

УДК 622.02

## Оценка состояния массива пород большепролетных подземных сооружений в процессе их длительной эксплуатации

Н.Н. Абрамов, Ю.А. Епимахов

Горный институт КНЦ РАН; Апатитский филиал МГТУ,  
кафедра горного дела

**Аннотация.** В статье предложена методика оценки состояния массива пород и приведены результаты натурного обследования подземных гидротехнических тоннелей Верхне-Териберской и Борисоглебской ГЭС на Кольском полуострове. Оценены физико-механические свойства вмещающих пород на образцах и непосредственно в массиве пород. Установлено, что природа образования нарушенной зоны приконтурного массива обследуемых тоннелей в большей степени определяется технологией проходки подземных выработок и не превышает установленных практикой горных работ значений. Количество вывалов незначительно и обусловлено естественным влиянием процесса выветривания пород по трещинам при длительной эксплуатации выработок. Выявлены участки тоннеля, где рекомендован периодический мониторинг состояния приконтурной зоны массива.

**Abstract.** The paper deals with the methods of assessment of rock state stress and the results of the in-situ study of underground hydrotechnical tunnels of the Verkhne-Teriberskaya and Borisoglebskaya HPS, the Kola Peninsula. Physical and mechanical properties of host rocks have been studied on samples and in-situ. It has been established that nature of excavation disturbed zone formed in the tunnel of rock mass contour is to a greater extent determined by mine working development technology and does not exceed values observed by mining practice. The number of fall-outs is small and conditioned by natural rock weathering along fractures in the course of continuous exploitation of mining workings. There have been revealed some tunnels sites, where regular monitoring of rock mass contour state is recommended.

**Ключевые слова:** подземные сооружения, тоннели, вывал породы, устойчивость, сейсмостанция, блочный массив

**Key words:** underground structures, tunnels, inrush, stability, seismic station, rock mass

### 1. Введение

Использование большепролетных подземных сооружений в настоящее время в отечественной и мировой практике хорошо известно (*Reider Lien, Knut Garsh.L.*, 1982). Горнорудная практика проходки подземных выработок буровзрывным (БВР) способом показывает, что степень устойчивости выработок в процессе эксплуатации в значительной мере определяется технологией их возведения, естественной структурой массива и свойствами вмещающих пород, особенно в пределах приконтурной зоны массива. Эта зона, как правило, является нарушенной от технологического воздействия взрывных работ, а также естественной трещиноватости массива.

Степень влияния БВР на сохранность приконтурного массива определяется, прежде всего, технологией ведения БВР. В практике горнопроходческих работ буровзрывным способом различают общую (традиционную) технологию ведения БВР, характеризующуюся параметрами паспорта взрывных работ, рассчитанного на максимальное дробление пород взрывом шпуровых зарядов, и технологию проходки с применением метода контурных зарядов (щадящая технология). Данные, полученные на основе многочисленных измерений, проводимых в Горном институте КНЦ РАН, показывают, что мощность нарушенной зоны при обычной технологии проходки может составлять от 0.3 м до 1.5 м, а при использовании технологии контурного взрывания изменяется в пределах 0-0.33 м (*Мельников и др.*, 2008).

В странах с высоким уровнем развития технологии проходческих работ, например, таких, как Норвегия и Финляндия, до 90-95 % тоннелей эксплуатируются без крепления на протяжении десятков лет. Известны также примеры, когда при строительстве тоннелей в сложных инженерно-геологических условиях объемы крепления выработок составляют не более 20-30 % их протяженности. При этом следует отметить, что на неблагоприятных с точки зрения устойчивости участках массива в обязательном порядке регламентируется контроль его состояния различными методами.

