Zone. Yakutsk: SMIK-MASTER Publ. 2013:38–43 (in Russian).
10. Abe T., Iwahana G., Efremov P.V., et al. Surface displacement revealed by L-band InSAR analysis in the Mayya area, Central Yakutia, underlain by continuous permafrost. *Earth, Planets and Space*. 2020;72(1):138. DOI: 10.1186/s40623-020-01266-3
11. Varlamov S.P., Skachkov Y.B., Skryabin P.N. Influence of Climate Change on the Thermal Condition of Yakutia's Permafrost Landscapes (Chabyda Station). *Land*. 2020;9(5):132. DOI: 10.3390/land9050132
12. Pavlov A.V. *Thermal physics of landscapes*. Novosibirsk: Nauka; 1979:285 (in Russian).
13. Gavriliev P.P., Mandarov A.A. *Basin irrigation of meadows in Central Yakutia*. Novosibirsk: Nauka; 1976:165 (in Russian).
14. *Field geocryological (permafrost) studies (methodological guidelines)*. Moscow: USSR Academy of Sciences; 1961:424 (in Russian).
15. Varlamov S.P., Skachkov Yu.B., Skryabin P.N. *Monitoring of the ground thermal regime in Central Yakutia*. Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute SB RAS; 2021:156 (in Russian).
16. Pavlov A.V. *Heat exchange between the freezing and thawing soils and the atmosphere*. Moscow: USSR Academy of Sciences; 1965:254 (in Russian).

## Сведения об авторе

ЕФРЕМОВ Петр Васильевич – н.с. Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова, г. Якутск, Российская федерация, ORCID: 0000-0003-0079-8481, Researcher ID: ADD-6701-2019, Scopus Author ID: 57189894858, SPIN: 8918-7160

E-mail: pvefremov@mpi.ysn.ru

## Author Information

Petr V. EFREMOV – Researcher, Melnikov Permafrost Institute, Yakutsk, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-0079-8481, Researcher ID : ADD-6701-2019, Scopus Author ID : 57189894858, SPIN : 8918-7160

E-mail: pvefremov@mpi.ysn.ru

**Конфликт интересов**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest**

The author declare that there is no conflict of interest.

*Поступила в редакцию / Submitted 13.01.2026*

*Поступила после рецензирования / Revised 19.03.2026*

*Принята к публикации / Accepted 27.03.2026*

## МЕХАНИЗМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ГЕОСИСТЕМАХ «ПРОМЫШЛЕННЫЙ ОБЪЕКТ – ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА»

*И.В. Ядрихинский<sup>1</sup>, Т.Р. Егорова<sup>2\*</sup>, В.В. Власенко<sup>3</sup>,  
С.Р. Егорова<sup>1</sup>, А.А. Денисова<sup>1</sup>, Д.Г. Захаров<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Российская Федерация

<sup>2</sup>АО «Алмазы Анабара», Якутск, Российская Федерация,

<sup>3</sup>Министерство экологии, природопользования и лесного хозяйства  
Республики Саха (Якутия), Якутск, Российская Федерация

\*Tuyaruslanovna@mail.ru

### Аннотация

В настоящее время с развитием горнодобывающей отрасли и с ростом потребления топлива на Арктическом севере Якутии, обладающей значительным минеральным запасом в стране, большое значение имеют аспекты, связанные с повышением экологических требований к добывающим компаниям, поиском баланса между экономикой и сохранением природной среды. А также в условиях тенденции потепления климата на большей части криолитозоны России особую важность приобретают мероприятия, направленные на изучение и развитие системы геотехнического мониторинга на промышленных и гражданских объектах в районах распространения многолетнемерзлых пород. Стоит отметить, что хранение нефтепродуктов в арктических районах осуществляется в резервуарных парках, возводимых на грунтовом основании. Поэтому изучение этих проблем недропользователями имеет особую важность для обеспечения устойчивого социально-экономического и инфраструктурного развития территории в соответствии с требованиями промышленной и экологической безопасности.

В статье представлены методы по использованию естественных научных методов в процессе исследований в области инженерной защиты окружающей среды и рационального использования природных ресурсов. Теоретические исследования фундаментального масштаба часто основаны на опосредованном, мысленном изучении процессов и явлений (синергетически взаимосвязанных природно-технических геосистем). При этом практическое взаимодействие с непосредственно исследуемыми объектами (конкретными объектами промышленной инфраструктуры) может отсутствовать.

На основе анализов теоретических методов установлены и выявлены общие принципы инженерной защиты окружающей среды в направлении минимизации интегральных потерь неживой и живой природы. Поставлены новые, ранее неизвестные или не решенные задачи, имеющие важное прикладное значение. Проведена качественная и количественная оценка ранее полученных прецедентов по аналогичным методологическим направлениям изучаемых проблем. Разработана принципиально новая система понимания явлений, механизмов и процессов экологически безопасного природопользования на промышленно-осваиваемых территориях.

