

ОСНОВЫ РАЗВИТИЯ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО И ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГОВ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ И АКВАТОРИИ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

А.Г. АЛЕКСЕЕВ^{1*}, д-р техн. наук

В.Г. КРЮЧКОВ², д-р экон. наук

М.Н. ЖЕЛЕЗНЯК³, член-корреспондент РАН, д-р геол.-минерал. наук

Л.И. ЛОБКОВСКИЙ^{4, 5, 6}, академик РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор

И.П. СЕМИЛЕТОВ^{7, 8, 9}, член-корреспондент РАН, д-р геогр. наук

¹ ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Ярославское шоссе, д. 26, г. Москва, 129337, Российская Федерация

² АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, г. Москва, 109428, Российская Федерация

³ Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, ул. Мерзлотная, д. 36, г. Якутск, 677010, Российская Федерация

⁴ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Нахимовский пр-т, д. 36, г. Москва, 117997, Российская Федерация

⁵ Научно-технологический университет «Сириус», Олимпийский пр-т, д. 1, Федеральная территория «Сириус», 354349, Российская Федерация

⁶ Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, ул. Профсоюзная, д. 84/32, г. Москва, 117997, Российская Федерация

⁷ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, ул. Балтийская, д. 43, Приморский край, г. Владивосток, 690041, Российская Федерация

⁸ Национальный исследовательский Томский государственный университет, проспект Ленина, д.36, Томская область, г. Томск, 634050, Российская Федерация

⁹ Институт экологии, Высшая школа экономики, Покровский бульвар, д. 11, г. Москва, 109028, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Статья посвящена мониторингу состояния многолетнемерзлых грунтов в Арктической зоне Российской Федерации. Интенсивное освоение Арктики в совокупности с изменением климата приводят к деградации мерзлоты и снижению устойчивости сооружений в данном регионе. Указываются высокие темпы повышения температуры воздуха и грунтов прибрежной зоны и акватории Северного морского пути.

Цель. Анализ состояния системы мониторинга вечной мерзлоты и предложения по созданию системы геотехнического и экологического мониторингов прибрежной зоны и акватории Северного морского пути.

Материалы и методы. В статье приведены основные аспекты проведения геотехнического мониторинга: оценка, контроль и прогноз теплового состояния вечноммерзлых грунтов и оценка несущей способности фундаментов инженерных сооружений.

Результаты. Отмечается несистемный подход к мониторингу мерзлых грунтов несмотря на имеющуюся нормативную базу и техническое обеспечение. Указывается необходимость создания комплексной системы государственного мониторинга.

Выводы. Обосновывается необходимость проведения фонового мониторинга экологических и климатических последствий деградации наземной и подводной мерзлоты. Даются рекомендации по мониторингу в ключевых районах наземной мерзлоты, включая прибрежную Арктическую зону и подводную мерзлоту в прибрежной зоне и на акватории Северного морского пути.

Ключевые слова: многолетнемерзлые грунты, Северный морской путь, геотехнический, экологический мониторинг, фоновый мониторинг, подводная мерзлота, прибрежная Арктическая зона

Для цитирования: Алексеев А.Г., Крючков В.Г., Железняк М.Н., Лобковский Л.И., Семилетов И.П. Основы развития геотехнического и экологического мониторингов прибрежной зоны и акватории Северного морского пути // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2026. № 2(49). С. 105–122. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2\(49\)-105-122](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2(49)-105-122) EDN: IURBNV

Вклад авторов

А.Г. Алексеев – разработка концепции и методологии исследования, корректировка материала.

В.Г. Крючков – сбор и анализ данных.

М.Н. Железняк – редактирование и корректировка материала.

Л.И. Лобковский – принятие ключевых решений, лежащих в основе исследования.

И.П. Семилетов – написание текста статьи.

Финансирование

Статья не имела стороннего финансирования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 15.01.2026

Поступила после рецензирования 27.02.2026

Принята к публикации 05.03.2026

FUNDAMENTALS OF THE DEVELOPMENT OF GEOTECHNICAL AND ENVIRONMENTAL MONITORING OF THE COASTAL ZONE AND THE WATER AREA OF THE NORTHERN SEA ROUTE

A.G. ALEKSEEV¹, Dr. Sci. [Engineering]

V.G. KRYUCHKOV², Dr. Sci. [Economy]

M.N. ZHELEZNYAK³, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. [Geology and Mineralogy]

L.I. LOBKOVSKY^{4, 5, 6}, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. [Physico-Mathematical], Professor

I.P. SEMILETOV^{7, 8, 9}, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. [Geography]

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation

² JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, Moscow, 109428, Russian Federation

³ Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Merzlotnaya str., 36, Yakutsk, 677010, Russian Federation

⁴ Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Nakhimovsky Prospekt, 36, Moscow, 117997, Russian Federation

⁵ Sirius University of Science and Technology, Olimpiyskiy Prospekt, 1, Federal Territory of Sirius, 354349, Russian Federation

⁶ Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics Russian Academy of Sciences, Profsoyuznaya st., 84/32, Moscow, 117997, Russian Federation

⁷V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, Baltiyskaya str., 43, Primorsky Krai, Vladivostok, 690041, Russian Federation

⁸National Research Tomsk State University, Lenina street, 36, Tomsk, 634050, Russian Federation

⁹Institute of Ecology, Higher School of Economics, Pokrovskii street, Moscow, 109028, Russian Federation

Abstract

Introduction. The article is devoted to monitoring the condition of permafrost soils in the Arctic zone of the Russian Federation. Intensive development of the Arctic combined with climate change leads to permafrost degradation and reduced stability of structures in the region. High rates of temperature drop in the air and soil of the coastal zone and the water area of the Northern Sea Route are indicated.

Aim. Analysis of the state of the permafrost monitoring system and proposals for the creation of a system of geotechnical and environmental monitoring of the coastal zone and the water area of the Northern Sea Route.

Materials and methods. The article presents the main aspects of geotechnical monitoring: assessment, control and forecast of the thermal condition of permafrost soils and assessment of the bearing capacity of foundations of engineering structures.

Results. There is an unsystematic approach to monitoring frozen soils, despite the existing regulatory framework and technical support. The necessity of creating a comprehensive system of state monitoring is indicated.

Conclusions. The necessity of background monitoring of the ecological and climatic consequences of the degradation of terrestrial and underwater permafrost is substantiated. Recommendations are given on monitoring in key areas of ground permafrost, including the coastal Arctic zone and underwater permafrost in the coastal zone and in the waters of the Northern Sea route.

Keywords: permafrost soils, Northern Sea route, geotechnical, environmental monitoring, background monitoring, underwater permafrost, coastal Arctic zone

For citation: Alekseev A.G., Kryuchkov V.G., Zheleznyak M.N., Lobkovsky L.I., Semiletov I.P. Fundamentals of the development of geotechnical and environmental monitoring of the Coastal zone and the water area of the Northern Sea route. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*, 2026, no. 2(49), pp. 105–122. (In Russian) [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2\(49\)-105-122](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2(49)-105-122) EDN: IURBNV

Funding

The study had no sponsorship.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Authors contribution statement

A.G. Alekseev – development of the research concept and methodology, correction of the material.

V.G. Kryuchkov – data collection and analysis.

M.N. Zheleznyak – editing and correction of the material.

L.I. Lobkovsky – making key decisions underlying the research.

I.P. Semiletov – writing the text of the article.

