



Геотехнический мониторинг на этапах жизненного цикла объектов топливно-энергетического комплекса на многолетнемерзлых грунтах

А.В. Каблуков¹, Т.Л. Дмитриева^{2✉}, В.П. Яценко³

^{1,2,3}Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. В статье отмечена специфика строительства производственных объектов нефтегазового комплекса в сложных климатических условиях в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов. Показано, что строительство таких объектов приводит к резкой активизации экзогенных процессов на территории их установки. Выявлена проблема влияния этих процессов на безопасную эксплуатацию площадных и линейных объектов нефтегазовых месторождений. Обоснована важность и актуальность проведения геотехнического мониторинга как необходимого условия для обеспечения техносферной безопасности на всех этапах жизненного цикла объектов, возводимых на многолетнемерзлых грунтах. Дано определение геотехнического мониторинга в соответствии с нормативными документами. Представлен перечень нормативных документов, регламентирующих его проведение. Описаны основные этапы жизненного цикла оснований и фундаментов на многолетнемерзлых грунтах с указанием выполняемых работ по геотехническому мониторингу для каждого этапа. Обозначен перечень работ при проведении геотехнического мониторинга. Дано подробное описание видов наблюдений за состоянием объектов при геотехническом мониторинге. Рассмотрены принципы проведения анализа результатов мониторинга с последующим применением компенсационных мероприятий. Отдельно представлен вопрос автоматизации процесса геотехнического мониторинга, обозначены достоинства автоматизации, а также факторы, препятствующие ее внедрению. Определены перспективы дальнейшего развития методов геотехнического мониторинга.

Ключевые слова: геотехнический мониторинг, топливно-энергетический комплекс, сооружения, деформации сооружений, вечноммерзлые грунты, приборы контроля, автоматизация процессов

Для цитирования: Каблуков А.В., Дмитриева Т.Л., Яценко В.П. Геотехнический мониторинг на этапах жизненного цикла объектов топливно-энергетического комплекса на многолетнемерзлых грунтах // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2025. Т. 15. № 1. С. 73–84. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-1-73-84>. EDN: QOXENM.

Original article

Geotechnical monitoring during the life cycle of fuel and energy complex facilities on permafrost soils

Andrei V. Kablukov¹, Tatiana L. Dmitrieva^{2✉}, Vladimir P. Yashchenko³

^{1,2,3}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The present article considers the specifics of constructing oil and gas production facilities in harsh climatic conditions of permafrost soils. The construction of such facilities sharply intensifies exogenous processes in permafrost soils. Therefore, due to the negative effect of these processes on the safe operation of area and linear objects in oil and gas fields, we substantiate the importance and relevance of geotechnical monitoring as a necessary condition for ensuring the safety of technosphere during the life cycle of objects erected on permafrost soils. A definition of geotechnical monitoring is given in accordance with regulatory documents; a list of governing regulatory documents is provided. The main life cycle stages of permafrost bases and foundations are described indicating the geotechnical monitoring works

© Каблуков А.В., Дмитриева Т.Л., Яценко В.П., 2025

for each stage. In addition to the types of object state observations during geotechnical monitoring, we consider the principles of analyzing monitoring results and applying compensatory measures. The advantages of geotechnical monitoring automation, as well as the factors hindering its implementation are outlined; the prospects for further geotechnical monitoring development are identified.

Keywords: geotechnical monitoring, fuel and energy complex, structures, deformations of structures, permafrost soils, control devices, automation of processes

For citation: Kablukov A.V., Dmitrieva T.L., Yashchenko V.P. Geotechnical monitoring during the life cycle of fuel and energy complex facilities on permafrost soils. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2025;15(1):73-84. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-1-73-84>. EDN: QOXENM.

ВВЕДЕНИЕ

Добыча нефти и газа на территории России сопряжена с необходимостью производства строительных работ в сложных климатических условиях. Большое количество производственных объектов нефтегазового комплекса расположено в зоне распространения многолетне-мерзлых грунтов (ММГ), которая занимает более 60 % территории страны.

На рис. 1 представлено распределение зон мерзлоты. Установлено, что строительство площадных и линейных объектов для эксплуатации нефтегазовых месторождений приводит

к резкой активизации экзогенных процессов на территории площадки проведения работ. Разработка грунта, рытье траншей и котлованов, вырубка леса под коридоры для трубопроводов и высоковольтных линий являются основными потенциально опасными геотехническими процессами, которые при эксплуатации объектов могут оказать негативное влияние на их техносферную безопасность [26, 27]. По данной причине проведение эффективного геотехнического мониторинга (ГТМ) является одной из актуальных задач всей отрасли [1, 8, 29].



Рис. 1. Схема распространения мерзлоты по территории России
Fig. 1. Scheme of permafrost distribution across the territory of Russia

С помощью ГТМ на ММГ можно выявить начальные формы опасных природных и техногенных процессов, спрогнозировать возникновение аварий. Данные, полученные в ходе ГТМ, разнообразны. Их анализ способствует

пониманию механизмов взаимодействия объекта с вечной мерзлотой в различных геологических условиях, а также позволяет оценивать и предсказывать состояние объектов и окружающей среды [5, 23, 24].