**Ключевые слова:** рациональное природопользование, природно-технические геосистемы, геотехнический мониторинг, геоэкология, инженерная защита окружающей среды, промышленный объект, эксплуатация, экологическая безопасность, экотоп, жизненный цикл.

**Для цитирования:** Ядрихинский И.В., Егорова Т.Р., Власенко В.В., Егорова С.Р., Денисова А.А., Захаров Д.Г. Механизмы взаимодействия в природно-технических геосистемах «промышленный объект-окружающая среда». *Вестник СВФУ*. 2026;(1):74-84. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-74-84

## INTERACTIONS MECHANISMS IN NATURAL-TECHNICAL GEOSYSTEMS “INDUSTRIAL FACILITY – ENVIRONMENT”

Ivan V. Yadrikhinsky<sup>1</sup>, Tuyaara R. Egorova<sup>2\*</sup>, V.V. Vlasenko<sup>3</sup>, Sargylaana R. Egorova<sup>1</sup>,  
Anastasia A. Denisova<sup>1</sup>, David G. Zakharov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Almazy Anabara JSC, Yakutsk, Russian Federation

<sup>3</sup>Ministry of Ecology, Nature Management and Forestry of the Sakha Republic (Yakutia),  
Yakutsk, Russian Federation

\*Tuyaruslanovna@mail.ru

### Abstract

With the development of the mining industry and growing fuel consumption in the Arctic north of Yakutia, which boasts significant mineral reserves, increasing environmental requirements for mining companies and finding a balance between economics and environmental conservation are increasingly important. Furthermore, given the trend of global warming in Russia's permafrost zone, measures aimed at studying and developing geotechnical monitoring systems at industrial and civil facilities in permafrost areas are particularly important. It is worth noting that petroleum products in Arctic regions are stored in tank farms constructed on ground foundations. Therefore, studying these issues by subsoil users is important to ensure sustainable socio-economic and infrastructural development of the territory in accordance with industrial and environmental safety requirements.

This article presents methods for using natural sciences in research in the field of environmental engineering and the rational resources.

Fundamental theoretical research is often based on an indirect, conceptual study of processes and phenomena (interconnected natural and technical geosystems). However, practical interaction with the objects being directly studied (industrial infrastructure facilities) may be absent.

Based on analyses of theoretical methods, general principles of environmental engineering aimed at minimizing integral losses of inanimate and animate nature were established and identified. New, previously unknown or unsolved problems of significant practical significance were posed. A qualitative and quantitative assessment of previously obtained precedents in methodological areas of the problems under study was conducted. A fundamentally new system for understanding the phenomena, mechanisms, and processes of environmentally sound nature management in industrially developed areas was developed.

**Keywords:** rational use of natural resources, natural-technical geosystems, geotechnical monitoring, geocology, environmental engineering, industrial facility, operation, environmental safety, ecotope, life cycle

**For citation:** Yadrikhinsky I.V., Egorova T.R., Vlasenko V.V., Egorova S.R., Denisova A.A., Zakharov D. G. Interactions mechanisms in natural-technical geosystems “industrial facility – environment”. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*. 2026;(1):74-84. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-74-84

### Введение

Общий принцип инженерной защиты окружающей среды в направлении минимизации интегральных потерь неживой и живой природы базируется на физико-математических аспектах исследования механизмов взаимодействия в природно-технических геосистемах (ПТГ) «промышленный объект – окружающая среда» [1]. При этом ущерб, наносимый окружающей среде (ОС) в локальном, региональном или глобальном масштабе может быть формализован следующим образом:

- абсолютно невозполнимые потери, связанные с уничтожением биологических популяций (растительного и животного вида) или необратимого изменения биогеоценозов за пределами границ самовосстановления;

- качественные потери неживой природы в первоначальных количественных пропорциях (ухудшение плодородной структуры почв, изменение гидрогеологического режима течений, деградации почв в наиболее экологически уязвимых районах Крайнего Севера;
- обратимые потери живой природы в границах самовосстанавливаемости или экологической реконструкции по результатам геотехнического мониторинга [2].

Анализируя механизм формирования экологических потерь по компонентам ОС целесообразно рассматривать три стадии функционирования ПТГ [3]. На первой стадии развития процесса происходит нормативно допустимое использование природных ресурсов, характеризующее окончание активной фазы производственно-технологического цикла. Далее процесс переходит в состояние относительной инженерно-экологической устойчивости в пределах сохранения баланса биосферы в границах её естественной саморегенерации. Третья стадия характеризует нарастающую динамику потери экологической устойчивости процесса функционирования ПТГ по двум возможным сценариям – естественной биоэкологической адаптации ОС и комплексной инженерно-экологической реабилитации ПТГ, создающей наибольший эффект восстановления природной среды и объектов промышленно-техногенной инфраструктуры.

