



ГЕОТЕХНИКА

GEOTECHNICS

Том XIII, Vol. XIII

1

2021

ГЕОТЕХНИКА

Международный научно-практический журнал

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Издается с декабря 2009 г.

Выходит 4 раза в год.

ISSN: 2221–5514 (Print), ISSN: 2587–8239 (Online)
Префикс DOI: 10.25296

В журнале публикуются статьи ведущих специалистов в области механики грунтов, геотехники, проектирования оснований и фундаментов. Основные темы — теоретические и прикладные аспекты механики грунтов, описание механических свойств грунтов, проектирование и устройство оснований и фундаментов, подземных и заглубленных сооружений, методы численного моделирования в строительстве, контроль качества работ и обследование конструкций нулевого цикла, а также многие другие вопросы.

УЧРЕДИТЕЛЬ

ООО «Геомаркетинг», 115088, РФ,
Москва, ул. Машиностроения 1-ая, д. 5

ИЗДАТЕЛЬСТВО

ООО «Геомаркетинг», 115088, РФ,
Москва, ул. Машиностроения 1-ая, д. 5

РЕДАКЦИЯ

Кондратьева Екатерина Андреевна
Генеральный директор

Звонарева Наталия Викторовна
Заместитель генерального директора

Барыкина Ольга Сергеевна
Литературный редактор

Кашкина Марина Сергеевна
Отдел рекламы и отдел подписки

АДРЕС РЕДАКЦИИ

ООО «Геомаркетинг»
107076, РФ, Москва, ул. Электrozаводская, д. 60
Тел. +7 495 210-63-90, +7 495 210-63-06
E-mail: info@geomark.ru
http://geomark.ru

ИП Гилманов М.А.
Допечатная подготовка, дизайн и верстка

ТИПОГРАФИЯ

ООО «Медиаколор»
127273, РФ, Москва, Сигнальный проезд, д. 19, стр. 1

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Барыкина О.С., Фоменко И.К., Зеркаль О.В.

Оценка влияния проходки туннеля на напряженно-деформированное состояние неоднородного скального массива в сложных геологических и сейсмотектонических условиях 6

ПРОИЗВОДСТВО ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ РАБОТ

Шашкин А.Г., Ступак Н.Н., Хисамов Р.Р., Воронов А.С., Бондарев М.В.

Форт «Император Петр I» Кронштадтской крепости: история строительства и современное техническое состояние 20

Конюхов Д.С.

Критериальный анализ современных технологий подземного строительства 40

Кивлюк В.П., Исаев И.О., Алексеев В.А., Шишкина В.В.

Применение технологии компенсационного нагнетания для обеспечения сохранности окружающих зданий при сооружении станционных комплексов 56

ГЕОФИЗИКА В ГЕОТЕХНИЧЕСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Капустин В.В., Чуркин А.А., Ширококов М.П.

Опыт применения георадиолокации для контроля качества фундаментных плит 68

ПРИЛОЖЕНИЕ

Шашкин А.Г.

Лев Львович Карбоньер — инженер и генерал 82

Перечень научных специальностей с указанием соответствующих им отраслей науки, которым соответствует основное содержание рецензируемого научного издания:

- 05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки);
- 05.23.07 – Гидротехническое строительство (технические науки);
- 05.23.08 – Технология и организация строительства (технические науки);
- 05.23.17 – Строительная механика (технические науки);
- 25.00.08 – Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (геолого-минералогические науки);
- 25.00.08 – Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (технические науки);
- 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых (физико-математические науки);
- 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых (геолого-минералогические науки);
- 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых (технические науки);
- 25.00.36 – Геоэкология (по отраслям) (геолого-минералогические науки);
- 25.00.36 – Геоэкология (по отраслям) (технические науки).

NUMERICAL MODELING

Barykina O.S., Fomenko I.K., Zerkal O.V.

Assessment of the tunneling influence on the stress-strain state of a heterogeneous rock massif in complex geological and seismotectonic conditions 6

GEOTECHNICAL WORKS PRODUCTION

Shashkin A.G., Stupak N.N., Khisamov R.R., Voronov A.S., Bondarev M.V.

Fort "Emperor Peter the Great" of Kronstadt fortress: history of construction and current technical state 20

Konyukhov D.S.

Criteria analysis of contemporary technologies of underground construction 40

Kivlyuk V.P., Isaev I.O., Alekseev V.A., Shishkina V.V.

Application of compensatory injection technology to ensure the safety of surrounding buildings during the construction of station complexes 56

GEOPHYSICS IN GEOTECHNICAL CONSTRUCTION

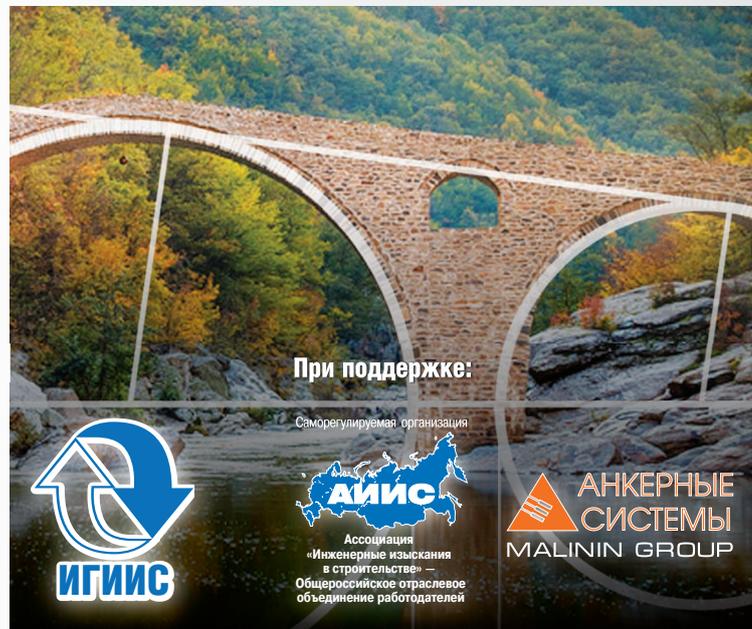
Kapustin V.V., Churkin A.A., Shirobokov M.P.

Experience of ground penetrating radar application for foundation slabs quality control 68

SUPPLEMENT

Shashkin A.G.

Lev Levovich Carbonier — engineer and general 82



GEOTECHNICS

International scientific and practical journal

The journal is included in the Russian List of peer-reviewed scientific publications, which should publish the main scientific results of dissertations for the degree of Candidate of Science and Doctor of Science.