МЕТОДЫ

Изменение геокриологического состояния ММГ возникает в результате таких естественных и техногенных факторов, как удаление и замена верхнего слоя грунта в ходе строительства объекта, изменение характера снежного покрова на отдельных участках, неравномерное распределение солнечной радиации, поверхностные и грунтовые воды. В результате таких воздействий меняется температурный и влажностный режим ММГ, что может привести к дальнейшему оттаиванию. Процесс оттаивания ММГ в основании фундамента оказывает существенное влияние на жизненный цикл объектов инфраструктуры топливно-энергетического комплекса и может стать причиной чрезвычайной ситуаций вплоть до разрушения объекта. Для исключения возникновения рисков подобных происшествий при реализации и эксплуатации объектов на ММГ в обязательном порядке требуется проведение ГТМ. Согласно определению, приведенному в СП 25.13330.2020 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах», ГТМ на ММГ представляет собой совокупность работ, основанных на полевых наблюдениях за состоянием грунтов основания (температурный режим), гидрогеологическими условиями и перемещениями конструкций фундаментов новых и реконструируемых зданий или сооружений. Цель ГТМ, согласно СП 305.1325800.2017 «Правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве», заключается в обеспечении

безопасности строительных работ и надежности эксплуатации новых или реконструируемых объектов, включая здания и сооружения в окружающей застройке. Это достигается за счет своевременного обнаружения изменений в контролируемых параметрах конструкций и грунтов оснований, которые могут привести к ухудшению работоспособности объектов или их аварийному состоянию. ГТМ осуществляется в соответствии с требованиями ряда нормативно-правовых актов, таких как Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», СП 25.13330.2020 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах», СП 497.1325800.2020 «Основания и фундаменты зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах.

Правила эксплуатации», СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений», СП 305.1325800.2017 «Правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве».

Организация и реализация ГТМ в процессе строительства и эксплуатации объектов необходима для сооружений, когда ведомственные нормы требуют наблюдения за основаниями и фундаментами, и для всех сооружений на ММГ. В таблице изложены ключевые этапы жизненного цикла оснований и фундаментов на ММГ, а также указаны работы по ГТМ, выполняемые на каждом из этапов.

Этапы жизненного цикла
Stages of the life cycle

Инженерные изыскания	Проектные работы	Строительство	Эксплуатация
– рекогносцировка площадки строительства на предмет наличия геокриологических процессов – полевые наблюдения за температурой грунтов – определение теплофизических характеристик грунтов – качественный геокриологический прогноз и рекомендации к строительству	– прогноз теплового состояния ММГ – разработка решений по температурной стабилизации грунтов – проект обустройства сетей ГТМ – разработка программы наблюдения по ГТМ – разработка проектных решений инженерной защиты	– наблюдения по ГТМ – анализ наблюдений и поверочные расчеты устойчивости – контроль возможности нагрузки оснований – внесений изменений в проектные решения – реализация мероприятий по компенсационным решениям	– наблюдения в рамках ГТМ – анализ наблюдений и поверхностный расчет устойчивости – формирование геотехнического прогноза – ведение геотехнических паспортов – разработка и реализация компенсационных мероприятий по результатам ГТМ

Выделяют следующие ключевые этапы работ по сопровождению процессов ГТМ:

1. Проектное сопровождение. К нему относят предпроектные исследования, проектно-

изыскательские работы, инжиниринговые услуги, экспертизу проектных решений по ГТМ и корректировку проектной документации.

2. Строительные и монтажные работы. Они включают в себя сборку и установку элементов систем ГТМ, маркировку элементов в соответствии с проектной документацией, подготовку исполнительной документации и передачу на баланс обслуживающей организации.

3. Проведение полевых наблюдений по ГТМ связано с визуальным обследованием грунтовых оснований и фундаментов, первичным техническим осмотром элементов систем ГТМ, мониторингом изменений температурного режима грунтов, контролем устойчивости грунтовых реперов, наблюдением за деформациями оснований и фундаментов, тепловизионной диагностикой термостабилизаторов грунта, а также наблюдением за толщиной и плотностью снежного покрова и гидрогеологическими исследованиями.

4. Анализ результатов наблюдений. Исследуются проверочные расчеты несущей способности свайного основания, прогнозные теплотехнические расчеты грунтов основания, подготовка отчетной документации по видам наблюдений и оформление геотехнического заключения, составление паспорта ГТМ.

Сеть ГТМ проектируемых сооружений включает в себя:

- грунтовые реперы;
- деформационные марки;
- термометрические скважины;
- гидрогеологические скважины;
- точки снегомерной съемки.

Грунтовые реперы формируют базовую геодезическую сеть, которая используется для оценки деформаций как самих сооружений, так и грунтов, на которых они расположены, с помощью деформационных марок.