**Материалы и методы исследования**

Оценка экологического равновесия промышленно осваиваемой территории опирается на глубокий количественный анализ многофункциональных ПТГ по всем трем стадиям экологических потерь. Объективной характеристикой равновесия ПТГ с точки зрения инженерной защиты ОС может служить вектор экологических потерь  $\bar{R}$ , ориентированный в направлении конкретного компонента природы. При этом длина вектора пропорциональна смещению, оцениваемому коэффициентом репрезентативности, характеризующему экологическую асимметрию  $\Delta$ , по компонентам экотопа (атмосферы – А, гидросферы – Г, литосферы – Л) и биоценоза (флоры  $\Phi_l$ , фауны  $\Phi_n$ ), т.е. [4]:

$$\bar{R} \approx \Delta_{\mathcal{E}}(\Delta_{A,G,L}; \Delta_{\Phi_l, \Phi_n}) \tag{1}$$

В этом случае теоретической идеализацией будет служить такая нормативно обеспеченная экологически устойчивая ПТГ, для которой общие потери ОС минимизированы до приемлемого биосферой уровня, или даже равны нулю:

$$\bar{R} = \min_{\substack{\Delta_{\mathcal{E}} \left( \sum_i^n \Delta_{A,G,L}; \sum_i^n \Delta_{\Phi_l, \Phi_n} \right) \\ \bar{R} = 0; \Delta_{\mathcal{E}}}} \tag{2}$$

Для реальной ПТГ вектор потенциальных потерь в ОС функционально характеризует качество инженерных изысканий на предпроектном этапе, а также качество работ строительного и производственно-технологического цикла. Вектор фактических потерь в ОС является функцией эксплуатационной надежности и экологической безопасности должна быть установлена регламентированная норма, являющаяся границей предельно допустимых воздействий на ОС. Предельно допустимые воздействия на этапах жизненного цикла функционирования промышленного объекта (строительство на всех этапах производства работ: земляных, сварочно-монтажных, изоляционно-укладочных и т.д.; эксплуатация) требуют инженерно-экологического обоснования по основным направлениям обеспечения устойчивого баланса биосферы:

- а) локального экологического прессинга (или интенсивности местных потерь конкретного вида);
- б) возможности развития необратимых смещений экологически устойчивого равновесия по интенсивности возникновения потерь в ОС –  $dR/dt$ , или вероятности повышения экологического риска  $P(\bar{R}, \Delta_{\mathcal{E}}) \leq 1$  [4];

в) самокомпенсационного или деградиционного характера экологического противодействия со стороны биосферы на техногенное воздействие промышленного объекта.

Одним из основных аспектов всестороннего инженерно-экологического анализа реальной антропогенной обстановки в конкретной ПТГ является глубокое исследование всех возможных источников вредных воздействий на компоненты биогеоценоза.



Рис. 1. Классификация источников негативного влияния на окружающую среду

Fig.1. Classification of sources of negative impact on the environment

На рис.1 представлена обобщённая классификация источников негативного влияния на окружающую среду, которая отражает реальную картину взаимодействия объектов промышленной и социальной инфраструктуры многоотраслевого природно-территориального комплекса Якутии за период наблюдения 2011–2022 гг. Интенсивное использование природных ресурсов, особенно в районах Крайнего Севера, создаёт всё более высокий риск превышения антропогенных нагрузок восстановительного потенциала биосферы региона.

Регионально-экологический подход к оценке последствий взаимодействия промышленных объектов с ОС базируется на результатах статистического анализа многофакторной ретроспективной информации, данных геотехнического и экологического мониторинга, а также многосторонних экспертных исследованиях [12, 13].

### Результаты и обсуждение

Исследование механизмов взаимодействия ПТГ на региональном и межрегиональном уровнях имеет цель создания комплексной инженерной защиты ОС с учётом зональных факторов географических, инженерно-геологических, биофизикохимических условий трансформирования природной среды под действием антропогенных процессов в границах исследуемой территории. Поэтому с позиции системного анализа экологическая защита природно-территориального комплекса подразумевает, прежде всего, создание условий, необходимых для реализации механизмов естественного саморегулирования и самовосстановления природной среды путём антропогенных ограничений регионального и межрегионального энерго-массопереноса между компонентами биогеоценоза (атмосферы – *A*, гидросферы – *G*, литосферы – *L*, биосферы – *B*).

