

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ МАССИВА ВБЛИЗИ ОТВЕТСТВЕННЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК И В ЦЕЛИКЕ МЕЖДУ НИМИ

АБРАМОВ Н. Н.¹, ЗЕМЦОВСКИЙ А. В.¹

¹ Горный институт Кольского научного центра РАН
(Россия, г. Апатиты, ул. Ферсмана, 24)

Цель настоящих исследований заключалась в оценке устойчивости двух подземных выработок, вмещающих машинный зал и щитовую галерею подземной гидроэлектростанции.

Актуальность исследований. Обеспечение длительной безопасной эксплуатации ГЭС в условиях статических и динамических нагрузок определяет актуальность исследований по контролю устойчивости подземных сооружений станции.

Методика проведения исследований. Для решения этой задачи использованы натурные методы исследования и численное моделирование напряженно-деформированного состояния массива пород. Фиксируемые проявления процессов заколообразования обнажений выработок обусловили выбор комплекса натурных методов, включающего контроль смещений и деформаций пород на поверхности выработок и сейсмотомографический мониторинг физико-механических характеристик пород массива. Для оценки состояния с помощью метода конечных элементов было проведено численное моделирование полей напряжений, действующих в массиве вокруг выработок.

Результаты. Полученные в результате выполненных работ данные показывают, что устойчивость скальных обнажений подземных сооружений определяется в основном структурными особенностями массива в условиях воздействия на них природных и техногенных факторов.

Область применения результатов. Представленный комплексный метод предлагается применять при мониторинге состояния массива вблизи ответственных подземных выработок.

Ключевые слова: подземная выработка; целик; сейсмотомография; численное моделирование; мониторинг.

Введение. Цель настоящих исследований заключалась в оценке устойчивости двух подземных выработок, вмещающих машинный зал и щитовую галерею подземной гидроэлектростанции (ГЭС). Идея использования подземного пространства для размещения в нем ответственных объектов различного назначения на сегодняшний день является достаточно обоснованной как в России [1, 2], так и за рубежом [3, 4]. Обеспечение длительной безопасной эксплуатации подобных объектов в условиях активных внешних воздействий определяет актуальность исследований по контролю устойчивости подземных сооружений и породных целиков между ними, при этом используются и натурные методы геомеханического мониторинга, и численное моделирование напряженно-деформированного состояния массива пород [5–9].

Задача контроля устойчивости решалась на участке массива пород, вмещающего подземную ГЭС на Кольском полуострове [10, 11]. Комплекс подземных сооружений, расположенных в блочном гранитогнейсовом массиве пород на глубине 60–90 м от поверхности, включает машинный зал с размещенными в нем четырьмя гидрогенераторами по 67,5 МВт каждый, щитовую галерею, штольню, транспортную и другие выработки. Сечения сооружений варьируют от 30 до 700 м², закреплены в основном облегченной крепью. Срок эксплуатации составляет более 50 лет. В целике породы мощностью 25 м между двумя параллельными выработками (машинным залом площадью 600 м² и щитовой галереей) фиксиро-

вался процесс активного заколообразования в своде соединительной выработки. Организованный здесь высокоточный деформационный мониторинг струнными дистометрами также выявил устойчивые деформационные тренды.

Методика проведения исследований. Для анализа степени влияния различных факторов на устойчивость сооружений использована комплексная методика исследований, включающая численное моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) массива пород, прямые натурные методы деформационных наблюдений на специально оборудованных геодинамических полигонах и сейсмо-томографический контроль характеристик массива на различных его участках [12].

