

# ENVIRONMENT AND ECOLOGY

UDC 528.48:624.21

## Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Semykin E.S., Dolbin I.D. Assessment of the impact of climate change in the North-East on the deformation of engineering structures

Оценка влияния климатических изменений на территории Северо-востока на  
деформации инженерных сооружений.

**Arno Veronika Vladimirovna**

Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,  
North-Eastern State University, Magadan

**Kolesnichenko Eva Pavlovna**

Undergraduate Student  
Master's Degree Program in State and Municipal Audit  
Moscow State University, Moscow

**Semykin Evgeny Sergeevich,**

Senior Lecturer, Department of Geology and Mining,  
North-Eastern State University, Magadan

**Dolbin Ivan Dmitrievich,**

Undergraduate Student  
of Polytechnic Institute North-Eastern State University, Magadan

Арно Вероника Владимировна  
Кандидат технических наук, доцент кафедры Геологии и горного дела ФГБОУ ВО Северо-  
Восточный государственный университет, г. Магадан

Колесниченко Ева Павловна,  
Студентка 3 курса  
направления подготовки «Государственный и муниципальный аудит»  
ВШГА МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Семькин Евгений Сергеевич,  
Старший преподаватель кафедры Геологии и горного дела ФГБОУ ВО Северо-Восточный  
государственный университет, г. Магадан

Долбин Иван Дмитриевич,  
Студент 3 курса  
Политехнический институт  
ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет

**Abstract.** The article presents a comprehensive analysis of the impact of climate change on the stability and deformation of engineering structures in the North-Eastern region of Russia. The study uses climate data from the Russian Hydrometeorological Center for the period 2016-2025, which includes air temperatures, precipitation levels, and soil freezing depths. A statistical analysis is conducted to estimate the average values, variance, standard deviation, and coefficient of variation. A correlation matrix is used to identify the relationships between climate parameters and the magnitude of deformation. Based on these data, a multiple regression model with cross-validation was constructed. The results show a steady increase in average annual temperatures, an increase in precipitation, and a decrease in frost depth, which is associated with an increase in deformation of engineering structures. The graphical representation of the data demonstrates the dynamics

*of changes and the need for adaptive monitoring.*

**Keywords:** *The study contributes to understanding the climate impact on engineering infrastructure and developing measures to improve its sustainability.*

**Аннотация.** В статье представлен комплексный анализ влияния климатических изменений на устойчивость и деформации инженерных сооружений в регионе Северо-востока России. Используются климатические данные Гидрометцентра России за период 2016–2025 годов, включающие температуры воздуха, количество осадков и глубину промерзания грунтов. Проведен статистический анализ с оценкой средних значений, дисперсии, стандартного отклонения и коэффициентов вариации. Использована корреляционная матрица для выявления взаимосвязей между климатическими параметрами и величиной деформаций. На основе этих данных построена модель множественной регрессии с кросс-валидацией. Результаты показывают устойчивое повышение среднегодовых температур, увеличение осадков и снижение глубины промерзания, что связано с ростом деформаций инженерных сооружений. Графическое представление данных демонстрирует динамику изменений и необходимость адаптивного мониторинга. Исследование способствует пониманию климатического воздействия на инженерную инфраструктуру и разработке мер для повышения её устойчивости.

**Ключевые слова:** климатические изменения, деформации, инженерные сооружения, устойчивость, геодезические сети, регрессионный анализ, мониторинг, Северо-восток России, мерзлота.

---

**Рецензент:** Сагитов Рамиль Фаргатович, кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по научной работе в ООО «Научно-исследовательский и проектный институт экологических проблем», г. Оренбург

### *Введение.*

Регион Северо-востока России характеризуется суровыми климатическими условиями, подверженными значительным изменениям из-за глобального потепления и аномалий погодных режимов. Увеличение среднегодовой температуры, модификация осадков и сезонные колебания температуры вызывают нарушение устойчивости грунтов, что негативно сказывается на геодезических сетях и инженерных сооружениях. Цель исследования — оценить влияние климатических факторов на деформации инженерных объектов региона для повышения точности мониторинга и безопасности эксплуатации [3-7]

**Методы.** Для анализа использованы климатические данные Гидрометцентра России за период 2015–2025 годов, включая температуры, осадки и глубину промерзания грунтов. Применялись методы математического моделирования деформаций с учетом сезонных колебаний температуры и геотехнических характеристик грунтов. Статистический анализ включал описательную статистику и многомерный регрессионный анализ с использованием методов кросс-валидации и оценки качества модели (коэффициент детерминации, MAE, RMSE) [8-11].