Published since December 2009.

Issued 4 times a year.

ISSN: 2221–5514 (Print), ISSN: 2587–8239 (Online)
Prefix DOI: 10.25296

The journal publishes articles by leading experts in the field of soil mechanics, geotechnics, foundation engineering. The main topics are theoretical and applied aspects of soil mechanics, description of soil mechanical properties, design and construction of foundations, underground and buried structures, methods of numerical modeling in construction, quality control and inspection of zero-cycle structures, as well as many other issues.

FOUNDER

Geomarketing LLC, 115088, Russian Federation, Moscow, Mashinostroyeniya 1st St., Bld. 5

PUBLISHER

Geomarketing LLC, 115088, Russian Federation, Moscow, Mashinostroyeniya 1st St., Bld. 5

JOURNAL EDITORING

Ekaterina A. Kondratieva
General Director

Nataliya V. Zvonaryova
Deputy General Director

Olga S. Barykina
Literary Editor

Marina S. Kashkina
Advertising Department and Subscription Department

CONTACTS

Geomarketing LLC
107076, Russian Federation, Moscow,
Electrozavodskaya St., Bld. 60
Tel. +7 495 210-63-90, +7 495 210-63-06
E-mail: info@geomark.ru
<http://geomark.ru>

Individual entrepreneur Gilmanov M.A.
Prepress, Design and Layout

PRINTING HOUSE

Mediacolor LLC; 127273, Russian Federation,
Moscow, Signalnyy Proyezd, Bld. 19, Pde 1

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРОХОДКИ ТУННЕЛЯ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ НЕОДНОРОДНОГО СКАЛЬНОГО МАССИВА В СЛОЖНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

БАРЫКИНА О.С.*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, barykina@geol.msu.ru
Адрес: Ленинские горы, д. 1, г. Москва, 119991, Россия

ФОМЕНКО И.К.

Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе (МГРИ), г. Москва, Россия, ifolga@gmail.com
Адрес: ул. Миклухо-Маклая, д. 23, г. Москва, 117997, Россия

ЗЕРКАЛЬ О.В.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, igzov@mail.ru



Оригинальная статья

Поступила в редакцию 20.02.2021 / Принята к публикации 26.03.2021 / Дата публикации 31.03.2021

© ООО «Геомаркетинг», 2021

АННОТАЦИЯ

Современные подземные сооружения имеют сложную конструкцию, располагаются на больших глубинах и на протяжении долгого времени взаимодействуют с геологической средой, что приводит к возникновению опасных инженерно-геологических процессов. В работе рассматривается туннель строящейся в Республике Таджикистан Рогунской гидроэлектростанции (ГЭС). Гидроузел располагается в сложных геолого-тектонических условиях с наличием активных разломов вблизи и в основании сооружений и возможностью их подвижек при землетрясении. В геологическом строении участка строительства принимают участие породы позднеюрского и в основном раннемелового возраста. Нижнемеловые отложения представляют собой неравномерно переслаивающуюся толщу песчаников и алевролитов с прослоями аргиллитов. Туннель — эксплуатационный водосброс — расположен на правом берегу р. Вахш и проходит через чередующиеся в разрезе терригенные породы, причем кровля туннеля располагается в слое нижнемеловых аргиллитов. Для выявления особенностей распределения напряжений в неоднородном скальном массиве до и после создания подземной выработки, с учетом сжимающей тектонической силы и без нее, было проведено количественное моделирование методом конечных элементов в программе RS2 (программный комплекс Rocscience Inc.). В первом варианте модели, учитывающем напряжения, которые формируются под действием только гравитационных сил, ось максимальных напряжений ориентирована субвертикально. В варианте модели, учитывающем действия сжимающей тектонической силы, равной 10 МПа, ориентировка оси главных напряжений изменяется на субгоризонтальную. Для характеристики и оценки состояния, а также поведения массива использован коэффициент прочности, представляющий собой отношение прочности пород к величине действующих в массиве напряжений. На участке расположения туннеля выявлена область с критическими значениями коэффициента прочности в кровле выработки, обусловленная наличием слабого слоя нижнемеловых аргиллитов. В пределах этой области при строительстве подземных сооружений Рогунской ГЭС возможно проявление неблагоприятных процессов (горные удары, стреляние пород, вывалы и др.).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Вахшский хребет; неоднородный скальный массив; распределение напряжений; метод конечных элементов; сжимающая тектоническая сила; коэффициент прочности; туннель; опасные процессы и явления

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Барыкина О.С., Фоменко И.К., Зеркаль О.В., 2021. Оценка влияния проходки туннеля на напряженно-деформированное состояние неоднородного скального массива в сложных геологических и сейсмодектонических условиях. Геотехника, Том XIII, № 1, с. 6-18, <https://doi.org/10.25296/2221-5514-2021-13-1-6-18>.

ASSESSMENT OF THE TUNNELING INFLUENCE ON THE STRESS-STRAIN STATE OF A HETEROGENEOUS ROCK MASSIF IN COMPLEX GEOLOGICAL AND SEISMOTECTONIC CONDITIONS

OLGA S. BARYKINA*

Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia; barykina@geol.msu.ru

Address: Bld. 1, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia

IGOR K. FOMENKO

Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University (MGRI); Moscow, Russia; ifolga@gmail.com

Address: Bld. 23, Miklukho-Maklaya St., 117997, Moscow, Russia

OLEG V. ZERKAL

Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia; igzov@mail.ru

Original paper

Received 20 February 2021 / Accepted 26 March 2021 / Published 31 March 2021

© Geomarketing LLC, 2021

ABSTRACT

Modern underground structures have a complex design, are located at great depths and interact with the geological environment for a long time, which leads to the emergence of dangerous engineering-geological processes. This paper considers the tunnel of the Rogun hydroelectric power plant (HPP), which is under construction in the Republic of Tajikistan. The hydropower plant is located in complex geological and tectonic conditions with the presence of active faults near and in the base of the structures and the possibility of their movement during earthquakes. Rocks of Late Jurassic and mainly Early Cretaceous age take part in the geological structure of the construction site. Lower Cretaceous sediments are irregularly interbedded sandstones and siltstones with argillite interlayers. The tunnel — operational spillway — is located on the right bank of the Vakhsh River and passes through terrigenous rocks alternating in the section, and the top of the tunnel is located in the Lower Cretaceous argillite layer. To identify the distribution of stresses in the heterogeneous rock massif before and after the underground excavation, with and without compressive tectonic force, a quantitative finite-element modeling was performed in the software package RS2 (Rocscience Inc.). In the model considering the stresses formed under the action of gravitational forces only, the axis of maximum stresses is oriented subvertically. In the model with compressive tectonic force equal to 10 MPa, the orientation of the main axis stresses changes to subhorizontal. To characterize and assess the state and behavior of rock mass, a strength factor was used, which is a ratio of soil strength to the value of stresses acting in the massif. An area with critical values of strength coefficient in the tunnel roof due to the presence of a weak layer of Lower Cretaceous siltstones was revealed at the tunnel location. Within this area during construction of underground structures of Rogun HPP, unfavorable phenomena (rock bumps, rock outbursts, falls out, etc.) may occur.

