



Н. Н. Абрамов
Ю. А. Епимахов

ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ КНЦ РАН, АПАТИТЫ
ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ КНЦ РАН, АПАТИТЫ

СЕЙСМИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

АННОТАЦИЯ. В статье рассмотрены вопросы, связанные с сейсмическим контролем состояния подземных сооружений. На примере эксплуатируемых в течение 45 лет выработок Верхне-Тулумской ГЭС подземного размещения, подверженных воздействию постоянных вибронагрузок, установлено ослабление трещинных контактов пород массива по границам структурных блоков. Рекомендован режимный контроль состояния приконтурного массива подземных сооружений.

Массивы скальных пород, в которых размещаются подземные сооружения гидростанций, имеют блочно-иерархическое строение и представляют собой открытые системы, постоянно осуществляющие энерго-массообмен с окружающей средой. В результате этих процессов блочная геофизическая среда постоянно испытывает неравномерные в пространстве и времени деформации, следствием которых являются циклические вариации её напряжённого состояния (суточные, месячные, сезонные, длиннопериодные), что в конечном итоге приводит к формированию зон неустойчивого равновесия, расколов и вывалов породы на контуре выработок. Развитию этих процессов способствуют также эксплуатационные особенности работы подземной ГЭС, связанные с постоянными вибрационными нагрузками, длительно воздействующими на межблоковые контакты массива. Неразрушающий контроль состояния подземных объектов, связанный в первую очередь с безопасностью их эксплуатации, становится особенно актуален.

Как известно, вибрационные нагрузки в зависимости от состояния и конструктивных размеров объекта воздействуют по-разному. Деформационные проявления виброчувствительности горных пород исследовались в различных работах. Было выявлено скачкообразное аномальное изменение величин деформаций и их скоростей во время действия вибраций на нагруженных образцы горных пород. В момент включения вибраций отмечалось существенное снижение уровня акустической эмиссии по сравнению с периодом деформирова-

ABSTRACT. The article considered issues of seismic control of underground constructions condition. Based on the example of underground construction of Verkhne-Tulomskaya HPS that has been operating for 45 years and exposed to constant vibration action impact, rock mass fracture propagation near boundaries of structural blocks has been established. The regime control of contour mass state of underground constructions has been recommended.

ния образца без вибрации. Эти результаты могут свидетельствовать о релаксации напряжений в основном на контактах зёрен и микротрещинам породных образцов. Но, к сожалению, на сегодняшний день вопрос об иницирующем воздействии слабых вибраций на процесс деформирования нагруженных геоматериалов в связи с задачами активного воздействия на очаги концентрации напряжений и оценкой устойчивости механических систем пока остаётся открытым.

Комплекс выработок Верхне-Тулумской ГЭС подземного размещения включает непосредственно машинный зал (25 × 100 × 25 м), щитовую галерею (8 × 100 × 25 м) и комплекс подходных транспортных выработок. Выработки размещены в скальном массиве и закреплены в основном облегчённой крепью (анкера, торкрет, сетка).

Массив скальных пород эксплуатируется около 45 лет. Блочная структура массива в соответствии с размерами подземных сооружений говорит о том, что на устойчивость выработок оказывают влияние состояние неоднородностей второго порядка (размер структурного блока от метра до первых десятков метров). Для подземных сооружений такого типа потеря устойчивости обусловлена образованием неустойчивых зон в стенах и кровле выработок. Учитывая это, а также большую протяжённость выработок, в качестве неразрушающего метода контроля принят сейсмический метод.

Влияние тех или иных факторов на состояние массива оценивается только через инструментальный мониторинг, организованный непосредственно в массиве

пород. В качестве основных показателей массива пород при проведении неразрушающего контроля состояния подземных сооружений используются скорости продольных V_P , и поперечных V_S сейсмических волн, возбуждаемых в массиве. Трещиноватость пород, как важнейшая характеристика состояния массива, оценивается по геофизическому показателю B_e и коэффициенту K , определяемым из выражений*:

$$B_e = (V_{P0}/V_{Pi})^2 - 1; \quad (1)$$

$$K = \frac{\mu_i}{\mu_0}, \quad (2)$$

где V_{Pi} - скорость продольной сейсмической волны по направлению i ; V_{P0} - скорость продольной волны в отдельностях, слагающих массив; μ_i и μ_0 - коэффициенты Пуассона в нарушенном и сохранном массивах, рассчитываемые по известным соотношениям скоростей V_P и V_S .