С позиции рассмотренного в данной статье закона о резонансных эффектах антропогенно связанных сопредельных территорий, процессы энерго-массопереноса, инициируемые техногенными факторами, обуславливают экологически объективный принцип причинности взаимовлияния компонентов биогеоценоза. Изучение этого принципа экологической причинности имеет фундаментальное значение, поскольку требует глубокого исследования пространственно-временных границ физико-химического взаимодействия и взаимосвязи потоков техногенного энерго-массопереноса.

Решение этой фундаментальной задачи в соответствии с законом, сформулированным Ядрихинским И.В. [5], потребовало в качестве необходимого исходного условия кардинального пересмотра и совершенствования естественно-научного содержания важнейшей составляющей ветви общей экологии-геоэкологии. В соответствии с общепринятым определением [6], геоэкология – это «изучение геосфер, их динамики и взаимодействия, геофизических условий жизни, факторов неживой окружающей среды, действующей на организм».

К сожалению, такое определение понятия геоэкологии не отвечает современным требованиям организации исследований по комплексной защите окружающей среды в условиях глобальной трансформации биосферы Земли в био-техносферу. Во-первых, понятийный аппарат традиционно рассматриваемой геоэкологии учитывает только геофизические условия жизни по факторам неживой ОС со стороны геосфер ( $A, G, L$ ). Во-вторых, не учитываются механизмы реальной синергетики в направлении самоорганизации, возникновения, устойчивости и деградации различных структур биосферы ( $B$  – флоры и фауны). В-третьих, по мере неуправляемого роста антропогенного влияния на географическую среду и депрессивных процессов трансформирования ландшафтной оболочки Земли увеличивается зона взаимопроникновения (эпигеосферы) и техногенно выраженного взаимодействия по биофизикохимическим свойствам всех компонентов биогеоценоза:

$$A \leftrightarrow G \leftrightarrow L \leftrightarrow B,$$

что в итоге создает экологически опасные резонансные эффекты, требующие адекватной инженерной защиты природной среды. И, наконец геоэкология на фундаментальном уровне наделена естественно-научной методологией исследования необходимых географических и достаточных инженерно-экологических критериев, и методов защиты природы в локальном и глобальном измерении.

На рис. 2 представлена структурно-функциональная характеристика фундаментальной геоэкологии, отражающая принципиальные направления развития этой усовершенствованной научной дисциплины.

Процесс функционирования ПТГ, «промышленный объект – окружающая природная среда», следует рассматривать в развитии двух диалектически взаимосвязанных противоположных подпроцессов:

- естественного компенсационного (за счёт механизмов саморегенерации популяций биосферы);
- техногенного подавления компенсационных механизмов саморегенерации компонентов экотопа и биоценоза под действием промышленного антропогенеза.

Первый подпроцесс характеризует потенциал жизнеспособности естественной природной экосистемы по критериям её сопротивляемости и приспособляемости (адаптируемости) потокам антропогенной деградации. Второй подпроцесс характеризуется техногенными факторами экологически экстремальных рисков по компонентам экотопа и биоценоза, конструктивно-технологической надёжностью и безопасностью по всем стадиям жизненного цикла промышленного объекта (изыскания, проектирование, строительство, испытания, эксплуатация).

В таком контексте исследования процесса ПТГ, накапливающего локальные, непрерывно появляющиеся во времени изменения  $\Delta_g$ , можно рассматривать как систему, обладающую закономерным снижением экологической устойчивости по отношению к внешним техногенным