KEY WORDS

Vakhsh Ridge; heterogeneous rock massif; stress distribution; finite element method; compressive tectonic force; strength factor; tunnel; hazardous processes and phenomena

FOR CITATION:

Barykina O.S., Fomenko I.K., Zerkal O.V., 2021. Assessment of the tunneling influence on the stress-strain state of a heterogeneous rock massif in complex geological and seismotectonic conditions. *Geotechnics*, Vol. XIII, No. 1, pp. 6–18, <https://doi.org/10.25296/2221-5514-2021-13-1-6-18>.

Введение

Подземные сооружения на протяжении значительного времени и разносторонне взаимодействуют с геологической средой, что приводит к возникновению опасных инженерно-геологических процессов, которые должны быть своевременно выявлены и оценены, а также разработаны мероприятия инженерной защиты для обеспечения надежной эксплуатации

объектов. В настоящее время подземные сооружения имеют сложную конструкцию, располагаются на больших глубинах и имеют разное назначение. В данной работе рассматривается туннель строящейся в настоящее время Рогунской гидроэлектростанции (ГЭС). Рациональное размещение в глубине массива подземных объектов, особенности их конструкции, обоснование использования территории для наземной части гид-

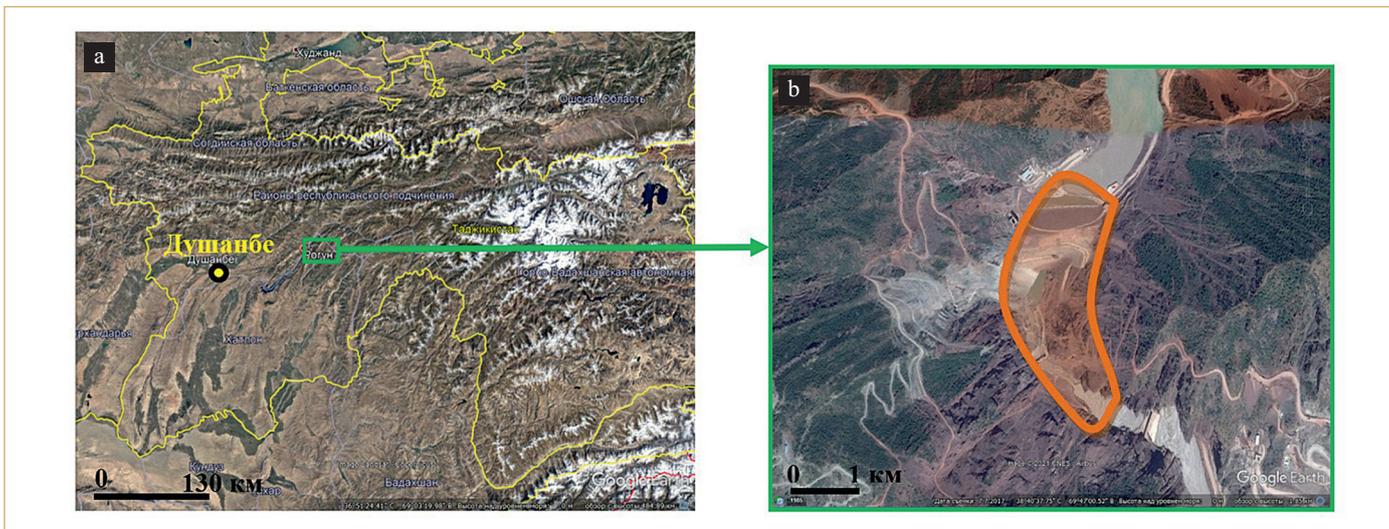


Рис. 1. Расположение площадки строительства Рогунской ГЭС на карте Республики Таджикистан (подложка Google Earth). Обозначения: а — желтым цветом отмечена государственная граница и столица республики, б — оранжевым цветом показано тело строящейся плотины

Fig. 1. Location of Rogun HPP construction site on the map of Tajikistan (Google Earth images). Designations: а — the state border of Tajikistan is marked in yellow color, б — the body of the dam under construction is shown in orange color

роузла и производство работ в большей степени определяются сложностью инженерно-геологических условий.

Строительство Рогунской ГЭС ведется в Республике Таджикистан (рис. 1), в долине р. Вахш с 1976 г. (основой для начала проектно-изыскательских работ по объекту явилось Постановление Государственной экспертной комиссии Госплана СССР № 21 от 25.12.1965). Плотина этой ГЭС станет самой высокой в мире каменно-набросной плотиной с высотой 335 м и длиной по гребню 612 м и будет являться верхней ступенью Вахшского каскада. Согласно проекту Рогунский гидроузел представляет собой комплекс сооружений: плотина, подземная гидроэлектростанция, включающая машинный зал, помещение трансформаторов, монтажную камеру и ряд водоводов, коллекторов и водосбросные туннели. Водоприемник находится на левом берегу водохранилища Рогунской ГЭС, через него и серию туннелей вода поступает к шести агрегатам мощностью 600 МВт каждый, находящихся в подземном здании гидроэлектростанции, затем попадает в водоотводящие туннели, располагающиеся под выработкой машинного зала, по которым происходит сброс воды в р. Вахш на правом берегу в нижнем бьефе.

Участок строительства располагается в узком ущелье, разделяющем хребты Вахшский и Сурх-Ку. Левый борт ущелья поднимается на 400 м, правый — на 600 м. Средняя крутизна склонов составляет 50–60° с отдельными отвесными участками. Ширина долины на участке строительства на отметках реки — 40 м, по линии нормального подпорного уровня — 700 м.

