

## Анализ деформационного поведения надшахтной конструкции в условиях таяния грунтов основания

Г.Н. Гусев✉, Р.В. Цветков, В.В. Епин, Ф.Д. Сологуб

Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Российская Федерация  
✉ gusev.g@icmm.ru

**Резюме:** Задачи обеспечения безопасной эксплуатации строящихся и эксплуатируемых ответственных строительных сооружений и конструкций как никогда актуальны сегодня. Технология проходки и строительства шахтного ствола на территории горно-обогатительного комбината в г. Петрикове (республика Беларусь) связана с замораживанием грунтового породного массива, поэтому возведение фундаментов надшахтной конструкции производилось на площадке, расположенной в зоне замороженных грунтов. При оттаивании породного массива, происходившего в течение многих месяцев, основание сооружения, построенного над шахтой для поднятия калийной руды, подвергалось опасному техногенному воздействию. В работе описан опыт применения системы непрерывного контроля деформационных параметров конструкции в процессе ее монтажа и промышленной эксплуатации. Представлены результаты долгосрочного мониторинга деформационного поведения строительных конструкций, демонстрирующие стабилизацию деформационных параметров при окончательной разморозке грунтов вокруг шахтного ствола. В силу того что задача размораживания грунтов основания на описанном объекте феноменологически схожа с проблематикой задач таяния многолетнемерзлых грунтов Севера РФ, результаты проведенного исследования являются основой разрабатываемого метода контроля и анализа деформационного поведения строительных конструкций для условий Арктики, в зоне опускания горизонта криолитозоны.

**Ключевые слова:** система деформационного мониторинга, датчики деформации, долгосрочные измерения, размораживание грунтового массива

**Благодарности:** Работа выполнена за счет средств государственной бюджетной темы №12440500016-9.

**Для цитирования:** 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;(4S):23–26. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-23-26>

## Analysis of the deformation behavior of the mine head frame structure at thawing of the foundation soils

G.N. Gusev✉, R.V. Tsvetkov, V.V. Yepin, F.D. Sologub

Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation  
✉ gusev.g@icmm.ru

**Abstract:** The problems of ensuring safe operation of critical facilities and structures under construction and in operation are more relevant than ever today. The technology of sinking and construction of a shaft on the territory of the mining and concentration plant in Petrikov (Republic of Belarus) was associated with freezing of the soil mass, therefore, the foundation of the mine structure was built on a site located within the zone of frozen soils. Due to thawing of the soil mass which was taking place over many months, the base of the structure built above the mine to hoist the potash ore was subjected to dangerous man-caused effects. The paper describes the experience of using a system for continuous monitoring of the deformation parameters of a structure during its installation and commercial operation. The paper presents the results of long-term monitoring of the deformation behavior of the building structures that demonstrate stabilization of the deformation parameters during the final thawing of the soils around the shaft. Due to the fact that the issue of foundation soils thawing at the described facility is phenomenologically similar to the problem of the permafrost soil thawing in the north of the Russian Federation, the results of the study can be used as the basis for a developed method of monitoring and analyzing the deformation behavior of the building structures for Arctic conditions in the permafrost zone.

**Keywords:** deformation monitoring system, strain gauges, long-term measurements, soil mass thawing

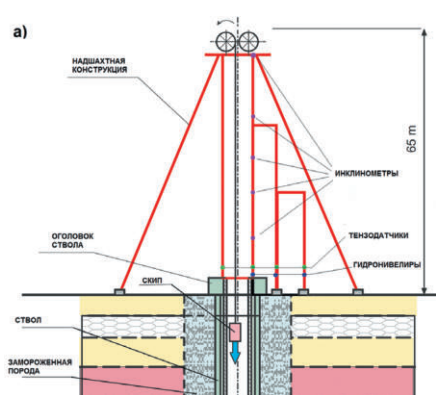
**Acknowledgements:** The study was made in the framework of the government task, registration number of the theme No.12440500016-9.