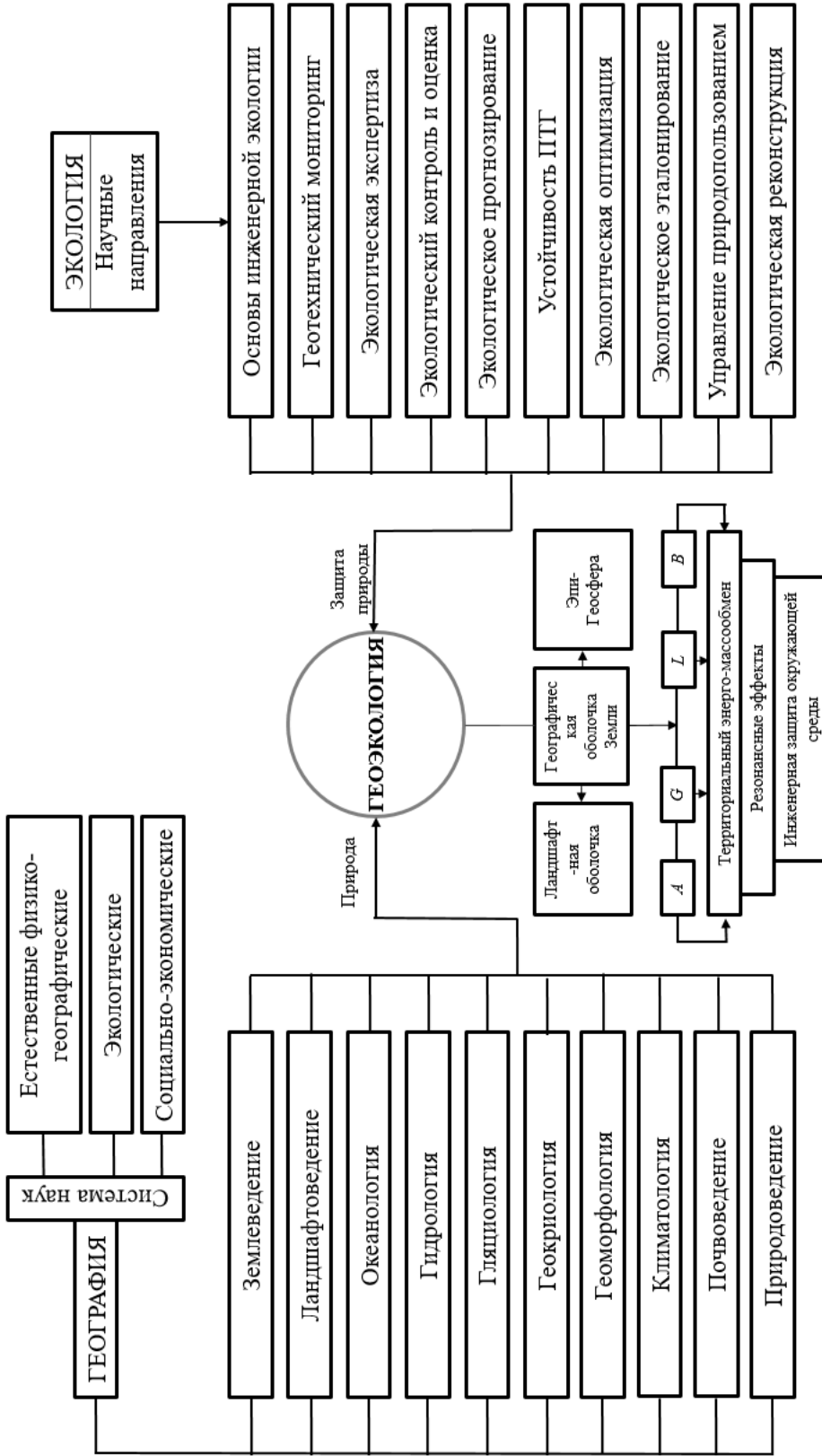


Рис. 2. Структурно-функциональная характеристика фундаментальной геоэкологии (география & экология)  
 Fig. 2. Structural and functional characteristics of fundamental geocology (geography & ecology)

воздействиям. Условные вероятности перехода экосистемы в процессе функционирования ПТГ могут рассматриваться по различным стадиям состояния – от начальной (без явного накопления антропогенно негативных изменений) через промежуточные (с незначительными остаточными антропогенными изменениями) [7, 8], к переходу экосистемы в предельное состояние (с полным нарушением равновесия). При этом вероятности перехода экосистемы из одного состояния в другое зависят от одного  $\Delta_{g_i}$ , или группы локальных изменений  $\sum_{i=1}^n \Delta_{g_i}$ , исходя из характера (интенсивности и мощности) факторов техногенного воздействия.

В общем случае задачи по определению условных вероятностей перехода экосистемы из одного состояния в другое методически решаются на основании теоремы умножения вероятностей. С точки зрения взаимной обусловленности распределений накапливающихся антропогенных изменений и времени нахождения экосистемы в равновесии физический смысл экологической безопасности состоит в последовательном суммировании времён перехода системы от начального равновесного состояния через промежуточные условно равновесные состояния к предельному, характеризующемуся критическим уровнем накопления антропогенных изменений [8, 9]:

$$t_{np} = \sum_i^n t_{i(g_i)} = t_{(g_1)} + t_{(g_2)} + \dots + t_{(g_n)} \quad (3)$$

Любому интервалу времени  $\Delta t = t_{(g_i)} - t_{(g_{i-1})}$  соответствуют приращения антропогенных изменений в экосистеме в целом  $\mathcal{E}_\Sigma$  или в конкретных компонентах экотопа ( $A, G, L$ ) и биоценоза  $B(\Phi_n, \Phi_n)$ , а также вероятности того, что такое накопление изменений произойдёт в рассматриваемом интервале  $\Delta t$  [9]. В этом случае имеем функционально связанную последовательность  $\Delta t \rightarrow \Delta \mathcal{E}_\Sigma \rightarrow \Delta P$ , которую характеризуют антропогенные изменения в рассматриваемой экосистеме в границах ПТГ:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P &= P(t + \Delta t) - P(t) \\ \Delta \mathcal{E}_\Sigma &= \mathcal{E}(t + \Delta t) - \mathcal{E}_\Sigma(t) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