Инженерно-геологические условия участка строительства Рогунской ГЭС

В геологическом отношении район строительства Рогунской ГЭС приурочен к сочленению двух крупных тектониче-

ских структур Центральной Азии — Афгано-Таджикской депрессии и юго-западного Тянь-Шаня. Зонаю сочленения является Вахшский региональный разлом. По преобладающей составляющей новейших движений этот разлом считается надвигом [5]. На Гармском геодинамическом участке по ряду профилей, пересекающих надвиг, получена детальная картина смещений во фронтальной части: опускание перед выходом плоскости надвига на поверхность до 5 мм/год, валообразное поднятие фронта со скоростью 4–15 мм/год и уменьшение скорости к тыловой части аллохтона. Южнее фронтальной зоны выделены еще две аналогичные активные полосы, соответствующие разломным зонам или фронтам других «пластин» надвига. Этим устанавливается чешуйчатость разрывного нарушения. В настоящее время по нему фиксируются криповые движения. Необходимо отметить, что с подвижками по разлому связаны землетрясения силой до 9 баллов.

Крупная древняя (досреднеплейстоценовая) речная долина, наследуемая в настоящее время современными долинами рек Сурхоб, Вахш и Оби-Гарм, была выработана по зоне регионального Вахшского разлома. Древняя долина выполнена рыхлыми образованиями, преимущественно галечниками мощностью до 300 м. Подошва галечников располагается на 100–150 м ниже современного уреза р. Вахш [3].

Большинство основных сооружений гидроузла (рис. 2) располагается в пределах единого тектонического блока, который ограничен двумя разломами второго порядка — Ионахшским и Гулизинданским, являющихся оперяющими для Вахшского регионального разлома [3].

Ионахшский разлом является основной тектонической структурой участка [14]. Он прослеживается в верхнем бьефе вдоль подножия склона левого борта долины р. Вахш, пере-



Рис. 2. Схема размещения сооружений Рогунской ГЭС [1] с изменениями. Обозначения: 1 — водоприемник, 2 — шахта; 3 — отводящие туннели; 4 — контур плотины. Тектонические разломы с зонами дробления подписаны красным цветом: I — Ионахшский второго порядка, II — малые № 28, 35 — третьего порядка). Зеленой окружностью показан исследуемый участок трассы туннеля

Fig. 2. Layout of Rogun HPP structures [1] as amended. Designations: 1 — hydroelectric intake, 2 — shaft; 3 — outlet tunnels; 4 — dam contour. Tectonic faults with fracture zones in red color (I — Ionakhsh second order, II — small No. 28, 35 — third order). Green circle shows the investigated section of the tunnel route

секает не только основание плотины, но и водосборные туннели от подземной части ГЭС, переходя на ее правый борт, удаляется вглубь массива Вахшского хребта. Это дизъюнктивное нарушение представляет собой крутопадающий взброс. Угол падения плоскости разлома в юго-западном направлении составляет 80°. Скорости перемещения по Ионахшскому разлому составляют 2 мм/год, по оперяющему разлому № 35 — 1 мм/год [8]. Тектонические линзы этих разрывов, вскрытые на поверхности эрозионными процессами, «выжимаются» из массива со скоростью 2–3 мм/год. Породы, слагающие линзы, характеризуются сильной трещиноватостью и снижением в 3,0–3,5 раза прочностных свойств [3].

В геологическом плане практически все основные сооружения гидроузла располагаются в пределах единой моноклинали [6]. Моноклираль слагается верхнеюрскими и нижнемеловыми отложениями, падающими, как и Ионахшский разлом, в направлении нижнего бьефа под углами 65–75°. Верхнеюрские отложения (J_{3gr}) представлены галитом с включением мелких обломков терригенных образований. Каменная соль перекрыта нижнемеловыми аргиллитами мощностью около 20 м. Более крутое по сравнению с породами моноклинали падение плос-

кости Ионахшского разлома обуславливает приращение с глубиной мощности соляного пласта (около 15 м на каждые 100 м глубины), что придает ему клинообразную форму с усеченной в результате растворения вершиной. На дневной поверхности обнажаются верхнеюрские аргиллиты, граница растворения соли располагается на 35 м ниже уреза р. Вахш. Нижнемеловая толща (K₁) красноцветных терригенных отложений мощностью 1150 м представлена неравномерно переслаивающимися песчаниками, алевролитами и реже аргиллитами [3]. В верхнем и частично нижнем бьефе обнажаются верхнемеловые пестроцветные образования — переслаивающаяся толща аргиллитов, известняков с прослоями песчаников и гипсов.

Четвертичные рыхлые отложения в пределах рассматриваемой территории представлены небольшими по площади, но достаточно мощными (до 20 м) делювиальными шлейфами. В русле реки мощность современных аллювиальных валунно-галечниковых отложений не превышает 8–12 м.

Основанием и средой большинства сооружений являются верхнеюрские и нижнемеловые породы, песчаники, алевролиты и аргиллиты (с преобладанием песчаников), состоящие преимущественно из обломков кварца и полевого шпата и па-

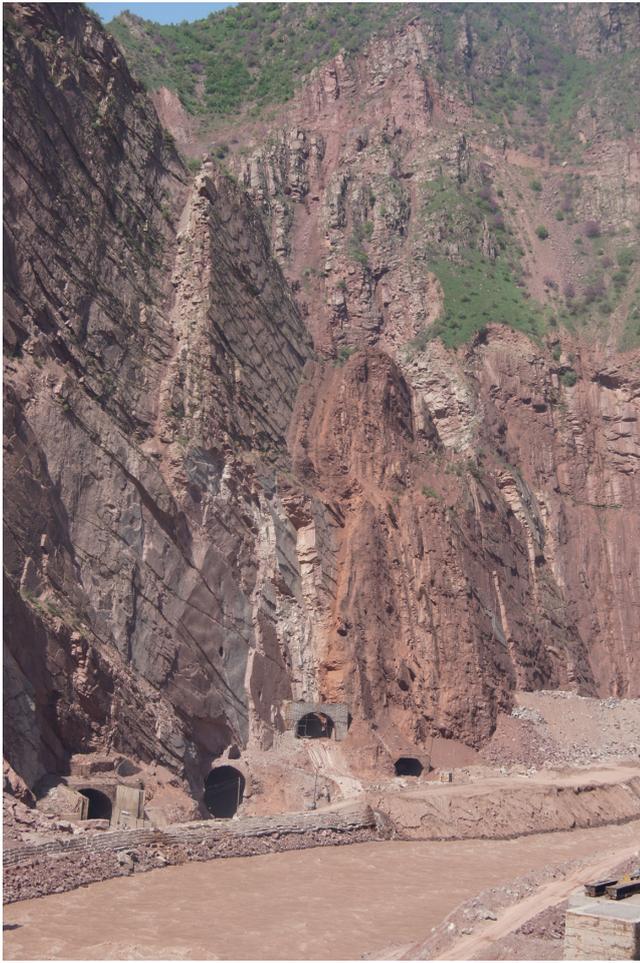


Рис. 3. Борт долины р. Вахш, представленный сильнодислоцированными нижнемеловыми песчаниками и алевролитами, на участке строительства Рогунской ГЭС. Фото О.В. Зеркала