**For citation:** Gusev G.N., Tsvetkov R.V., Yepin V.V., Sologub F.D. Analysis of the deformation behavior of the mine head frame structure at thawing of the foundation soils. *Russian Mining Industry*. 2025;(4S):23–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-23-26>

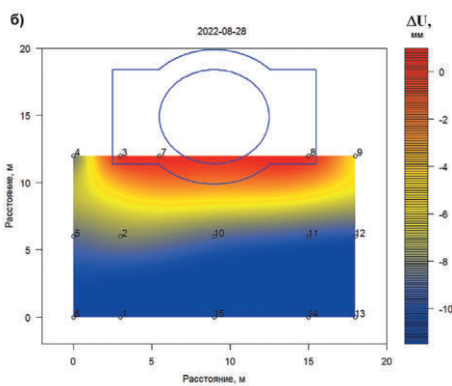
## Введение

Мониторинг деформационного состояния ответственных строительных конструкций актуален [1; 2] и критически важен, тем более для горного оборудования [3]. В практике строительства и эксплуатации технологически сложных сооружений возникают ситуации, которые связаны с различного рода техногенным воздействием, предопределить заранее степень влияния которого сложно. Ввиду особенностей технологии проходки и строительства шахтного ствола на территории горно-обогатительного комбината в г. Петрикове (Республика Беларусь), связанной с замораживанием грунтов на площадке производства работ, часть фундаментов вышележащего строительного сооружения была построена на мерзлых грунтах. В процессе оттаивания здание получило дополнительные перемещения. Целью проведенного исследования была организация системы измерения деформационного поведения объекта (надшахтного здания СКИПового ствола), для того чтобы оценить изменение его напряженного состояния в процессе деградации механических свойств грунтов в основании сооружения.

Подробное описание исследуемого сооружения представлено в работе [4]. В процессе строительства шахтного ствола, которое предвляло строительство самого надшахтного здания, грунты в активной зоне были заморожены посредством организации системы скважин, в которых постоянно циркулировал хладагент. Описание технологии замораживания приведено в работе [5; 6].



**Рис. 1**  
Схема размещения датчиков (а)  
и изополе неравномерных осадок (б)



**Fig. 1**  
A schematic drawing of the sensor  
locations (а) and the isofield of uneven  
settlements (б)

Происходящий затем естественный процесс оттаивания грунтов [7] в активной толще и связанный с ним процесс деградации механических свойств основания потенциально мог привести к развитию неравномерных осадок сооружения. Вызванное этим изменение деформированного состояния всего вышележащего сооружения нуждалось в постоянном контроле, чтобы не допустить развития неконтролируемых процессов перехода части конструкции или всей ее несущей системы в неработоспособное состояние. Именно это явилось главной задачей проведенного исследования.

## Материалы и методы

Были разработаны и реализованы четыре ветви первичных датчиков, которые ориентированы на регистрацию квазистатических параметров сооружения. Для измерения неравномерных осадок применялись датчики на основе метода гидростатического нивелирования [8; 9]. На несущих элементах сооружения в уровне первого этажа было смонтировано 15 гидронивелиров: на оголовок шахтного ствола и ряды несущих колонн. 20 датчиков деформации тензометрического типа, вторая ветвь системы, использовались для контроля механического отклика сооружения на изменение деформированного состояния. 5 двухосевых инклинометров были использованы для контроля наклона сооружения в двух плоскостях на всей высоте – 65 м. Последняя, четвертая, ветвь системы представляла из себя 5 точек контроля температуры посредством термосопротивлений в зонах расположения остальных измерительных ветвей. Детальная схема расположения датчиков, подробное описание всей системы, технология монтажа, а также аспекты создания и использования отдельных типов датчиков приведены в работах [10–12]. На первом этапе измерений, в конце 2019 г., была развернута сеть гидронивелиров и датчиков температуры, по прошествии полугода на объекте заработали датчики инклинометрирования и тензометрирования.

