

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 620.02.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ТРИГГЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ В МАССИВЕ НА ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНО ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Н. Н. Абрамов

*Горный институт КНЦ РАН, E-mail: root@goi.kolasc.net.ru,
ул. Ферсмана, 24, 184209, г. Апатиты, Россия*

Физические процессы, возникающие в массиве пород под воздействием длительных техногенных вибрационных нагрузок, приводят к возникновению триггерных эффектов, неучет которых может привести к потере устойчивости подземных сооружений. Описаны методические особенности мониторинга этих процессов в конкретных условиях работы подземного машинного зала ГЭС на территории Кольского полуострова РФ.

Подземное сооружение, сейсмотомография, физико-механические характеристики пород, приконтурный массив, частотный спектр сигнала

DOI: 10.15372/FTPRPI20180501

При оценке длительной устойчивости обнажений скальных массивов неучет современных представлений о существовании подвижной динамики отдельных блоков пород может привести к ошибочным результатам, в особенности в условиях длительных внешних воздействий [1 – 3]. Даже при слабых вибрационных внешних нагрузках на массив в приконтурном массиве может возникнуть триггерный эффект. Триггером в данном случае является эффект колеблющегося под действием слабых вибраций породного блока при совпадении частоты его собственных колебаний с частотой вынуждающей внешней нагрузки. Этот эффект инициирует ослабление контактных связей с другими блоками и, как следствие, снижение устойчивости приконтурного массива пород. Своевременное выявление подобных эффектов в массиве, а также методическое обеспечение контроля состояния массива пород в подобных условиях — актуальная научно-практическая задача.

В методическом отношении выявление триггерных эффектов в массиве может быть реализовано в процессе геомеханического инструментального мониторинга его состояния. Особенности методики обусловлены прежде всего природой возникновения подобных эффектов, связанных со структурой массива, его блочностью. Таким образом, возможность оценки структурной блочности массива, качества межблоковых контактов и степени свободы (“подвижности”) отдельных

массива, особенно вблизи обнажений, — одно из требований комплексного методического обеспечения при решении поставленных задач. Перспективными для решения этих задач являются сейсмические и деформационные методы натуральных наблюдений [4, 5].

Триггерные эффекты в массиве могут возникать при внешних воздействиях, реализовываться в смещениях массива и в конечном итоге приводить к потере устойчивости выработок. Подобные явления были зафиксированы в подземных выработках Верхне-Тулумской ГЭС на Кольском полуострове [6]. Комплекс подземных сооружений, размещенных в блочном гранито-гнейсовом массиве пород на глубине 60–90 м от поверхности, включает машинный зал с четырьмя гидрогенераторами по 67.5 МВт каждый, щитовую галерею, штольню, транспортную и другие выработки. Сечения сооружений варьируют от 30 до 700 м² и закреплены в основном облегченной крепью.

За 50 лет эксплуатации ГЭС в подземном машинном зале, в соединительных выработках малого сечения, стали активизироваться процессы заколообразования, что послужило основанием для организации комплексного геомеханического мониторинга массива. На геодинимических полигонах выполняется контроль смещения и деформаций массива с помощью струнных дистометров JSETH и маяков ЗИ-2.2 (Crack monitor zi-2.2). Мониторинг физико-механических характеристик массива осуществляется на сейсмических измерительных полигонах с помощью цифровой сейсмостанции ЭЛЛИСС-3 по методике сейсмической томографии ХТомо.

Оценка напряженно-деформированного состояния массива вокруг выработок показала, что естественное поле напряжений не представляет опасности для устойчивости выработок. Определяющим фактором являются структурные особенности массива. Из числа внешних воздействий на массив отмечаются техногенные вибронгрузки работающих гидрогенераторов. На геодинимическом полигоне в районе сопряжения машинного зала с соединительной выработкой наряду с заколообразованием массива зафиксирован рост деформаций (рис. 1а), который может быть связан с длительным воздействием динамической нагрузки на приконтурный массив.