Fig. 3. The valley slope of the Vakhsh River, formed by strongly dislocated Lower Cretaceous sandstones and siltstones at the Rogun hydroelectric power plant site. Photo by O.V. Zerkal

дающие под углом 70° вниз по долине (рис. 3, 4). У песчаников преобладает карбонатный и карбонатно-глинистый цемент, у алевролитов и аргиллитов — глинистый.

В целом как песчаники, так и алевролиты нижнемеловой толщи представляют собой прочные породы (табл.). Аргиллиты позднеюрского возраста выше границы растворения соли несколько слабее, но ниже влияния процессов выщелачивания соли они по прочности не отличимы от раннемеловых. Образцы песчаника, отобранные из массива, практически не выветриваются, алевролиты и аргиллиты в течение нескольких часов разрушаются до состояния дресвы.

В породах повсеместно, за исключением каменной соли, распространены ортогональные соскладчатые трещины. В зоне влияния надвигов (20–30 м для разлома № 35 и 5 м для более мелких разрывов) выделяется четвертая, приразрывная, система трещин, параллельная нарушениям. В целом трещи-



Рис. 4. Вид долины со стороны верхнего бьефа, 2019.

Источник:

<http://news.tajweek.tj/uploads/news/370d/a8235c768990807729b1b785f4ea64f2.jpg>

Fig. 4. Valley view from the upstream side, 2019. Source:

<http://news.tajweek.tj/uploads/news/370d/a8235c768990807729b1b785f4ea64f2.jpg>

новатость пород средняя и сильная — размеры единичных блоков 15–40 см. Протяженность тектонических трещин 1–3 м. Трещины открытые с шириной раскрытия 0,1–0,2 мм и лишь в тектонических линзах имеют влажный глинистый заполнитель мощностью 0,1–0,5 мм с параметрами сцепления $C = 0,005$ МПа и углом трения $\varphi = 28\text{--}30^\circ$.

Более крупные разрывы, например, № 35, 27, 24 и другие, с шириной зоны дробления до 20 см, участками значительно расширены и образуют линзы тектонически дробленных масс [1]. Такие разрывы третьего порядка являются опережающими к Ионахшскому разлому, имеющему четко выраженный шов и зону дробления до 80–100 м [10]. Тектонический разрыв № 24 выходит по правому борту р. Вахш (в 130–150 м на юго-запад от выходного портала отводящего туннеля IV–VI агрегата), прослеживается в северо-западном направлении по склону, от уреза р. Вахш до Ионахшского разлома.

Элементы залегания разрыва № 24, располагающегося вблизи отводящего туннеля, изменчивы по простиранию: азимут падения $195\text{--}225^\circ$, угол падения $70\text{--}80^\circ$. По своему строению это надвиг, пересекающий перпендикулярно напластованию породы $J_3\text{gr}$ и K_{1-2} возраста. С поверхности шов разлома в основном перекрыт четвертичными отложениями. Ширина раскрытия шва, который заполнен глиной трения, до 2 см.

В лежачем крыле породы не нарушены, в висячем крыле характеризуются повышенной трещиноватостью и обратным падением с азимутом $310\text{--}330^\circ$, а также углом падения $50\text{--}60^\circ$. Блочность массива — 10–15 см. Зона влияния разлома № 24 — до 30 м.

Характерная особенность разрывов третьего-четвертого порядков — их современная подвижность, оцененная авторами по данным режимных наблюдений. В случае землетрясе-

Таблица
Table

Характеристика прочностных свойств нижнемеловых пород участка Рогунского гидроузла на основе данных [1, 3] и параметры Хоэка-Брауна

Characteristics of Lower Cretaceous rocks strength properties of the Rogun HPP site based on data from [1, 3] and Hoek-Brown parameters

Породы	Цвет	Плотность, г/см ³	Коэффициент Пуассона	Модуль Юнга, МПа	Прочность на одноосное сжатие, кПа	Параметры Хоэка-Брауна			GSI параметр	m_i параметр
						m_b	s	a		
Песчаник		2,60	0,3	6067	110000	1,9944	0,0013	0,5114	40	17
Алевролит		2,70	0,3	1556	57000	0,4806	0,0002	0,5313	25	7
Аргиллит		2,44	0,3	397	5000	0,1607	0,00005	0,5854	10	4

Примечание: m_b , s , a — расчетные параметры, m_i — параметр литологического типа пород.

ния интенсивностью 9 баллов возможные величины перемещений могут составить до 10–15 см по тектоническому разрыву № 35 и несколько десятков сантиметров по основному (Ионахшскому) разлому.

Ближние значения прочностных характеристик основных литотипов нижнемеловой толщи и приблизительно одинаковая интенсивность трещиноватости в них определяют близкие геомеханические показатели свойств пород массива вне области влияния разгрузки напряжений в зоне воздействия экзогенных процессов. В зоне выветривания и разгрузки различия между характеристиками литотипов проявляются заметнее, в целом геомеханические характеристики снижаются, а водопроницаемость становится выше.

Одной из важнейших задач является изучение деформационных и прочностных свойств пород массива, в т.ч. с учетом неодинаковой степени воздействия сооружений. Показателями физических и физико-механических свойств пород для обоснования крепления и определения технологии строительства являются: модуль деформации, коэффициент Пуассона, коэффициент отпора, прочность на сдвиг и разрыв, коэффициент крепости по Протоdjяконову [7], плотность. Для экстраполяции показателей свойств и напряженного состояния пород, определенных на образцах, на массив с учетом его литологической и трещинной изменчивости используются сейсмоакустические характеристики (скорости продольных и поперечных волн, динамический модуль упругости). Существуют зависимости между показателями деформационных свойств, в меньшей степени напряженного состояния и прочности пород, определенных полевыми и лабораторными испытаниями, и данными сейсмоакустических исследований [1].

