

УДК 622.02

Н.Н. Абрамов, Ю.А. Епимахов

ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Рассмотрены вопросы, связанные с геофизическим 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.

Ключевые слова: горный массив, окружающая среда, трещиноватость пород, сейсмограмма, нарушенность пород.

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 ее напряженного состояния (суточные, месячные, сезонные, длиннопериодные), что в конечном итоге, приводит к формированию зон неустойчивого равновесия, заколов 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, вынуждающие 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 нагруженные образцы горных пород. В момент включения вибраций отмечалось существенное снижение уровня акустической эмиссии по сравнению с периодом деформирования образца без вибрации. Эти результаты могут свидетельствовать о релаксации напряжений, в основном, по контактам зерен 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 остается открытым.

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

Массив скальных пород эксплуатируется около 45 лет. Блочная структура массива, в соответствии с размерами подземных сооружений определяет, 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 протяженность выработок, в качестве неразрушающего метода контроля принят сейсмический метод (волновой метод сейсмического частотного диапазона).

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 упругих продольных V_p , и поперечных V_s сейсмических волн, возбуждаемые в массиве. Трещиноватость пород, как важнейшая характеристика состояния массива, оценивается по геофизическому показателю B_e и коэффициенту K , [1], определяемым из выражений:

$$B_e = (V_{p0}/V_{pi})^2 - 1, \quad (1)$$

$$K = \mu_i / \mu_0, \quad (2)$$

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 [1]. Пять категорий трещиноватости массива соответствуют категориям принятым в классификации Межведомственной комиссии по взрывному делу. Таким образом, на основе замеров величин 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 $B_e=1.0$ (IV категория) рост величин до $K=1.2—1.6$ показывает не на снижение категории трещиноватости, а на ослабление межблоковых контактов массива.

Глубина размещения подземной ГЭС-12 от свободной поверхности составляет около $H = 60$ 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 мас-



Рис. 1. Схема подземных выработок ГЭС

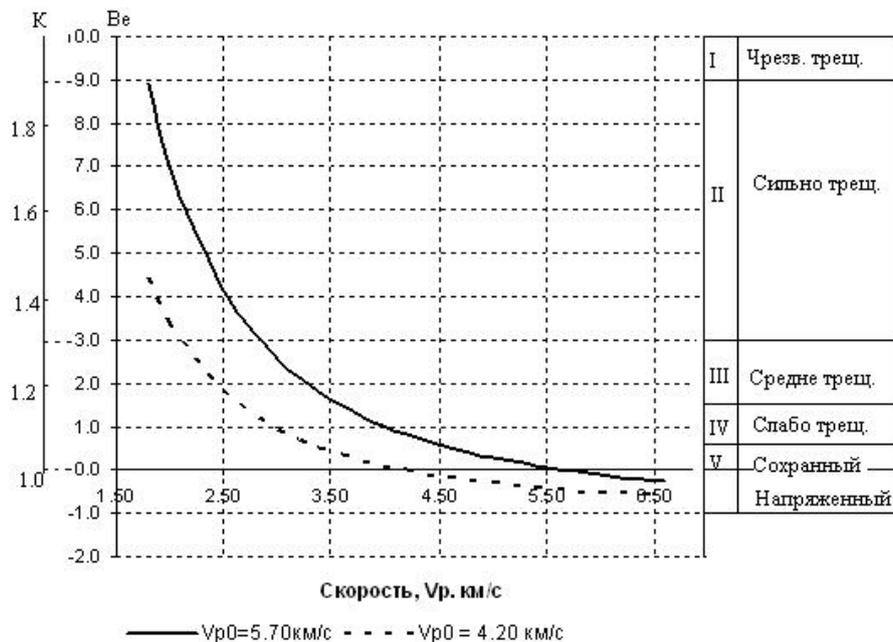


Рис. 2. Номограмма оценки категории трещиноватости массива по комплексному геофизическому показателю