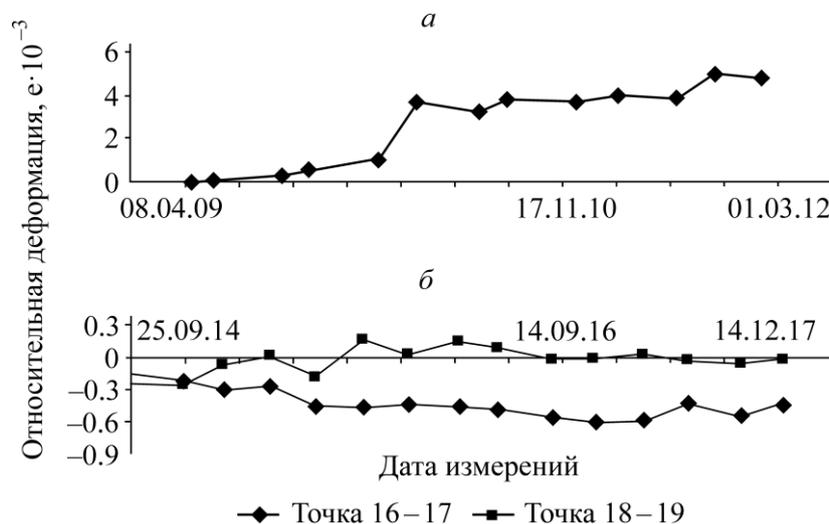


Рис. 1. Результаты натурального мониторинга деформаций в подземном машинном зале ГЭС: а — до закрепления контура выработки; б — после закрепления контура выработки

Опасные участки сопряжений вдоль и поперек оси соединительной выработки массива были дополнительно подкреплены поддерживающей крепью, после чего динамика деформаций в районе сопряжения выработок (точки 16–17 — створ вдоль соединительной выработки, точ-

ки 18–19 размещены вдоль оси машинного зала) стабилизировалась (рис. 1б). При увеличении жесткости приконтурного слоя массива с помощью крепи снижается опасное действие вибраций, что подтверждает установленную причину возникновения деформационного тренда.

Измерения параметров фактических вибраций в горных выработках проводились с использованием комплекта аппаратуры фирмы “InstanTel” (Канада) с рабочим диапазоном частот 2–250 Гц. Сейсмоприемник размещался на расстояниях 40–50 м от источников вибраций непосредственно на блоковых отдельностях массива в стенке выработки. Фрагмент результатов контроля вибраций для двух участков в стенах машинного зала представлен на рис. 2. Резонансные частотные пики на разных участках фиксируются в довольно широком спектре колебаний (35–100 Гц). Это следствие, по-видимому, эффектов возникновения квазирезонансов вынуждающих колебаний с частотами собственных колебаний отдельных блоков на различных участках массива. Тогда логично предположить, что на участках массива, вмещающих более мелкие отдельности, частотные спектры смещается в сторону более высоких частот и, наоборот.

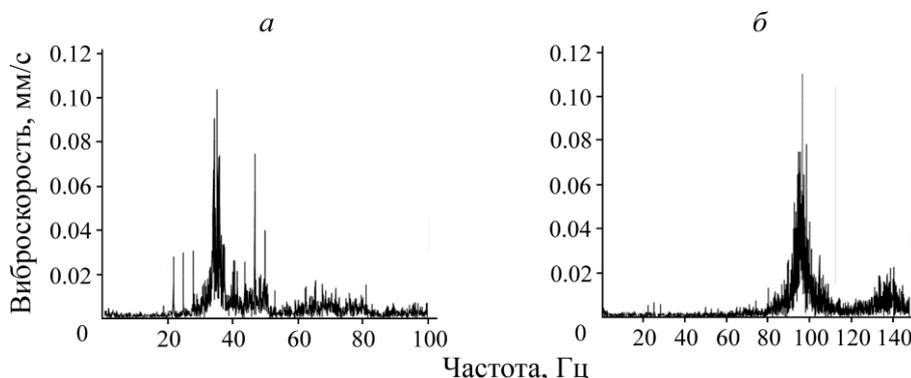


Рис. 2. Результаты контроля параметров вибронгрузок на приконтурном участке (а) и в массиве (б) от работы генераторных блоков

Чем больше степеней свободы породного блока и меньше трение на контактах между блоками массива, тем контрастнее будет частотный пик, а данный участок более опасным по формированию закола.