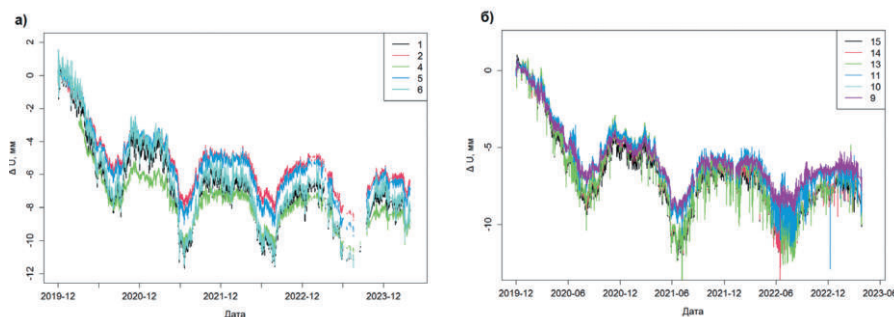
## Результаты

Ниже приведены результаты измерений контрольных параметров – относительных вертикальных перемещений, показаний датчиков деформаций, данных инклинометрии на ряде несущих элементов (колоннах) за период в три с половиной года.

На рис. 2 представлены результаты измерений относительной составляющей осадок в основании сооружения. Номерам на схеме соответствуют контролируемые вертикальные несущие элементы – колонны. На схеме изображен контур оголовка шахтного ствола (синим цветом). Базовыми точками гидронивелирования являются точки 3 и 7. Точка 3 является отчетной для контура гидронивелирования из 6 датчиков – с 1-го по 6-й. Точка 7 – для контура из 6 датчиков с 7-го по 15-й.

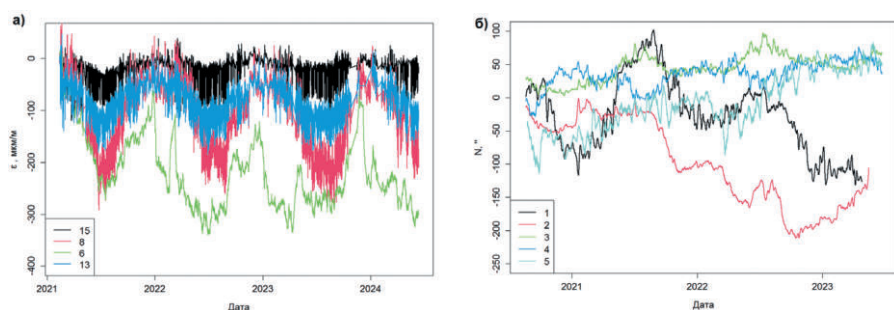
Поле накопленных средних величин относительных осадок построено на середину 2022 г. (рис. 1, а). Именно эта часть фундаментов сооружения, на схеме они соответствуют точкам, удаленным от оголовка шахтного ствола, была возведена на мерзлых грунтах.

На рис. 2 изображены величины относительных осадок за период с конца 2019 г. по первый квартал 2023 г. В 2019 г. на строящемся здании были смонтированы ветви системы гидронивелирования и уже несколько месяцев как была отключена система охлаждения грунтов вокруг шахтного ствола. На рисунках видно, что первые два года наблюде-



**Рис. 2**  
Результаты измеренных относительных осадок методом гидронивелирования: контур с датчиками 1–6 (а), контур с датчиками 7–15 (б)

**Fig. 2**  
The results of measuring relative settlements using the hydrolevelling method: sensors 1–6 (a), sensors 7–15 (b)



**Рис. 3**  
Результаты измерений деформаций (а) и наклонов (б)

**Fig. 3**  
The results of measuring the strains (a) and inclinations (b)

ний процесс накопления осадок, связанный с размораживанием грунта, шел максимально интенсивно. После двух лет измерений отчетливо наметился тренд к стабилизации процесса накопления осадок. Также на графиках видны сезонные колебания вертикальной составляющей относительных осадок, которые связаны с изменением поля температур и его воздействием на бетонное тело шахтного ствола. Анализ этого влияния описан в работе А.В. Пугина и др. [13].