В отечественной практике гидротехнического строительства большепролетные подземные сооружения используются для размещения машинных залов ГЭС; они играют роль подводящих и отводящих напорных и безнапорных тоннелей, причем значительное количество тоннелей также

эксплуатируются без крепления. Как правило, тоннели пройдены с использованием обычных паспортов БВР. К особенностям эксплуатации таких тоннелей можно отнести то, что при образовании даже небольших локальных вывалов из стен и кровли происходит водоперенос горной массы по тоннелю, которая, попадая на лопатки турбин, приводит к их поломкам и выходу из строя дорогостоящих агрегатов и аварийным ситуациям. Поэтому особую актуальность приобретают вопросы своевременного проведения периодических обследований состояния массива, на основе которых разрабатываются регламенты профилактических и ремонтных работ по обеспечению безаварийной работы ГЭС. В то же время опыт эксплуатации подобных тоннелей с оценкой их фактического состояния в научно-технической литературе практически не освещен.

## 2. Результаты натурных исследований

Гидротехнической службой филиала "Кольский" ОАО "ТГК-1", совместно с Горным институтом КНЦ РАН разработан регламент обследования подземных сооружений ГЭС Кольского полуострова. Важным моментом при проведении натурного обследования гидротехнических тоннелей является не только принятая на сегодняшний день обычная фиксация очагов зон вывалообразования из кровли и стен сооружений, но и оценка природы образовавшихся в процессе эксплуатации сооружений вывалов. Исходя из современных представлений о формировании состояния массива во времени, программой работ учитывалась необходимость организации и проведения периодических наблюдений. Для этой цели в тоннеле закладывались стационарные наблюдательные полигоны для долговременных наблюдений. В качестве основного инструментального метода наблюдений для этой цели был выбран метод сейсмической томографии с использованием многоканальной сейсмической аппаратуры. Для проведения оперативных оценок состояния приконтурного массива подземных сооружений использована портативная одноканальная сейсмостанция "Bison".

В соответствии с требованиями технической эксплуатации гидростанций было проведено обследование тоннелей Верхне-Териберской и Борисоглебской ГЭС (Кольский полуостров, Россия). Основные характеристики тоннелей приведены в табл. 1.

Методика обследований включает:

1. отбор проб, проведение лабораторных испытаний образцов пород по определению физико-механических свойств вмещающих пород;
2. визуальный осмотр тоннелей, документирование вывалов, их классификация;
3. организация на отдельных участках тоннелей инструментальной оценки параметров нарушенной зоны приконтурного массива.

Массив скальных пород, вмещающий подземные сооружения ГЭС, представлен микроклиновыми гранитами Балтийского щита, гранитогнейсами и сиенитами, ослабленными на отдельных участках зонами разлома и глинистыми прослойками с подчиненными гранодиоритами верхне-архейского возраста. Вариации минерального состава для данных вмещающих пород невелики, в связи с чем характеристики плотности изменяются в небольших пределах. Плотность гранитов, содержащих в основном легкие минералы – кварц и полевые шпаты, составляет (2.70-2.75) т/м<sup>3</sup>. На характеристики упругости и прочности в большей мере влияют структурно-текстурные факторы и трещиноватость, ввиду чего и вариации изменчивости этих характеристик более широкие. Скорости продольных и поперечных волн составляют, соответственно, (5.15-5.42) км/с и (3.01-3.26) км/с. Прочности пород на сжатие (160-247) МПа.

Важной эксплуатационной характеристикой любой подземной выработки, определяющей уровень вертикальной составляющей поля напряжений в массиве, является глубина ее заложения от свободной поверхности. Для тоннелей Верхне-Териберской и Борисоглебской ГЭС максимальная глубина заложения выработок от свободной поверхности составляет 60-100 м. Оценочные величины максимальных напряжений в зонах концентраций в приконтурной части выработки можно определить как

$$\sigma_i = \kappa \cdot \gamma \cdot H, \quad (1)$$

Таблица 1. Основные характеристики тоннелей

Наименование объекта	Сечение, м <sup>2</sup> / длина, м	Тип тоннеля	Тип крепи	Способ проходки	Срок эксплуатации, лет
Верхне-Териберская ГЭС	40 / 1410	<u>Водонапорный</u>	без крепления, на отд. участках торкрет-бетон, анкера	Обычная технология	22
Борисоглебская ГЭС	145 / 817 160 / 130 160 / 158	<u>Безнапорные:</u> -подводящий; -отводящий 1; -отводящий 2	без крепления, на отд. участках анкера	буро-взрывных работ	43

где  $\kappa$  – коэффициент концентрации напряжений ( $\kappa \approx 2 \div 3$ );  $\gamma$  – плотность пород ( $\gamma = 2.70 \text{ кг/см}^3$ );  $H$  – глубина от свободной поверхности.