Геофизическими исследованиями установлено, что в зоне влияния динамических вибронгрузок массив пород проявляет себя как дискретная среда, испытывающая колебания в диапазоне частот, близком к частотам собственных колебаний отдельностей массива. Длительное воздействие нагрузок на массив усиливает и ускоряет влияние естественных процессов выветривания, способствует ослаблению межблоковых связей и оказывает негативное влияние на устойчивость приконтурного массива подземных сооружений. Доказательством послужили результаты сейсмотомаграфического мониторинга данного объекта.

Интерпретация результатов выполнялась с использованием разработанных геофизических показателей нарушенности [7, 8] (рис. 3):

$$B_e = (V_{p0} / V_{pi})^2 - 1 \quad \text{и} \quad K = \mu_i / \mu_0 = f [(V_s / V_p)^2],$$

где V_{p0} , V_{pi} — скорости продольных волн в сохранном и нарушенном массиве соответственно; μ_i , μ_0 — коэффициент Пуассона для нарушенного и сохранного массивов соответственно; V_s — скорость поперечной волны в массиве.

Величины V_{p0} и μ_0 определяются по результатам измерений скоростей продольных и поперечных волн в лабораторных условиях для представительной выборки отобранных образцов. Например, для гранитогнейсового массива приняты: $V_{p0} = 5.67$ км/с, $\mu_0 = 0.27$.

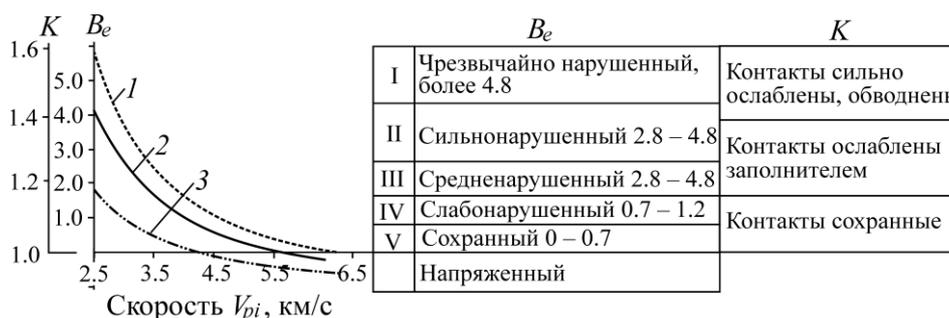


Рис. 3. Номограмма оценки состояния массива пород по геофизическим показателям V_e и K :
 1 — $V_{p0} = 6.5$ км/с; 2 — $V_{p0} = 5.7$ км/с; 3 — $V_{p0} = 4.2$ км/с

В физическом отношении показатель V_e характеризует снижение скоростей продольных волн на нарушениях массива при его прозвучивании, оценивая тем самым блочность массива. Показатель K демонстрирует вариации коэффициента Пуассона, вызванные изменением состояния отдельных участков (например, намоканием), вмещающих трещинные контакты заполнителя, по сравнению с величиной μ_0 , характерной для ненарушенного массива естественной влажности. Данный показатель находится по соотношению скоростей V_s/V_p , и определяет качество межблоковых контактов скального массива. На основе многолетних наблюдений в различных горно-геологических условиях скальных массивов разработан алгоритм ведения мониторинга с использованием трендов геофизических показателей (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Алгоритм оценки изменения состояния массива пород по изменениям геофизических показателей нарушенности

Геофизические показатели состояния массива		Вероятные причины динамики состояния массива пород		
V_e	K	Рост трещиноватости массива	Снижение прочности межтрещинных контактов	Консолидация массива (напряженность)
Trend (V_e) > 0	Trend $K = 0$	+	–	–
	Trend $K > 0$	+	+	–
Trend (V_e) < 0	Trend $K \leq 0$	–	–	+
Trend (V_e) ≤ 0	Trend $K > 0$	–	–	+

Одной из особенностей данного алгоритма является возможность снятия неоднозначности при установлении причин снижения скоростей V_p (показатель V_e) в процессе мониторинга, возникающей от двух возможных причин: роста степени нарушенности (количества трещин) на участке массива либо от ослабления межтрещинных контактов. В этом случае, используя тренд показателя K , более точно устанавливается эта причина.