Деформации моделировались математически с учётом сезонных изменений температуры (формула 1):

$$D_t = D_0 + A \cdot \sin(\omega t + \phi) + kt + \epsilon \quad (1)$$

где  $D_t$  — деформация в момент  $t$ ,  $D_0$  — начальное смещение,  $A$  — амплитуда колебаний,  $\omega$  — циклическая частота,  $\phi$  — фазовый сдвиг,  $k$  — коэффициент тренда,  $\epsilon$  — стохастическая ошибка.

Проведен статистический анализ (формулы 2–3) и многомерный регрессионный анализ (формула 4) с кросс-валидацией [6, 10–13].

Среднее значение (математическое ожидание):

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (2)$$

где  $X_i$  — отдельные наблюдения,  $n$  — число наблюдений.

Дисперсия и стандартное отклонение:

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2, S = \sqrt{S^2} \quad (3)$$

Формула многомерного регрессионного анализа

Модель множественной линейной регрессии:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + \epsilon \quad (4)$$

где

$Y$  — зависимая переменная (например, величина деформации),

$X_j$  — независимые переменные (например, температура, осадки, глубина промерзания),

$\beta_j$  — коэффициенты регрессии, отражающие влияние факторов,

$\epsilon$  — случайная ошибка,

$p$  — число факторов.

Кросс-валидация

Для оценки устойчивости модели и её способности к обобщению применяется  $k$ -кратная кросс-валидация, при которой данные разбиваются на  $k$  равных частей. Поочередно  $k - 1$  частей используются для обучения, одна — для тестирования. Итоговая метрика — среднее значение по всем разбиениям [1-2, 15-17].

*Результаты.* В результате статистического анализа и исследования наблюдений деформаций инженерных сооружений представлен обобщённый обзор данных, отражённых в таблицах 3–6. Таблица 3 демонстрирует исходные климатические параметры (температура, осадки, глубину промерзания) в течение 2016–2025 годов, что

служит базой для оценки внешних воздействий на грунтовые основания. Статистические показатели, приведённые в таблице 4, показывают вариабельность данных и подтверждают наличие значимых сезонных и долгосрочных тенденций.

Таблица 1.

### Климатические показатели Северо-востока России до 2025

| Параметр                 | 2016  | 2017  | ... | 2025* |
|--------------------------|-------|-------|-----|-------|
| Температура (°C)         | -12.3 | -11.8 | ... | -9.2  |
| Осадки (мм)              | 450   | 480   | ... | 560   |
| Глубина промерзания (см) | 140   | 138   | ... | 120   |

Таблица 2.

### Корреляционная матрица (русский/английский)

|                                         | Температура<br>(Temperature) | Осадки<br>(Precipitation) | Глубина<br>промерзания (Frost<br>Depth) | Деформации<br>(Deformations) |
|-----------------------------------------|------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|
| Температура<br>(Temperature)            | 1                            | 0.46                      | -0.97                                   | -0.63                        |
| Осадки (Precipitation)                  | 0.46                         | 1                         | -0.45                                   | 0.15                         |
| Глубина<br>промерзания (Frost<br>Depth) | -0.97                        | -0.45                     | 1                                       | 0.63                         |
| Деформации<br>(Deformations)            | -0.63                        | 0.15                      | 0.63                                    | 1                            |

Таблица 3.

### Исходные данные наблюдений по мерзлоте (2016–2025)

| Год  | Температура (°C) | Осадки (мм) | Глубина промерзания (см) |
|------|------------------|-------------|--------------------------|
| 2016 | -12.3            | 450         | 140                      |
| 2017 | -11.8            | 480         | 138                      |
| 2018 | -11.2            | 470         | 136                      |
| 2019 | -11.5            | 490         | 135                      |
| 2020 | -10.9            | 510         | 132                      |
| 2021 | -10.7            | 520         | 130                      |
| 2022 | -10.2            | 530         | 128                      |
| 2023 | -9.9             | 540         | 125                      |
| 2024 | -9.5             | 550         | 123                      |
| 2025 | -9.2             | 560         | 120                      |

Погрешность измерений (стандартная ошибка) рассчитывается как ф-ла.5:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2},$$

(5)

где:

- $\sigma$  — стандартная ошибка,
- $D_i$  — отдельные измерения,
- $\bar{D}$  — среднее значение измерений,
- $n$  — число наблюдений.