На рис. 1 приведена номограмма оценки степени трещиноватости массива по предложенным показателям, построенная на основе многочисленных натуральных наблюдений. Пять категорий трещиноватости массива соответствуют категориям, принятым в классификации Межведомственной комиссии по взрывному делу. Таким образом, на основе замеров скоростей непосредственно в массиве пород по данной номограмме можно оценить степень его трещиноватости. В случае несовпадения интервалов варьирования показателей B_e и K степень трещиноватости назначается только по параметру B_e , а причины аномальной вариации параметра K устанавливаются дополнительно. Например, для случая, когда $B_e = 1,0$ (IV категория) рост K до 1,2 - 1,6 показывает не на снижение категории трещиноватости, а на ослабление межблоковых контактов массива.

Глубина размещения подземной ГЭС-12 от свободной поверхности H составляет около 60 м. Уровень действующих напряжений вокруг горных выработок при гравитационной природе незначителен и может составлять в зонах концентрации напряжений ($2\gamma H$, где γ - плотность породы, г/см³) 3 - 4 МПа. В этой связи основным влияющим фактором на устойчивость выработок можно считать структурные характеристики массива, его трещиноватость. Основным объектом воздействия вибраций на массив являются межблоковые границы, трещины, заполненные, как правило, рыхлым материалом. Под действием вибрационных нагрузок, особенно в течение длительного времени, состояние контактов может ухудшаться, что приводит к снижению устойчивости массива.

1. Мельников Н. Н., Епимахов Ю. А., Абрамов Н. Н., 2008, Научные основы интенсификации возведения большепролетных подземных сооружений в скальном массиве: Апатиты, КНЦ РАН.

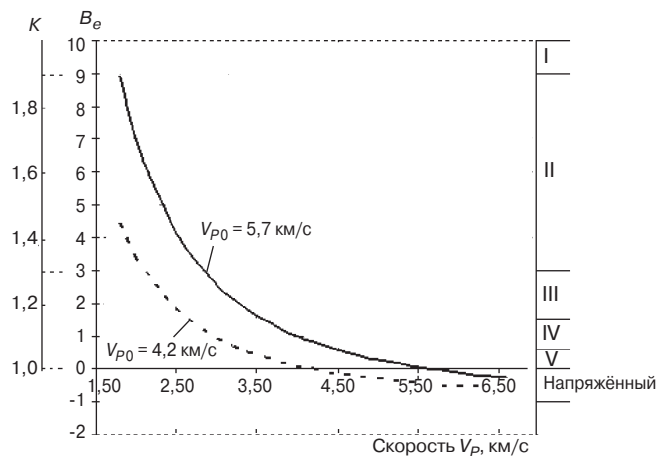


Рис. 1. Номограмма оценки категории трещиноватости массива по комплексу геофизических показателей: I - чрезвычайно трещиноватый, II - сильнотрещиноватый, III - среднетрещиноватый, IV - слаботрещиноватый, V - сохранный

Сейсмоизмерения скоростей сейсмических волн производились с использованием 24-канальной цифровой сейсмостанции *Ellis* (сертификат соответствия рег. № ССПП 01.1.1.-125) на полигонах НП-1-2, в дальней зоне от воздействия вибронагрузок (эталонный участок) и полигоне НП-3 в непосредственной близости к машинному залу с источниками вибраций. Выполнено сейсмопрофилирование и просвечивание стенок выработок. Сейсмотограммы скоростей распространения сейсмических волн в массиве построены с использованием пакета программ “Х-Томо” (лицензия А- 545, разработчик ФГУП “Севморгео”, г. С.-Петербург).

Результаты сейсмотомографического обследования по двум циклам мониторинга в 2003 и 2007 гг. представлены на рис. 2. Диапазоны изменения скоростей для обоих циклов наблюдений совпадают (3,0 - 5,40 км/с) с вариацией средних значений ($V_{ср.2003} = 4,47$ км/с,

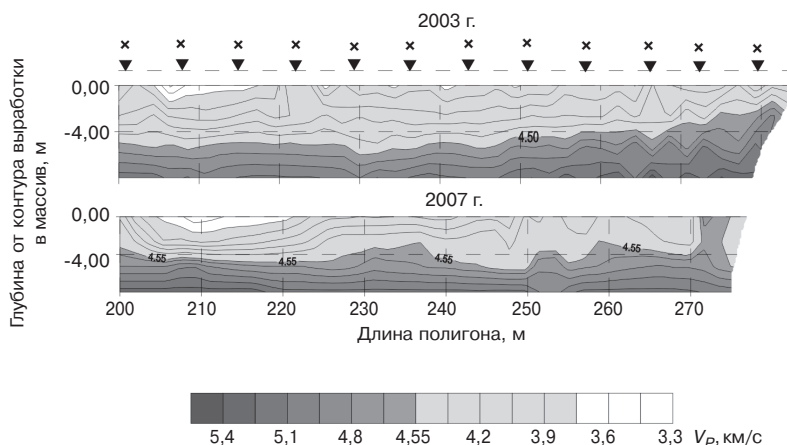


Рис. 2. Сейсмотомограммы скоростей продольных волн на полигоне НП-1 в 2003 - 2007 гг.: крестики - точки ударного возбуждения сейсмических волн; треугольники - сейсмоприемники