На рис. 4 и в табл. 2 приведены результаты сейсмотомографического мониторинга контролируемого массива пород для двух участков массива: НП-2 (наблюдательный полигон), участок размещен непосредственно в зоне влияния техногенных нагрузок, и НП-3 — участок находится в дальней от источника вибраций зоне, где вибровоздействия на массив не проявляются. Различия состояний для двух участков заметны даже визуально по палитре томограмм скоростей V_p , модулей упругости E и коэффициентов Пуассона μ , рассчитанных по скоростям V_p и V_s и сведенным в табл. 2. По результатам сейсмотомографической оценки свойств и состояния массива пород на контрольных участках установлено, что породы участка НП-3 имеют идентичные показатели трещиноватости (величина V_e) и характеризуются большей сохранностью. На это указывает меньшее значение показателя нарушенности K для этого участка.

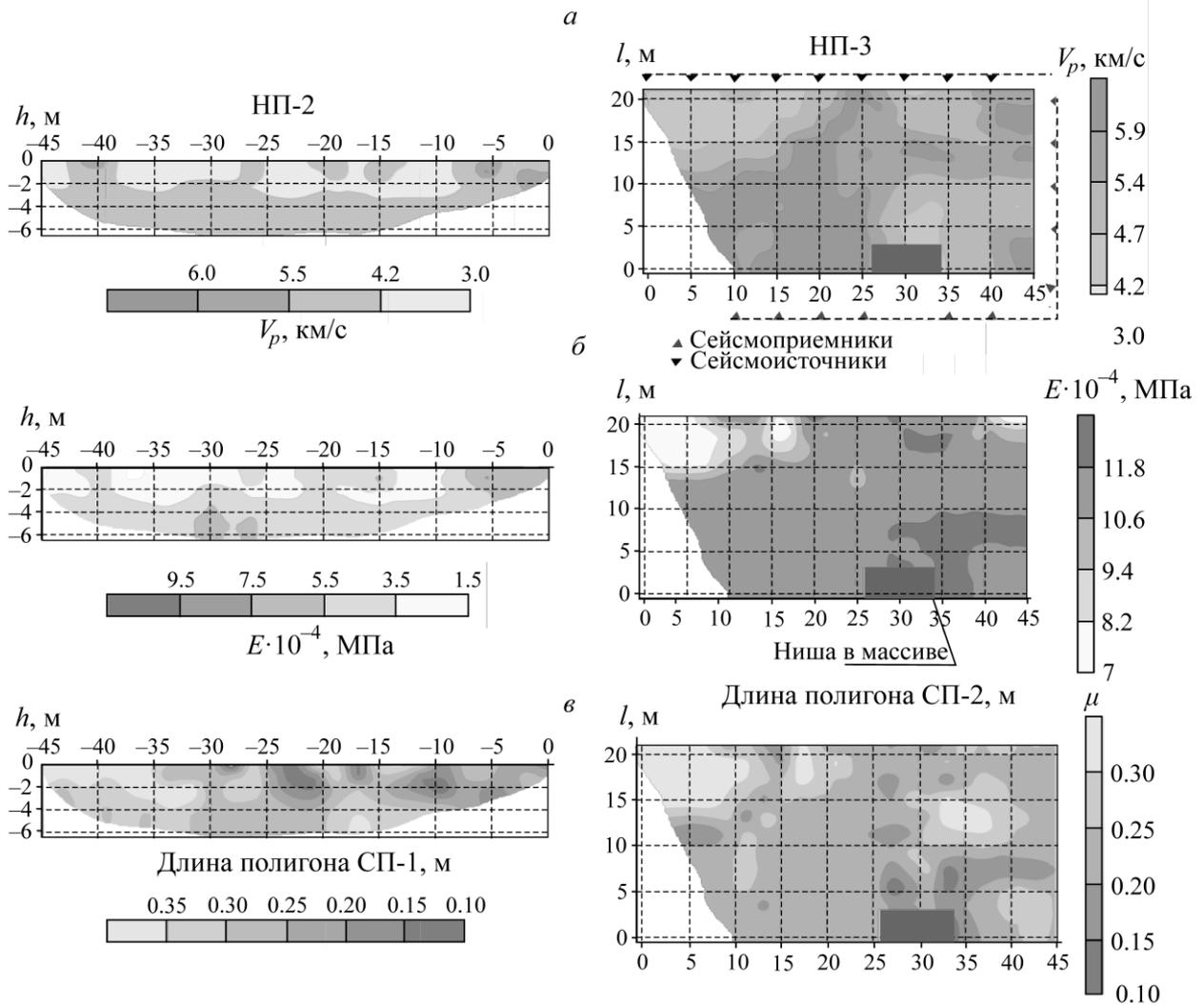


Рис. 4. Результаты натуральных сейстотомографических наблюдений на полигонах НП-2 и НП-3: а — томограммы скорости V_p , км/с; б — томограммы распределения модуля упругости, $E \cdot 10^{-4}$, МПа; в — томограммы распределения коэффициента Пуассона μ (h — глубина в массиве; l — ширина породного целика; СП — сейсмический профиль)