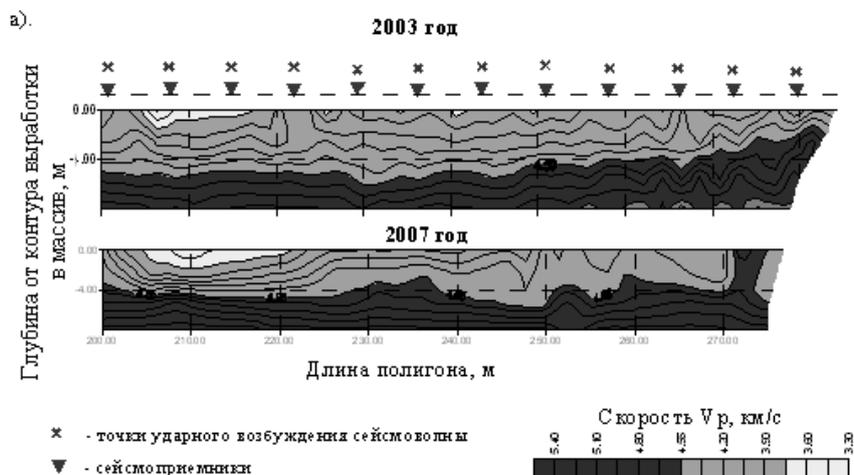


Рис. 3. Сейсмотомограммы скоростей продольных волн на полигоне НП № 1 в 2003—2007 гг.

сива, 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.

Сейсмоизмерения скоростей сейсмических волн производились с использованием 24-канальной цифровой сеймостанции «Elliss» (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 сеймопрофилирование и просвечивание стенок выработок. Сейсмотомограммы скоростей распространения сейсмических волн в массиве построены с использованием пакета программ «Х-Томо» (лицензия А- 545, разработчик ФГУП «Севморгео», г. С-Петербург).

Результаты сейсмотографического обследования по двум циклам мониторинга в 2003 и 2007 годах представлены на рис. 3. Диапазоны изменения скоростей для обоих циклов наблюдений совпадают (3.0–5.40 км/с) с вариацией средних значений ($V_{cp.2003} = 4.47$ км/с, $V_{cp.2007} = 4.51$ км/с) не превышающей 1 %, что явно лежит в пределах точности измерений и является не значимой величиной. Величина геофизического показателя V_e варьирует в пределах 0.8—1.3. По коэффициентам Пуассона, показатель $K = \mu_{2007} / \mu_{2003} = 1.16$, по номограмме рис. 1, принимая $V_0 = V_{cp.2003} = 4.47$ км/с, оцениваем состояние массива по трещинной нарушенности как сохранное и слабо-трещиноватое. 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 году представлены на рис. 4—5. Как видно из