Согласно (1), для данных конкретных условий величины напряжений не будут превышать 10 МПа, что не составляет и 10 % от прочности пород на сжатие  $[\sigma_{сж}]$  в образце. Следовательно, фактор напряженности пород при оценке устойчивости тоннеля не имеет решающего значения, и им можно пренебречь.

Таким образом, определяющим фактором в данных условиях становится структурный фактор массива, в особенности, структурные неоднородности низшего порядка, к которым относятся крупные тектонические разломы и зоны сильно трещиноватых обводненных пород.

По результатам визуального обследования тоннеля Борисоглебской ГЭС построена обобщенная гистограмма распределения поперечных размеров для всех вывалов зафиксированных в выработках (рис. 1). Характеристика кусков породы, вывалившихся из кровли и стен водоводов, по их минимальному поперечному размеру, соответствующему наиболее вероятному случаю отслоений породы по трещинам в массиве, показывает, что более 81 % кусков, обнаруженных в процессе визуального осмотра водоводов, можно отнести к мелкообломочным отдельностям породы, которые находились в пределах нарушенной зоны образовавшейся от технологического воздействия БВР (0.1-0.6) м при проходке тоннелей.

К аналогичным по природе вывалам можно отнести еще 9.5 % обнаруженных кусков размером (0.6-0.8) м. В то же время, было зафиксировано несколько крупных обрушившихся блоков (объем каждого составляет 5-6 м<sup>3</sup>). Данные крупные блоки породы, по визуальной оценке, находились в пяте свода водовода. Обрушение этих блоков произошло, по всей видимости, из-за снижения сцепления по межблоковым границам массива пород в результате длительного воздействия на него водо-воздушных потоков. Кроме того, на этих участках отмечено неблагоприятное пересечение вертикальных и наклонных трещин на сопряжении стен и кровли выработок, не создающих у обнажения тоннеля заклинивающего межблокового эффекта. На остальных участках тоннеля по визуальным данным фиксируется преобладающая крутопадающая трещиноватость, которая должна обеспечивать в основном устойчивое состояние тоннеля.

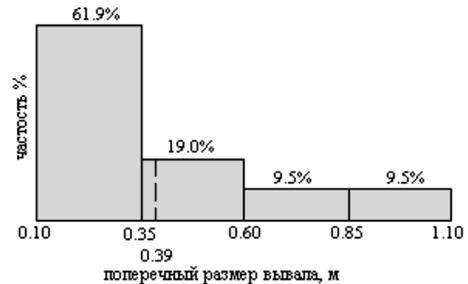


Рис. 1. Гистограмма распределения поперечных размеров вывалов в подводящем тоннеле

Таким образом, характеристика кусков породы, вывалившихся из кровли и стен подземных выработок, при их визуальном обследовании указывает на природу отслаивающихся кусков породы. Обрушения породы произошли, в основном, в пределах нарушенного техногенного слоя приконтурного массива пород. Для оценки состояния приконтурного массива подводящего тоннеля на пяти участках с зафиксированными вывалами породы был выполнен инструментальный контроль параметров нарушенной зоны массива. Использован сейсмический метод исследований, основанный на зависимости скоростей упругих сейсмических волн, возбуждаемых в массиве пород, от его состояния (Никтин, 1981) – мощности нарушенной зоны от контура выработки  $h$  и степени трещиноватости массива.