На рис. 3 отражен физический смысл функциональных переходов ПТГ по стадиям антропогенных изменений в соответствии с формулами (1), (2) [10-11]. Поскольку показатели состояния ПТГ  $P(t)$  и  $\mathcal{E}_\Sigma(t)$  обуславливают общую тенденцию изменений, происходящих в экосистеме  $\mathcal{E}_\Sigma[(A, G, L); (B)]$ , то для оценки устойчивого функционирования её в составе ПТГ необходимо учитывать интенсивность техногенного влияния  $V_g$  на природные компоненты со стороны промышленных объектов (являющихся источниками техногенеза). Учитывая противостояние защитных функций природной среды техногенным факторам антропогенного воздействия со стороны промышленных объектов, функциональная взаимосвязь противоположных процессов в реальной ПТГ будет иметь вид:

$$\Delta P(t) = -\partial_g \bullet \Delta \mathcal{E}_\Sigma[(A, G, L); (B); t] \quad (5)$$

Специальные опытно-статистические исследования реальных ПТГ позволят глубже изучить механизмы взаимодействия рассматриваемых подсистем по выше рассмотренным аналитическим моделям.

### Заключение

Таким образом, геоэкологический аспект защиты природной среды заключается в необходимости выявления допустимых масштабов трансформирования географической оболочки исследуемого природно-территориального комплекса в эпигеосферу с признаками локального и общерегионального антропогенного загрязнения. Причём экологическое загрязнение в рамках понятия, определённого ЮНЕСКО, включает не только прямое, непосредственное введение

$P_{t_0 t_1} = \frac{P_0(t_0)}{P_0(t_1)}$  - переход ПТГ без явного накопления антропогенных изменений (экологическое равновесие устойчиво).

$P_{t_1 t_2} = \frac{P_1(t_1, t_2)}{P_0(t_1)}$  - переход экосистемы из абсолютно устойчивого состояния в состояние с имеющимися незначительными остаточными антропогенными изменениями (условно равновесное состояние экосистемы)

$P_{t_2 t_3} = \frac{P_2(t_2, t_3)}{P_2(t_2)}$  - переход ПТГ в состояние с локальным нарушением равновесия (экологическая неустойчивость)

$P_{t_3 t_{пр.}}$  - переход ПТГ в предельное состояние (с полным нарушением экологического равновесия)

Функциональный переход природно-технической геосистемы от начального равновесия через промежуточные условно равновесные состояния к предельному характеризуется критическим уровнем накопления антропогенных изменений:

$$t_{пр} = \sum_{i=1}^n t_{e(g)_i} + t_{e(g)_2} + t_{e(g)} + \dots + t_{e(g)_n}; \quad \text{выполняя переход } t \rightarrow \infty,$$

имеем предельную условную вероятность накопления антропогенных изменений  $P_i^*$  в равновесной экосистеме  $g_i (i = 1, 2, 3 \dots n) \rightarrow P_i^* = \lim P_{g_i}(t)$

Рис. 3. Физический смысл функциональных переходов природно-технической геосистемы по стадиям антропогенных изменений [10, 11]

Fig. 3. The physical meaning of functional transitions of the natural-technical geosystem through the stages of anthropogenic changes [10, 11]

физико-химических реагентов или энергии в географическую оболочку, но и косвенное нарушение экологической целостности природного ландшафта [14]. К примеру, разрушающий механический эффект на действующих нефтепроводах и нефтехранилищах существенно меньше, чем на объектах транспорта и хранения газа. Однако, авария на магистральном нефтепроводе или ёмкостях-хранилищах нефти (нефтепродуктов) сопровождается выходом, как правило, значительного количества продукта, в результате чего резко возрастает опасность для загрязнения (с долговременными последствиями) грунтов, почво-растительных покровов и водных объектов. Причём физико-химическое воздействие нефтепроводов на почву и воду, как правило, приводит к режиму трудновосстанавливаемого (и даже невосстанавливаемого) самоочищения.