Received 15.01.2026

Revised 27.02.2026

Accepted 05.03.2026

Введение

Изменение климата, которое отмечается в последнее время, существенным образом сказывается на температурном состоянии вечной мерзлоты, в том числе в акватории Северного морского пути. Согласно климатическим исследованиям, в север-

ных широтах Западной Сибири начиная с 1970-х годов были зарегистрированы темпы повышения температуры мерзлых пород в диапазоне от 0,05 до 0,07 °C/год [1]. Ряд исследований, посвященных проблемам мониторинга вечной мерзлоты в Западной и Восточной Сибири [2, 4, 5, 6, 7] и др., показывает наличие устойчивого тренда потепления климата, что приводит к усилению деформаций поверхности почв в зоне распространения вечной мерзлоты. Это особенно актуально для нашей страны, где около 70 % территории содержит многолетнемерзлые породы (далее – мерзлота) в различных формах, а в морях Восточной Арктики (Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское) и в Карском море содержится более 80 % всей подводной мерзлоты на планете, а также огромные запасы углеводородов, включая газовые гидраты [8, 9, 10, 11]. Следовательно, устойчивое социально-экономическое развитие большей части территории РФ в будущем можно спрогнозировать, применяя научно обоснованные рекомендации, которые могут быть разработаны на основе развития геотехнического и экологического мониторингов мерзлоты в арктической системе «суша–шельф». Для этого необходимо проведение хорошо организованных, высокотехнологичных комплексных исследований, направленных на изучение климатических и экологических последствий деградации мерзлоты, которые приводят к **опасным природным явлениям – георискам**, а также к серьезным социально-экономическим последствиям.

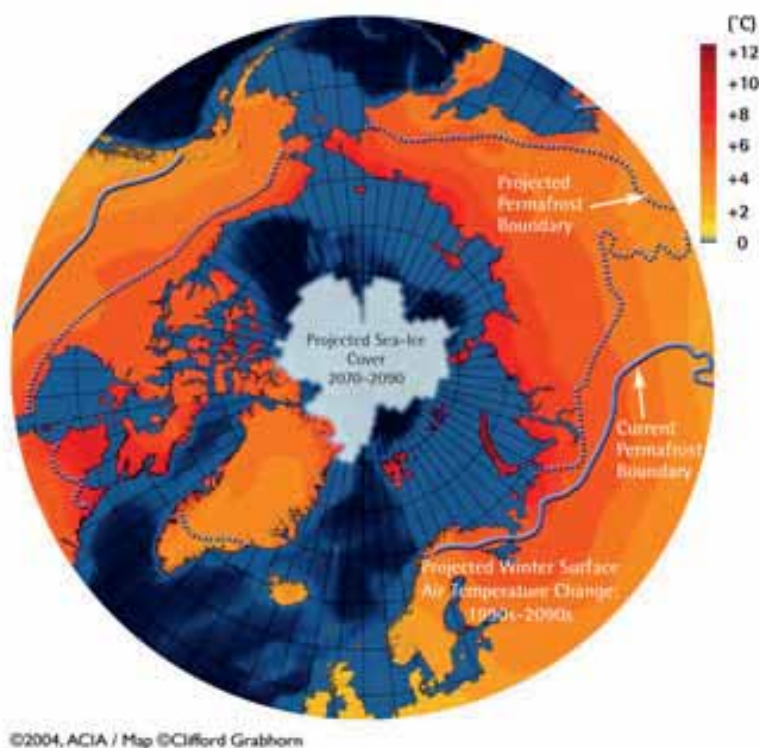


Рис. 1. Предполагаемые изменения в криосфере Северного полушария, 1990–2090 гг. [12]
Fig. 1. Estimated changes in the cryosphere of the Northern Hemisphere, 1990–2090 [12]

Согласно авторитетным экспертным оценкам [12] предполагается, что к 2090 году площадь мерзлоты в Российской Федерации уменьшится примерно в 2 раза, что приведет

Результаты наблюдений свидетельствуют о том, что этот прогнозный сценарий начинает выполняться намного более высокими темпами: потепление климата уже составило около 2,8 °C (1970–2018 гг.) [14]. Более того, показано, что деградация мерзлоты вызвала активное развитие растительного покрова и смещение границ биоклиматических зон к северу на 30–40 км (1975–2018 гг.), а среднегодовая температура наземной мерзлоты на глубине 10–12 м увеличивается со скоростью от 0,03 до 0,06 °C/год, что близко к тренду повышения температуры воздуха от 0,05 до 0,07 °C/год в регионе Западной Сибири [1].

Повышение температуры приводит к деградации вечномёрзлых грунтов, что обуславливает развитие опасных геокриологических процессов, таких как термокарст, термоэрозия, термоабразия, солифлюкция, морозное пучение и других процессов. Оттаивание мерзлых грунтов приводит к снижению несущей способности оснований зданий и сооружений их деформированию и разрушению [5, 15, 16, 18, 20, 21]. Особую опасность для инфраструктуры представляют процессы береговой эрозии речных и морских берегов, сложенных ледовым комплексом (рис. 2).



Fig. 2. Permafrost degradation is the main factor of destabilization of the socio-economic development of the cryolithozone of the Russian Federation [42]

Строительная нормативная база (СП 25.13330, СП 305.13330, СП498.13330 и др.) регламентирует нормы и правила выполнения геотехнического мониторинга на стадии строительства и эксплуатации. Несмотря на достаточно детальную проработку требований к мониторингу в нормах, следует отметить низкое качество выполнения геотехнического мониторинга, несоблюдение периодичности и точности измерения, неверное расположение контролируемых параметров и др. Зачастую мониторинг полностью не выполняется, особенно в жилых и гражданских зданиях. Получаемые данные не анализируются, проводится прогноз изменений контролируемых параметров с учетом результатов мониторинга.

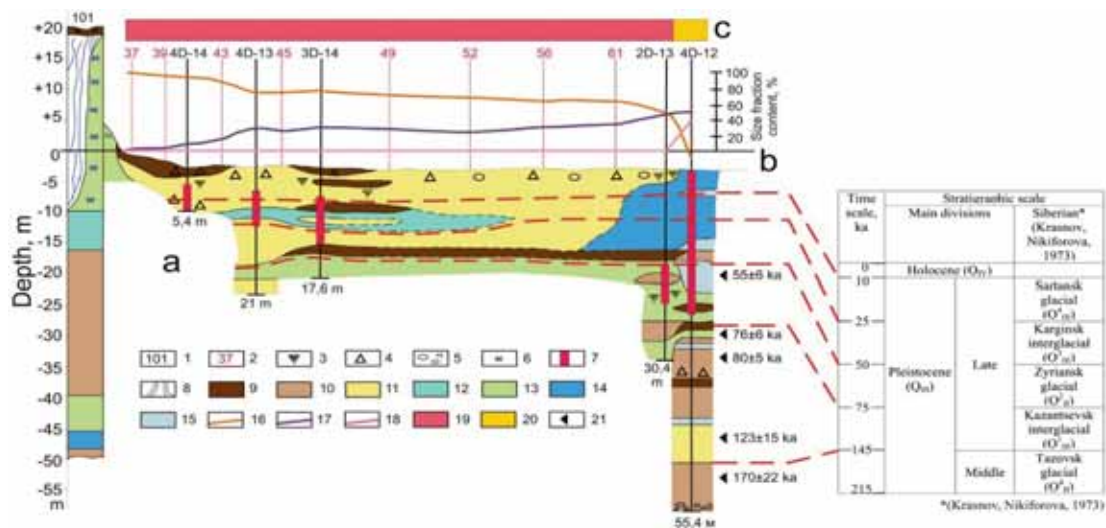


Рис. 3. Дegradaция подводной мерзлоты прогрессирует со скоростью до 18 см в год – во много раз выше, чем было принято считать [24]

Fig. 3. The degradation of permafrost is progressing at a rate of up to 18 cm per year, many times higher than previously though [24]

Мониторинг геотехнической и экологической обстановки в акватории Северного морского пути не нормируется и практически не проводится. Наблюдения за геокриологической обстановкой акватории проводится фрагментарно и в большинстве случаев базируется на энтузиазме ученых и разовых грантах [24, 25]. Необходимость в периодических исследованиях в режиме фонового мониторинга можно проиллюстрировать рис. 3, из рассмотрения которого следует, что скорости реальной вертикальной деградации подводной мерзлоты во много раз выше тех, что теоретически предсказаны на основе математического моделирования. Более того, было задокументировано увеличение скорости вертикальной деградации подводной мерзлоты в два раза за последние 30 лет [10, 24, 36]. Важнейшей характерной особенностью подводной мерзлоты акватории Северного морского пути стало обнаружение близости к фазовому переходу [10, 24], что можно проиллюстрировать данными научного бурения (рис. 4).

