

## ДЕФОРМАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ЗДАНИЯ НА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ\*

Г.Н. Гусев, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

В.В. Епин, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Р.В. Цветков, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Ф.Д. Сологуб, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

### Для цитирования:

Гусев Г.Н., Епин В.В., Цветков Р.В., Сологуб Ф.Д. Деформационный мониторинг здания на многолетнемерзлых грунтах // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2025. – № 4. – С. 80–86. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2025.4.7>

Мониторинг деформированного состояния строительных конструкций в условиях Арктики имеет стратегически важное значение. Массовое применение недорогих измерительных систем и адаптация их к суровым температурным условиям позволит осуществлять контроль за фундаментами зданий при таянии грунтов криолитозоны. В работе показаны этапы адаптации измерительной системы на основе метода гидростатического нивелирования для эксплуатации в северных регионах. Приведено описание элементов системы мониторинга, смонтированной на здании в г. Якутск. Показаны начальные результаты измерений.

**Ключевые слова:** Арктика, криолитозона, здание, мониторинг, гидростатический нивелир.

Актуальной задачей строительства и эксплуатации зданий является разработка и внедрение методов и средств, обеспечивающих непрерывный мониторинг механического состояния объектов, в том числе расположенных в арктических регионах РФ [1]. Решение этой задачи в условиях Арктики, помимо стандартных проблем при организации долговременных измерений, сопряжено с дополнительными. Главная из них – это воздействие перепада температур окружающего воздуха на эксплуатируемые сооружения (средний

диапазон в течение года от +40°C до -50°C). Однако, наряду с этим, в связи с изменениями климатических условий, в последние десятилетия возникла новая проблема, связанная с таянием многолетнемерзлых грунтов [2-3] и, как следствие, с существенным изменением механических свойств оснований, на которых располагаются здания и инженерные сооружения [4-5]. Данные проблемы свидетельствуют об актуальности темы обеспечения постоянного контроля механического состояния зданий и инженерных

\* Работа выполнена в рамках государственного задания (номер темы №124040500016-9).

сооружений, расположенных в Арктической зоне, особенно с учетом изменяющихся свойств грунтов в связи с опусканием горизонта криолитозоны.

У сотрудников коллектива ПФИЦ УрО РАН имеется опыт создания и эксплуатации различных вариантов систем деформационного мониторинга строительных объектов [6-8]. Многие из них имеют в своем составе гидростатические нивелиры, контролирующие неоднородные осадки сооружений с необходимым пространственным разрешением. В постоянно меняющихся инженерно-геологических условиях, которые характерны для таяния грунтов криолитозоны, использование таких измерительных средств более чем оправдано. Однако реализация типовых схем мониторинга осуществлялась для климатических условий средней полосы России или внутри теплового контура зданий. В рамках проекта создания молодежной лаборатории «Интеллектуального мониторинга» на базе ПФИЦ УрО РАН (г. Пермь) были поставлены задачи адаптации систем деформационного мониторинга к суровым арктическим условиям и опытной эксплуатации с целью выявления и решения возникающих проблем.

Первой задачей являлся подбор подходящих материалов для элементов системы мониторинга, а также организации процесса непрерывных измерений и рабочих условий для оборудования. Необходимо было учесть специфические конструктивные особенности зданий в условиях криолитозоны, большинство из которых имеют возвышающийся над поверхностью земли свайный фундамент, острия свай его оперты на многолетнемерзлые грунты. Вытекающей из этого конструктивной особенностью сооружений является отсутствие цокольных и подвальных помещений – пространство под зданием защищено от прямых солнечных лучей, но вентилируется окружа-

ющим арктическим воздухом, что замедляет процессы оттаивания. Данное обстоятельство, с одной стороны, существенно упрощает и ускоряет монтаж элементов системы мониторинга непосредственно на стволы свай под зданием для контроля их вертикальных перемещений. С другой стороны, сильно затрудняет монтаж гидростатических нивелиров внутри теплового контура здания. Однако отрицательные температуры накладываю серьезные ограничения на материалы датчика-нивелира. Так, например, от проверенных временем ПВХ гидролиний пришлось отказаться и использовать силиконовые, пригодные к использованию при температурах до  $-60^{\circ}\text{C}$ . Это, в свою очередь, повлекло за собой отказ от масел на силиконовой основе (типа ПМС-1.5), имеющих подходящие параметры вязкости в области низких температур ввиду негативных химических процессов взаимодействия силиконовых элементов системы гидролиний и неконтролируемых изменений механических свойств контуров сообщения датчиков. Была найдена альтернатива гидронивелировочной жидкости в виде водных растворов гликолей. Окончательный выбор был сделан в пользу нетоксичного 65% раствора пропиленгликоля. Данный раствор имеет температуру кристаллизации около  $-60^{\circ}\text{C}$  и не вступает в химическую реакцию с силиконовыми гидролиниями, однако обладает более высокой вязкостью, чем силиконовые масла.

