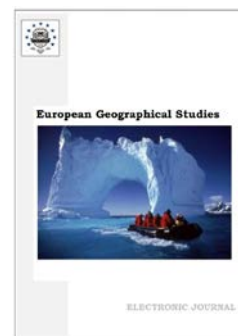


Copyright © 2025 by Cherkas Global University



Published in the USA
European Geographical Studies
Issued since 2013.
E-ISSN: 2413-7197
2025. 12(1): 57-61

DOI: 10.13187/egs.2025.1.57

<https://egs.cherkasgu.press>

Geoinformation Technologies as a Tool for Managing Natural and Economic Systems in the Cryolithozone: from the First Maps to Digital Doubles

Boris Yu. Krotenko ^{a, *}^a Lomonosov Moscow State University, Russian Federation

Abstract

The development of the Russian cryolithozone, which occupies 65 % of the country's territory, has historically been a daunting task. Against the background of rapid climate change and intensive economic development of the Arctic, the traditional risks associated with the melting of permafrost have become systemic and widespread. This article argues that it is modern geographic information systems (GIS) that are becoming the central technological solution for a paradigm shift from disaster management to proactive strategic management. The author examines in detail the evolution of GIS: from basic mapping to the development of complex “digital twins” of the territory. These dynamic models, integrating monitoring, survey, and climate forecast data, make it possible to simulate permafrost degradation processes in high detail, assess risks to critical infrastructure, and justify optimal spatial development solutions. The key conclusion of the article emphasizes that in order to ensure the long-term sustainability of vulnerable northern regions, deep integration of GIS platforms with artificial intelligence technologies is necessary, which will open up opportunities for predictive analytics and adaptive planning.

Keywords: cryolithozone, geographic information systems (GIS), management of natural and economic systems, digital mapping, permafrost degradation, spatial planning, sustainable development of the Arctic.

1. Введение

История освоения российских пространств к востоку от Урала – это история непрерывного диалога, а зачастую и сурового противостояния, с многолетнемёрзлыми породами. Ещё в XVIII–XIX веках первопроходцы и инженеры эмпирическим путём, ценой проб и ошибок, вырабатывали правила жизни в условиях вечной мерзлоты. Они заметили, что подпочвенный лёд «дышит» и двигается, что одни участки устойчивы, а другие проваливаются, и эти наблюдения ложились в основу первых примитивных карт и схем. Сегодня, когда на карту поставлены грандиозные национальные проекты – «Северный широтный ход», развитие Северного морского пути, освоение гигантских месторождений Арктики, – ставки неизмеримо возросли (*Современные технологии...*, 2025).

Площадь российской криолитозоны составляет колоссальные 65 % от территории страны – это около 11 миллионов квадратных километров, пространство, сравнимое с целым континентом. Климатические изменения действуют на этот регион как катализатор: по данным научного сообщества, средняя годовая температура верхних горизонтов мёрзлых

* Corresponding author

E-mail addresses: boriskrotenko78@gmail.com (B.Yu. Krotenko)

пород в Западной Сибири за последние 30–40 лет повысилась на 1,5–2 °С, а в некоторых районах Якутии граница мёрзлых пород отступила к северу на десятки километров. Последствия этого процесса не абстрактны: просадки грунта приводят к деформациям зданий в Норильске, Якутске и Воркуте; таяние подземных льдов угрожает устойчивости магистральных нефте- и газопроводов; активизация термокарста меняет ландшафты, делая их непроходимыми для техники и нарушая традиционные пути коренных народов. В этих условиях наследие «дедовских методов» и разрозненные данные уже не спасают. Требуется системный, всевидящий и прогнозирующий инструмент ([Цифровизация промышленности..., 2024](#)). Им становятся современные геоинформационные системы (ГИС), совершающие настоящую революцию в нашем восприятии и управлении криолитозоной.

2. Материалы и методы

Основу исследования составили комплексные методы сбора, интеграции и анализа пространственных данных, направленные на оценку состояния и прогноз развития природно-хозяйственных систем криолитозоны. Методологический подход был реализован в несколько последовательных этапов.