Не выполняется мониторинг опасных геокриологических процессов и прогнозы изменения мерзлотных условий, также не выполняется составление геокриологических карт. Тем не менее многолетние экспедиционные комплексные исследования состояния подводной мерзлоты на арктическом шельфе РФ показали, что одним из наиболее перспек-

тивных методов картирования кровли подводной мерзлоты является электромагнитное профилирование, реализованное в различных летних и зимних модификациях с буксировкой излучающих и принимающих антенн или в стационарном режиме в море или на льду с раскладыванием петель на неровных поверхностях, например, на припайном льду или в районах ледовых комплексов и аласов [26, 27].

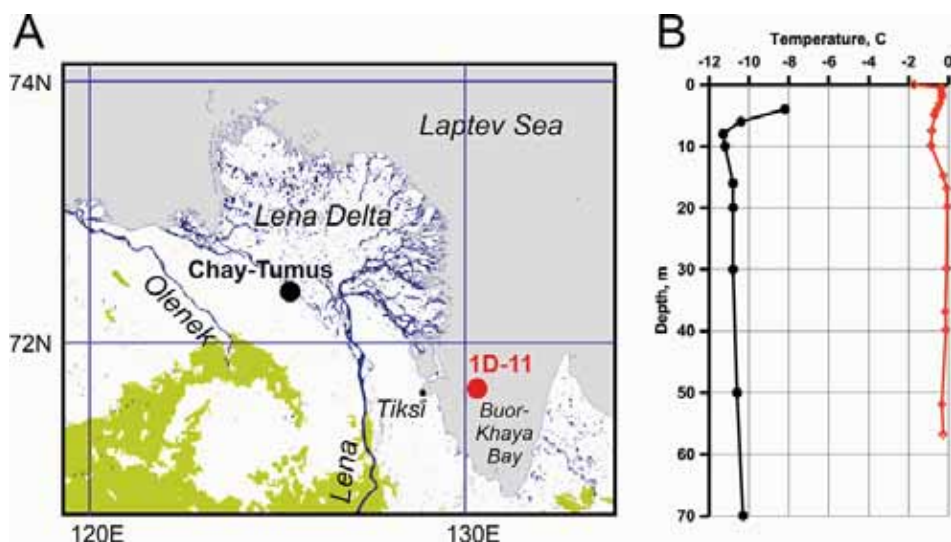


Рис. 4. Подводная мерзлота примерно на 10 °С теплее наземной мерзлоты и характеризуется наличием глубоких или сквозных таликов – путей разгрузки глубинного метана [10]

Fig. 4. The underwater permafrost is about 10 °C warmer than the ground permafrost and is characterized by the presence of deep or through taliks – ways of unloading deep methane [10]

Создание системы мониторинга

Глобальное потепление климата приводит к изменению температурного режима вечномёрзлых грунтов, имеющих в своем составе лед, газогидраты, флюиды, органические вещества, соли и микроорганизмы. Оценка и количественный прогноз изменения данных компонент является важной хозяйственной задачей.

Изменения, происходящие в криолитозоне при антропогенном и природном воздействиях приводят к развитию негативных для вечной мерзлоты и инженерных сооружений процессов. Оценка, наблюдения, прогноз и контроль данных явлений должны осуществляться с помощью геоэкологического и экологического мониторингов. Учитывая значимость, широту и межотраслевую кооперацию, мониторинг должен иметь государственное управление.

Государственный мониторинг вечной мерзлоты – межведомственная система наблюдений и сбора данных, анализ изменения и прогноз состояния контролируемых параметров вечной мерзлоты в природных условиях (фоновый мониторинг) и инженерных зданий и сооружений (геотехнический мониторинг).

Целью геотехнического мониторинга криолитозоны является:

- оценка, контроль и прогноз теплового состояния вечномёрзлых грунтов;
- оценка несущей способности и деформационного состояния фундаментов инженерных сооружений;

- обеспечение промышленной и экологической безопасности объектов промышленного, гражданского и жилищного строительства, транспортных систем на территории арктической криолитозоны страны, включая мелководную зону шельфа северных морей;
- предотвращение и ликвидация медико-биологических угроз в Арктике;
- предотвращение аварийных ситуаций, связанных с пузырьковыми выбросами метана газогидратов, включая геофизический мониторинг, уже обнаруженных подводных бугров пучения и образования взрывных кратеров с линейными размерами до 200 метров и более [10];
- информационное обеспечение государственных структур, органов местного самоуправления и граждан информацией о состоянии вечной мерзлоты в Арктической зоне РФ.

Основные задачи мониторинга криолитозоны:

- замеры величин контролируемых параметров, наблюдения, сбор, обработка и анализ данных о состоянии криолитозоны;
- оценка состояния температурно-влажностного режима криолитозоны и прогнозирование его изменений;
- своевременное выявление и прогнозирование развития природных и техногенных процессов, влияющих на состояние криолитозоны;
- разработка эффективных мероприятий по предотвращению или снижению негативного воздействия опасных геокриологических процессов на осваиваемой площадке;
- своевременное информирование органов власти, организаций, субъектов хозяйственной деятельности и граждан об изменениях состояния криолитозоны;
- межведомственное взаимодействие и международное сотрудничество в сфере обмена информацией по экологически безопасному природопользованию в Арктике.

Геотехнический мониторинг

В районах распространения многолетнемерзлых грунтов мониторинг должен проводиться для всех видов зданий и сооружений, в том числе подземных инженерных коммуникаций, согласно СП 25.13330 [5]. Мониторинг на стадии строительства и дальнейшей эксплуатации сооружений выполняется на основании программы мониторинга, который является обязательной частью проектной документации на стадии проекта. Для осуществления мониторинга в период строительства сооружений оборудуются контрольные термометрические и гидрогеологические скважины, на фундаментах сооружений устанавливаются постоянные геодезические марки, по которым выполняются измерения температуры грунта, уровень подземных вод, их состав и температура, замеры деформаций фундаментов. Дополнительно могут контролироваться: температура воздуха в проветриваемом подполье, работоспособность искусственной вентиляции, сезонно или искусственно охлаждающих устройств, высота и плотность снежного покрова, влажность и плотность грунтов, уложенных в насыпях, при замене грунтов в выемках и при намыве территории. Устройство системы мониторинга выполняется в соответствии с проектом, выполняемым на стадии подготовки рабочей документации.

В состав геотехнического мониторинга (ГТМ) входят следующие виды работ:

- текущий и контрольный осмотр состояния технических этажей, подполий зданий и расположенных в них коммуникаций и других устройств;
- наблюдения за состоянием бетона фундаментов;

- наблюдения за температурой грунта в основании сооружений;
- наблюдения за температурой воздуха в подполье;
- наблюдения за работой системы искусственной вентиляции подполья;
- наблюдения за работой охлаждающих устройств;
- наблюдения за осадками фундаментов;
- наблюдения за гидрогеологическим режимом грунтового основания.