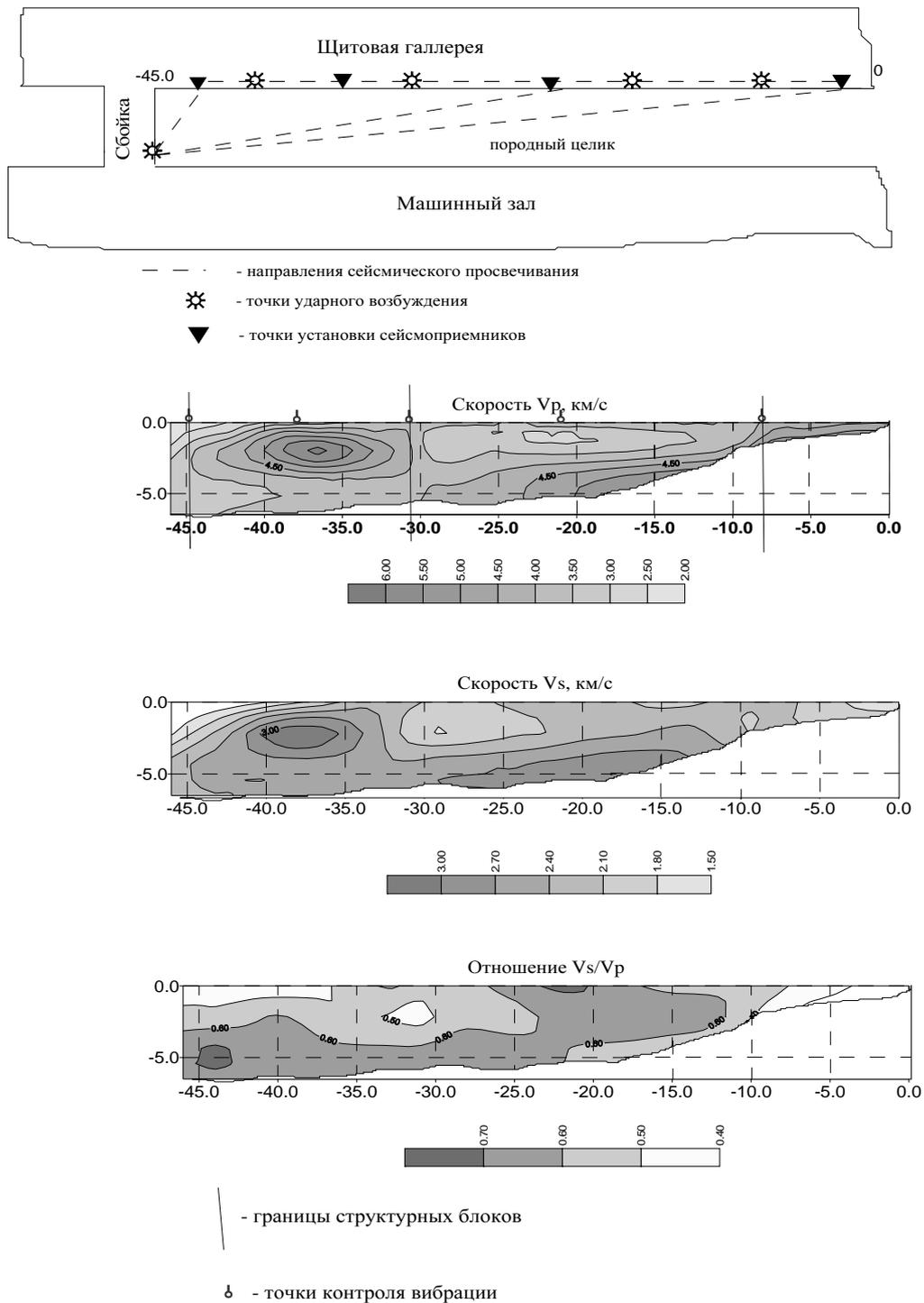


Рис. 4. Сейсмотомограммы скоростей сейсмических волн на полигоне НП № 3

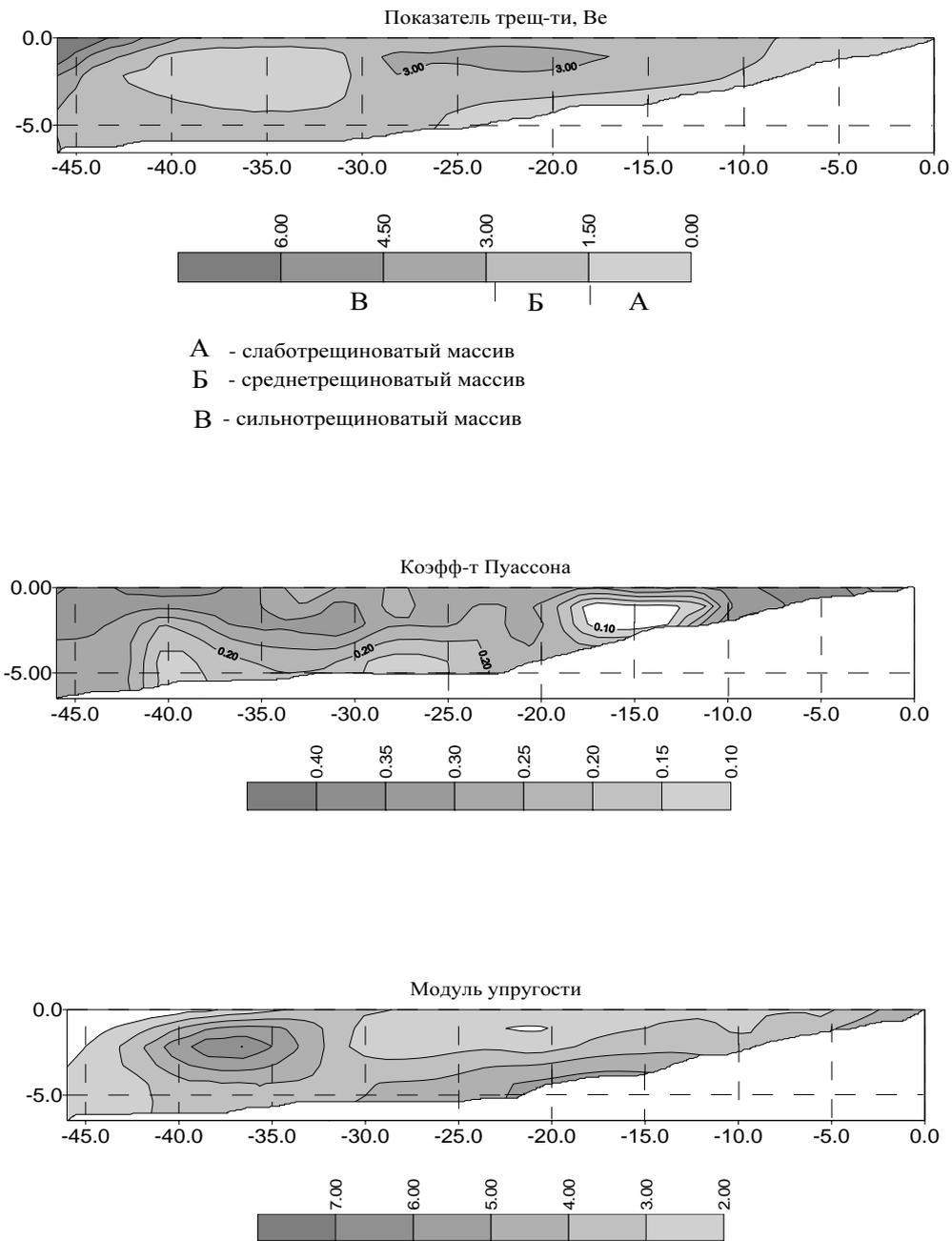


Рис. 5. Оценка трещиноватости и свойств массива пород в стенке щитовой галереи по результатам натурального сейсмотомографического мониторинга НП №3

приведенных данных, участок характеризуется снижением скоростей продольных волн до 2.0 км/с.

На рис. 6 приведена гистограмма распределения показателя трещиноватости V_e , из которой можно охарак-

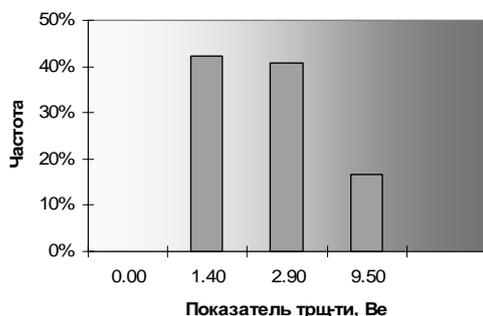


Рис. 6. Распределение показателя трещиноватости контрольного участка массива на полигоне НП-3

теризовать данный участок следующим образом: 43 % — сохранный, весьма крупноблочный, 42 % — слабо и среднетрещиноватый (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. Анализируя распределения коэффициента Пуассона на контролируемом участке массива, рис. 5, прослеживается тенденция его роста до значений 0.35—

0.40 (коричневая палитра рисунка) на участках средне- и крупноблочной трещиноватости ($B_e=1.4$). Можно предположить, что причинной такой вариации свойств массива является ослабление естественных межблоковых связей массива, проявление усталостных свойств материала заполнителя трещин. Этот вывод подтверждает и снижение на этих же участках скоростей продольных волн и модуля упругости пород до значений $(2-3) \cdot 10^4$ Мпа. Причиной такого проявления могут стать постоянно действующие динамические вибронагрузки от работы гидрогенераторов. Устойчивость массива в приконтурной части шандорной галереи обеспечивается, в основном, использованием надежной анкерной крепи.

Выявленные особенности поведения массива Верхне-Тулумской ГЭС в период 2003—2008 годов, 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мельников Н.Н., Епимахов Ю.А., Абрамов Н.Н. Научные основы интенсификации возведения большепролетных подзем-

ных сооружений в скальном массиве. — Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2008. — 226 с. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Абрамов Н.Н. — старший научный сотрудник Горного института КНЦ РАН, чл.-корр. МАНЭБ, e-mail: abramov@goi.kolasc.net.ru;

Епимахов Ю.А. — доктор технических наук, старший научный сотрудник, зав. лабораторией Горного института КНЦ РАН, root@goi.kolasc.net.ru