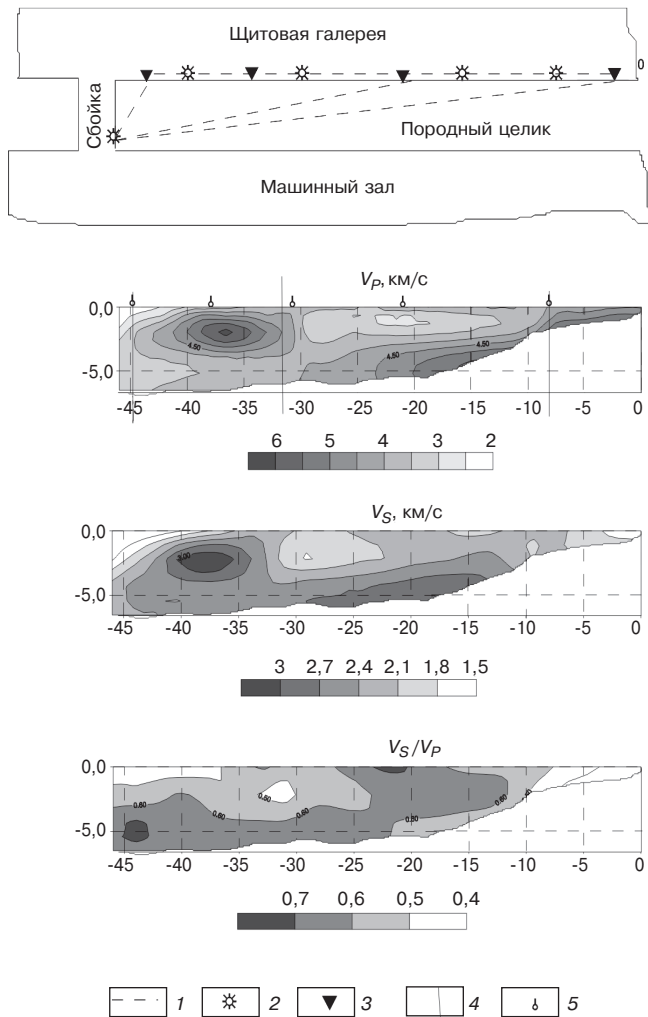


Рис. 3. Сейсмотомограммы скоростей сейсмических волн на полигоне НП-3:

1 - направления сейсмического просвечивания; 2 - точки ударного возбуждения; 3 - точки установки сейсмоприёмников; 4 - границы структурных блоков; 5 - точки контроля вибрации

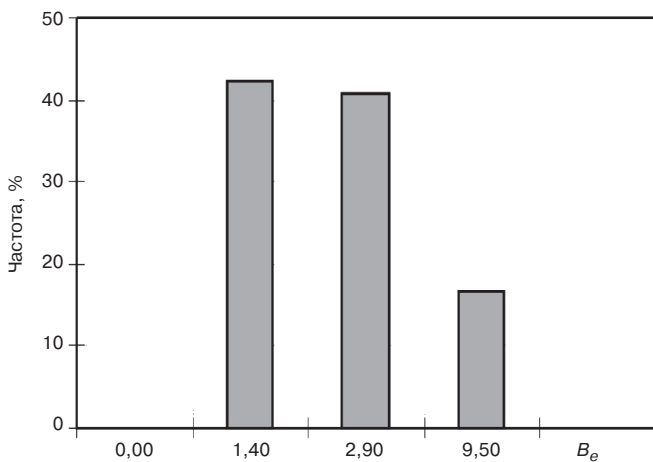


Рис. 5. Распределение показателя трещиноватости B_e контрольного участка массива на полигоне НП-3