### Литература

1. Сергеева А.Ю. Модели и методы управления строительными проектами с учетом экологической обстановки в регионе: дис. ... канд. техн. наук: Воронеж: 2004:212.
2. Латышенко, К.П. *Экологический мониторинг: учебник и практикум для вузов*. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Юрайт. 2025. 450. Доступно на: <https://urait.ru/bcode/560602> (дата обращения: 11 февраля 2025).
3. Куликова Е.Ю. *Подземная геоэкология мегаполисов: учебное пособие*. Горная книга Москва: 2005. 480 с. Доступно на: <https://e.lanbook.com/book/3242> (дата обращения: 20.02.2026).
4. Ефимов В.М. Ядрихинский И.В., Молдаванов О.И. Геотехнический мониторинг в ММГ как условие обеспечения инженерно-экологической безопасности промышленного освоения территории. Материалы XV Общероссийской научно-практической конференции «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». Москва: 2019.
5. Ядрихинский И.В. О значении фундаментальных исследований в решении глобальных экологических проблем. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2021;(4):106. DOI: 10.23670/IRJ.2021.106.4.030
6. Стурман, В. И. *Геоэкология*. 5-е изд., стер. Санкт-Петербург: Лань, 2023. 228. Доступно на: <https://e.lanbook.com/book/276458> (дата обращения: 22.02.2026).
7. Алиев, Р. А., Авраменко А.А., Е. Д. Базилева *Основы общей экологии и международной экологической политики: учебное пособие*. Москва: Аспект Пресс, 2014. 384. Доступно на: <https://e.lanbook.com/book/68658> (дата обращения: 22.02.2026).
8. Меркулов П. И. *Геоэкологический анализ этносоциоприродных процессов на территории этногенеза мордовского народа*. Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 2015:181.
9. Азимов Ю.И., Ахмадулина И.А., Биль О. Н. *Наука, образование, технологии в эпоху глобальной трансформации*. Петрозаводск: Новая наука, 2024:314.
10. Кашников В.И. Геоэкологический анализ техногенно-природных геосистем: на примере г. Воронежа: дис. ... канд. геогр. наук. Воронеж: 2007:177
11. Сурикова, Т.Б. *Экологический мониторинг: учебник*. 4-е изд., перераб. и доп. Старый Оскол: ТНТ. 2020. 344. Доступно на: <https://www.tnt-ebook.ru/library/book/211> (дата обращения: 17 февраля 2025).
12. Таранов Р.А. Марченко А.В., Особенности проектирования, строительства и эксплуатации магистральных нефтепроводов в зонах вечной мерзлоты, *Вестник науки и образования*. 2019:(12)66.
13. Царапов М.Н., Котов П.И. Свойства мерзлых грунтов при оттаивании *Путь и путевое хозяйство*. 2013:31–34.
14. Писаренко А.В. Обеспечение экологической безопасности безотказной работы экосистемы «человек-трубопровод-окружающая среда». В сборнике: *Безопасный и комфортный город*. Сборник научных трудов по материалам IV международной научно-практической конференции. 2020:490-492.

## References

1. Sergeeva A.Yu. Models and methods for managing construction projects taking into account the environmental situation in the region: diss. ... Cand. of Technical Sciences: Voronezh: 2004:212 (in Russian).
2. Latyshenko K.P. Environmental monitoring: textbook and workshop for universities. 3rd ed., revised. and expanded. Moscow: Yurayt; 2025. Available at: <https://urait.ru/bcode/560602> (accessed: 11 February 2025) (in Russian).
3. Kulikova E.Yu. Underground geocology of megacities: a study guide. Moscow: Gornaya kniga; 2005:480. Available at: <https://e.lanbook.com/book/3242> (accessed: 20 February 2026) (in Russian).
4. Efimov V.M., Yadrikhinsky I.V., Moldavanov O.I. In: *Geotechnical monitoring in MMG as a condition for ensuring engineering and environmental safety of industrial development of the territory: Proceedings of the XV All-Russian scientific and practical conference "Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation*. Moscow: 2019 (in Russian).
5. Yadrikhinsky I.V. On the importance of fundamental research in solving global environmental problems. *International Research Journal*. 2021;(4):106 (in Russian). DOI: 10.23670/IRJ.2021.106.4.030.
6. Sturman V.I. Geocology. St. Petersburg: Lan; 2023:228. Available at: <https://e.lanbook.com/book/276458> (accessed: 22 February 2026) (in Russian).
7. Aliev R.A., Avramenko A.A., Bazileva E.D. Fundamentals of general ecology and international environmental policy: a study guide. Moscow: Aspect Press; 2014:384. Available at: <https://e.lanbook.com/book/68658> (accessed: 22 February 2026) (in Russian).
8. Merkulov P.I. Geocological analysis of ethnosocionatural processes in the territory of ethnogenesis of the Mordvin people. Saransk: Publishing house of Mordovian University, 2015:181 (in Russian).
9. Azimov Yu.I., Akhmadullina I.A., Bil O.N. Science, education, and technology in the era of global transformation. Petrozavodsk: Novaya Nauka, 2024:314 (in Russian).
10. Kashnikov V.I. Geocological analysis of technogenic-natural geosystems: on the example of the city of Voronezh: diss. ... Cand. Geogr. Sciences. Voronezh: 2007:177 (in Russian).
11. Surikova T.B. Environmental monitoring: a textbook. 4th ed., revised and add. Stary Oskol: TNT; 2020. Available at: <https://www.tnt-ebook.ru/library/book/211> (accessed: 17 February 2025) (in Russian).
12. Taranov R.A., Marchenko A.V. Features of design, construction, and operation of trunk oil pipelines in permafrost zones. *Bulletin of Science and Education*. 2019;(12):66 (in Russian).
13. Tsarapov M.N., Kotov P.I. Properties of frozen soils during thawing. *Track and Track Facilities*. 2013:31–34 (in Russian).
14. Pisarenko A.V. Ensuring environmental safety and failure-free operation of the “human-pipeline-environment” ecosystem. In: *Safe and Comfortable City: Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference*. 2020:490–492 (in Russian).