Таблица 1. Принятые для расчета физико-механические характеристики пород
Table 1. Physical-mechanical characteristics of rock accepted for calculation

Показатель	Породы вмещающего массива	Породы целика
Модуль упругости, МПа	58 300	50 000
Коэффициент Пуассона	0,220	0,285
Плотность, т/м ³	2,67	2,67

Результаты исследований. Для оценки НДС было проведено исследование полей напряжений, действующих в массиве вокруг двух параллельных выработок, с помощью методов численного моделирования. Исследование проводилось для незакрепленных выработок, пройденных в упругом изотропном массиве горных пород. Численное моделирование выполнено с помощью метода конечных элементов в двухмерной упругой постановке. Граничные условия задавались на основе данных, свидетельствующих о действии в массиве только гравитационного типа поля напряжений. Правая, левая и нижняя границы были шарнирно закреплены. На каждый элемент модели действовала сила тяжести P , которая определялась по формуле $P = \gamma H$, где γ – удельный вес породы; H – глубина расположения элемента (табл. 1).

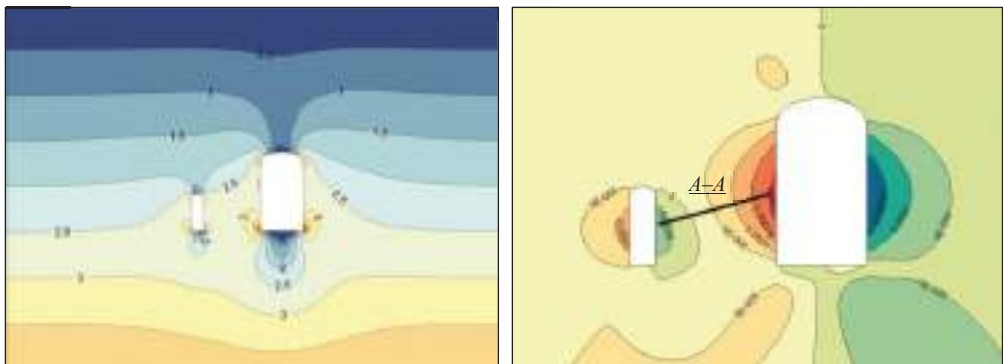


Рис. 1. Результаты численного моделирования НДС в окрестности двух параллельных выработок:
 a – распределение максимальных напряжений, МПа; b – распределение смещений, м
Fig. 1. SSS numerical modeling results nearby two parallel excavations:
 a – maximum stress distribution, МПа; b – displacements distribution, m

При анализе максимальной компоненты тензора главных напряжений σ_{\max} (рис. 1, a) установлено, что значения σ_{\max} в районе выработок колеблются от 1 до 3 МПа, а в целике не превышают 2,5–3,0 МПа.

Основные зоны концентраций напряжений σ_{\max} приурочены к сопряжениям стенок выработок с кровлей и почвой и не превышают 4–5 МПа. Анализ минимальной компоненты тензора главных напряжений показал, что значения σ_2

колеблются от 0 до 1 МПа и являются сжимающими. В целике также не выявлены зоны растягивающих напряжений.

Представляет интерес также картина распределения расчетных смещений пород в районе выработок и целике, представленная на рис. 1, б. Как видно из рисунка, наибольшие смещения, достигая величин 0,19–0,22 мм, приурочены непосредственно к стенке каждой из выработок, причем смещения имеют противоположные знаки и направлены в сторону обнажений выработок, создавая тем самым возможность развития зон разуплотнения внутри целика по линии А–А.