Ключевыми параметрами, подлежащими контролю в процессе ГТМ сооружений на стадии строительства, являются температура грунта, уровень подземных вод, деформация, температура охлаждающих устройств и воздуха в проветриваемом подполье, высота и плотность снежного покрова, работоспособность искусственной вентиляции, эффективность работы охлаждающих систем, функционирующих сезонно или круглогодично и плотность грунтов, используемых в насыпях, при замене грунтов в выемках и при намыве территории. Геотехнические наблюдения в процессе строительства должны включать в себя следующие аспекты:

– визуальный осмотр элементов сетей для проверки их состояния и соответствия проектной документации;

– обследование грунтовых оснований и фундаментов;

– оценка устойчивости опорной сети (в ходе нивелирования деформационных марок);

– мониторинг деформаций оснований и фундаментов;

– термометрические измерения;

– гидрогеологические исследования;

– тепловизионная диагностика термостабилизаторов грунта;

– контроль за глубиной и плотностью снежного покрова.

Рассмотрим подробнее каждый тип геотехнических наблюдений.

Ключевыми элементами термометрических наблюдений являются термометрическая скважина и термометрическая коса.

Термометрическая скважина представляет собой специально подготовленное отверстие, предназначенное для измерения температуры грунта с помощью гирлянды температурных датчиков (рис. 2).

Этот набор датчиков температуры закреплен несущем шнуре в соответствии с глубиной их размещения.

Основными задачами термометрического наблюдения являются:

– получение точных данных о температуре мерзлых, промерзающих и оттаивающих грунтов для использования в теплотехнических расчетах при проектировании;

– оценка и прогнозирование устойчивости осваиваемой территории;

– определение глубины заложения и выбор типа фундаментов для зданий и сооружений, а также оценка их несущей способности;

– мониторинг и оценка изменений в тепловом режиме грунтов, возникающих в результате строительства и эксплуатации зданий и сооружений.

Визуально-инструментальные методы мониторинга включают в себя как визуальные наблюдения (осмотр объекта), так и инструментальные измерения (фиксация дефектов и повреждений в конструкциях), а также возможность выявления опасных геокриологических процессов, таких как криогенное пучение, термокарст, оползни и оседание поверхности при оттаивании.

В результате проведения такого мониторинга составляются ведомости и карты дефектов.

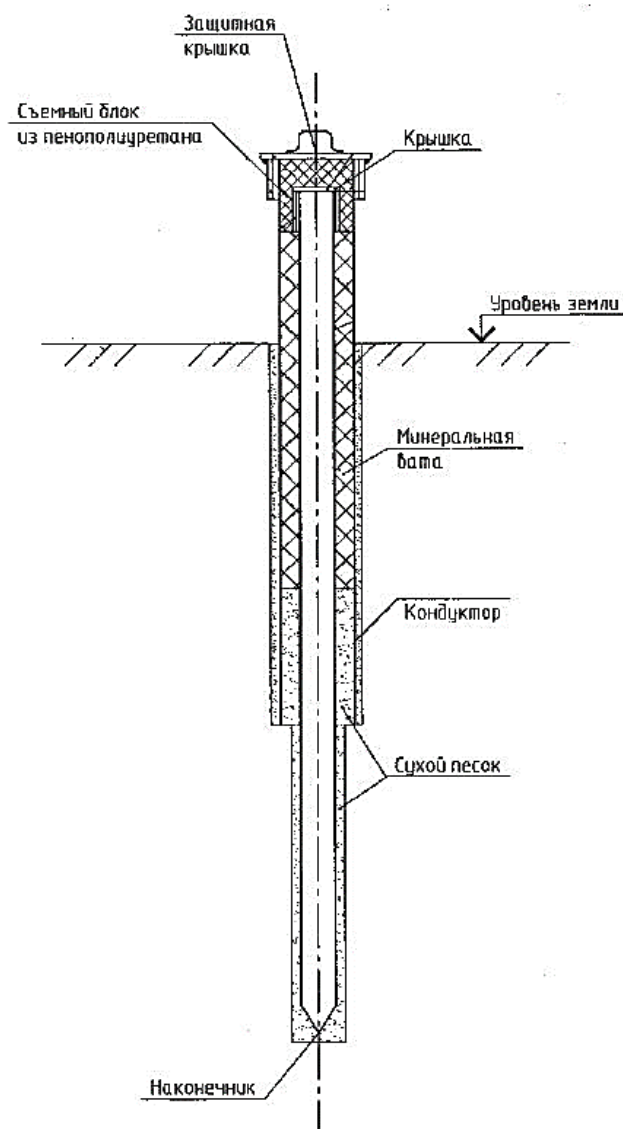


Рис. 2. Схема устройства термометрической скважины
Fig. 2. Scheme of the device of a thermometric well

Текущий осмотр проводится для выявления первичных признаков деформаций и повреждений фундаментов и охлаждающих устройств, а также для контроля соблюдения условий эксплуатации сооружений. Он осуществляется визуально с использованием фотофиксации выявленных нарушений и деформаций.

По результатам текущего осмотра заполняется журнал наблюдений и, при необходимости, ведомость дефектов. Контрольный осмотр должен проводиться не реже одного раза в год.