ТАБЛИЦА 2. Результаты сейстотомографического мониторинга скального массива

Контрольный участок массива	Скорость продольной волны V_p , км/с	Коэффициент Пуассона μ	Модуль упругости $E \cdot 10^{-4}$ МПа	Геофизические показатели нарушенности	
				B_e	K
НП-2	$\frac{3.50 - 6.50}{5.05}$	$\frac{0.12 - 0.39}{0.285}$	$\frac{2.5 - 10.0}{4.95}$	(-0.1 - 1.4)	До 1.77
НП-3	$\frac{4.2 - 6.5}{5.46}$	$\frac{0.15 - 0.35}{0.24}$	$\frac{10.5 - 14.0}{12.5}$	(0 - 1.35)	До 1.59

Примечание. В числителе — размах варьирования показателя, в знаменателе — его среднее значение

С помощью номограммы рис. 3, состояние пород массива на участке НП-3 оценивается как устойчивое с прочным заполнителем трещин и слабой нарушенностью. Породы участка НП-2 в большей степени подвержены влиянию техногенных воздействий. Их состояние характеризу-

ется большей нарушенностью, которая согласно принятым критериям проявляется не в росте трещиноватости (показатель V_e стабилен), а в ослаблении структурных связей массива по границам структурных блоков (показатель K возрос более чем на 15%), приводящим к формированию областей заколообразования на контуре выработок. Следующим важным элементом методики является диагностика опасных состояний массива на контуре выработок, которая может осуществляться с использованием методов спектральной сейсмологии [8–10]. В данном случае используется зависимость частотного спектра проходящей сейсмической волны от размеров скальных отделенностей и их относительной свободы упаковки внутри массива.



Рис. 5. План-схема натурального эксперимента: с/пр — 3-компонентный сейсмоприемник; X — точки возбуждения сейсмоколебаний

Большим количеством степеней свободы в этом отношении будут обладать блоки массива, непосредственно примыкающие к обнажению выработок. План-схема эксперимента, поясняющего особенности данной методики, приведена на рис. 5. Эксперимент проводился в скальном целике породы ($L = 20$ м) блочного строения, образованном пересечением трех выработок. Породный блок L_i на сопряжении выработок 1 и 2 прикреплен анкерами к основному массиву пород. На нем размещен 3-компонентный пьезометрический сейсмоприемник с рабочей полосой частот до 1 кГц. Выполнено продольное сейсмическое профилирование стен выработок 1 и 2. Цель — показать наличие взаимосвязи частот спектра возбуждаемых сейсмических колебаний с блочностью массива L_i и качеством естественной упаковки отдельных блоков в массиве.

На рис. 6 представлены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) спектров сейсмоколебаний при их возбуждении непосредственно у сейсмоприемника и в 5 м от него вдоль выработки 1. При возбуждении колебаний непосредственно у сейсмоприемника в массиве возникают колебания в двух преобладающих диапазонах частот по трем компонентам X, Y, Z : $f_1 = 150–180$ и $f_2 = 300–370$ Гц. При переносе точки возбуждения колебаний на 5 м в сторону от сейсмоприемника фиксируется только один низкочастотный диапазон колебаний f_1 (рис. 6б). При ударе у сейсмоприемника на породном блоке L_i отмечаются отклики непосредственно этого мелкого блока с более высокой частотой f_2 и отклик крупного участка массива, заключенного между тремя выработками, с $L = 20$ м и низким диапазоном частот f_1 . Все другие блоки породы (отдельности) в частотном спектре никак не проявились, по-видимому, из-за малости их относительных степеней свободы и силы воздействия.