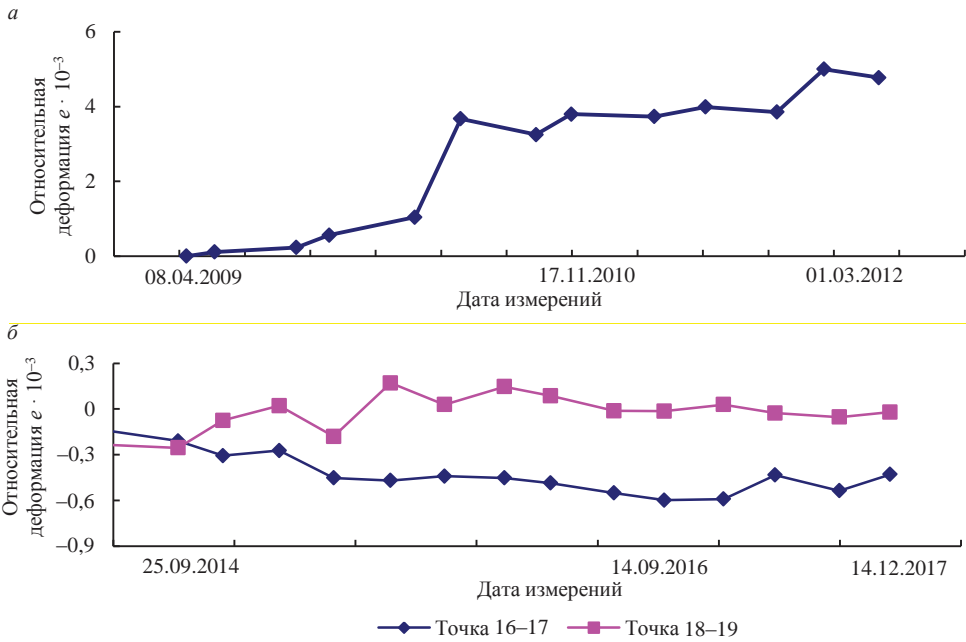


Рис. 2. Результаты натурального мониторинга деформаций в подземном машинном зале ГЭС:

а – до закрепления контура выработки; б – после закрепления контура выработки

Fig. 2. Deformations numerical modeling results in the underground engine room of HPP:

а – before securing the excavation outline; б – after securing the excavation outline

Однако полученные результаты моделирования отражают лишь статичную картину формирования состояния массива, не учитывая его динамику от воздействия природных и техногенных факторов в процессе эксплуатации и поэтому имеют в основном качественный характер.

Таблица 2. Результаты сейсмотомографического мониторинга массива пород на участках НП-2 и НП-3

Table 2. The rock mass seismotomographic monitoring results at NP-2 and NP-3 sections

Контрольный участок	Скорость продольной волны V_p , км/с	Коэффициент Пуассона μ	Модуль упругости $E \cdot 10^{-4}$ МПа
НП-2	$\frac{3,50-6,50}{5,05}$	$\frac{0,12-0,39}{0,285}$	$\frac{2,5-10,0}{4,95}$
НП-3	$\frac{4,2-6,5}{5,46}$	$\frac{0,15-0,35}{0,24}$	$\frac{10,5-14,0}{12,5}$

Результаты многолетнего натурального мониторинга в выработках ГЭС подтверждают общий характер развития геомеханических процессов в массиве. На рис. 2, а представлены результаты контроля деформаций в обследуемом целике между выработками за три года наблюдений.

Как удалось установить с использованием сейсмотомографического мониторинга массива по скоростям продольной V_p и поперечной V_s волн на различных участках, причиной изменения состояния массива являются постоянно действующие низкоамплитудные вибронгрузки работающих в машинном зале гидрогенераторов. Результаты расчетов физико-механических характеристик массива, характеристик пород массива на участках в ближней зоне влияния вибронгрузок (НП-2) и вне ее (НП-3) представлены в табл. 2.

На рис. 3 представлены сейсмотомограммы выполненных наблюдений для этих же участков.