В работы контрольного осмотра входят:

- мероприятия, предусмотренные текущим осмотром;
- измерения осадки и наклона фундамента;
- измерения температуры воздуха в подпольном пространстве и грунтов основания, а

также подготовка ведомости дефектов фундаментных конструкций. Геодезические наблюдения осуществляются с использованием нивелиров, теодолитов, тахеометров, сканеров (включая оптические, электронные, лазерные и др.) и навигационных спутниковых систем [9].

Отслеживаются вертикальные и горизонтальные смещения на поверхности грунта, а также сдвиги между слоями. На основе такого мониторинга выявляются некоторые обобщения и закономерности, с помощью которых можно оценить вероятность наступления критических деформаций. При тепловизионной диагностике результаты визуального контроля конденсаторов термостабилизаторов, а также данные тепловизионного обследования и измерения температур грунтов фиксируются в специальном журнале (рис. 3).



Рис. 3. Автономная система горизонтальной термостабилизации
Fig. 3. Autonomous horizontal thermal stabilization system

Контроль работоспособности термостабилизаторов осуществляется в два этапа – визуальный контроль и инструментальный тепловизионный контроль.

Цель гидрогеологических методов заключается в мониторинге изменений уровня подземных вод или пьезометрических напоров для своевременного принятия мер, направленных на предотвращение негативного влияния этих изменений на сооружения и коммуникации,

расположенные вблизи строительной площадки, а также на само строящееся сооружение, включая риск всплытия объекта строительства.

Замеры уровня подземных вод в наблюдательных скважинах проводятся с помощью гидрогеологической рулетки, электроуровнемера или автоматического регистратора с электронной памятью (рис. 4). Точность замеров не должна превышать 3 см.

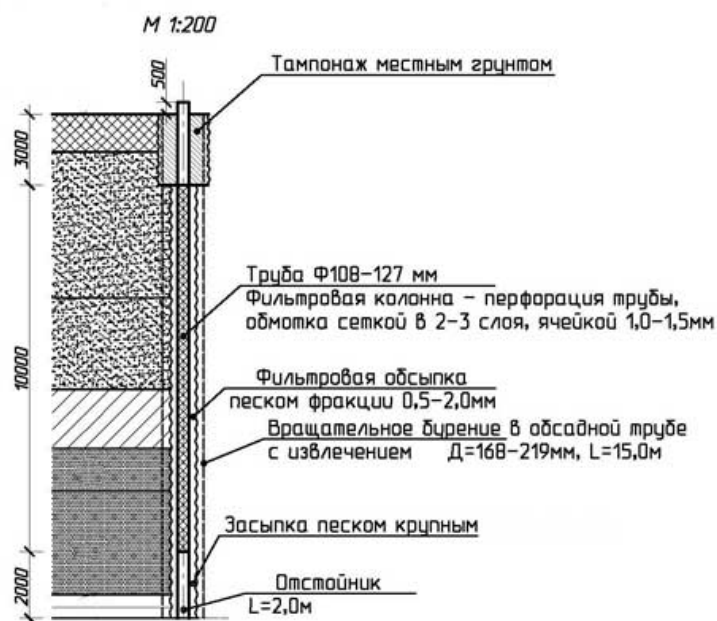


Рис. 4. Схема устройства гидрогеологической скважины
Fig. 4. Scheme of the hydrogeological well device

При наблюдении за изменениями уровней (напоров) нескольких водоносных горизонтов, на которые влияет новое строительство, необходимо организовать кусты наблюдательных скважин, где каждая скважина будет обслуживать соответствующий горизонт.

В процессе наблюдений в термометрических скважинах за изменениями температурного режима грунтов оснований фиксируются следующие параметры:

- температуры грунтов на различных глубинах;
- глубина сезонного промерзания (или оттаивания) грунтов, а также положение кровли мерзлых грунтов или новообразований;
- температуры грунтов на уровне подошвы фундаментов и средние значения температур по глубине их заложения;
- актуальные значения несущей способности грунтов.

Длительность мониторинга определяется в зависимости от выбранного принципа строительства. Первый принцип подразумевает наблюдение на протяжении всего срока эксплуатации, второй — на десять лет с учетом оттаивания или на пять лет с предварительным оттаиванием.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ результатов мониторинга включает в себя сравнение измеренных значений контролируемых параметров с предельными значениями и скоростями их изменений, а также определение необходимости внедрения корректирующих мер. К таким мерам могут относиться изменение технологии выполнения работ или применение специальных геотехнических мероприятий.

По итогам анализа полевых наблюдений назначаются компенсационные мероприятия, целью которых является обеспечение механической безопасности объекта на весь период эксплуатации. Ответственные за организацию и проведение мониторинга сотрудники составляют акты, в которых фиксируются выявленные дефекты и рекомендации по их устранению. Эти акты передаются в эксплуатационную службу для устранения дефектов, после чего проводятся повторные наблюдения.