Приемники сейсмических волн помещались вдоль обнажения выработки. С шагом перемещения, равным 1.0 м, проводилось возбуждение сейсмической волны в массиве с регистрацией времен прохождения волны до сейсмоприемника. Измерение времен прохождения сейсмической волны осуществлялось одноканальной сеймостанцией "Bison" (USA), обеспечивающей точность отсчета времени прихода волны 0.05 мс. По каждому измерительному профилю (обычно не менее 10) строился годограф времен прохождения сейсмической волны в массиве – график в координатах "время-расстояние", по наклону которого оценивалась величина скоростей продольных сейсмических волн для нарушенной зоны приконтурного массива  $V_{p,uzm}$  и для сохранного нетронутого массива  $V_{p,0}$ . Мощность нарушенной зоны  $h_i$  вычислялась по координатам точки перегиба годографа ( $X_i$ ) и соответствующим значениям скоростей продольных сейсмических волн согласно (Никтин, 1981):

$$h_i = \frac{X_i}{2} \cdot \sqrt{\frac{V_{p,0} - V_{p,uzm}}{V_{p,0} + V_{p,uzm}}} \quad (2)$$

Степень трещиноватости пород в пределах нарушенной зоны оценивалась по классификации Межведомственной комиссии по взрывному делу на основе геофизического показателя трещиноватости (Фокин и др., 2004)  $B_e$ , определяемого из выражения:

$$B_e = (V_{p,0} / V_{p/uzm})^2 - 1. \quad (3)$$

Результаты расчетов по выражениям (2) и (3) представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты натуральных измерений тоннеля Борисоглебской ГЭС

№ набл. станции	Пикетаж, м	Мощность нарушенной зоны, $h$ , м	Диапазон скоростей в пределах нарушенной зоны, $V_p$ , км/с	Показатель трещиноватости, $B_e$	Степень трещиноватости, категория
1	15 - 25	0.2 - 0.4	3.29 - 4.0	1.95	Средне-трещиноватый, (размер блока 0.5 - 1.0 м), категория III
2	-(15 - 25)	0.8 - 1.0	3.30 - 3.50	1.6	
3	40 - 50	0.8 - 1.1	3.30 - 3.50	2.1	
4	280 - 290	0.6 - 0.8	3.43 - 3.65	2.1	
5	650 - 660	0.5 - 0.7	3.27 - 3.76	1.6	

Рис. 2. Схема тоннеля со следами тектонических нарушений

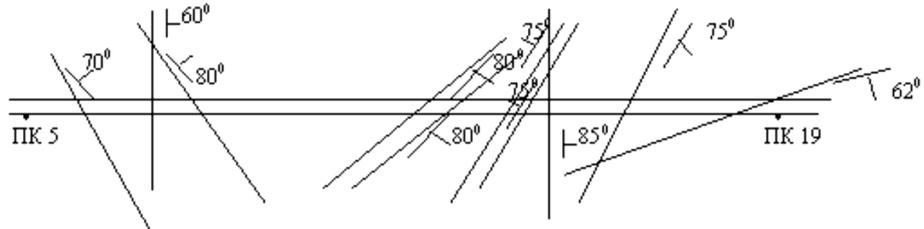
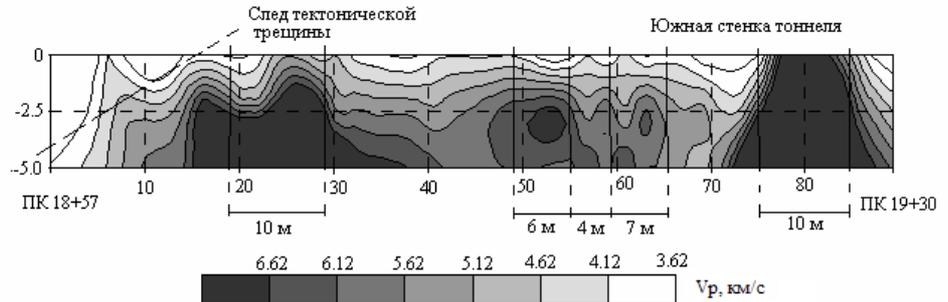