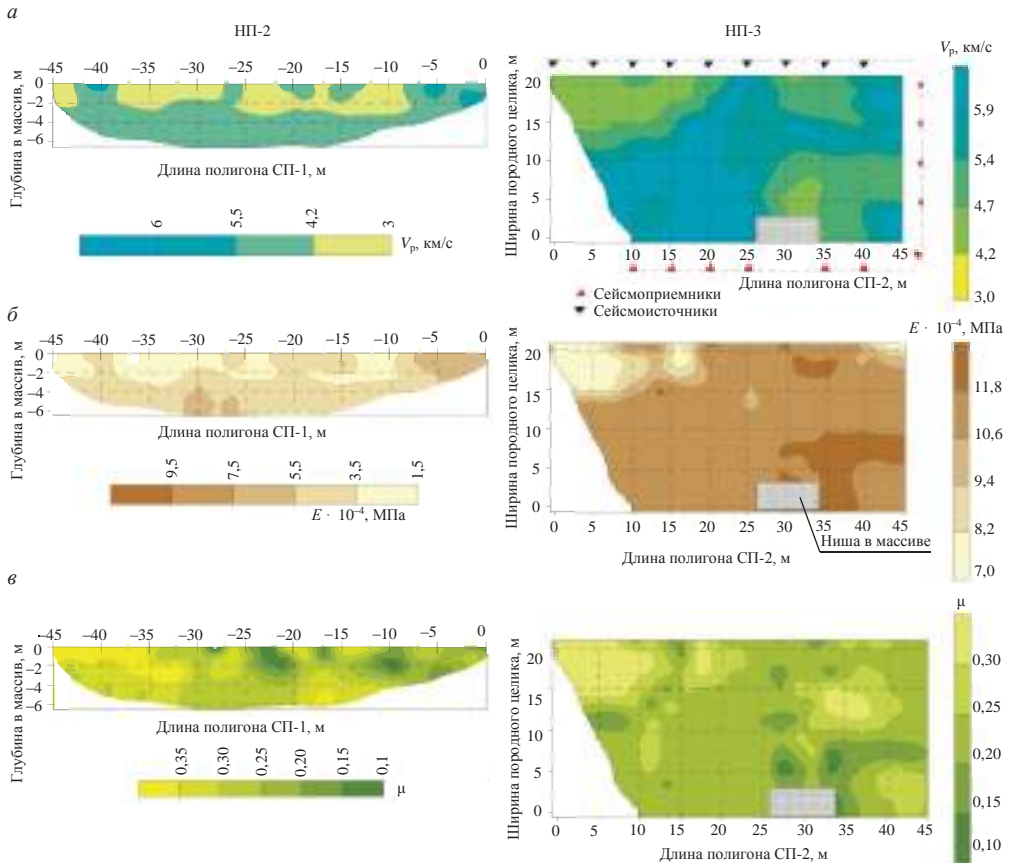


Рис. 3. Результаты сейсмотомографического мониторинга массива на участках НП-2 и НП-3: а – томограмма скорости; б – томограмма распределения модуля упругости; в – томограмма распределения коэффициента Пуассона

Fig. 3. The rock mass seismotomographic monitoring results at NP-2 and NP-3 sections:

а – velocity tomogram; б – elasticity modulus distribution tomogram; в – Poisson coefficient distribution tomogram

Анализ и обсуждение результатов. В результате численного исследования НДС массива горных пород установлено, что значения напряжений и смещений значительно ниже критических и свидетельствуют об отсутствии условий для формирования разрушений на контуре выработок. По данному фактору на момент строительства массив горных пород в районе выработок и целика можно охарактеризовать как устойчивый, без проявлений горного давления.

Анализ деформаций в обследуемом целике между выработками за три года показал, что фиксируемый тренд смещений совпадает по знаку с прогнозируемым при моделировании, но по величинам смещений примерно на порядок выше,

что привело впоследствии к разуплотнению породного целика. Ввиду этого были предусмотрены мероприятия по дополнительному укреплению опасного участка массива, после чего тренд стабилизировался (рис. 2, б).

Как видно из приведенных данных, контрольный участок массива НП-2, расположенный в зоне техногенного воздействия, обладает ослабленными физико-механическими характеристиками (модуль упругости меньше в 2,5 раза, коэффициент Пуассона выше на 15 %) по сравнению с участком НП-3. Этот факт свидетельствует о негативном влиянии длительных техногенных воздействий.

В результате выполненных геофизических исследований установлено, что в зоне влияния динамических вибронагрузок массив пород проявляет себя как дискретная среда, испытывающая колебания в диапазоне частот, близком к частотам собственных колебаний отдельностей массива. Длительное воздействие этих нагрузок на массив усиливает и ускоряет влияние естественных процессов выветривания, способствует ослаблению межблоковых связей массива и оказывает негативное влияние на устойчивость приконтурного массива подземных сооружений.