Компенсационные мероприятия обычно направлены на следующие цели:

- изменение эксплуатационных параметров объектов;
- мониторинг динамики состояния оснований и фундаментов, а также геокриологических процессов;
- предотвращение возникновения опасных геокриологических явлений, таких как водная и водно-тепловая эрозия, солифлюкация и др.;

– стабилизацию теплового режима грунтов, на которых расположены объекты;

– корректировку положения фундаментов объектов в соответствии с проектными требованиями;

– предотвращение деформаций конструкций инженерных сооружений и оборудования;

– устранение последствий негативных экзогенных процессов и деформаций грунтов оснований, фундаментов и конструкций инженерных сооружений.

Стоит отметить, что есть проблемы, связанные с передачей и анализом данных ГТМ. В настоящее время процесс накопления и анализа данных ГТМ производственных объектов на всех стадиях жизненного цикла зданий и сооружений не автоматизирован и выполняется в ручном режиме. Ручной сбор показаний с огромного количества элементов геотехнической сети с последующей ручной оцифровкой данных измерений из-за их разнородности является крайне трудоемким и приводит к низкой скорости принятия управленческих решений по объектам на ММГ. Вопросом автоматизации процесса ГТМ активно занимаются как российские ученые, так и их западные коллеги [2, 6, 11, 14–19].

В крупных российских нефтегазовых компаниях ведутся активные работы по разработке программных комплексов, позволяющих автоматизировать процесс накопления и анализа данных ГТМ для повышения эффективности выполнения процесса ГТМ путем сокращения непроизводительных и дублирующих операций, операций, выполняемых «вручную», оптимизации информационного взаимодействия между проектными институтами и добывающими компаниями, своевременного выявления объектов, на которых превышены критерии надежности геотехнической сети, либо прогнозируется их превышение, в целях обеспечения механической надежности зданий и сооружений в соответствии с требованиями Федерального закона от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», а также СП 25.13330.2012 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах». Это также поможет с ведением архивов по объектам ГТМ без ограничения сроков давности, позволит минимизировать риск ошибок из-за человеческого фактора при формировании геотехнических заключений о возможности эксплуатации сооружений за счет применения современных технологий обработки и анализа данных (нейронные сети), а также сможет

предоставить оперативный доступ к актуальным данным ГТМ и сократить количество задействованного персонала.

На данный момент на рынке представлены автоматизированные системы измерения таких контролируемых параметров, как:

- осадки сооружений;
- температуры грунта;
- уровень и химический состав грунтовых вод;
- прогноз геотехнического состояния объекта.

Основными препятствиями для широкого внедрения автоматизированных систем ГТМ являются недостатки в нормативной базе, отсутствие доступных результатов их применения и отсутствие однозначного подтверждения точности и классов измерений в соответствии с ГОСТ и СП.

Ключевые направления для решения проблем внедрения систем автоматизированного мониторинга включают:

1. Улучшение нормативной базы для промышленных объектов, включая указание на широкий спектр аналогов и четкое установление взаимосвязей между различными нормативными документами, такими как ГОСТ 24846-2019 «Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений» и СП 25.13330.2020 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах».

2. Проведение опытно-промышленных испытаний с последующей доработкой и повыше-

нием точности приборов, а также популяризацию автоматизированных методов и систем среди компаний нефтегазового сектора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение, отметим, что ГТМ зданий и сооружений в сфере топливно-энергетического комплекса России, расположенных на ММГ, является необходимым условием для обеспечения техносферной безопасности на всех этапах жизненного цикла объектов на ММГ.

Мониторинг предоставляет возможность своевременно обнаруживать деформации различных конструкций и грунтов, а также организовывать работы с учетом состояния окружающей застройки, расположения коммуникационных сетей и природных и техногенных факторов.

Перспективы дальнейшего развития ГТМ могут быть связаны со следующим:

1. Создание и внедрение программного обеспечения, которое позволит автоматизировать процесс сбора и анализа данных мониторинга;

2. Обмен данными о результатах ГТМ между компаниями топливно-энергетического комплекса России для составления общей базы мониторинга изменения состояния ММГ [12];

3. Создание системы государственного межведомственного мониторинга за состоянием криолитозоны с целью формирования дальнейших прогнозов и разработки компенсационных мероприятий [12].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Власова А.Ю., Голофаст С.Л. Амплитудно-частотный анализ данных геотехнического мониторинга магистрального трубопровода // Наука и техника в газовой промышленности. 2017. № 1 (69). С. 88–99. EDN: ZULOMR.
2. Макарычева Е.М., Ибрагимов Э.Р., Кузнецов Т.И., Шуршин К.Ю. Применение воздушного лазерного сканирования для геотехнического мониторинга объектов магистрального трубопровода // Наука и технология трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2019. Т. 9. № 1. С. 21–31. <https://doi.org/10.28999/2541-9595-2019-9-1-21-31>. EDN: YZFJHF.
3. Мирсаяпов И.Т., Королева И.В. Особенности геотехнического мониторинга уникальных зданий и сооружений // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 4 (26). С. 147–154. EDN: RSTDXT.
4. Гаврилов А.Н., Грязнова Е.М. Экспресс методы в геотехническом мониторинге // Вестник МГСУ. 2010. № 4-5. С. 61–66. EDN: RTUJKJ.
5. Осокин А.И., Татаринцов С.В., Макарова Е.В. Система геотехнического мониторинга как средство обеспечения безопасности строительства // Жилищное строительство. 2014. № 9. С. 10–18. EDN: SMVCMТ.
6. Смирнов В.В., Земенков Ю.Д., Торопов С.Ю., Сероштанов И.В., Никифоров В.Н. Перспективы развития систем геотехнического мониторинга // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № S4. С. 191–198. EDN: SXLUPR.
7. Карпов А.А., Мальцев А.В. Актуальность проведения геотехнического мониторинга в строительстве // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре: материалы 70-й юбилейной Всеросс. науч.-техн. конф. по итогам НИР 2012 (г. Самара, 15–19 апреля 2013 г.). Самара, 2013. С. 361–364. EDN: TLLHGF.