Методика расчетов

Напряженно-деформированное состояние (НДС) массивов пород и их свойства являются основой для прогноза и оценки горных ударов и давления, вывалов, разуплотнения, выпора, отслаивания и других негативных инженерно-геологических

процессов и явлений, развивающихся во времени при проходке и эксплуатации подземных сооружений [1]. Для выявления величин и распределения естественных напряжений, их режима и изменения под влиянием подземного строительства в сложнопостроенных массивах пород применяются различные методы в зависимости от особенностей геологического строения и глубины заложения.

Исследование распределения напряжений вокруг отводящего туннеля Рогунской ГЭС было выполнено с помощью количественного моделирования, целью которого являлось выявление особенностей распределения напряжений в сильнодислоцированном неоднородном скальном массиве до и после создания выработки. Туннель — эксплуатационный водосброс — расположен на правом берегу р. Вахш. Кровля туннеля располагается в слое слабых нижнемеловых аргиллитов.

В основу расчетной схемы был положен геологический разрез (рис. 5), составленный по результатам проведения инженерно-геологических изысканий в 2014 г. ОАХК «БАРКИ ТОЧИК» «Исследования ТЭО проекта строительства Рогунской ГЭС. Отчет Фазы II (окончательного): варианты определения проекта». Решение поставленных задач осуществлялось методом конечных элементов в программе RS2 комплекса Rockscience Inc.

Для оценки НДС пород во вмещающем туннель массиве были решены следующие задачи.

1. Определение величин и закономерностей распределения естественных напряжений, действующих в массиве, без учета влияния подземной выработки (рис. 6).
2. Определение величин и закономерностей распределения напряжений с учетом подземной выработки (рис. 7).
3. Определение величин и закономерностей распределения напряжений с учетом подземной выработки и сжимающих тектонических напряжений, равных 10 МПа.

В рассматриваемом случае неоднородность массива обусловлена слоистым залеганием терригенных песчано-глинистых пород и тектоническим разрывом № 27 взбросового кинематического типа.

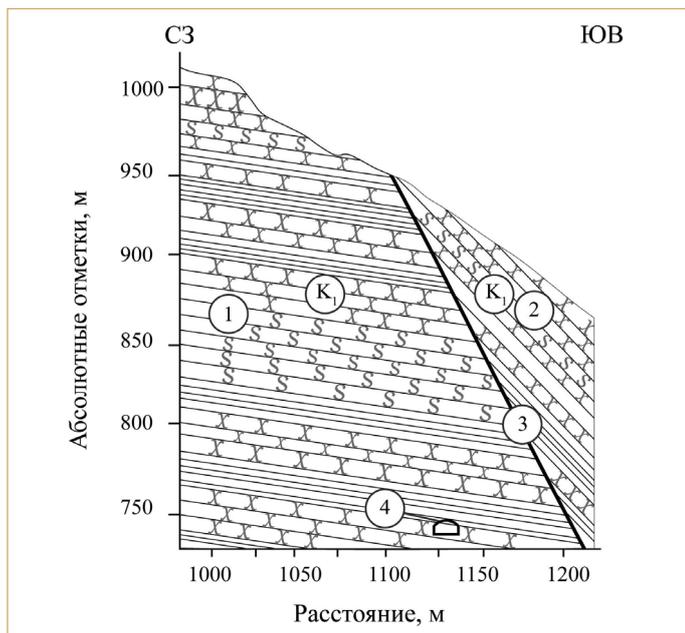


Рис. 5. Геологический разрез для расчетной схемы [1, 3] с изменениями. Обозначения: 1 — нижнемеловая толща неравномерно переслаивающихся песчаников, алевролитов и аргиллитов (Аз. пд. ЮВ 140°, \angle 85°), 2 — нижнемеловая толща неравномерно переслаивающихся песчаников, алевролитов и аргиллитов (Аз. пд. СЗ 294°, \angle 75°), 3 — разрыв № 24 (Аз. пд. ЮЗ 250°, \angle 60°), 4 — сечение туннеля

Для решения первой задачи учитывались неровности рельефа, слоистое строение массива и нарушенность массива разрывом. При составлении расчетной схемы учитывалось падение слоев в сторону склона и разрыв № 27, имеющий ширину 4 м, заполненный глиной трения с пониженными значениями прочностных и деформационных свойств.

Для предварительной оценки состояния и поведения массива пород при создании подземных выработок предложены различные эмпирические классификации, как правило, основанные на наблюдениях в конкретном регионе, и поэтому имеющие ограниченное применение [2, 4].

Разработаны общие классификации, характеризующие массивы пород для оценки их состояния и влияния горного давления, из которых в нашей стране применялись классификации М.М. Протодяконова [7], Z.T. Bieniawski [11], N. Barton, R. Lien, J. Lunde [9]. В методических документах института «Гидропроект им. С.Я. Жука» по инженерно-геологическим изысканиям для туннелей рекомендуется различать показатели крепости пород для оценки их разрабатываемости и для устойчивости сводов. Для общих и предварительных оценок состояния массивов пород применяется геомеханическая классификация Z.T. Bieniawski, ос-

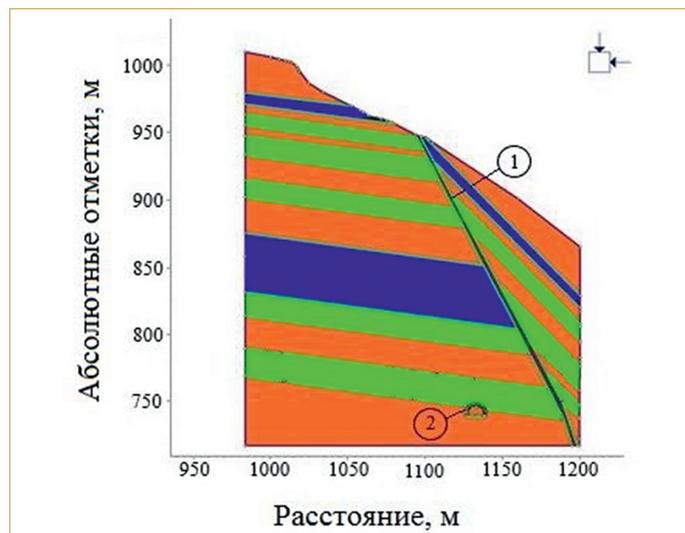


Рис. 6. Предварительная расчетная схема для оценки напряжений в районе туннеля. Обозначения: 1 — разрыв № 24 (третьего порядка), 2 — сечение туннеля, справа сверху — направление главных напряжений, цвет — см. Таблицу