Выводы. Таким образом, в результате выполненных исследований по оценке состояния массива вблизи ответственных подземных сооружений и в целике между ними продемонстрированы возможности комплексного метода для установления реальных причин динамики состояния массива при длительной эксплуатации объекта. Внедрение предложенного метода в систему геомониторинга будет способствовать повышению безопасности эксплуатации подземных сооружений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куперман Б. Л., Мостков В. М., Илюшин В. Ф. Подземные сооружения гидроэлектростанций. М.: Энергоатомиздат, 1996. 320 с.
2. Казарян В. А. Подземные хранилища газа и нефтепродуктов – необходимый элемент функционирования ТЭК. М.: Империял, 2006. 318 с.
3. Delmastro C., Lavagno E., Schranz L. Energy and underground // Tunnelling and Underground Space Technology. 2016. Vol. 55. May. P. 96–102.
4. Zhi-Long Chen, Jia-Yun Chen, Hong Liu, Zhi-Feng Zhang. Present status and development trends of underground space in Chinese cities: evaluation and analysis // Tunnelling and Underground Space Technology. 2018. Vol. 71. January. P. 253–270.
5. Адушкин В. В., Опарин В. Н. Физика и геомеханика формирования и развития очаговых зон разрушения горных пород в природных и горно-технических системах: современное состояние и перспективные направления фундаментальных исследований и прикладных разработок // ГИАБ. 2015. Вып. 56. С. 24–45.
6. Савич А. И., Ященко З. Г. Исследования упругих и деформационных свойств горных пород сейсмоакустическими методами. М.: Недра, 1979. 213 с.
7. Куксенко В. С., Манжиков Б. Ц., Тилегенов К., Шатемиров Ж. К., Эмильбеков Б. Э. Триггерный эффект слабых вибраций в твердых телах (горных породах) // Физика твердого тела. 2003. Т. 45. Вып. 12. С. 2182–2185.
8. Назиров Д. А., Давлатшоев С. К., Козлов Д. В. Геодезический мониторинг большепролетных подземных помещений во время строительства Рогунской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2018. № 6. С. 2–7.
9. Ang Li, Nuwen Xu, Feng Dai, Gongkai Gu, Zhonghua Hu, Yi Liu. Stability analysis and failure mechanism of the steeply inclined bedded rock masses surrounding a large underground opening // Tunnelling and Underground Space Technology. 2018. Vol. 77. July. P. 45–58.
10. Абрамов Н. Н., Епимахов Ю. А., Ткаченко А. П., Савельев В. В., Клевакин И. А. Организация геофизического мониторинга состояния подземных сооружений Верхне-Тулумской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2011. № 8. С. 10–15.
11. Abramov N. N., Epimakhov Yu. A. Instrument-aided assessment of the effect of natural and technogenic factors on the geomechanical state of a massif enclosing an HPP turbine room // Power Technology and Engineering. 2016. Vol. 50. Issue 1. P. 9–12.
12. Абрамов Н. Н. Натурный геомониторинг как инструмент контроля устойчивости подземных сооружений // Известия вузов. Горный журнал. 2016. № 2. С. 100–105.

Поступила в редакцию 3 мая 2018 года

Абрамов Н. Н., Земцовский А. В. Исследование состояния массива вблизи ответственных подземных выработок и в целике между ними // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 7. С. 45–51.

Сведения об авторах:

Абрамов Николай Николаевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией проблем теории и технологии подземного строительства Горного института Федерального исследовательского центра Кольского научного центра РАН. E-mail: abramov@goi.kolasc.net.ru

Земцовский Александр Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геомеханики Горного института Федерального исследовательского центра Кольского научного центра РАН. E-mail: zemtsovskiy@yandex.ru

THE STUDY OF THE ROCK MASS STATE NEARBY IMPORTANT UNDERGROUND EXCAVATIONS AND IN A PILLAR BETWEEN THEM

Abramov N. N.¹, Zemtsovskii A. V.¹

¹ Mining Institute, Federal Research Center KSC RAS, Apatites, Russia.

Research aim is to assess the stability of two underground excavations storing an engine room and a shield gallery of an underground hydroelectric power plant (HPP).

Research relevance. Ensuring the long-term safe operation of HPP under conditions of static and dynamic loads makes relevant the studies on control over the stability of the station's underground structures.