На рис. 3, а приведены результаты измерений величины деформаций в части несущих элементов стального каркаса здания (в колоннах) и данные по наклонам всего сооружения (рис. 3, б). Линия инклинометрирования расположена в районе т. 7. Инклинометр №1 расположен на высоте порядка 10 м от грунтового основания, №5 на высоте порядка 58 м. Шаг инклинометров по высоте равномерен. По результатам наблюдений также отчетливо виден процесс стабилизации деформационных процессов на объекте контроля.

### Обсуждение результатов

Анализ результатов проведенных измерений позволил выявить и регистрировать процессы оттаивания грунтов

основания сооружения СКИПового ствола. Из представленных результатов видно, что процесс стабилизации основания сооружения регистрируется всеми описываемыми ветвями системы мониторинга сообразно. Также выявлено, что наблюдаемые сезонные изменения показаний всех типов датчиков коррелируют с температурой и связаны с процессом сезонного температурного расширения шахтного ствола, что приводит к перераспределению деформаций в элементах конструкции и изменению ее наклонов. Об этом также свидетельствуют высокие значения коэффициентов корреляции разных систем датчиков между собой, которые достигают значений 0.9.

Все это говорит о том, что по результатам проведенных измерений зафиксирован процесс стабилизации основания сооружения, который вызван таянием замороженных грунтов.

Анализ результатов нескольких лет наблюдений в совокупности с результатами численного моделирования позволил оценить уровень влияния процессов развития осадок в основании сооружения на НДС здания в целом и сделать вывод о возможности дальнейшей эксплуатации сооружения.

### Заключение

Представленная в исследовании методика деформационного мониторинга строительной конструкции, которая находится в сложных инженерно-геологических условиях и испытывает влияние от изменения свойств грунтов в основании, позволила зарегистрировать процессы эволюции его НДС. Помимо регистрации параметров деформированного состояния в совокупности с разработанной математической моделью сооружения удалось оценить возможность безопасной эксплуатации здания, которое находилось в зоне влияния таяния мерзлых грунтов.

Представленные разработки и описанная методика деформационного мониторинга лежат в основе разрабатываемых сегодня систем для ряда сооружений, которые находятся в условиях таяния грунтов криолитозоны. Близкая специфика деформационных процессов в основании строительных сооружений, которая связывает эти задачи, позволяет использовать описанные наработки для анализа НДС зданий и сооружений в зоне таяния вечномёрзлых грунтов.

### Список литературы / References

- Hao D., Li Y., Liu H., Xu Z., Zhang J., Ren J., Wu J. Deformation monitoring of large steel structure based on terrestrial laser scanning technology. *Measurement*. 2025;248:116962. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.116962>
- Xiong H.-B., Cao J.-X., Zhang F.-L. Inclinomater-based method to monitor displacement of high-rise buildings. *Structural Monitoring and Maintenance*. 2018;5(1):111–27. <https://doi.org/10.12989/SMM.2018.5.1.111>