В состав наблюдаемых параметров дополнительно включают характеристики снежного и почвенного покровов, обводнение поверхности, влажность почв и грунтов, от которых зависит температурный режим грунтов.

Мониторинг для сооружений, построенных по I принципу, должен проводиться в течение всего периода эксплуатации сооружения. Важно подчеркнуть, что для прогноза состояния вечной мерзлоты требуются наблюдения ряда параметров, а не только температуры, уровня грунтовых вод и деформаций строительных конструкций. Кроме того, необходима оценка факторов, влияющих на температурный режим грунтов оснований зданий и сооружений, которые могут быть природными (глобальное потепление, изменения атмосферных осадков, гидрология поверхностных и межмерзлотных вод, эволюция растительного покрова) и техногенными (утечки вод из коммуникаций, изменение рельефа или прямое тепловое воздействие на грунтовое основание). Также важны наблюдения за динамикой изменения глубины сезонно-талого слоя и таликов мерзлоты в районах интенсивного строительства.

В зависимости от особенностей объекта, расположенного в криолитозоне, необходимо определить наблюдаемые параметры, в том числе параметры криогенных процессов, для защиты объекта от разрушения. Поэтому для прогноза устойчивости инфраструктуры необходимо не только ГТМ, но и фоновый мониторинг, где можно отслеживать естественные колебания природных параметров и учитывать их при прогнозе несущей способности оснований.

В процессе строительства наблюдательных скважин для фонового и геотехнического мониторингов следует выполнять инженерно-геологические изыскания мерзлых пород: физические свойства; состав, льдистость (влажность), плотность, механические свойства; теплофизические характеристики (теплопроводность, теплоемкость) и т. д. Наблюдательные скважины могут оборудоваться автономными автоматизированными средствами для регистрации и накопления температурных данных, обеспечивающих точность измерения не ниже 0,1 °С во всем диапазоне изменения температуры мерзлых и талых грунтов. В избранных районах развития инфраструктуры целесообразно организовывать электротомографические профили, которые позволяют отслеживать глубину сезонно-талого слоя и таликов различного генезиса в реальном масштабе времени. Для проведения высокоточного мониторинга вертикального и горизонтального движений поверхности (с точностью 1–2 мм в год) предлагается создать сеть станций геодезического спутникового мониторинга.

Выполнение в Арктике и Субарктике единых по методическому подходу геокриологических и геотехнических наблюдений в рамках фонового и геотехнического мониторингов позволит обоснованно подойти к прогнозированию температурного режима грунтов основания и прогнозированию развития опасных геологических процессов на территориях застройки промышленного и гражданского назначений.

Единый методический подход (включая технические средства наблюдений, создание объединенных баз и банков данных) в изучении и мониторинге состояния вечной мерзлоты

ты в естественных условиях и на застроенной территории существенным образом повысит эффективность исследований и проектных решений, выполняемых в настоящее время раздельно научно-исследовательскими организациями и хозяйствующими субъектами.

Фоновый мониторинг экологических и климатических последствий деградации наземной и подводной мерзлоты

В последнее время основные исследования были направлены на решение фундаментальных задач: оценку углеродного потенциала наземной мерзлоты, который оценивается в:

1. ~1400 ГтС (1 Гт = 1 млрд тонн) в верхнем слое наземной мерзлоты (толщиной примерно 3 метра), который может деградировать в течение ближайших десятилетий вследствие летнего оттаивания;

2. ~ 400 ГтС в береговом ледовом комплексе, который подвержен в летний период разрушению (эрозии) вследствие термокарста и волноприбойной деятельности [11, 30].

На примере Северо-Восточной Азии было показано, что в региональном балансе атмосферного CO_2 основную роль может играть дисбаланс между респирацией и фотосинтезом северных почв [28], при растущем вкладе окисления эрозионного углерода на арктическом шельфе, что приводит к экстремальной асидификации (подкислению) вод и угнетению бентосных организмов – основной кормовой базой моржей, на которых охотятся белые медведи, что особенно актуально для восточной части Восточно-Сибирского моря, примыкающей к острову Врангеля («родному белых медведей» в Восточной Арктике) [31, 33].

Рост атмосферной эмиссии CO_2 , вследствие *медленного* процесса углубления сезонно-талого слоя наземной мерзлоты, может привести к ускорению удвоения содержания атмосферного CO_2 в ближайшие десятилетия [34]. Для оценки динамики этого процесса целесообразно провести сравнительные исследования на характерных трансектах, пересекающих все типичные ландшафты в ключевых районах Сибири, где представлены различные виды мерзлоты – от сплошной до островной и спорадической. Особое внимание следует уделить исследованию и количественной оценке транспорта и трансформации наземного органического вещества (ОВ) в арктической системе «суша–шельф», с фокусом на вынос ОВ в различных формах со стоком великих Сибирских рек и в результате береговой эрозии [31, 42].

Предполагается, что в результате современного беспрецедентного потепления должны произойти изменения в состоянии наземной мерзлоты, которые приведут к мобилизации и экспорту в море огромного количества наземного ОВ, которое в значительной степени может трансформироваться в CO_2 и в значительной мере повлиять на экологическое состояние вод на акватории Северного морского пути [31, 32]. Более того, увеличивается экспорт токсичных и нетоксичных металлов, ассоциированных с мобилизацией ОВ из деградирующей мерзлоты, что может оказать существенное влияние на состояние здоровья коренных народов через трофические цепочки от фитопланктона к рыбе – основной пище местного населения.

Известно, что шельф морей Восточной Арктики (МВА) подстилается подводной мерзлотой, в которой законсервирован огромный пул метана (1750 ГтС), из которых 500 ГтС – в форме природного газа, а 750 ГтС – в форме газгидратов [11, 42]. В условиях, когда температурный режим мерзлоты не нарушен, метан сохраняется в законсервированном резервуаре и не попадает в водную толщу и далее в атмосферу. В теплые климатические

эпохи температурный режим мерзлоты меняется, что приводит к частичной дестабилизации метанового резервуара и его эмиссии в водную толщу. Поскольку метан поступает из донных отложений в водную толщу МВА в виде восходящих струй и «облаков» пузырей, в форме так называемых *факелов* или *сипов*, он преодолевает окислительный потенциал донных осадков шельфа и выбрасывается в атмосферу. Скорость деградации мерзлоты растет, а вместе с ней растет и эмиссия метана в атмосферу Арктического региона. Учитывая, что в современной атмосфере планеты содержится примерно 5 Гт метана, то становится очевидным, что выброс даже ничтожно малой доли метана (менее 1 %), законсервированного в мерзлоте МВА, способен увеличить концентрацию метана в атмосфере планеты многократно, что может привести к значительному потеплению в глобальном масштабе. Учитывая также, что радиационная эффективность метана для 20-летнего периода (GWP20) в 80 раз выше, чем двуокиси углерода, то можно предположить, что вклад этой эмиссии может значительно превысить антропогенный вклад в эмиссию парниковых газов.

Ускорение деградации подводной мерзлоты было установлено на основе повторного научного бурения на шельфе скважин 30-летней давности [24], а также был задокументирован драматический рост потока метана в результате многократного увеличения сечения мега-сипов, выявленного в результате 25-летнего мониторинга акватории Северного морского пути (рис. 5). Отметим, что, начиная с 2012 года, во всех авторских экспедициях используется новая технология количественной оценки пузырькового переноса [36, 39].