Диапазон работы электронных компонентов датчиков, как правило, регламентируется температурами выше  $-40^{\circ}\text{C}$ , что также потенциально может повлиять на работоспособность при существенно более низких температурах. Поэтому часть электронных устройств (таких как устройства сбора данных и коммутации) следовало разместить внутри теплового контура помещений. Для модулей датчиков-гидро-

нивелиров, находящихся вне теплового контура, следовало предусмотреть подсистему обогрева. Планируемые к установке элементы системы (компоненты датчиков и электронные модули) были протестированы в климатической камере Института механики сплошных сред УрО РАН при температуре  $-45^{\circ}\text{C}$  и показали свою работоспособность.

Для опытной эксплуатации оборудования в 2025 г. был осуществлен монтаж системы деформационного мониторинга на здание «Института физико-техниче-

ских проблем севера им. В.П. Ларионова» в г. Якутск. Данное сооружение является сборной железобетонной каркасной строительной конструкцией на свайном основании с высоким ростверком (рис. 1). Острия 10-ти метровых свай оперты на многолетнемерзлые грунты, горизонт которых неуклонно снижается в последние десятилетия. Здание построено в 1978 году и как многие строительные объекты в такого рода условиях нуждается в непрерывном деформационном мониторинге.



Рис. 1. Объект мониторинга

Основным измерительным средством, осуществляющим контроль за процессами неравномерной осадки здания, является подсистема гидростатического нивелирования из 10 датчиков-нивелиров, размещенная на элементах фундамента здания. Также осуществляется контроль температуры и наклона стен внутри здания. Показания со всех устройств передаются по линиям связи на устройство сбора данных, расположенное внутри теплового контура здания (рис. 2) и далее по сети Интернет передаются на сервер. Устройство сбора данных содержит в себе источники питания датчиков и подсистемы обогрева, коммутатор для связи с устройствами по Ethernet, конвертер сигналов по шине

RS-485, модуль аналогового ввода Owen MB110 для опроса термодатчиков. «Мозгом» системы является локальная рабочая станция под управление операционной системы Linux, которая осуществляет опрос всех типов датчиков: запись, обработку, архивирование и передачу данных на удаленный сервер, который находится на территории ПФИЦ УрО РАН, г. Пермь.

Для подсистемы гидронивелирования был разработан измерительный модуль датчика, жестко закрепляемый на фундаментах конструкции. Он содержит в себе измерительную трубку с жидкостью, шкалу и ip-камеру. Данный подход хорошо себя зарекомендовал и использовался во многих проектах [6,7].



Рис. 2. Устройство сбора данных

Положение мениска относительно маркеров и шкалы позволяет отслеживать уровень жидкости в измерительном сосуде. Изменение относительной разности уровней жидкости во всех сосудах относительно выбранного базового позволяет получать картину распределения относительных осадок сооружения. Изображение, получаемое с камеры устройства, представлено на рис. 3. Стоит отметить, что в текущую версию модуля датчика-нивелира встроен датчик температуры (красный столб в правой части кадра), для визуального контроля работоспособности устройства.



Рис. 3. Типовое изображение с камеры датчика-гидронивелира

Модуль гидронивелира закрыт защитным металлическим коробом, утепленным снаружи термоизоляционным материалом. Внутри на металлической части корпуса расположен нагревательный элемент с радиатором, который при необходимости может включаться в работу. Начальные измерения при температуре  $-35^{\circ}\text{C}$  показали, что данное решение обеспечивает температуру внутри модуля на 12-15 градусов выше окружающей среды, что теоретически достаточно для примененных электронных устройств.



Рис. 4. Внешний вид модуля системы гидронивелирования

Внешний вид модуля датчика-гидронивелира, размещенного на фундаменте здания, показан на рис. 4. С двух сторон к нему подходят гидролинии системы и линии связи, обеспечивающие питание и передачу данных. Измерительные элементы системы размещены с внутренней части фундамента здания, чтобы исключить попадание прямых солнечных лучей на датчики и гидролинии. Всего на фундаментные конструкции было установлено 10 измерительных модулей. В гидросистему встроен расширительный бак емкостью 10 литров, для компенсации теплового расширения в системе.