Research methodology. To solve this problem, in-situ investigation methods and numerical modeling of the stress-strain state of the rock mass have been used. The registered occurrences of excavations outcrops slabbing determined the choice of in-situ methods including the control of rock displacements and deformations on the excavations' surface and seismic tomographic monitoring of physical-mechanical characteristics of the mass rock. In order to assess the state, numerical modeling of the stress fields has been carried out in the rock mass around the excavations using the finite element method.

Results. The data obtained show that underground facilities rock outcrops stability is determined mainly by the structural features of the rock mass under the influence of natural and technogenic factors.

Results application area. The introduced integrated method is suggested to be applied when monitoring the state of the rock mass nearby underground excavations.

Key words: underground excavation; pillar; seismotomography; numerical modelling; monitoring.

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-7-45-51

REFERENCES

1. Kuperman B. L., Mostkov V. M., Iliushin V. F. [Underground structures of hydroelectric power plants]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1996. 320 p.
2. Kazarian V. A. [Underground storage facilities of gas and oil is an essential element of the energy industry functioning]. Moscow, Imperial Publ., 2006. 318 p.
3. Delmastro C., Lavagno E., Schranz L. Energy and underground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, vol. 55, May, pp. 96–102.
4. Zhi-Long Chen, Jia-Yun Chen, Hong Liu, Zhi-Feng Zhang. Present status and development trends of underground space in Chinese cities: evaluation and analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, vol. 71, January, pp. 253–270.
5. Adushkin V. V., Oparin V. N. [Physics and geomechanics of rock breaking focuses development and generation within environmental systems and mining engineering systems: modern state and prospects of basic research and applied developments]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)* 2015, issue 56, pp. 24–45. (In Russ.)
6. Savich A. I., Iashchenko Z. G. [Investigation into elastic and deformational properties of rock using seismoacoustic methods]. Moscow, Nedra Publ., 1979. 213 p.
7. Kuksenko V. S., Manzhikov B. Ts., Tilegenov K., Shatemiroy Zh. K., Emil'bekov B. E. [Trigger effect of weak vibrations in solid state (rocks)]. *Fizika tverdogo tela – Solid State Physics*, 2003, vol. 45, issue 12, pp. 2182–2185. (In Russ.)
8. Nazirov D. A., Davlatshoev S. K., Kozlov D. V. [Geodetic monitoring of large-span underground facilities during the construction of the Rogun Dam]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo – Hydrotechnical Construction*, 2018, no. 6, pp. 2–7. (In Russ.)
9. Ang Li, Nuwen Xu, Feng Dai, Gongkai Gu, Zhonghua Hu, Yi Liu. Stability analysis and failure mechanism of the steeply inclined bedded rock masses surrounding a large underground opening. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, vol. 77, July, pp. 45–58.
10. Abramov N. N., Epimakhov Iu. A., Tkachenko A. P., Savel'ev V. V., Klevakin I. A. [Organizing geophysical monitoring of Verkhne-Tulomskaya HPP underground structures state]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo – Hydrotechnical Construction*, 2011, no. 8, pp. 10–15. (In Russ.)
11. Abramov N. N., Epimakhov Yu. A. Instrument-aided assessment of the effect of natural and technogenic factors on the geomechanical state of a massif enclosing an HPP turbine room. *Power Technology and Engineering*, 2016, vol. 50, issue 1, pp. 9–12.

12. Abramov N. N. [Natural geomonitoring in check problems of underground constructions stability]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2016, no. 2, pp. 100–105. (In Russ.)

Information about authors

Abramov Nikolai Nikolaevich – Candidate of Engineering science, head of the Laboratory of Underground Construction Technology Theory Issues of the Mining Institute, Federal Research Center KSC RAS. E-mail: abramov@goi.kolasc.net.ru

Zemtsovskii Aleksandr Vasil'evich – Candidate of Engineering science, senior researcher of the Laboratory of Geomechanics of the Mining Institute, Federal Research Center KSC RAS. E-mail: zemtsovskiy@yandex.ru