По результатам профилирования получена эмпирическая зависимость частот спектра от величины L_i : $L = 54.8 \cdot e^{-0.0095f}$. Вид этой зависимости показан на рис. 7.

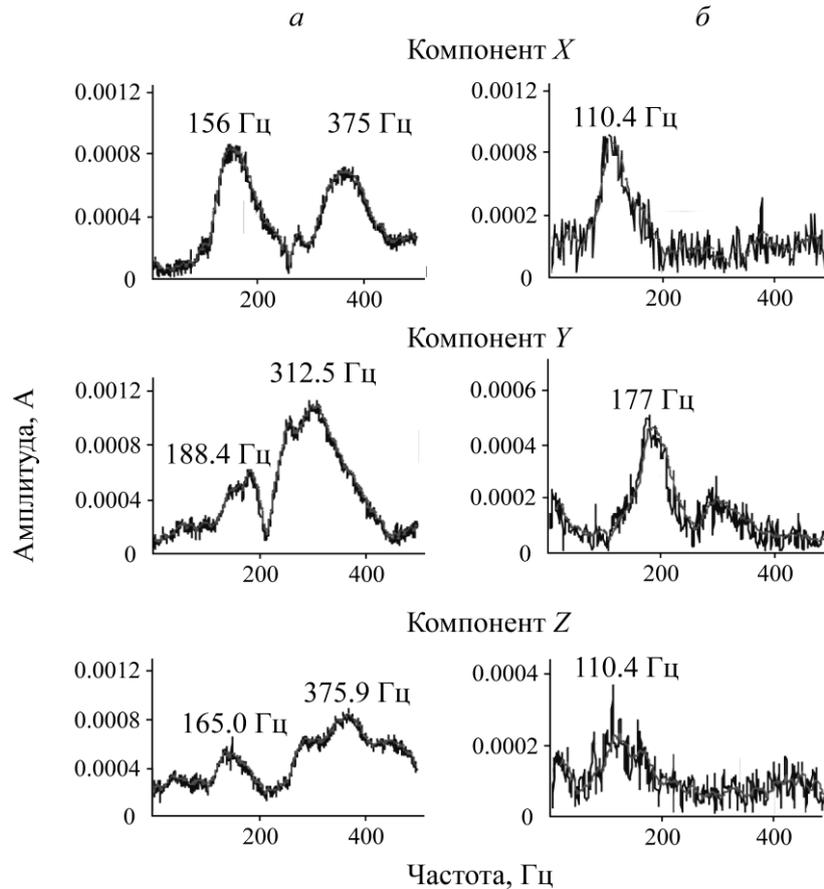


Рис. 6. АЧХ сигнала при сейсмопрофилеировании выработки: а — источник у сейсмоприемника; б — источник на удалении 5 м от сейсмоприемника

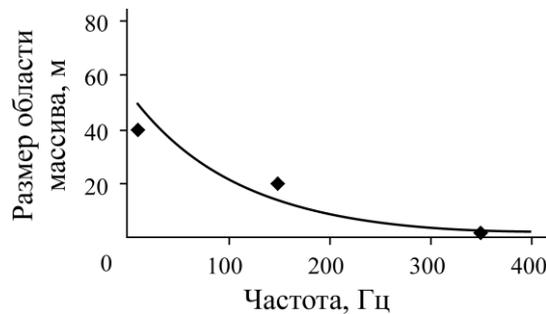


Рис. 7. Оценка размера породной отдельности по частоте сейсмических колебаний

Устойчивость блоковых отдельностей пород вблизи обнажений горных выработок определяется прочностью контактных связей по границам контакта блока с основным массивом. Представляя скальный массив как колебательную систему, состоящую из отдельных блоков, ее качество можно описать такой важной характеристикой колебательной системы, как добротность [8, 11]. При наличии квазирезонансов колебаний на АЧХ эта характеристика может быть оценена как $\Omega_i = f_0 / F_i$, где F_i — ширина амплитудной резонансной кривой по уровню $1/\sqrt{2} = 0.7$ с частотой резонанса f_0 (рис. 6а).