Fig. 6. Preliminary calculation scheme for stress estimation in the tunnel area. Designations: 1 — rupture No. 24 (third order), 2 — tunnel section, top right — direction of main stresses, color — see Table

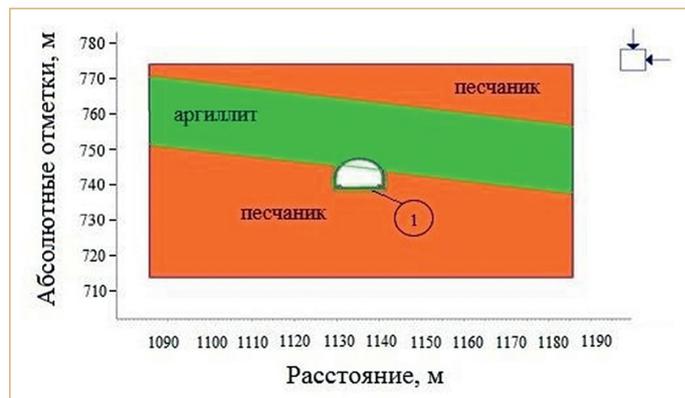


Рис. 7. Предварительная расчетная схема для оценки распределения напряжений вокруг туннеля. Обозначения: 1 — сечение туннеля, справа сверху — направление главных напряжений, цвет — см. таблицу

Fig. 7. Preliminary calculation scheme for estimating the distribution of stresses around the excavation. Designations: 1 — tunnel section, top right — direction of main stress, color — see Table

нованная на использовании нескольких геологических признаков, в результате которых по сумме баллов выделяется пять классов и дается обобщенная их характеристика.

Таким образом, в качестве одного из подходов к оценке устойчивости конструкций подземных выработок является привлечение рейтинговых геомеханических классификаций, так называемых «систем оценок качества геологической среды». Наиболее известными и широко используемыми в настоящее время в мире рейтинговыми классификациями яв-

ляются: Rock Mass Rating (RMR); Q -рейтинг; на основе индекса геологической прочности (GSI) [13].

В публикуемой работе была апробирована методика оценки устойчивости подземных горных выработок, представляющая синтез классификационного подхода, а также позволяющая учесть масштабный эффект за счет привлечения рейтинговой классификации GSI.

В качестве критерия прочности был использован обобщенный критерий Хоека-Брауна. Для этого проводилось уточнение показателей критериев прочности Хоека-Брауна, принятых в расчет. Расчет выполнялся в программе RocLab (комплекс Rockscience Inc.), позволяющей при обработке данных лабораторного изучения прочностных свойств горных пород осуществлять переход от результатов, полученных в образце, к характеристикам массива.

Обобщенный критерий Хоека-Брауна является примером нелинейного критерия прочности на сдвиг, введенного в инженерной геологии для скальных грунтов. Его оригинальная версия была разработана Э. Хоеком и Э.Т. Брауном в 1980 г. для проектирования подземных выработок [12]. В 1988 г. этот критерий был расширен для применения к задачам устойчивости склонов, а в 2002 г. был предложен обновленный вариант, который включал улучшение корреляции между параметрами модели и GSI [13].

Основная идея рассматриваемого критерия состоит в том, чтобы учесть масштабный эффект при переходе от свойств в образце породы к свойствам в массиве. Обобщенный критерий Хоека-Брауна может быть определен следующим образом [13]:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a, \quad (1)$$

где σ_1 и σ_3 — эффективные главные напряжения; σ_{ci} — прочность на одноосное сжатие; s , a и m_b — параметры критерия Хоека-Брауна, которые можно получить из следующих уравнений:

$$m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right), \quad (2)$$

$$s = \exp \left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right), \quad (3)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right), \quad (4)$$

где GSI — индекс геологической прочности, зависящий от структуры массива, например, ненарушенный, блочный, флишевый и т.д. (от 0 до 100); D — фактор техногенной нарушенности массива горных пород (от 0 до 1), e — основание натурального логарифма (число e).

На основе предельной огибающей критерия Хоека-Брауна можно получить эквивалентные параметры критерия прочности Мора-Кулона (удельное сцепление C и угол внутреннего трения ϕ) путем подбора линейной аппроксимации в исследуемом диапазоне напряжений. Главными достоинствами

критерия Хоека-Брауна являются его нелинейность и учет масштабного эффекта. В критерии Мора-Кулона нет данных преимуществ, что может существенно исказить реальное поведение скального образца под нагрузкой.

Физико-механические параметры критерия Хоека-Брауна для скальных грунтов, использованные в расчетах, приведены в таблице. Особенностью параметра D является то, что он не зависит от литологического состава, строения и физико-механических свойств исследуемого массива, а является отражением техногенного воздействия на него.

Коэффициент прочности рассчитывается путем деления прочности породы (на основе критериев разрушения) на индуцированное напряжение в каждой точке сетки. Все три главных напряжения оказывают влияние на коэффициент прочности ($\sigma_1, \sigma_3, \sigma_2$), поэтому коэффициент прочности в программе RS2 (комплекс Rockscience Inc.) можно считать трехмерным.

В случае упругих материалов коэффициент прочности может быть меньше единицы, т.к. допускается перенапряжение. В случае пластических материалов коэффициент прочности всегда больше или равен единице.

Критерий Хоека-Брауна — это эмпирически полученная зависимость, используемая для описания нелинейного возрастания максимальной прочности породы с возрастанием эффективного напряжения.