Монтаж системы был завершен в начале октября 2025 года, при температуре окружающего воздуха около нуля градусов Цельсия. С этого времени начался процесс измерений и обработки показаний датчиков системы. На рисунках ниже представлены первые результаты.

На рис. 5 представлено изменение температуры воздуха под зданием (x1)

и внутри двух модулей датчиков-гидронивелиров. Видно, что за полтора месяца температура снизилась до  $-35^{\circ}\text{C}$ . До включения подогрева 24.11.2025 г., температуры внутри модулей были выше температуры окружающей среды на несколько градусов. После включения обогрева разница стала составлять  $10-15^{\circ}\text{C}$ .

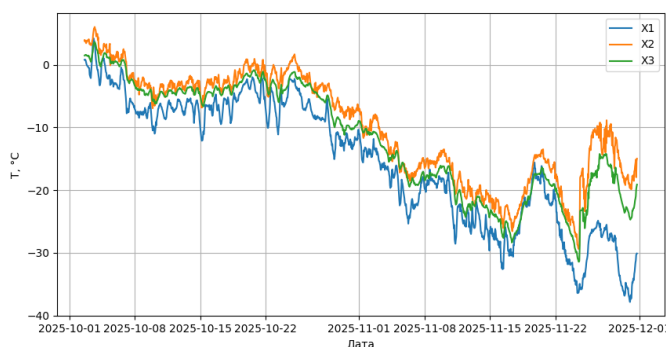


Рис. 5. Изменение температуры воздуха (1) и датчиков (2-3)

На рис. 6 представлены изменения уровня жидкости в датчиках. Несмотря на наличие бака, расположенного около датчика №1, наблюдается снижение уровня жидкости во всех датчиках, связанное со снижением температуры окружающего воздуха. Происходят колебания уровней жидкости в измерительных сосудах в течение дня, наиболее заметные на датчиках, расположенных на удалении от расширительного бака. Это связано с перетоком жидкости внутри гидролиний системы под воздействием неравномерно

меняющегося внешнего поля температур. Следует отметить увеличение амплитуды пульсаций с уменьшением температуры окружающего воздуха. Это связано с увеличением вязкости гидронивелировочной жидкости, которой требуется больше времени для установления в положении гидростатического равновесия. Однако практический интерес представляет не сам уровень жидкости, а разность его значений во времени, которая показывает вертикальные смещения (осадку) фундаментов относительно одного из датчиков.

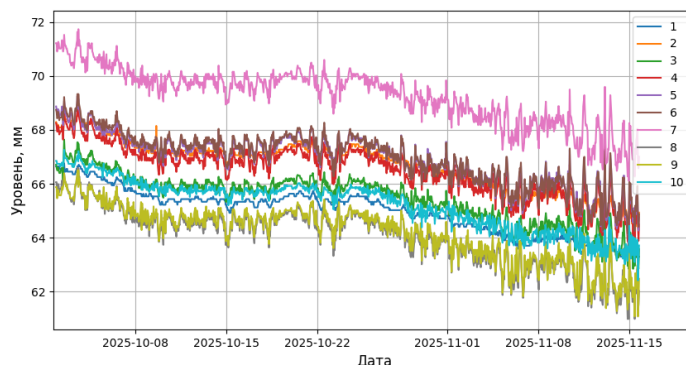


Рис. 6. Изменение уровня жидкости в датчиках

На рис. 7 показаны графики усредненных значений вертикальных перемещений (осадки) всех датчиков относительно датчика №1. Видно, что в текущий момент измерений неравномерной осадки здания практически не наблюдается. Зимние условия являются идеальным тестом для проверки измерительного оборудования. В такого рода условиях оно должно де-

монстрировать работоспособность и стабильность измерений. Дальнейшие измерения, в том числе в период положительных температур, позволят оценить температурное влияние на осадку сооружения.

В статье приведены основные этапы создания системы деформационного мониторинга, адаптированного к условиям работы в северных регионах.