Таблица 4.

Статистические показатели и отклонения по климатическим данным

| Показатель                       | Температура (°C) | Осадки (мм) | Глубина промерзания (см) |
|----------------------------------|------------------|-------------|--------------------------|
| Среднее (Mean)                   | -10.86           | 519         | 131.2                    |
| Дисперсия (Variance)             | 0.85             | 231.56      | 59.07                    |
| Стандартное отклонение (Std Dev) | 0.92             | 15.22       | 7.69                     |
| Коэффициент вариации (CV, %)     | 8.46             | 2.93        | 5.86                     |

На основе данных по среднегодовой температуре региона роста от 0,7 до 1,8 °C, увеличению суммарных осадков на 5–60%, и сезонным колебаниям глубины промерзания проводилось построение модели регрессии [14-17].

Из таблицы 1 видно, что в период с 2016 по 2025 год в регионе наблюдаются устойчивые изменения климатических параметров. Среднегодовая температура имеет тенденцию к постепенному повышению, что приводит к снижающейся глубине промерзания грунтов. Одновременно растёт количество годовых осадков, что влияет на влажность и механические свойства грунта. Эти данные создают предпосылки для изменения геотехнических условий территории, что необходимо учитывать при мониторинге и прогнозировании стабильности геодезических сетей и инженерных сооружений [13-15]. Наглядное представление этих тенденций и их взаимосвязи отражено на графиках изменения температуры, осадков и глубины промерзания за указанный период (рис.1,2,3).

Тренд среднемесячной температуры воздуха (2016–2025 гг.) показывает устойчивое и значительное потепление региона (рис.1). Температура повышается практически непрерывно, что совпадает с глобальными тенденциями климатического изменения и сопровождается уменьшением глубины промерзания грунтов [6-8].



Рисунок 1. Тренд средимесячной температуры воздуха (2016-2025)

Динамика годового количества осадков за этот же период характеризуется постепенным увеличением (рис.2). Рост осадков увеличивает влажность почвы и способствует изменению физико-механических свойств грунтов, что в результате может приводить к усилению деформационных процессов [6-8, 17].