Рис. 3. Томограмма скоростей продольных сейсмических волн в стенке тоннеля Верхне-Териберской ГЭС

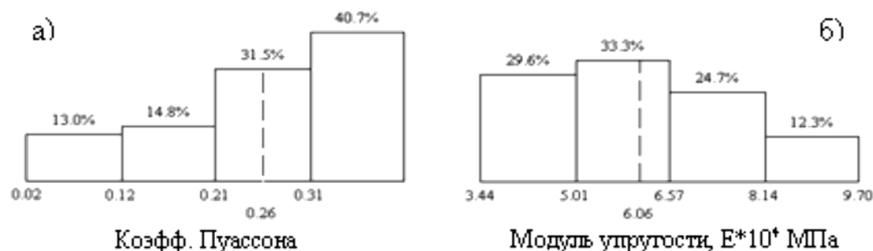


Выполненная инструментальная оценка параметров приконтурного массива позволила классифицировать породы в пределах нарушенной зоны как среднетрещиноватые (III категория трещиноватости) с размером блока 0.5-1.0 м. В пределах точности измерений данная оценка хорошо согласуется и дополняет результаты визуального обследования тоннелей. Величины оцененных мощностей нарушенной зоны от контура выработок  $h$  не превышают 1.1 м (как на момент проходки), что свидетельствует о том, что массив не потерял своих несущих свойств и обладает достаточным запасом устойчивости.

Трасса тоннеля Верхне-Териберской ГЭС отличается по геологическим условиям. Она пересекает 9-11 зон тектонической трещиноватости. Однако мощность этих зон по протяженности вдоль тоннеля не превышает 10-15 % его длины. Падение трещин в пределах этих зон составляет 75-80°. Они пересекают выработку, в основном, под углами 60-90°. С точки зрения устойчивости массива, такое взаиморасположение тектонических нарушений и выработки является наиболее благоприятным. В то же время на отдельных участках тектонические нарушения пересекают трассу тоннеля под острыми углами, что может создавать условия для развития процессов вывалообразования. План тоннеля со следами тектонических нарушений представлен на рис. 2.

Для оценки состояния массива на участках неблагоприятной тектонической трещиноватости была проведена инструментальная оценка свойств пород и трещиноватости массива методом сейсмической томографии. В зоне тектонической трещины на ПК 1857-1930 оборудован стационарный измерительный полигон, на котором выполняется продольное сейсмическое профилирование. На установленные в массиве реперы крепятся сейсмоприемники. Возбуждение сейсмических волн производится ударным способом. Регистрация сейсмосигналов осуществляется по каждому каналу в широком частотном диапазоне (до 768 Гц) 24-канальной сеймостанцией McSeis-160. Для получения томограммы скоростей сейсмических волн в массиве на данном участке выполнено 12 ударных возбуждений. Решение прямой и обратной задач сейсмической томографии осуществлялось с использованием пакета программ для ПЭВМ "Х-Томо" (лицензия А-545, разработчик ФГУП "Севморгео", г. Санкт-Петербург). На рис. 3 приведена томограмма скоростей продольных волн для обследованного участка массива пород. Диапазон скоростей продольных волн составляет 3.62-6.62 км/с. По томограмме прослеживается структурная блочность массива. По контактам монолитных блоков (светло-серая палитра рисунка) скорость  $V_p$  падает, показывая на снижение упругих свойств в зонах их влияния. В то же время, преобладание высокоскоростной составляющей в общем распределении скоростей упругих волн (в 70 % случаев скорость  $V_p \geq 5.3$  км/с) разреза свидетельствует о высокой консолидации массива пород внутри блоков породы с размерами 4-10 м. По соотношению скоростей  $V_p$  и

Рис. 4. Гистограммы свойств пород в массиве по данным натурных измерений



$V_s$  и известным выражениям (Савич, Яценко, 1979) оцениваются свойства пород в массиве (коэффициент Пуассона и модуль упругости) и категория трещиноватости пород. Категория трещиноватости определяется на основе классификации по геофизическому критерию трещиноватости  $B_e$ .