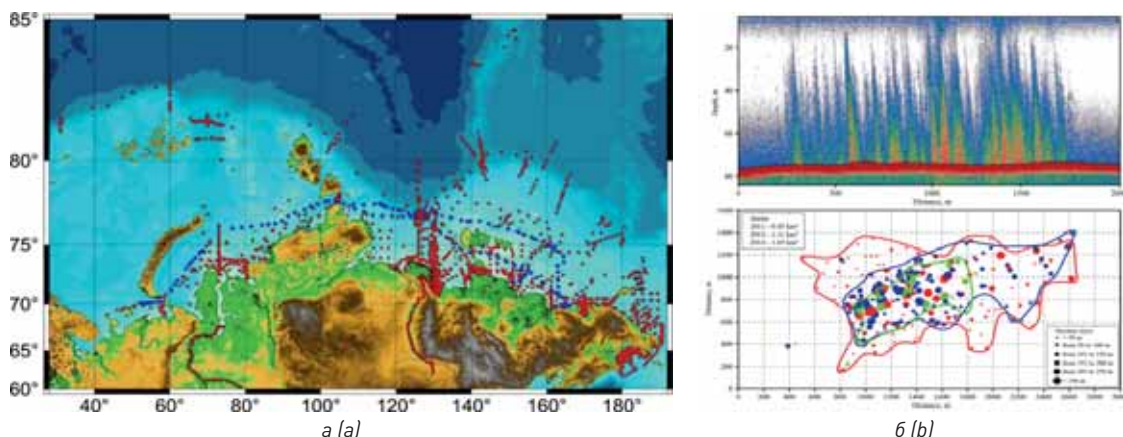


Рис. 5. а – Блок-схема комплексных морских исследований, выполненных в арктических морях России в 1999–2024 гг. под руководством И.П. Семилетова. Синим цветом показана экспедиция 2024 г.; б – пример драматического роста размеров источника массивного выброса пузырькового метана

Fig. 5. a – is a flowchart of comprehensive marine research carried out in the Arctic seas of Russia in 1999–2024 under the leadership of I.P. Semiletov. The expedition of 2024 is shown in blue; b – is an example of a dramatic increase in the size of the source of a massive release of bubbly methane

Развитие фонового мониторинга подводной мерзлоты целесообразно основывать на многолетних инициативных исследованиях, представленных в ряде ключевых публикаций [10, 23, 24, 26, 36, 42] и на рис. 5. Такой подход позволит выполнить картирование кровли подводной мерзлоты и оценку вероятности проявления георисков, связанных с деградацией подводной мерзлоты и дестабилизацией гидратов в районах выполнения промышленной разведки и бурения скважин, а также прокладки подводных нефтегазопроводов. Кроме того, на основе комплекса геофизических, биогео-

химических и геологических исследований (включая выявление роли современных сейсмотектонических процессов) будут выработаны практические рекомендации по минимизации ущерба от потенциальных георисков при освоении прибрежной зоны и акватории Северного морского пути.

Конкретная реализация мероприятий по мониторингу мерзлоты

В настоящее время становится очевидным, что фоновый (природный) мониторинг состояния мерзлоты в арктической системе «суша-шельф» является неотъемлемой частью геотехнического мониторинга. Поэтому стратегия полномасштабного социально-экономического развития в Арктическом секторе РФ должна быть основана на единой комплексной научно-технологической платформе, сформированной в структуре Минстроя, с учетом многолетнего опыта ведущих ученых и инженеров, которые доказали высокую эффективность комплексного мониторинга состояния и структуры мерзлоты, включая передовые методы исследований, разработанные в профильных научно-исследовательских институтах, университетах и ряде институтов РАН. Ниже приведен *план начала фонового мониторинга наземной и подводной мерзлоты* с фокусом на прибрежной зоне и ключевых районах акватории Северного морского пути, который основан на уже разработанных и испытанных в натурных условиях технологиях мирового уровня. Реализация указанных направлений мониторинга будет начата незамедлительно – *в дополнение к уже существующим разрезам и полигонам*, после начала финансирования важнейшего национального проекта, направленного на устойчивое социально-экономическое развитие более 2/3 территории Российской Федерации, в которых присутствуют вечномерзлые грунты, имеющие различную геологическую историю, что проявляется в изменении типов мерзлоты от сплошной до островной и спорадической.

Мониторинг в ключевых районах наземной мерзлоты, включая прибрежную Арктическую зону РФ:

- дистанционный мониторинг глубины залегания сезонно-талого слоя методом электротомографии с тестированием прямыми измерениями (бурение, металлический прут) и откалиброванными СВЧ-радарам;
- 3D-картирование современных и динамических границ существующих термокарстовых таликов природного (озерные, подрусьевые, сейсмотектонические и иной природы) и техногенного характеров различными модификациями метода электромагнитного зондирования с валидацией по данным бурения;
- массивированный термический мониторинг сезонно-талого слоя и селективный мониторинг деятельного слоя в характерных мерзлотных ландшафтах с передачей и сбором данных в центрах координации и управления проектом.

Мониторинг в ключевых районах подводной мерзлоты в прибрежной зоне и на акватории Северного морского пути:

- картирование кровли подводной мерзлоты различными модификациями метода электромагнитного зондирования с тестированием по данным бурения;
- акустический количественный мониторинг потоков пузырькового метана в зонах массивированной разгрузки – в комплексе с мониторингом границ зон разгрузки метана с помощью эхолотных комплексов;
- 3D-картирование современных и динамических границ подводных термокарстовых таликов природного (озерные, подрусьевые, сейсмотектонические) и иной приро-

ды различными модификациями метода электромагнитного зондирования в комплексе с сейсмическим профилированием на различных частотах, с валидацией по данным бурения;

- мониторинг сейсмотектонической активности в ключевых районах арктического шельфа и материкового склона с помощью постановки донных станций и анализа существующих и расширенных сетей наземного/прибрежного геофизического мониторинга;

- 3D-мониторинг изменения подводных ландшафтов с помощью геоакустических комплексов и с фокусом на формирование и развитие положительных форм рельефа (бугры пучения различного генезиса), которые являются предвестниками взрывообразного образования отрицательных форм рельефа дна (покмарки, кратеры);

- мониторинг изотопных (С-13, дейтерий, С-14, изотопы благородных газов) и прочих индикаторов (молекулярный состав гопанов, элементный и изотопный состав аутигенных карбонатов и т.д.) генезиса массивированных разгрузок газообразного и жидкого геофлюида из донных осадков в водную толщу и атмосферу.

Комплексный мониторинг будет дополнен экспериментальными лабораторными высокотехнологичными исследованиями влияния солей на состояние мерзлоты и стабильность газовых гидратов [40, 41]. Данные мониторинга будут использованы для кросс-валидации диагностических моделей динамики состояния мерзлоты, которые были протестированы данными бурения [24, 37], которые станут основой для нового поколения прогностических моделей состояния мерзлоты, что станет основой для безопасного планирования развития инфраструктуры в северных районах РФ на ближайшее будущее – на десятки и сотни лет.

Выводы

Современные изменения климата приводят к повышению температурного режима криолитозоны, в том числе в акватории Северного морского пути, вызывая деформирование инженерных сооружений и нарушая природное сложение вечномерзлых грунтов.

Контроль за состоянием вечной мерзлоты и обеспечением ее сохранности должен осуществляться с помощью государственного мониторинга, состоящего из фоновых (природного) и геотехнического (объектного) мониторингов.

Основным способом обеспечения сохранения вечномерзлых грунтов в основании зданий и сооружений является геотехнический мониторинг, обеспечивающий наблюдения, анализ и прогноз температурного и гидрогеологического режимов основания, деформационного состояния сооружения. Он позволяет выявить характерные динамические особенности деградации различных типов мерзлоты в различных типах ландшафтов, которые станут основой для репрезентативного прогнозирования состояния мерзлых грунтов, что является основой для проектирования инфраструктуры для дальнейшего освоения природных ресурсов в российском секторе Арктики.