3. Rusiński E., Moczko P., Odyjas P. Estimating the remaining operating time of mining headframe with consideration of its current technical condition. *Procedia Engineering*. 2013;57:958–966. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.122>
4. Shardakov I., Glot I., Shestakov A., Tsvetkov R., Gusev G., Yepin V. System for monitoring deformation processes in high-rise metal structure. *Procedia Structural Integrity*. 2023;48:127–134. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.07.138>
5. Levin L., Golovatyi I., Zaitsev A., Pugin A., Semin M. Thermal monitoring of frozen wall thawing after artificial ground freezing: Case study of Petrikov Potash Mine. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021;107:103685. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103685>
6. Levin L., Semin M., Golovatyi I. Analysis of the structural integrity of a frozen wall during a mine shaft excavation using temperature monitoring data. *Fracture and Structural Integrity*. 2022;17(63):1–12. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.63.01>
7. Оглоблина А.А., Пугин А.В. Контроль размораживания ледопородного ограждения за крепью ствола при подготовке к тампонажным работам. *Горное эхо*. 2022;(3):88–92. <https://doi.org/10.7242/echo.2022.3.14>  
Ogloblina A.A., Pugin A.V. Control of the thawing of the ice fence behind the trunk anchorage in preparation for grouting operations. *Gornoe Ekho*. 2022;(3):88–92. (In Russ.) <https://doi.org/10.7242/echo.2022.3.14>
8. Meier E., Geiger A., Ingensand H., Licht H., Limpach P., Steiger A., Zwysig R. Hydrostatic levelling systems: Measuring at the system limits. *Journal of Applied Geodesy*. 2010;4(2):91–102. <https://doi.org/10.1515/jag.2010.009>
9. Jacob T., Chéry J., Boudin F., Bayer R. Monitoring deformation from hydrologic processes in a karst aquifer using long-baseline tiltmeters. *Water Resources Research*. 2010;46(9):W09542. <https://doi.org/10.1029/2009WR008082>
10. Epin V., Glot I., Gusev G., Tsvetkov R., Shardakov I., Shestakov A. Hydrostatic leveling system for monitoring the headframe of the mine shaft. *Procedia Structural Integrity*. 2021;32:64–70. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.09.010>
11. Glot I., Shardakov I., Shestakov A., Tsvetkov R., Gusev G. Inclinomometer-based long-term monitoring of the headframe of salt mine shaft. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1945:012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1945/1/012009>
12. Gusev G., Glot I., Epin V., Tsvetkov R., Shardakov I., Shestakov A. Experience of using tensorresistive strain gauges in corrosive environments. *Procedia Structural Integrity*. 2021;32:49–55. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.09.008>
13. Пугин А.В., Богомягков А.В., Оглоблина А.А., Агеева К.М. Особенности эксплуатации ледопородного ограждения в условиях действующего рудника. *Горное эхо*. 2023;(1):152–158. <https://doi.org/10.7242/echo.2023.1.21>  
Pugin A.V., Bogomyagkov A.V., Ogloblina A.A., Ageeva K.M. Features of the operation of the ice fence in the conditions of an operating mine. *Gornoe Ekho*. 2023;(1):152–158. (In Russ.) <https://doi.org/10.7242/echo.2023.1.21>

#### Информация об авторах

**Гусев Георгий Николаевич** – кандидат технических наук, заведующий лабораторией интеллектуального мониторинга, Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-9072-0030>; e-mail: gusev.g@icmm.ru

**Цветков Роман Валерьевич** – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории интеллектуального мониторинга, Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-9617-407X>; e-mail: flower@icmm.ru

**Епин Валерий Валерьевич** – младший научный сотрудник лаборатории интеллектуального мониторинга, Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-5625-2678>; e-mail: epin.v@icmm.ru

**Сологуб Федор Денисович** – инженер-исследователь лаборатории интеллектуального мониторинга, Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0005-4283-5502>; e-mail: sologub.f@icmm.ru

#### Information about the authors

**Georgii N. Gusev** – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Smart Monitoring Laboratory, Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-9072-0030>; e-mail: gusev.g@icmm.ru

**Roman V. Tsvetkov** – Cand. Sci. (Eng.), Research Associate, Smart Monitoring Laboratory, Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-9617-407X>; e-mail: flower@icmm.ru

**Valery V. Yepin** – Junior Research Associate, Smart Monitoring Laboratory, Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-5625-2678>; e-mail: epin.v@icmm.ru

**Fedor D. Sologub** – Research Engineer, Smart Monitoring Laboratory, Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0005-4283-5502>; e-mail: sologub.f@icmm.ru

#### Article info

Received: 21.06.2025

Revised: 07.08.2025

Accepted: 15.08.2025

#### Информация о статье

Поступила в редакцию: 21.06.2025

Поступила после рецензирования: 07.08.2025

Принята к публикации: 15.08.2025