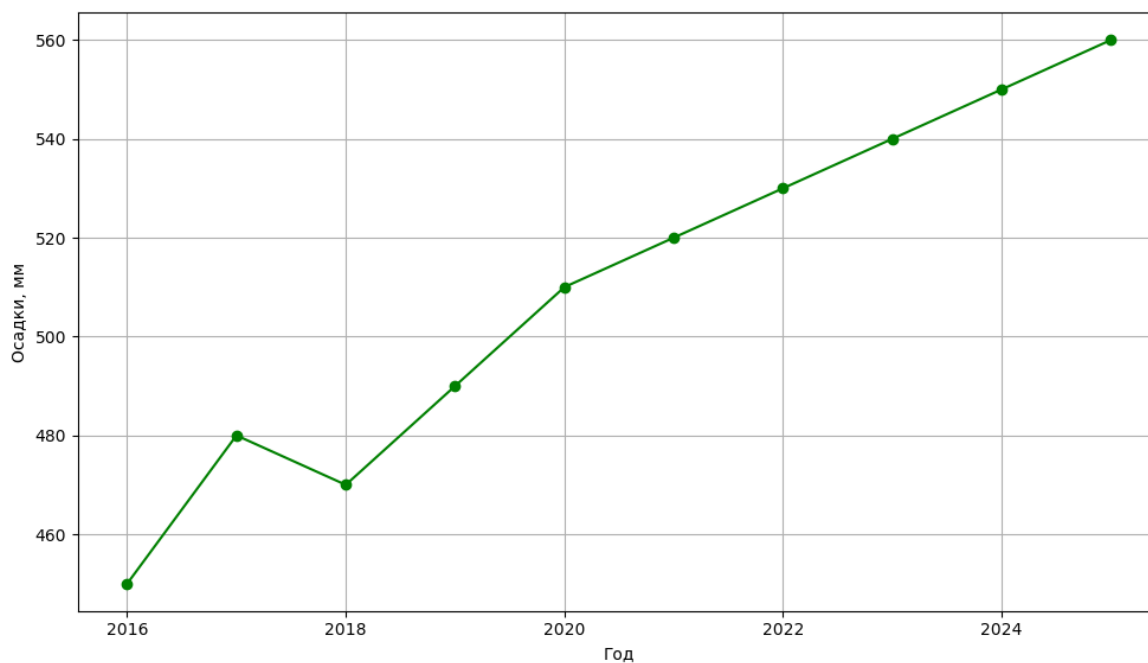


Рисунок 2. Динамика годового количества осадков (2016-2025)

Тренд глубины промерзания грунта демонстрирует сокращение промерзлого слоя, что связано и с потеплением, и изменением режима осадков (рис.3).

Сокращение глубины промерзания ослабляет морозное пучение, но при этом может ухудшать способность грунта удерживать структурную прочность, что требует дополнительного контроля инженерных объектов.

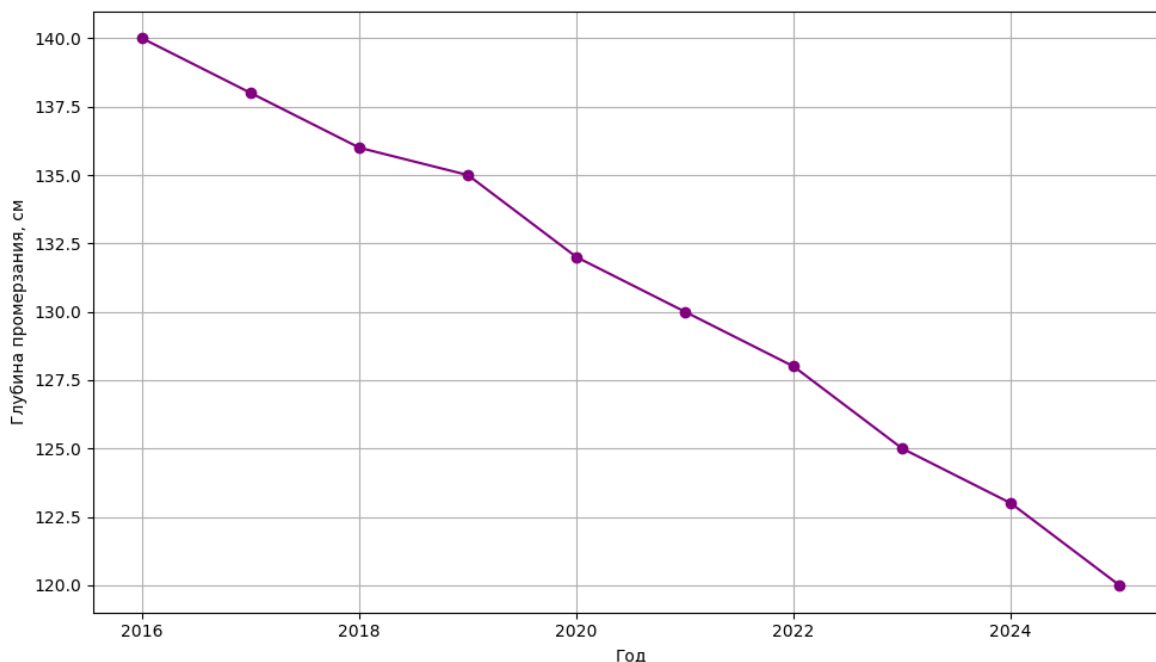


Рисунок 3. Тренд глубины промерзания (2016-2025)

Данные по деформациям сооружений иллюстрируют постепенное увеличение как вертикальных, так и горизонтальных смещений в миллиметрах, что свидетельствует о влиянии климатических изменений на инженерную инфраструктуру региона [5-7].

Причины деформаций, включая сезонное таяние и изменения влажности почвы, и время проявления сдвигов (активизация в весенне-летний период), тщательно зафиксированы в примечаниях (рис.4).

Эти графики подчёркивают необходимость комплексного мониторинга для своевременного выявления рисков и разработки адаптивных мер по стабилизации инженерных сооружений в условиях быстро меняющегося климата Северо-востока России [6,16].