Последствия геоэкологических катастроф, которые могут произойти при создании инфраструктуры Северного морского пути (включая проектирование и строение портовых сооружений, мобильных плавучих АЭС, подводных трубопроводов и т. д.), разведочно-промышленной деятельности, выполненной без учета последних достижений наших научных исследований, в материальном отношении могут нанести ущерб, значение которого трудно переоценить.

Список литературы

1. Vasiliev A.V., Drozdov A.G. Gravis et al. Permafrost degradation in the Western Russian Arctic. *Environmental Research Letters*, 2020; 15(4). pp. DOI: 10.1088/1748-9326/ab6f12 EDN: ESYZUG
2. Мельников В.П., Осипов В.И., Брушков А.В. и др. Адаптация инфраструктуры Арктики и Субарктики к изменениям температуры мерзлых грунтов // *Криосфера Земли*. 2021; XXV (6):3–15. DOI: 10.15372/KZ20210601 EDN: HEVLIU
3. Заключение РАН: Проект Федерального закона «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части создания государственной системы мониторинга многолетнемерзлых грунтов» / Вице-президент РАН В.Н. Пармон [23.07.2021]. Новосибирск: СО РАН, 2021.
4. Павлов А.В. Мониторинг криолитозоны. Новосибирск: Гео, 2008.
5. Алексеев А.Г. Геотехнический мониторинг на многолетнемерзлых грунтах. Москва: АСВ, 2019. 111 с. ISBN: 978-5-4323-0331-8 EDN: WVDBNX
6. Брушков А.В., Алексеев А.Г., Дроздов Д.С. и др. Мониторинг вечной мерзлоты. Москва: Академический проект, 2024. 468 с. ISBN: 978-5-8291-4278-0 EDN: YAWPIQ
7. Мельников В.П., Брушков А.В., Федоров Р.Ю. К развитию холистического образа криосферы // *Арктика: экология и экономика*. 2021;11(4):519–528. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-4-519-528 EDN: JSCDWF
8. Гинсбург Г.Д., Соловьев В.А. Субмаринные газовые гидраты. Санкт-Петербург: ВНИИОкеангеология, 1994. 194 с.
9. Makagon Y.F., Holditch S.A., Makagon T.Y. Natural gas hydrates – a potential energy source for the 21st century. *J. Petr. Sci. Eng.*, 2007; 56:14–31. <https://doi.org/10.1016/j.petro.2005.10.009>
10. Шахова Н.Е., Сергиенко В.И., Семилетов И.П. Вклад Восточно-Сибирского шельфа в современный цикл метана // *Вестник РАН*. 2009;79(6):507–518. EDN: KMLVQJ
11. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., et al. Geochemical and geophysical evidence of methane release from the inner East Siberian Shelf. *Journal Geophys. Res.*, 2010a, 115, DOI: 10.1029/2009JC005602 EDN: TIIZAX
12. ACIA, 2004. Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment. ACIA Overview report. Cambridge University Press.
13. Васильев А.А., Гравис А.Г., Губарьков А.А., и др. Деградация мерзлоты: результаты многолетнего геоэкологического мониторинга в западном секторе российской Арктики // *Криосфера Земли*. 2020; XXIV (2):15–30. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30) EDN: HROYGC
14. Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetz L.J. et al. Permafrost is warming at a global scale. *Nature Communications*, 2019; 10(1):264. DOI: 10.1038/s41467-018-08240-4 EDN: HTZKKV
15. Melnikov V.P., Osipov V.I., Brushkov A.V., et al. Climate warming and permafrost thaw in the Russian Arctic: potential economic impacts on public infrastructure by 2050. *Natural Hazards*, 2022; (112):231–251. DOI: 10.1007/s11069-021-05179-6 EDN: ZPYQET
16. Streletskiy D.A., Suter L., Shiklomanov N.I., et al. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost. *Environmental Research Letters*, 2019; 14(2):025003. DOI: 10.1088/1748-9326/aaf5e6 EDN: AHATIK
17. Suter L., Streletskiy D., Shiklomanov N. Assessment of the cost of climate change impacts on critical infrastructure in the circumpolar Arctic. *Polar Geography*, 2019; (42):267–286. DOI: 10.1080/1088937X.2019.1686082 EDN: PXPBBS
18. Badina S., Pankratov A. Assessment of the impacts of climate change on the Russian Arctic economy (including the energy industry). *Energies*, 2022; 15(8). DOI: 10.3390/en15082849 EDN: NNRCTK
19. United Nation. Goals. 9. Build resilient infrastructure, promote inclusive and sustainable industrialization and foster innovation. URL: <https://sdgs.un.org/goals/goal9>.
20. Медведков А.А. Геоэкологические факторы жизнестойкости арктических городов в криолитозоне: теоретические подходы к изучению // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2021;85(5):726–739. DOI: 10.31857/S2587556621050071 EDN: OGQMWR
21. Хрусталева Л.Н. Температурный режим вечномёрзлых грунтов на застроенной территории. Москва: Наука, 1971. 167 с.
22. Semiletov I., Shakhova N., Romanovsky V. Methane Climate Forcing and Methane Observations in the Siberian Arctic Land-Shelf System. *World Resource Review*, 2004; 16(4):503–541.