8. Реутских Н.В., М.А. Бережной М.А., Дуденко И.А. Геотехнический мониторинг для магистральных трубопроводов в различных типах многолетнемерзлых пород // Научный журнал российского газового сообщества. 2016. № 2. С. 22–26. EDN: WBMKHR.
9. Новиков Ю.А., Краев А.Н. Геодезические наблюдения за осадками здания в рамках проведения геотехнического мониторинга // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий. 2019. Т. 24. № 1. С. 28–41. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2019-24-1-28-41>. EDN: ZCHEFF.
10. Иванова А.В., Соловьева Т.А., Бугакова Т.Ю. Геотехнический мониторинг – основа жизненного цикла зданий и сооружений // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2019. Т. 6. № 1. С. 214–220. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2019-6-1-214-220>. EDN: SSWSAM.
11. Верещагин А.Ю., Николенко С.Д., Сазонова С.Д. Информационная система геотехнического мониторинга строительных объектов // Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. 2021. № 2 (24). С. 33–39. EDN: ZGOEUV.
12. Мельников В.П., Осипов В.И., Брушков А.В., Алексеев А.Г., Багина С.В., Бердников Н.М. и др. Развитие геокриологического мониторинга природных и технических объектов в криолитозоне Российской Федерации на основе систем геотехнического мониторинга топливно-энергетического комплекса // Криосфера Земли. 2022. Т. 26. № 4. С. 3–18. <https://doi.org/10.15372/KZ20220401>. EDN: TMLZFZ.
13. Шашкин А.Г. Основы геотехнического мониторинга // Инженерные изыскания. 2013. № 10-11. С. 18–21. EDN: RMTVBT.
14. Ji Xiaohu Ma, HuaFu Pei, Honghu Zhu, Bin Shi, Jianhua Yin A Review of Previous Studies on The Applications of Fiber Optic Sensing Technologies in Geotechnical Monitoring // Rock Mechanics Bulletin. 2023. Vol. 2. Iss. 1. P. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.rockmb.2022.100021>.
15. Lebedev M. Automated Systems as a Part of Geotechnical Monitoring in Construction and Operation of Transport Tunnels // Procedia Engineering. 2016. Vol. 165. P. 448–454. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.719>.
16. Hongkui Gong, Kizil M.S., Zhongwei Chen, Moe Amanzadeh, Ben Yang, Aminossadati S.M. Advances in Fibre Optic Based Geotechnical Monitoring Systems for Underground Excavations // International Journal of Mining Science and Technology. 2019. Vol. 29. Iss. 2. P. 229–238. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.06.007>.
17. Pies M., Velicka J., Hajovsky R. Advanced IoT-Based Wireless Sensors for Remote Geotechnical Monitoring and Structural Diagnostics // IFAC-PapersOnLine. 2024. Vol. 58. Iss. 9. P. 193–198. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.07.395>.
18. Alekseev A., Shilova L., Mefedov E. An Approach for Automatization of Geotechnical Monitoring in Cryolithozone // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1083. P. 1–7. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1083/1/012080>.
19. Di Gennaro L., Damiano E., De Cristofaro M., Netti N., Olivares L., Zona R. et al. An Innovative Geotechnical and Structural Monitoring System Based On the Use of NSHT // Smart Materials and Structures. 2022. Vol. 31. Iss. 6. P. 1–12. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac5fc6>.
20. Dorofeev N.V., Grecheneva A.V., Romanov R.V., Pankina E.S. The Selection of Parameters and Control Points in The Geotechnical Monitoring System // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 873. P. 1–9. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/873/1/012030>.
21. Dorofeev N.V., Pankina E.S. Decision Making in Geotechnical Monitoring Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 988. P. 1–6. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/988/3/032049>.
22. Gairabekov I.G., Kaimov Sh. S-E., Mishieva A.T., Ibragimova E.I., Gairabekov M-B. I., Gayrabekova A.I. Geotechnical Monitoring // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 905. P. 1–11. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/905/1/012026>.
23. Olteanu A.K., Tomsa C., Malancu T. Geotechnical Monitoring - Reducing The Risks Related to The Construction of Infrastructure // Romanian Journal of Transport Infrastructure. 2023. Vol. 12. Iss. 2. P. 1–12. <https://doi.org/10.2478/rjti-2023-0014>.
24. Gryaznova E. Geotechnical Monitoring to Ensure Reliability of Construction and Operation of Buildings and Structures // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. Iss. 5. P. 1–8. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/5/052014>.
25. Gryaznova E. Piled Raft Foundation Assessment Based On Geotechnical Monitoring Results // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1425. P. 1–7. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1425/1/012060>.
26. Kudryavtsev S.A., Valtseva T.Yu., Gavrilov I.I., Kotenko Zh.I., Sokolova N. Geotechnical Monitoring Bearing Capacity Boring Pile Foundations of Bridge During Permafrost Degradation // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1928. P. 1–8. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1928/1/012057>.
27. Potapov A.I., Shikhov A.I., Dunaeva E.N. Geotechnical Monitoring of Frozen Soils: Problems and Possible Solutions // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1064. P. 1–6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1064/1/012038>.
28. Shakurova A.F., Shakurova A.F. Use of Geotechnical Monitoring Data in The Design of the Serginsky Field Development // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1021. P. 1–9.