2.1. Сбор и подготовка исходных данных. Для создания аналитической базы были использованы разнородные источники:

- Геокриологические и инженерно-геологические данные: архивные материалы и результаты полевых обследований (данные термометрических скважин, параметры мерзлых пород, кадастр инженерно-геокриологических условий);
- Картографические материалы: тематические карты разного масштаба и времени создания (карты распространения и характеристики многолетнемерзлых пород, ландшафтные, топографические карты);
- Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ): многолетние ряды космических снимков среднего и высокого разрешения (Landsat, Sentinel-1/2), использованные для мониторинга динамики ландшафтов (термокарст, береговая абразия) и деформаций земной поверхности методом радарной интерферометрии (InSAR);
- Данные о хозяйственной деятельности: цифровые слои расположения и характеристик объектов инфраструктуры (населенные пункты, линейные сооружения, промышленные объекты), материалы территориального планирования;
- Климатические данные: реанализы (например, ERA5) и сценарии будущих изменений климата (модельные ряды CMIP6 для различных траекторий RCP/SSP).

2.2. Геоинформационное моделирование и анализ. Все собранные данные были систематизированы и интегрированы в единую геоинформационную среду на платформе ArcGIS Pro/QGIS. Ключевые аналитические процедуры включали:

- Пространственный анализ и наложение многослойных тематических покрытий для выявления корреляций и зонирования территории по степени риска;
- Статистический анализ временных рядов данных (температура воздуха и пород, деформации) для выявления трендов;
- Моделирование сценариев деградации мерзлоты с использованием упрощенных физико-математических моделей (например, на основе уравнения Стефана), инициируемых климатическими прогнозами;
- Оценка уязвимости инфраструктуры на основе пространственного пересечения карт прогнозируемых геокриологических процессов с расположением объектов.

2.3. Верификация моделей. Результаты моделирования и прогнозные карты рисков верифицировались путем сравнения с данными натурных наблюдений на реперных участках, а также с известными случаями аварийных ситуаций и деформаций (на примере объектов в Норильске, Воркуте, Якутске). Для анализа использовались как авторские полевые данные, так и материалы, представленные в научных публикациях и отчетах производственных организаций.

3. Обсуждение

Внедрение ГИС-технологий кардинально меняет парадигму управления. Мы наблюдаем переход от борьбы с последствиями к их интеллектуальному предупреждению ([Zhdanov, 2022](#)).

Для пространственного планирования. Выбор места под новый завод, порт или даже целый населённый пункт перестаёт быть лотереей. ГИС-анализ позволяет провести «ситовой отбор» территории, отбросив зоны с высокой льдистостью, активными криогенными процессами и низкой несущей способностью, и выделив наиболее стабильные и безопасные участки. Это позволяет сэкономить миллиарды рублей на будущих ремонтах и ликвидации аварий ([Кузык и др., 2023](#)).

Для эксплуатации инфраструктуры. Создаются «цифровые паспорта» и «цифровые двойники» критических объектов – мостов, эстакад, трубопроводов. В такой двойник в режиме, близком к реальному времени, поступают данные мониторинга (например, о деформациях опор). Система не просто фиксирует изменения, но и, используя заложенные модели, может сигнализировать: «Устойчивость опоры №47 достигла 80 % от критического значения, рекомендовано провести укрепление в течение 6 месяцев».

Для экономики и страхования. ГИС даёт возможность перевести риски из категории «форс-мажор» в категорию «просчитанная величина». Страховые компании могут использовать ГИС-карты рисков для точного калькулирования страховых премий для объектов в криолитозоне. Инвесторы получают инструмент для реалистичной оценки жизненного цикла проекта и потенциальных экологических издержек ([Кобзев и др., 2022](#)).

4. Результаты

Эволюцию методов можно проследить в трёх ключевых направлениях, где ГИС выступают центральным нервным узлом:

1. От статичной карты к динамическому многослойному полотну. Первые карты распространения вечной мерзлоты, созданные ещё основоположником российского мерзловедения Михаилом Сумгиным, были гениальным, но статичным обобщением. Современная ГИС – это живой, «дышащий» организм ([Цифровизация промышленности..., 2023](#)). Представьте себе виртуальную модель территории, на которую, как прозрачные кальки, нанесены десятки тематических слоёв: не только классическая топооснова, но и геокриологические данные (температура, мощность, льдистость), инженерно-геологические условия, расположение всей инфраструктуры, космические снимки разных лет, данные мониторинга деформаций и даже социально-экономические показатели. Возможность наложить слой распространения наледных процессов на карту автодорог или посмотреть, как менялась граница мёрзлых пород за 20 лет на фоне нового промышленного объекта, – это качественный скачок в аналитике.