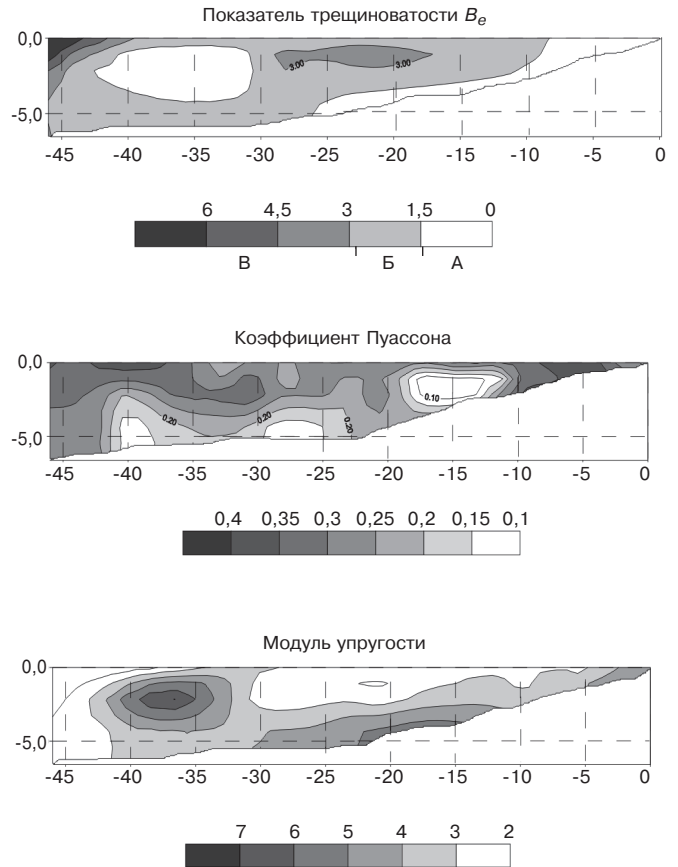


Рис. 4. Оценка трещиноватости и свойств массива пород в стенке щитовой галереи по результатам натурно-геофизического мониторинга НП-3: массивы: А - слаботрещиноватый, Б - среднетрещиноватый, В - сильнотрещиноватый

$V_{ср.2007} = 4,51$ км/с), не превышающей 1%, что лежит в пределах точности измерений. Значение геофизического показателя B_e варьирует в пределах 0,8 - 1,3. По коэффициентам Пуассона, показатель $K = \mu_{2007}/\mu_{2003} = 1,16$, по номограмме рис. 1, принимая $V_0 = V_{ср.2003} = 4,47$ км/с, оцениваем состояние массива по трещинной нарушенности как сохранное и слаботрещиноватое. Таким образом, можно заключить, что существенных изменений параметров состояния массива на данном участке, как показали результаты мониторинга, не выявлено.

Результаты сейсмомониторинга на полигоне НП-3 (шандорная галерея), полученные в 2008 г. представлены на рис. 3, 4. Как видно из приведённых данных, участок характеризуется снижением скоростей продольных волн до 2,0 км/с.

На рис. 5 приведена гистограмма распределения показателя трещиноватости B_e , из которой можно охарактеризовать данный участок следующим образом: 43% - сохраннный, весьма крупноблочный, 42% - слабо- и сред-

нетрещиноватый (размер блока 0,5 - 3 м) и 15% - сильнотрещиноватый (размер блока менее 0,5 м).

По существующим данным для сохранных скальных пород коэффициент Пуассона составляет 0,22 - 0,32. Для одних и тех же комплексов пород рост этого показателя для различных участков массива свидетельствует либо о росте нарушенности пород, либо о снижении прочности межтрещинных связей массива. По распределению коэффициента Пуассона на контролируемом участке массива (см. рис. 5) прослеживается тенденция его роста до значений 0,35 - 0,40 на участках средне- и крупноблочной трещиноватости ($B_e = 1,4$). Можно предположить, что причиной такой вариации свойств массива является ослабление естественных межблоковых связей массива, проявление усталостных свойств материала заполнителя трещин. Этот вывод подтвер-

ждает и снижение на этих же участках скоростей продольных волн и модуля упругости пород до значений $(2 - 3) \cdot 10^4$ МПа. Причиной этого могут стать постоянно действующие динамические вибронгрузки от работы гидрогенераторов. Устойчивость массива в приконтурной части шандорной галереи обеспечивается в основном использованием надёжной анкерной крепи.

Выявленные особенности поведения массива Верхне-Тулумской ГЭС в период 2003 - 2008 гг., особенно вблизи работающих гидроагрегатов станции, позволяют рекомендовать, наряду с проведением регламентных работ по регулярному осмотру обнажений выработок, и периодический неразрушающий инструментальный контроль внутренней структуры массива пород вокруг выработок с использованием сейсмотомографического метода.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Николай Николаевич АБРАМОВ - старший научный сотрудник Горного института КНЦ РАН, чл.-кор. МАНЭБ.
E-mail: abramov@ goi.kolasc.net.ru.

Юрий Александрович ЕПИМАНОВ - заведующий лабораторией Горного института КНЦ РАН, доктор техн. наук.