<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1021/1/012013>.

29. Struchkova G., Kapitonova T., Efremov P. Geotechnical Monitoring of Pipeline Systems Operating Under Conditions of Permafrost (Yakutia) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 666. P. 1–8. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/3/032088>.

REFERENCES

1. Vladova A.Yu., Golofast S.L. Amplitude-Frequency Analysis of Geotechnical Monitoring Data of a Main Pipeline. *Nauka i tekhnika v gazovoi promyshlennosti*. 2017;1(69):88-99. (In Russ.). EDN: ZULOMR.
2. Makarycheva E.M., Ibragimov E.R., Kuznetsov T.I., Shurshin K.Y. Using The Airborne Laser Scanning Method for Geotechnical Monitoring of Pipeline System Facilities. *Science and Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2019;9(1):21-31. (In Russ.). <https://doi.org/10.28999/2541-9595-2019-9-1-21-31>. EDN: YZFJHF.
3. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V. Geotechnical Monitoring Features of Unique Buildings and Structures. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2013;4(26):147-154. (In Russ.). EDN: RSTDXT.
4. Gavrilo A.N., Gryaznova E.M. Express Methods in Geotechnical Monitoring. *Monthly Journal on Construction and Architecture*. 2010;4-5:61-66. (In Russ.). EDN: RTUJKJ.
5. Osokin A.I., Tatarinov S.V., Denisova O.O., Makarova E.V. Geotechnical Monitoring System as a Tool for Ensuring the Safety of Construction. *Housing Construction*. 2014;9:10-18. (In Russ.). EDN: SMVCMT.
6. Smirnov V.V., Zemenkov Y.D., Toropov S.Y., Seroshtanov I.V., Nikiforov V.N. Prospects of Development of Geotechnical Monitoring Systems. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2014;S4:191-198. (In Russ.). EDN: SXLUPR.
7. Karpov A.A., Maltsev A.V. Relevance of Geotechnical Monitoring in Construction. In: *Traditsii i innovatsii v stroitel'stve i arkhitekture: materialy 70-i yubileinoi Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii po itogam NIR 2012 = Traditions and Innovations in Construction and Architecture: Materials of The 70th Anniversary All-Russian Scientific and Technical Conference On the Results of NIR 2012*. 15–19 April 2013, Samara. Samara; 2013. p. 361–364. (In Russ.). EDN: TLLHGF.
8. Reutskiy N.V., Berezhnoy M.A., Dudenko I.A. Geotechnical Monitoring for Main Pipelines in Various Types of Permafrost Soils. *Nauchnyi zhurnal rossiiskogo gazovogo soobshchestva*. 2016;2:22-26. (In Russ.). EDN: WBMKHR.
9. Novikov Yu.A., Kraev A.N. Geodetic Overseeing by Building Settlements Within Carrying Out Geotechnical Monitoring. *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies*. 2019;24(1):28-41. (In Russ.). <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2019-24-1-28-41>. EDN: ZCHEFF.
10. Ivanova A.V., Solovieva T.A., Bugakova T.Yu. Geotechnical Monitoring of Buildings and Structures for The Control and Construction Safety. *Interkspoz GEO-Sibir*. 2019;6(1):214-220. (In Russ.). <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2019-6-1-214-220>. EDN: SSWSAM.
11. Vereshchagin A.Y., Nikolenko S.D., Sazonova S.A. Information System for Geotechnical Monitoring of Construction Objects. *Informatsionnye tekhnologii v stroitel'nykh, sotsial'nykh i ekonomicheskikh sistemakh*. 2021;2(24):33-39. (In Russ.). EDN: ZGOEVV.
12. Melnikov V.P., Osipov V.I., Brouchkov A.V., Alekseev A.G., Badina S.V., Berdnikov N.M. et al. Development of Geocryological Monitoring of Natural and Technical Facilities in The Regions of the Russian Federation Based On Geotechnical Monitoring Systems of Fuel and Energy Sector. *Earth's Cryosphere*. 2022;26(4):3-18. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/KZ20220401>. EDN: TMLZFZ.
13. Shashkin A.G. The Basics of Geotechnical Monitoring. *Inzhenernye izyskaniya*. 2013;10-11:18-21. (In Russ.). EDN: RMTVBT.
14. Jiaxiao Ma, Huafu Pei, Honghu Zhu, Bin Shi, Jianhua Yin A Review of Previous Studies on The Applications of Fiber Optic Sensing Technologies in Geotechnical Monitoring. *Rock Mechanics Bulletin*. 2023;2(1):1-16. <https://doi.org/10.1016/j.rockmb.2022.100021>.
15. Lebedev M. Automated Systems as a Part of Geotechnical Monitoring in Construction and Operation of Transport Tunnels. *Procedia Engineering*. 2016;165:448-454. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.719>.
16. Hongkui Gong, Kizil M.S., Zhongwei Chen, Moe Amanzadeh, Ben Yang, Aminossadati S.M. Advances in Fibre Optic Based Geotechnical Monitoring Systems for Underground Excavations. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019;29(2):229-238. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.06.007>.
17. Pies M., Velicka J., Hajovsky R. Advanced IoT-Based Wireless Sensors for Remote Geotechnical Monitoring and Structural Diagnostics. *IFAC-PapersOnLine*. 2024;58(9):193-198. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.07.395>.
18. Alekseev A., Shilova L., Mefedov E. An Approach for Automatization of Geotechnical Monitoring in Cryolithozone. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1083:1-7. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1083/1/012080>.