2. От ретроспективного анализа к прогнозному моделированию. Самый мощный козырь ГИС – не в том, чтобы показать, что уже произошло, а в том, чтобы смоделировать, что может произойти. Используя климатические прогнозы (например, по модели RCP 8.5), ГИС позволяет рассчитать, как будет повышаться температура мёрзлых пород в ближайшие 50 лет, и, что критически важно, к каким последствиям это приведёт. Можно создать «карту рисков» просадки фундаментов для всего города, рассчитать вероятность образования нового термокарстового озера вблизи ключевого объекта инфраструктуры или спрогнозировать изменение несущей способности грунтов под взлётно-посадочной полосой. Яркий пример – история с Норильской ТЭЦ-3, где предварительный ГИС-анализ мог бы выявить риски протавивания под резервуаром и предотвратить масштабную аварию.

3. От точечных измерений к сплошному космическому мониторингу. Гляциологи и мерзловеды десятилетиями проводили в полевых условиях, бури скважины и закладывая термометрические станции. Их труд бесценен, но он даёт информацию лишь в точках. Сегодня на помощь приходят технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Радарная интерферометрия (технология InSAR) со спутников позволяет с сантиметровой точностью отслеживать вертикальные смещения земной поверхности на площадях в тысячи квадратных километров. Данные со спутников серий Landsat и Sentinel позволяют наблюдать динамику береговой линии, зарастание озёр, смещение границ тундры и леса. Всё это «сырьё» поступает в ГИС, где обрабатывается, анализируется и превращается в готовые продукты для принятия решений ([Топ-10 трендов цифровизации, 2023](#)).

5. Заключение

Таким образом, геоинформационные системы – это уже не просто вспомогательный софт для картографов, а становой хребет новой философии управления северными и арктическими территориями. Они позволяют увидеть невидимое: скрытые под землёй линзы льда, медленные, но неумолимые движения грунта, будущие очаги разрушений (Поняева и др., 2024). Синтез ГИС с технологиями искусственного интеллекта для автоматического анализа снимков и Big Data для обработки гигантских массивов климатической информации открывает следующую ступень – создание «Цифрового двойника Российской криолитозоны». Это будет общедоступная платформа, где учёные, инженеры, градостроители и чиновники смогут совместно моделировать сценарии развития, минимизируя ущерб для хрупкой арктической природы и обеспечивая устойчивое и безопасное будущее для уникальных российских регионов, стоящих на ледяном фундаменте. Этот путь от наскальных рисунков первопроходцев к цифровым двойникам – наглядное свидетельство того, как знание и технологии позволяют человеку не покорять природу, а находить с ней разумный и устойчивый компромисс.

Литература

Кобзев и др., 2022 – Кобзев В.В., Бабкин А.В., Скоробогатов А.С. Цифровая трансформация промышленных предприятий в условиях новой реальности // *π-Economy*. 2022. Т. 15. № 5. С. 7-27.

Кузык и др., 2023 – Кузык М.Г., Симачев Ю.В., Федюнина А.А., Сергеева К.П. Цифровизация компаний как фактор адаптации к коронавирусу и санкционному шоку // *Российский журнал менеджмента*. 2023. Т. 21. № 4. С. 481-513.

Поняева и др., 2024 – Поняева И.И., Кукушкин К.В., Рождественский О.И., Бабкин А.В. Стратегическое управление организацией в условиях цифровой трансформации: основные тенденции // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Менеджмент*. 2024. Т. 18. № 1. С. 45-67.

Современные технологии..., 2025 – Современные технологии в промышленности: как автоматизация, роботизация и цифровизация меняют производство / GDPQuadrat. 2025. [Электронный ресурс]. URL: <https://gdpquadrat.ru/modern-technologies-industry> (дата обращения: 21.10.2025).

Топ-10 трендов цифровизации, 2023 – Топ-10 трендов цифровизации / Vedomosti.ru при поддержке «Ростелекома». 2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vedomosti.ru/technology/articles/2023/11/15/top-10-trends-digitalization> (дата обращения: 21.10.2025).

Цифровизация промышленности..., 2024 – Цифровизация промышленности – тренды и проблемы российского рынка / Skolkovo-resident.ru. 2024. [Электронный ресурс]. URL: <https://skolkovo-resident.ru/digitalization-trends-problems> (дата обращения: 21.10.2025).

Цифровизация промышленности..., 2023 – Цифровизация промышленности как главный драйвер развития экономики России / MGPU-Media. 2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://mgpu-media.ru/digitalization-industrial> (дата обращения: 21.10.2025).

Zhdanov, 2022 – Zhdanov D. Digitalization of domestic manufacturing companies: status and prospects // *Economics of Contemporary Russia*. 2022. Vol. 25. No. 2. Pp. 127-141.