23. Шахова Н.Е., Никольский Д.Ю., Семилетов И.П. О современном состоянии подводной мерзлоты на Восточно-Сибирском шельфе: тестирование результатов моделирования данными натурных измерений. *Доклады Академии наук*. 2009; 429(6):541–544. EDN: KYGOCN
24. Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O., et al. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf. *Nature Communications*, 2017; (8):15872. DOI: 10.1038/ncomms15872 EDN: XNDEBA
25. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., et al. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf. *Nature Geoscience*, 2014; 7(1):64–70, 2014. DOI: 10.1038/ngeo2007 EDN: SKLLGN
26. Koshurnikov A.V., Tumskey V.E., Shakhov N.E., et al. The first ever application of electromagnetic sounding for mapping the submarine permafrost table on the Laptev Sea. *Dokl. Earth Sci*, 2016; 469:860–863. DOI: 10.1134/S1028334X16080110 EDN: XFIKAN
27. Alekseev D.A., Koshurnikov A.V., Gunar A., et al. Time-Domain Electromagnetics for Subsea Permafrost Mapping in the Arctic: The Synthetic Response Analyses and Uncertainty Estimates from Numerical Modelling Data. *Geosciences*, 2023; 13:144. DOI: 10.3390/geosciences13050144 EDN: FCPMCS
28. Zimov S.A., Semiletov I.P., Daviodov S.P., et al. Wintertime CO₂ Emission from Soils of Northeastern Siberia. *Arctic*, 1993; 46(3):197–204. DOI: 10.14430/arctic1344 EDN: VUTHXT
29. Semiletov I.P. Destruction of the coastal permafrost ground as an important factor in biogeochemistry of the Arctic Shelf waters, *Trans. Doklady Russian Acad. Sci*, 1999; 368:679–682. EDN: MQDSJL
30. Semiletov I.P., Shakhova N.E., Sergienko V.I., et al. On Carbon Transport and Fate in the East Siberian Arctic Land-Shelf-Atmosphere System. *Environment Research Letters*, 2012; (7). DOI: 10.1088/1748-9326/7/1/015201 EDN: ARLKHH
31. Semiletov I., Pipko I., Gustafsson Ö., et al., Extreme acidification in the East Siberian Arctic Shelf driven by a permafrost-released carbon translocation and seawater freshening. *Nature Geoscience*, 2016; 9:361–365. DOI: 10.1038/NGEO2695 EDN: UOXOKP
32. Semiletov I.P., Pipko I.I., Shakhova N.E., et al. Carbon transport by the Lena River from its headwaters to the Arctic Ocean, with emphasis on fluvial input of terrestrial particulate organic carbon vs. carbon transport by coastal erosion. *Biogeosciences*, 2011; 8(9):2407–2426. DOI: 10.5194/bg-8-2407-2011 EDN: JVIOMM
33. Semiletov I.P., Pipko I.I., Repina I.A., Shakhova N. Carbonate dynamics and carbon dioxide fluxes across the atmosphere-ice-water interfaces in the Arctic Ocean Pacific sector of the Arctic. *Journal of Marine Systems*, 2007; 66(1–4):204–226. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2006.05.012 EDN: LKMQTB
34. Natali S.M., Holdren J.P., Rogers B.M., MacDonald E. Permafrost carbon feedbacks threaten global climate goals. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021; 118(21). DOI: 10.1073/pnas.2100163118 EDN: FEMEWR
35. Соловьев В.А. Прогноз распространения реликтовой субаквальной мерзлой зоны (на примере восточно-арктических морей). Криолитозона арктического шельфа. Изд-во Института мерзлотоведения СО АН СССР. Якутск, 1981. С. 28–38.
36. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V., et al. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2015; 373:20140451. DOI: 10.1098/rsta.2014.0451 EDN: UZYQRR
37. Shakhova N.E., Semiletov I.P. Methane Hydrate Feedbacks, In: Martin Sommerkorn & Susan Joy Hassol, eds., Arctic Climate Feedbacks: Global Implications, Published by WWF International Arctic Programme August, 2009; 81–92. ISBN: 978-2-88085-305-1
38. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., et al. Extensive Methane Venting to the Atmosphere from Sediments of the East Siberian Arctic Shelf. *Science*, 2010; 327(5970):1246–1250. DOI: 10.1126/science.1182221 EDN: MXGVPH
39. Chernykh D., Yusupov V., Salomatin A., et al. Sonar Estimation of Methane Bubble Flux from Thawing Subsea Permafrost: A Case Study from the Laptev Sea Shelf. *Geosciences*, 2020; 10(10):411. DOI: 10.3390/geosciences10100411 EDN: SQLOLB
40. Chuvilin E., Ekimova V., Bukhanov B., Grebenkin, S., Shakhova N., Semiletov I. Role of Salt Migration in Destabilization of Intra Permafrost Hydrates in the Arctic Shelf: Experimental Modeling. *Geosciences*, 2019; 9:188. DOI: 10.3390/geosciences9040188 EDN: EEEMKL
41. Yusupov V., Semiletov I. Understanding the processes associated with the formation and decomposition of gas hydrates on the Arctic shelf. *Fuel*, 2025; 388:134472. DOI: 10.1016/j.fuel.2025.134472 EDN: TMWDYY
42. Семилетов И.П., Шахова Н.Е. Баланс парниковых газов и изменение климата: роль деградации мерзлоты в Арктике // *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*. 2024. № 4. С. 5–43. DOI: 10.31857/S0869769824040015

References

1. Vasiliev A.V., Drozdov A.G. Gravis et al. Permafrost degradation in the Western Russian Arctic. *Environmental Research Letters*, 2020; 15(4). pp. DOI: 10.1088/1748-9326/ab6f12 EDN: ESYZUG
2. Melnikov V.P., Osipov V.I., Brushkov A.V. et al. Adaptation of Arctic and Subarctic infrastructure to changes in permafrost soil temperature. *Earth's Cryosphere*, 2021; XXV (6):3–15. DOI: 10.15372/KZ20210601 EDN: HEVLIU
3. Conclusion of the RAS: Draft Federal Law "On Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation Regarding the Creation of a State System for Monitoring Permafrost Soils" / Vice-President of the RAS V.N. Parmon (23.07.2021). Novosibirsk: SB RAS, 2021.
4. Pavlov A.V. Monitoring of the Cryolithozone. Novosibirsk: Geo, 2008.
5. Alekseev A.G. Geotechnical Monitoring of Permafrost Soils. Moscow: ASV, 2019. 111 p. ISBN: 978-5-4323-0331-8 EDN: VVDBNX
6. Brushkov A.V., Alekseev A.G., Drozdov D.S., et al. Permafrost Monitoring. Moscow: Academicheskyy Proekt, 2024. 468 p. ISBN: 978-5-8291-4278-0 EDN: YAWPIQ
7. Melnikov V.P., Brushkov A.V., Fedorov R.Yu. Toward a Holistic Image of the Cryosphere. *Arctic: Ecology and Economy*, 2021; 11(4):519–528. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-4-519-528 EDN: JSCDWF
8. Ginsburg G.D., Soloviev V.A. Submarine Gas Hydrates. St. Petersburg: VNIIOkeangeologiya, 1994. 194 p.
9. Makagon Y.F., Holditch S.A., Makagon T.Y. Natural Gas Hydrates – a Potential Energy Source for the 21st Century. *J. Petr. Sci. Eng.*, 2007; 56:14–31. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2005.10.009>
10. Shakhova N.E., Sergienko V.I., Semiletov I.P. Contribution of the East Siberian Shelf to the Modern Methane Cycle. *Vestnik RAS*, 2009; 79(6):507–518. EDN: KMLVQJ
11. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., et al. Geochemical and geophysical evidence of methane release from the inner East Siberian Shelf. *Journal Geophys. Res*, 2010a, 115, DOI: 10.1029/2009JC005602 EDN: TIIZAX
12. ACIA, 2004. Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment. ACIA Overview report. Cambridge University Press.
13. Vasiliev A.A., Gravis A.G., Gubarkov A.A., et al. Permafrost degradation: results of long-term geocryological monitoring in the western sector of the Russian Arctic. *Earth's Cryosphere*, 2020; XXIV (2):15–30. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30) EDN: HROYGC
14. Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetz L.J. et al. Permafrost is warming at a global scale. *Nature Communications*, 2019; 10(1):264. DOI: 10.1038/s41467-018-08240-4 EDN: HTZKKV
15. Melnikov V.P., Osipov V.I., Brushkov A.V., et al. Climate warming and permafrost thaw in the Russian Arctic: potential economic impacts on public infrastructure by 2050. *Natural Hazards*, 2022; (112):231–251. DOI: 10.1007/s11069-021-05179-6 EDN: ZPYQET
16. Streletskiy D.A., Suter L., Shiklomanov N.I., et al. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost. *Environmental Research Letters*, 2019; 14(2):025003. DOI: 10.1088/1748-9326/aaf5e6 EDN: AHATIK
17. Suter L., Streletskiy D., Shiklomanov N. Assessment of the cost of climate change impacts on critical infrastructure in the circumpolar Arctic. *Polar Geography*, 2019; (42):267–286. DOI: 10.1080/1088937X.2019.1686082 EDN: PXPBBS
18. Badina S., Pankratov A. Assessment of the impacts of climate change on the Russian Arctic economy (including the energy industry). *Energies*, 2022; 15(8). DOI: 10.3390/en15082849 EDN: NNRCTK
19. United Nation. Goals. 9. Build resilient infrastructure, promote inclusive and sustainable industrialization, and foster innovation. URL: <https://sdgs.un.org/goals/goal9>.
20. Medvedkov A.A. Geoeological factors of the resilience of Arctic cities in the permafrost zone: theoretical approaches to study. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*, 2021; 85(5):726–739. DOI: 10.31857/S2587556621050071 EDN: OGQMWR
21. Khrustalev L.N. Temperature regime of permafrost soils in built-up areas. Moscow: Nauka, 1971. 167 p.
22. Semiletov I., Shakhova N., Romanovsky V. Methane Climate Forcing and Methane Observations in the Siberian Arctic Land-Shelf System. *World Resource Review*, 2004; 16(4):503–541.
23. Shakhova N.E., Nikol'skii D.Yu., Semiletov I.P. On the current state of subsea permafrost on the East Siberian shelf: testing modeling results with in-situ measurement data. *Doklady Akademii Nauk*, 2009; 429(6):541–544. EDN: KYGOCN

24. Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O., et al. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf. *Nature Communications*, 2017; (8):15872. DOI: 10.1038/ncomms15872 EDN: XNDEBA
25. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., et al. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf. *Nature Geoscience*, 2014; 7(1):64–70, 2014. DOI: 10.1038/geo2007 EDN: SKLLGN
26. Koshurnikov A.V., Tumskey V.E., Shakhov, N.E., et al. The first ever application of electromagnetic sounding for mapping the submarine permafrost table on the Laptev Sea. *Dokl. Earth Sci*, 2016; 469:860–863. DOI: 10.1134/S1028334X16080110 EDN: XFIKAN
27. Alekseev D.A., Koshurnikov A.V., Gunar A., et al. Time-Domain Electromagnetics for Subsea Permafrost Mapping in the Arctic: The Synthetic Response Analyzes and Uncertainty Estimates from Numerical Modeling Data. *Geosciences*, 2023; 13:144. DOI: 10.3390/geosciences13050144 EDN: FCPMCS
28. Zimov S.A., Semiletov I.P., Daviodov S.P., et al. Wintertime CO₂ Emission from Soils of Northeastern Siberia. *Arctic*, 1993; 46(3):197–204. DOI: 10.14430/arctic1344 EDN: VUTHXT
29. Semiletov I.P. Destruction of the coastal permafrost ground as an important factor in biogeochemistry of the Arctic Shelf waters, Trans. *Doklady Russian Acad. Sci*, 1999; 368:679–682. EDN: MQDSJL
30. Semiletov I.P., Shakhova N.E., Sergienko V.I., et al. On Carbon Transport and Fate in the East Siberian Arctic Land-Shelf-Atmosphere System. *Environment Research Letters*, 2012; (7). DOI: 10.1088/1748-9326/7/1/015201 EDN: ARLKHH
31. Semiletov I., Pipko I., Gustafsson Ö., et al., Extreme acidification in the East Siberian Arctic Shelf driven by a permafrost-released carbon translocation and seawater freshening. *Nature Geoscience*, 2016; 9:361–365. DOI: 10.1038/NGE02695 EDN: UOXOKP
32. Semiletov I.P., Pipko I.I., Shakhova N.E., et al. Carbon transport by the Lena River from its headwaters to the Arctic Ocean, with emphasis on fluvial input of terrestrial particulate organic carbon vs. carbon transport by coastal erosion. *Biogeosciences*, 2011; 8(9):2407–2426. DOI: 10.5194/bg-8-2407-2011 EDN: JVIOMM
33. Semiletov I.P., Pipko I.I., Repina I.A., Shakhova N. Carbonate dynamics and carbon dioxide fluxes across the atmosphere-ice-water interfaces in the Arctic Ocean Pacific sector of the Arctic. *Journal of Marine Systems*, 2007; 66(1-4):204–226. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2006.05.012 EDN: LKMQTB
34. Natali S.M., Holdren J.P., Rogers B.M., MacDonald E. Permafrost carbon feedbacks threaten global climate goals. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021; 118(21). DOI: 10.1073/pnas.2100163118 EDN: FEMEWR
35. Soloviev V.A. Forecast of the distribution of the relic subaqueous permafrost zone (using the East Arctic seas as an example). Cryolithozone of the Arctic shelf. Publishing House of the Permafrost Institute of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. Yakutsk, 1981, pp. 28–38.
36. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V., et al. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2015; 373:20140451. DOI: 10.1098/rsta.2014.0451 EDN: UZYQRR
37. Shakhova N.E., Semiletov I.P. Methane Hydrate Feedbacks, In: Martin Sommerkorn & Susan Joy Hassol, eds., Arctic Climate Feedbacks: Global Implications, Published by WWF International Arctic Program August, 2009; 81–92. ISBN: 978-2-88085-305-1
38. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., et al. Extensive Methane Venting to the Atmosphere from Sediments of the East Siberian Arctic Shelf. *Science*, 2010; 327(5970):1246–1250. DOI: 10.1126/science.1182221 EDN: MXGVPH
39. Chernykh D., Yusupov V., Salomatin A., et al. Sonar Estimation of Methane Bubble Flux from Thawing Subsea Permafrost: A Case Study from the Laptev Sea Shelf. *Geosciences*, 2020; 10(10):411. DOI: 10.3390/geosciences10100411 EDN: SQLOLB
40. Chuvilin E., Ekimova V., Bukhanov B., Grebenkin, S., Shakhova N., Semiletov I. Role of Salt Migration in Destabilization of Intra Permafrost Hydrates in the Arctic Shelf: Experimental Modeling. *Geosciences*, 2019; 9:188. DOI: 10.3390/geosciences9040188 EDN: EEEMKL
41. Yusupov V., Semiletov I. Understanding the processes associated with the formation and decomposition of gas hydrates on the Arctic shelf. *Fuel*, 2025; 388:134472. DOI: 10.1016/j.fuel.2025.134472 EDN: TMWDYY
42. Semiletov I.P., Shakhova N.E. Greenhouse Gas Balance and Climate Change: The Role of Permafrost Degradation in the Arctic. *Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2024, no. 4, pp. 5–43. DOI: 10.31857/S0869769824040015

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Григорьевич Алексеев*, д-р техн. наук, доцент, профессор, НИУ МГСУ, Москва
e-mail: adr-alekseev@yandex.ru
ORCID 0000-0001-6020-0328

Andrey G. Alekseev*, Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow
e-mail: adr-alekseev@yandex.ru
ORCID 0000-0001-6020-0328

Виталий Геннадьевич Крючков, д-р экон. наук, академик РИА, генеральный директор, АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: kryuchkov@dstroy.ru

Vitaly G. Kryuchkov, Dr. Sci. (Economy), Academician of the REA, General Director, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: kryuchkov@dstroy.ru

Михаил Николаевич Железняк, д-р геол.-минерал. наук, член-корреспондент РАН, академик АН Республики Саха (Якутия), директор, Институт мерзлотоведения СО РАН, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск
e-mail: fe1956@mail.ru

Mikhail N. Zheleznyak, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Corresponding Member of the RAS, Academician of the Academy of Sciences (Republic Sakha (Yakutia)), Director, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk
e-mail: fe1956@mail.ru

Леопольд Исаевич Лобковский, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор. Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва, Россия
e-mail: llobkovsky@ocean.ru

Leopold I. Lobkovsky, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Physical and Mathematical), Professor P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences. Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
e-mail: llobkovsky@ocean.ru

Игорь Петрович Семилетов, член-корреспондент Российской Академии наук, доктор географических наук, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток, Российская Федерация

Национальный исследовательский Томский государственный университет, проспект Ленина, д. 36, Томская область, г. Томск, 634050, Российская Федерация

Институт экологии, Высшая школа экономики, Покровский бульвар, д. 11, г. Москва, 109028, Российская Федерация

e-mail: ipsemiletov@gmail.com

Igor P. Semiletov, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. of (Geography), Ilyichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation

National Research Tomsk State University, Lenina street, 36, Tomsk, 634050, Russian Federation

Institute of Ecology, Higher School of Economics, Pokrovskii street, Moscow, 109028, Russian Federation
e-mail: ipsemiletov@gmail.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author