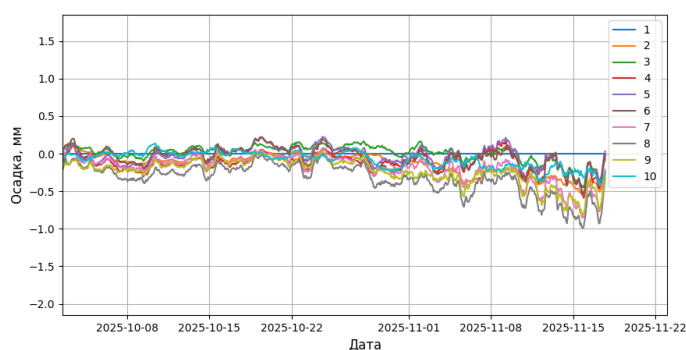


Рис. 7. Осадка датчиков относительно датчика №1

#### Библиографический список

1. Уставич Г.А., Аврунев Е.И., Сальников В.Г., Попов В.К. Особенности выполнения деформационного мониторинга инженерных сооружений в условиях вечной мерзлоты // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 4. – С. 97–109.
2. Васильев А.А., Гравис А.Г., Губарьков А.А. Деградация мерзлоты: результаты многолетнего геокриологического мониторинга в западном секторе российской Арктики // Криосфера Земли. – 2020. – Т. 24, № 2. – С. 15-30. – [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-2\(15-30\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30)).
3. Ривкин Ф.М., Власова Ю.В., Пармузин И.С. Закономерности изменения геокриологических условий в результате осадки мерзлых пород при оттаивании // Криосфера земли. – 2017. – Т. 21. – №6. – С. 26 – 34.
4. Емельянова И.А. Основные причины деформаций зданий и сооружений городов криолитозоны // Литосфера. – 2011. – № 3. – С. 144-149.
5. Гарькин И.Н., Гарькина И.А., Ключев С.В., Саденко Д.С. Из опыта экспертизы конструкций зданий и сооружений в условиях Крайнего Севера // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 4(53). – С. 66-74. – [https://doi.org/10.54734/20722958\\_2022\\_4\\_66](https://doi.org/10.54734/20722958_2022_4_66).
6. Tsvetkov R., Shardakov I., Shestakov A., Gusev G., Glot I., Epin V. Dynamic processes in hydrostatic leveling systems with various configuration and fluid properties // Procedia Structural Integrity. –2021– Vol. 32. – P. 209-215. – <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.09.030>.
7. Гусев Г.Н., Цветков Р.В., Епин В.В., Сологуб Ф.Д. Анализ деформационного поведения надшахтной конструкции в условиях таяния грунтов основания // Горная промышленность. – 2025. – № S4. – С. 23-26. – <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-23-26>.
8. Tsvetkov R.V., Lekomtsev S.V., Yepin V.V. Temperature error in a hydrostatic leveling system and its reduction // Structural Control and Health Monitoring. – 2021. – Vol. 28, No. 2. – P. e2668. – <https://doi.org/10.1002/stc.2668>.

DEFORMATION MONITORING OF BUILDINGS ON PERMAFROST SOILS

Gusev G.N., Epin V. V., Tsvetkov R.V., Sologub F.D.

*Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS*

---

**For citation:**

*Gusev G.N., Epin V. V., Tsvetkov R.V., Sologub F.D.* Deformation monitoring of buildings on permafrost soils // Perm Federal Research Center Journal. – 2025. – № 4. – P. 80–86. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2025.4.7>

---

Monitoring the deformation state of building structures in Arctic conditions is of strategic importance. Widespread use of inexpensive measuring systems and their adaptation to harsh temperature conditions will make it possible to monitor the foundations of buildings during the melting of cryolithozone soils. The paper describes the stages of adapting a hydrostatic leveling-based measuring method for the use in northern regions. The description of the monitoring system elements mounted on a building in Yakutsk is provided. Initial measurement results are presented.

*Keywords: Arctic, building, permafrost, monitoring, hydrostatic level.*

**Сведения об авторах**

*Гусев Георгий Николаевич*, кандидат технических наук, заведующий лабораторией интеллектуального мониторинга, Институт механики сплошных сред УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИМСС УрО РАН»), 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1; e-mail: [gusev.g@icmm.ru](mailto:gusev.g@icmm.ru)

*Епин Валерий Валерьевич*, младший научный сотрудник лаборатории интеллектуального мониторинга, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: [epin.v@icmm.ru](mailto:epin.v@icmm.ru)

*Цветков Роман Валерьевич*, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории интеллектуального мониторинга, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: [flower@icmm.ru](mailto:flower@icmm.ru)

*Сологуб Федор Денисович*, инженер-исследователь лаборатории интеллектуального мониторинга, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: [sologub.f@icmm.ru](mailto:sologub.f@icmm.ru)

*Материал поступил в редакцию 05.12.2025*