Согласно данным ультразвуковых испытаний образцов пород в лабораторных условиях, рост ослабления по контактам трещин в образце породы приводит к более интенсивному затуханию колебательного процесса в образце, росту величины F_i и снижению добротности коле-

бательной системы [11]. Таким образом, добротность как свойство колебательной системы, определяющее полосу резонанса F_i , может быть показателем динамической устойчивости массива при возбуждении в нем упругих колебаний. В качестве примера для оценки устойчивости пород массива на рис. 8 приведен фрагмент сейсмотограммы относительной добротности при сеймопросвечивании скального целика породного массива. Согласно результатам расчетов относительных добротностей с пятикатегорийной шкалой нарушенности скальных массивов, определим категорию нарушенности приконтурного массива по данным мониторинга добротности колебательной системы.

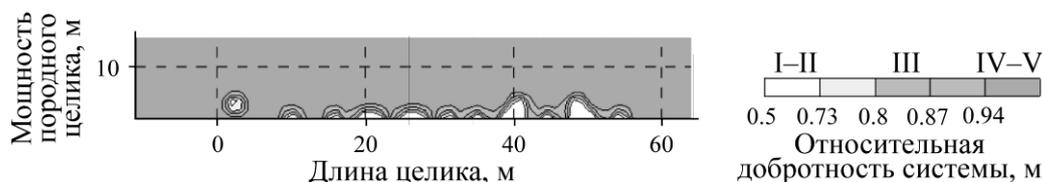


Рис. 8. Результаты оценки нарушенности приконтурного массива по данным сеймопросвечивания породного целика

Участки пониженной устойчивости с категорией нарушенности I–II (сильно нарушенные породы) обладают минимальной добротностью $(0.5–0.8)\Omega_{\max}$. Однако ключевым моментом для определения категории устойчивости массива будет являться установление корреляций добротности системы и преобладающих частот спектра f_0 .

ВЫВОДЫ

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 инициирует триггерные эффекты динамических подвижек, способствует ослаблению межблоковых связей и оказывает негативное воздействие на устойчивость приконтурного массива подземных сооружений. Рекомендованный и апробированный в условиях действующей подземной ГЭС комплекс натуральных методов геомониторинга состояния вмещающего массива позволил выполнить контроль состояния массива, используя при этом предложенные критерии, обеспечил необходимую достоверность полученных результатов. Внедрение этих методов в систему геомониторинга будет способствовать повышению безопасности эксплуатации подземных сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Adushkin V. V. and Oparin V. N. From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed geomeia. Part III, J. of Min. Sci., 2014, Vol. 50, No. 4. — P. 203–222.
2. Адушкин В. В., Опарин В. Н. Физика и геомеханика формирования и развития очаговых зон разрушения горных пород в природных и горнотехнических системах: Современное состояние, перспективные направления фундаментальных исследований и прикладных разработок // ГИАБ. — 2015. — Вып. 56. — С. 24–44.
3. Куксенко В. С., Манжиков Б. Ц. и др. Триггерный эффект слабых вибраций в твердых телах (горных породах) // Физика твердого тела. — 2003. — Т. 45. — Вып. 12. — С. 2182–2186.
4. Никтин В. Н. Основы инженерной сейсмологии. — М.: МГУ, 1981. — 176 с.

5. Савич А. И., Яценко З. Г. Исследования упругих и деформационных свойств горных пород сейсмоакустическими методами. — М: Недра, 1979. — 213 с.
6. 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 стр-во. — 2011. — № 8. — С. 10–15.
7. Abramov N. N. and 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 Tech. and Eng., 2016, Vol. 50, Issue 1. — P. 9–12.
8. Абрамов Н. Н. Натурный геомониторинг как инструмент контроля устойчивости подземных сооружений // Горн. журн. — 2016. — № 2. — С. 100–104.
9. Сашурин А., Панжин А., Мельник В. Решение задачи устойчивости бортов в целях защиты потенциально опасных участков транспортных берм карьеров // Инж. защита. — 2015. — № 2 (7). — С. 80–86.
10. Гликман А. Г. О формировании упругих колебаний в слоистых средах // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. — 1999. — № 6. — С. 25–29.
11. Вознесенский А. С., Куткин Я. О., Красилов М. Н. О возможности определения резерва прочности анкерного крепления кровли методами неразрушающего контроля // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: тр. XX Всерос. конф. с участием иностр. ученых, 7–11 октября, 2013 г. — Новосибирск, 2013. — С. 337–342.

Поступила в редакцию 26/II 2018