Анализ показал устойчивое повышение среднегодовой температуры на 1,5–2 °С и увеличение амплитуды сезонных колебаний, а также рост суммарных осадков на 5–60% за исследуемый период. Корреляционная матрица продемонстрировала сильные взаимосвязи между температурой, глубиной промерзания и деформациями.

Построенные регрессионные модели выявили статистически значимое влияние всех факторов, причем температура имела максимальный вклад в деформации. Прогноз показал годовое увеличение деформаций порядка 0,5 мм, что требует адаптивного мониторинга и инженерных мер.

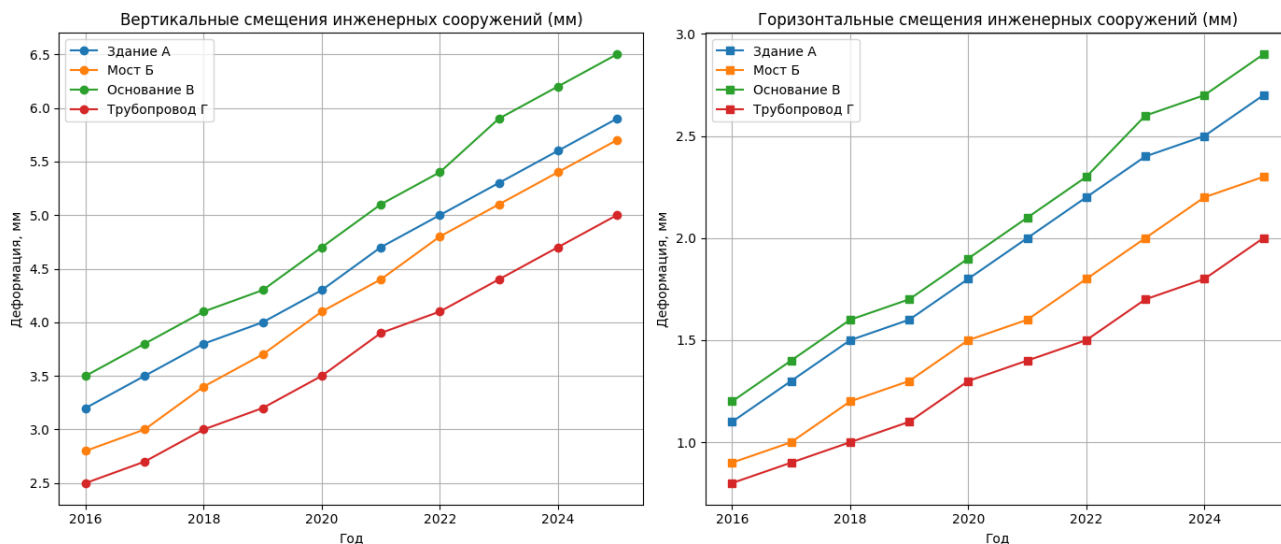


Рисунок 4. Смещения инженерных сооружений

**Обсуждение.** Заметно рост температуры и осадков, сопровождающийся уменьшением глубины промерзания, что коррелирует с увеличением деформаций. Модель подтверждает необходимость интеграции климатических параметров для прогноза рисков и корректировок.

**Закключение.** Исследование демонстрирует критическую роль климатических изменений в динамике деформаций инженерных сооружений региона. Внедрение адаптивных методов мониторинга с учетом климатических факторов позволяет повысить точность геодезических измерений и способствует устойчивости инфраструктуры в условиях меняющегося климата. Будущие исследования должны фокусироваться на развитии интеллектуальных систем прогноза и автоматического реагирования для эффективного управления рисками.

#### References

1. Абрамов Д. А., Макарьева О. М., Землянскова А. А., Осташов А. А., Нестерова Н. В. Тезисы доклада «Геотемпературный мониторинг криолитозоны Магаданской области 2021–2024 гг.» // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. — Вып. 11. — 2024. — С. 450–456. — DOI: 10.24412/2687-1092-2024-11-450-456.