19. Di Gennaro L., Damiano E., De Cristofaro M., Netti N., Olivares L., Zona R. et al. An Innovative Geotechnical and Structural Monitoring System Based On the Use of NSHT. *Smart Materials and Structures*. 2022;31(6):1-12. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac5fc6>.
20. Dorofeev N.V., Grecheneva A.V., Romanov R.V., Pankina E.S. The Selection of Parameters and Control Points in The Geotechnical Monitoring System. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;873:1-9. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/873/1/012030>.
21. Dorofeev N.V., Pankina E.S. Decision Making in Geotechnical Monitoring Systems. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;988:1-6. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/988/3/032049>.
22. Gairabekov I.G., Kaimov Sh. S-E., Mishieva A.T., Ibragimova E.I., Gairabekov M-B. I., Gayrabekova A.I. Geotechnical Monitoring. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;905:1-11. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/905/1/012026>.
23. Olteanu A.K., Tomsa C., Malancu T. Geotechnical Monitoring - Reducing The Risks Related to The Construction of Infrastructure. *Romanian Journal of Transport Infrastructure*. 2023;12(2):1-12. <https://doi.org/10.2478/rjti-2023-0014>.
24. Gryaznova E. Geotechnical Monitoring to Ensure Reliability of Construction and Operation of Buildings and Structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;365(5):1-8. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/5/052014>.
25. Gryaznova E. Piled Raft Foundation Assessment Based On Geotechnical Monitoring Results. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1425:1-7. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1425/1/012060>.
26. Kudryavtsev S.A., Valtseva T.Yu., Gavrilov I.I., Kotenko Zh.I., Sokolova N. Geotechnical Monitoring Bearing Capacity Boring Pile Foundations of Bridge During Permafrost Degradation. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1928:1-8. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1928/1/012057>.
27. Potapov A.I., Shikhov A.I., Dunaeva E.N. Geotechnical Monitoring of Frozen Soils: Problems and Possible Solutions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1064:1-6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1064/1/012038>.
28. Shakurova A.F., Shakurova A.F. Use of Geotechnical Monitoring Data in The Design of the Serginsky Field Development. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;1021:1-9. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1021/1/012013>.
29. Struchkova G., Kapitonova T., Efremov P. Geotechnical Monitoring of Pipeline Systems Operating Under Conditions of Permafrost (Yakutia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;666:1-8. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/3/032088>.

Информация об авторах

Каблуков Андрей Валерьевич,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: andrewkablukov@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0002-1152-0629>

Дмитриева Татьяна Львовна,
д.т.н., доцент, заведующий кафедрой
механики и сопротивления материалов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
✉e-mail: dmitrievat@list.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4622-9025>
Author ID: 312501

Ященко Владимир Петрович,
к.т.н., доцент, доцент кафедры механики
и сопротивления материалов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: vp_yashenko@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3800-0570>
Author ID: 179786

Information about the authors

Andrei V. Kablukov,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russia,
e-mail: andrewkablukov@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0002-1152-0629>

Tatiana L. Dmitrieva,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of Mechanics
and Resistance of Materials,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
✉e-mail: dmitrievat@list.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4622-9025>
Author ID: 312501

Vladimir P. Yashchenko,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Mechanics and Strength of Materials,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: vp_yashenko@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3800-0570>
Author ID: 179786

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 10.01.2025.
Одобрена после рецензирования 20.01.2025.
Принята к публикации 21.01.2025.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 10.01.2025.
Approved after reviewing 20.01.2025.
Accepted for publication 21.01.2025.