## Сведения об авторах

**ЯДРИХИНСКИЙ Иван Васильевич** – к.г.н., доцент Института естественных наук СВФУ им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация, SPIN-код: 3493-9605, AuthorID: 747609

**ЕГОРОВА Туйаара Руслановна** – вед. спец. по промышленной и радиационной безопасности, АО «Алмазы Анабара», г. Якутск, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-7117-9218

**ВЛАСЕНКО Валентина Владимировна** – вед. спец. департамента по водным отношениям и регулированию рыболовства Министерства экологии, природопользования и лесного хозяйства Республики Саха (Якутия), г. Якутск, Российская Федерация

**ЕГОРОВА Саргылаана Руслановна** – студентка гр. Б-ТБ-22 ЭГО ИЕН СВФУ им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация

**ДЕНИСОВА Анастасия Андреевна** – студентка гр. Б-ТБ-22 ЭГО ИЕН СВФУ им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация

**ЗАХАРОВ Давид Григорьевич** – студент гр. Б-ТБ-22 ЭГО ИЕН СВФУ им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация

### About the authors

*Ivan V. YADRIKHINSKY* – Cand. Sci. (Geography), Associate Professor, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, SPIN-код: 3493-9605, AuthorID: 747609

*Tuiaara R. EGOROVA* – leading specialist in industrial and radiation safety, Almazy Anabara JSC, Yakutsk, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-7117-9218, SPIN-код: 5218-5617, e-mail: tuyaruslanovna@mail.ru  
e-mail: tuyaruslanovna@mail.ru

*Valentina V. VLASENKO* – leading specialist, Department of Water Relations and Fisheries Regulation, Ministry of Ecology, Nature Management and Forestry of the Sakha Republic (Yakutia), Yakutsk, Russian Federation

*Sargylaana R. EGOROVA* – student, Ecological and Geographical Department, Institute of Natural Sciences, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

*Anastasia A. DENISOVA* – student, Ecological and Geographical Department, Institute of Natural Sciences, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

*David G. ZAKHAROV* – student, Ecological and Geographical Department, Institute of Natural Sciences, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation.

### Вклад авторов

*Ядрихинский И.В.* – разработка концепции, методология, проведение исследования, анализ данных.

*Егорова Т.Р.* – верификация данных, анализ полученных данных, редактирование.

*Власенко В.В.* – проведение исследования

*Егорова С.Р.* – сбор данных

*Денисова А.А.* – сбор данных

*Захаров Д.Г.* – сбор данных.

### Authors' contribution

*Ivan V. Yadrikhinsky* – concept development, methodology, research implementation, data analysis.

*Tuiaara R. Egorova* – data verification, data analysis, editing

*Valentina V. Vlasenko* – research implementation

*Sargylaana R. Egorova* – data collection

*Anastasia A. Denisova* – data collection

*David G. Zakharov* – data collection.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Корреспондент имеет прав и полномочия выступать от имени всех авторов по этому исследованию.

### Conflict of interests

The authors declare no relevant conflict of interests. Corresponding author has the right and authority to speak on behalf of all authors on this study.

*Поступила в редакцию / Submitted 03.03.2026*

*Поступила после рецензирования / Revised 23.03.2026*

*Принята к публикации / Accepted 27.03.2026*

**Вестник Северо-Восточного федерального университета  
им. М.К. Аммосова.  
Vestnik of North – Eastern Federal University.  
Серия ”Науки о Земле. Earth Sciences”**

**Сетевое научное периодическое издание**

**№ 1(41) 2026**

*Технический редактор А.Н. Егорова  
Компьютерная верстка Л.М. Винокурова  
Оформление обложки П.И. Антипин*

Подписано в печать 30.03.2026. Формат 70x108/16.  
Дата выхода в свет 30.03.26.