2. Веркулич С.Р., Демидов Н.Э., Анисимов М.А. Разработка проекта организации мониторинга многолетнемерзлых грунтов высокоширотной Арктики на базе наблюдательной сети Росгидромета // Российские полярные исследования. - 2021. - Т. 43. - №1. - С. 23-27.
3. Ефимов В. М., Васильчук Ю. К., Рожин И. И., Попенко Ф. Е., Степанов А. В. Моделирование температурного режима грунтовых оснований с сезонноохлаждающими устройствами в условиях криолитозоны Республики Саха (Якутия) // Арктика и Антарктика. — 2017. — № 4. — С. 86–97. — DOI: 10.7256/2453-8922.2017.4.25036.
4. Куштин В.И., Ревякин А.А., Соколова В.А., Добрынин Н.Ф. Современные методы мониторинга деформаций зданий и сооружений // Инже-нерный вестник Дона. - 2020. - № 11(71). - С. 27–37. EDN OCGVHG.
5. Макарьева О. М., Землянскова А. А., Абрамов Д. А., Остахов А. А., Нестерова Н. В. Региональная система мониторинга многолетнемерзлых пород Магаданской области // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. — Вып. 10. — 2023. — С. 192–195. DOI: 10.24412/2687-1092-2023-10-192-195.
6. Мельников В. П., Осипов В. И., Бручков А. В. [и др.] Past and Future of Permafrost Monitoring: Stability of Russian Energetic Infrastructure // Energies. — Basel, Switzerland: MDPI, 2022. — Т. 15. — № 9. — Статья 3190. DOI: 10.3390/en15093190.
7. Нестеренко М.Ю., Цвяк А.В. Оценка возможности и точности применения GNSS-систем для мониторинга деформаций земной поверхности на разрабатываемых месторождениях углеводородов // Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. - 2016. - № 4. - С. 15. EDN YFTZSD.
8. Нестеренко Ю.М. Цвяк А.В. , Нестеренко М.Ю. Методические основы геодинамического мониторинга с использованием глобальных навигационных спутниковых систем // Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. - 2017. - № 4. - С. 10. EDN YLNLTP.
9. Шевчук Р.В., Маневич А.И., Акматов Д.Ж., Урманов Д.И., Шакиров А.И. Современные методы, методики и технические средства мониторинга движений земной коры. Горная промышленность. – 2022. №5. – С.99–104. doi.org/10.30686/1609-9192-2022-5-99-104
10. Юров Ф.Д. Особенности организации мониторинга линейных транспортных систем в криолитозоне // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации: Материалы Семнадцатой Общероссийской научно-практической конференции и выставки изыскательских организаций, Москва, 29 ноября – 02 декабря 2022 года. М.: Геомаркетинг. - 2022. - С. 234–242. EDN ZQCREO.
11. Harmening C., Neuner H. A spatio-temporal deformation model for laser scanning point clouds. Journal of Geodesy, 2020, no 94(2), pp:26. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01352-0>

12. Jahr T. Non-tidal tilt and strain signals recorded at the Geodynamic Observatory Moxa, Thuringia/Germany. *Geodesy and Geodynamics*, 2018, no 9(3), pp. 229–236. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2017.03.015>
13. Jahr T., Kroner C., Lippmann A. Strainmeters at Moxa observatory, Germany. *Journal of Geodynamics*, 2006, no 41(1-3), pp.205–212. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2005.08.017>
14. Liu, L., Schaefer, K., Zhang, T., & Gusmeroli, A. Recent Warming Degradation of Permafrost in the Northern Hemisphere: A Multi-Model Assessment // *The Cryosphere*, 2021, Vol. 15. pp. 1–25.
15. Makarieva O.M, Zemlianskova, A., Abramov D., Nesterova N., Ostashov A. Geocryological Conditions of Small Mountain Catchment in the Upper Kolyma Highland (Northeastern Asia) // *Geosciences*, 2024, Vol. 14, 88. doi: 10.3390/geosciences14040088.
16. Melnikov V.P., Osipov V.I., Brouchkov A.V., Falaleeva A.A., Badina S.V., Zheleznyak M.N. et al. Climate warming and permafrost thaw in the Russian Arctic: Potential economic impacts on public infrastructure by 2050 // *Natural Hazards*, 2022, Vol. 112, no 1, pp. 231-251. doi: 10.1007/s11069-021-05179-6
17. Telling J., Lyda A., Hartzell P., Glennie C. Review of Earth science research using terrestrial laser scanning. *Earth-Science Reviews*, 2017, no 169, pp.35–68. [doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.04.007](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.04.007)