На рис. 4 приведены гистограммы распределения упругих характеристик массива – коэффициента Пуассона  $\nu$  (а) и модуля упругости  $E$  (б) по результатам натурных наблюдений в массиве. Средние значения этих характеристик ( $\nu = 0.26$ ,  $E = 6.06 \cdot 10^4$  МПа) близки или даже превышают эти показатели по сравнению со свойствами, полученными на образцах пород в лабораторных условиях. Низкими значениями упругих свойств ( $\nu > 0.35$ ) обладают породы, находящиеся в непосредственной близости к контуру выработки и в зонах влияния тектонических нарушений и межблоковых контактов массива. Однако, мощность этих участков от контура выработок в глубь массива, как видно из рис. 3, не превышает 0.4-0.6 м и опасности для устойчивости тоннеля не представляет. Свойства пород приконтурного массива, сформировавшиеся в период проходки под влиянием генезиса и буро-взрывных работ, в процессе длительной эксплуатации под воздействием напорных вод туннеля, постепенно вымывающих трещинный заполнитель межблоковых контактов, могут существенно изменяться. Об этом свидетельствует и вид гистограммы распределения коэффициента Пуассона, рис. 4а, имеющий явное смещение частот в сторону больших величин  $\nu > 0.35$ . Категорирование массива по трещиноватости, выполненное по показателю  $B_e$  для контрольного участка, рис. 3, характеризует массив, в основном, как сохранный, слаботрещиноватый (95 %). Гистограмма категорирования приведена на рис. 5.

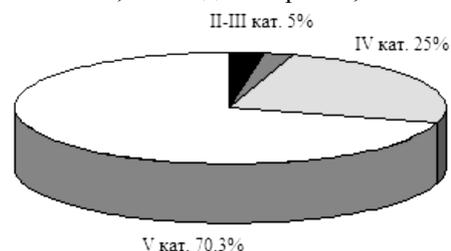


Рис. 5. Категорирование массива пород тоннеля Верхне-Териберской ГЭС по трещиноватости: II – повышено трещиноватые породы, III-IV – средние и слаботрещиноватые породы, V – сохранные породы

### 3. Заключение

Таким образом, полученные результаты натурного обследования тоннелей Верхне-Териберской и Борисоглебской ГЭС, дают основания сделать выводы о том, что несмотря на высокие показатели физико-механических свойств пород вмещающего массива, обеспечиваемые на 80-90 % протяженности тоннелей и обладающими поэтому высоким запасом устойчивости, длительная эксплуатация практически незакрепленных гидротехнических тоннелей под влиянием процессов выветривания и воды приводит к снижению геомеханических характеристик массива. В зонах тектонических нарушений фиксируется процесс ослабления естественных межблоковых связей под действием активных процессов выветривания и напорных вод, в особенности для водонапорных тоннелей. Со временем на подобных участках могут формироваться очаги вывалообразования из стен и кровли тоннеля. Для выявления динамики состояния геомеханический контроль состояния массива по предложенной методике необходимо сделать режимным, путем организации долгосрочных наблюдений.

### Литература

- Reider Lien, Knut Garsh.L. Submarine Tunnel rafnes – herdva, Southway. Aahen, Norwegian Hard Rock Tunneling Publication, N 1, p.77, 1982.
- Мельников Н.Н., Епимахов Ю.А., Абрамов Н.Н. Научные основы интенсификации возведения большепролетных подземных сооружений в скальном массиве. *Апатиты, КНЦ РАН*, 226 с., 2008.
- Никитин В.Н. Основы инженерной сейсмологии. М., МГУ, 176 с., 1981.
- Савич А.И., Яценко З.Г. Исследования упругих и деформационных свойств горных пород сейсмоакустическими методами. М., Недра, 213 с., 1979.
- Фокин В.А., Абрамов Н.Н., Кабеев Е.В. Инструментальное изучение глубины техногенных нарушений при скважинной отбойке горных пород на карьерах. *Горный журнал*, № 2, с.49-51, 2004.