References

Kobzev i dr., 2022 – Kobzev, V.V., Babkin, A.V., Skorobogatov, A.S. (2022). Tsifrovaya transformatsiya promyshlennykh predpriyatii v usloviyakh novoi real'nosti [Digital transformation of industrial enterprises in the new reality]. *π-Economy*. 15(5): 7-27. [in Russian]

Kuzyk i dr., 2023 – Kuzyk, M.G., Simachev, Yu.V., Fedyunina, A.A., Sergeeva, K.P. (2023). Tsifrovizatsiya kompanii kak faktor adaptatsii k koronavirusnomu i sanktsionnomu shokam [Digitalization of companies as a factor in adaptation to the coronavirus and sanctions shocks]. *Rossiiskii zhurnal menedzhmenta*. 21(4): 481-513. [in Russian]

Ponyaeva i dr., 2024 – Ponyaeva, I.I., Kukushkin, K.V., Rozhdestvenskii, O.I., Babkin, A.V. (2024). Strategicheskoe upravlenie organizatsiei v usloviyakh tsifrovoi transformatsii: osnovnye tendentsii [Strategic management of an organization in the context of digital transformation: main trends]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Menedzhment*. 18(1): 45-67. [in Russian]

Sovremennye tekhnologii..., 2025 – Sovremennye tekhnologii v promyshlennosti: kak avtomatizatsiya, robotizatsiya i tsifrovizatsiya menyayut proizvodstvo [Modern technologies in industry: how automation, robotics and digitalization are changing production]. GDPQuadrat. 2025. [Electronic resource]. URL: <https://gdpquadrat.ru/modern-technologies-industry> (date of access: 21.10.2025). [in Russian]

Top-10 trendov tsifrovizatsii, 2023 – Top-10 trendov tsifrovizatsii [Top-10 digitalization trends]. Vedomosti.ru pri podderzhke «Rostelekoma». 2023. [Electronic resource]. URL: <https://www.vedomosti.ru/technology/articles/2023/11/15/top-10-trends-digitalization> (date of access: 21.10.2025). [in Russian]

Tsifrovizatsiya promyshlennosti..., 2023 – Tsifrovizatsiya promyshlennosti kak glavnyi draiver razvitiya ekonomiki Rossii [Digitalization of industry as the main driver of the Russian economy's development]. MGPU-Media. 2023. [Electronic resource]. URL: <https://mgpu-media.ru/digitalization-industrial> (date of access: 21.10.2025). [in Russian]

Tsifrovizatsiya promyshlennosti..., 2024 – Tsifrovizatsiya promyshlennosti – trendy i problemy rossiiskogo rynka [Digitalization of industry – trends and problems of the Russian market]. Skolkovo-resident.ru. 2024. [Electronic resource]. URL: <https://skolkovo-resident.ru/digitalization-trends-problems> (date of access: 21.10.2025). [in Russian]

Zhdanov, 2022 – Zhdanov, D. (2022). Digitalization of domestic manufacturing companies: status and prospects. *Economics of Contemporary Russia*. 25(2): 127-141.

Геоинформационные технологии как инструмент управления природно-хозяйственными системами в криолитозоне: от первых карт к цифровым двойникам

Борис Юрьевич Кротенко ^{a, *}

^aМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Российская Федерация

Аннотация. Освоение российской криолитозоны, занимающей 65 % территории страны, исторически было сложнейшей задачей. На фоне стремительного изменения климата и интенсивного хозяйственного освоения Арктики традиционные риски, связанные с таянием вечной мерзлоты, стали системными и масштабными. В данной статье утверждается, что именно современные геоинформационные системы (ГИС) становятся центральным технологическим решением для смены парадигмы – от ликвидации последствий к упреждающему стратегическому управлению. Автор детально рассматривает эволюцию ГИС: от базового картографирования до разработки комплексных «цифровых двойников» территории. Эти динамические модели, интегрирующие данные мониторинга, изысканий и климатических прогнозов, позволяют с высокой детализацией имитировать процессы деградации мерзлоты, проводить оценку рисков для критической инфраструктуры и обосновывать оптимальные решения по пространственному развитию. Ключевой вывод статьи подчеркивает, что для обеспечения долгосрочной устойчивости уязвимых северных регионов необходима глубокая интеграция платформ ГИС с технологиями искусственного интеллекта, что открывает возможности для предиктивной аналитики и адаптивного планирования.

Ключевые слова: криолитозона, геоинформационные системы (ГИС), управление природно-хозяйственными системами, цифровое картографирование, деградация многолетнемерзлых пород, пространственное планирование, устойчивое развитие Арктики.

* Корреспондирующий автор

Адреса электронной почты: boriskrotenko78@gmail.com (Б.Ю. Кротенко)