Ниже приведены уравнения, используемые для расчета коэффициента прочности в RS2, а также расчет количества ступеней нагрузки: уравнения коэффициента прочности.

$$I_1 = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}, \quad (5)$$

$$J_2 = 1/6[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} + \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2] + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2, \quad (6)$$

$$J_3 = (\sigma_{xx} - I_1/3)(\sigma_{yy} - I_1/3)(\sigma_{zz} - I_1/3) + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx} - (\sigma_{xx} - I_1/3)\tau_{yz}^2 - (\sigma_{yy} - I_1/3)\tau_{zx}^2 - (\sigma_{zz} - I_1/3)\tau_{xy}^2, \quad (7)$$

$$\Theta = 1/3 \arcsin \left[-\frac{3\sqrt{3}J_3}{2J_2^{3/2}} \right], -\frac{\pi}{6} < \Theta < \frac{\pi}{6}, \quad (8)$$

$$S = \sqrt{J_2}, \quad (9)$$

$$S_{max} = \frac{\sqrt{\left(1 + \frac{\tan \Theta}{\sqrt{3}}\right)^2 \left(\frac{m\sigma_c}{8}\right)^2 + \left(\frac{m\sigma_c I_1 + s\sigma_c^2}{12}\right)^2 - \frac{m\sigma_c}{8} \left(1 + \frac{\tan \Theta}{\sqrt{3}}\right)}}{\cos \Theta}, \quad (10)$$

$$\text{Коэффициент прочности (strength factor)} = S_{max}/S. \quad (11)$$

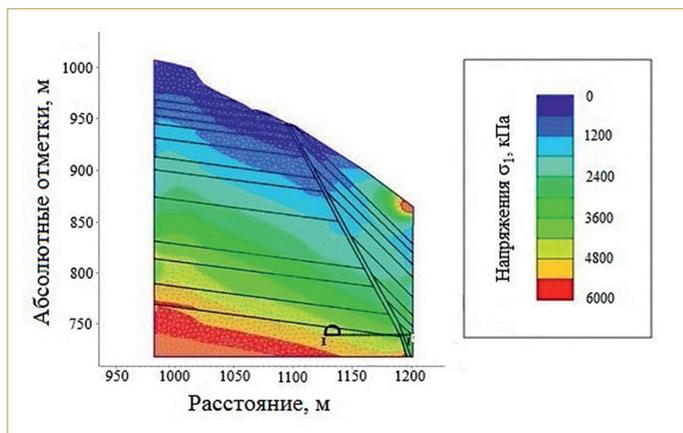


Рис. 8. Распределение естественных напряжений в массиве пород левого борта долины р. Вахш до создания выработки и планируемое расположение туннеля. Обозначения: см. рис. 6

Fig. 8. Distribution of natural stresses in the rock mass of the left bank of the Vakhsh valley before the excavation and the planned location of the tunnel. Designations: see Fig. 6

Результаты моделирования

Итоговая геомеханическая схема, полученная в результате количественного моделирования естественных напряжений, действующих в массиве, показана на рис. 8. Рассмотрение результатов позволяет сделать вывод о закономерном увеличении величин напряжений вертикально по направлению вглубь массива. Анализ горизонтальной изменчивости напряжений по направлению к дневной поверхности склона (линия I–I на рис. 8) показал общее плавное снижение действующих напряжений (на расстоянии 55 м на 1000 кПа), связанное с их разгрузкой при эрозионном врезе в долину реки. Однако на участке пересечения разлома, в двухметровой зоне тектонического нарушения, отмечается резкое падение σ_1 (рис. 9), достигающее 600 кПа. Вместе с тем, исходя из полученных результатов, участок проходки туннеля располагается вне области влияния тектонического нарушения.

На втором этапе оценивалось изменение распределения напряжений вокруг туннеля. В качестве критерия оценки состояния массива вокруг выработки был использован коэффициент прочности. Он определялся как отношение прочности грунтов к величине действующих напряжений S_{max}/S . Еще раз следует подчеркнуть, что, если коэффициент прочности больше 1, то прочность материала выше, чем индуцированное напряжение; в случае, если этот коэффициент меньше 1, то напряжения превышают прочность материала.

Подземная полость туннеля является существенным фактором, влияющим на изменение естественного поля напряжений массива горных пород, рассмотренного на рис. 8. В свою очередь изменение напряжений и их концентрация вокруг подземной выработки может вызвать деформации в виде обрушения кровли или горного удара.

Характер формирующегося вокруг выработки поля напряжений (рис. 10) зависит от целого ряда факторов. Во-первых,

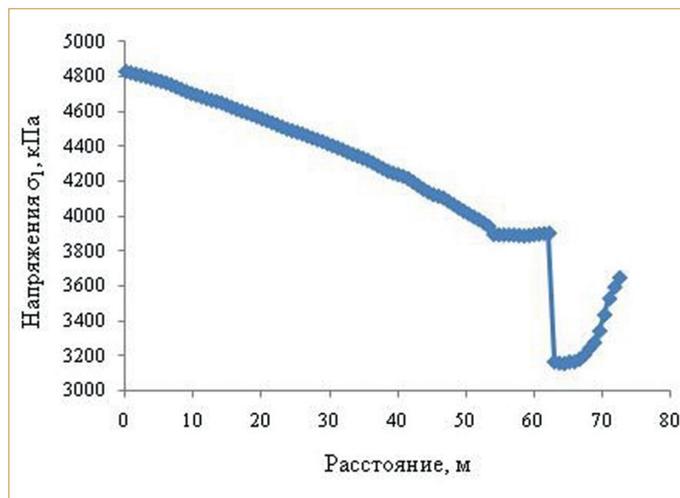


Рис. 9. Значения напряжений σ_1 по линии (I–I) (см. рис. 8), показывающее резкое падение в зоне разрывного нарушения

Fig. 9. Stress values σ_1 along the line (I–I) (see Fig. 6), showing a sharp drop in the fault zone

от величин и соотношения напряжений, обусловленных весом массива пород, а также возможным действием тектонической силы (на рассматриваемом этапе исследований не учитывалось). Во-вторых, от физико-механических свойств и особенностей строения массива горных пород, расположенных в непосредственной близости от контура подземной выработки. Для анализируемого массива такими особенностями являются:

- наличие в кровле выработки слоя сильнодислоцированных аргиллитов нижнего мела;
- наличие тектонической структуры, в зоне воздействия которой существенно изменяются физико-механические свойства пород;
- форма поперечного сечения и геометрия самой выработки, что является не менее важным фактором.

Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод о характере перераспределения величин напряжений в массиве на участке проходки туннеля. Из приведенного рис. 11 хорошо видна негативная роль слоя нижнемеловых аргиллитов, залегающих в кровле туннеля.

Расчеты показали, что проходка туннеля принятой геометрии и размеров приводит к существенному снижению коэффициента прочности, значение которого в кровле выработки уменьшается в четыре раза. Полученный результат моделирования указывает на потенциальную неустойчивость этой части массива.

Максимальные расчетные размеры зоны влияния в кровле выработки достигают двух диаметров туннеля, предопределяясь мощностью и структурой слоя слабых дислоцированных аргиллитов. Падение прочности со стороны подошвы и стенок выработки существенно меньше по размерам и не превышает 1/3 диаметра туннеля. Концентрация напряжений фиксируется в угловых точках нижней части туннеля.

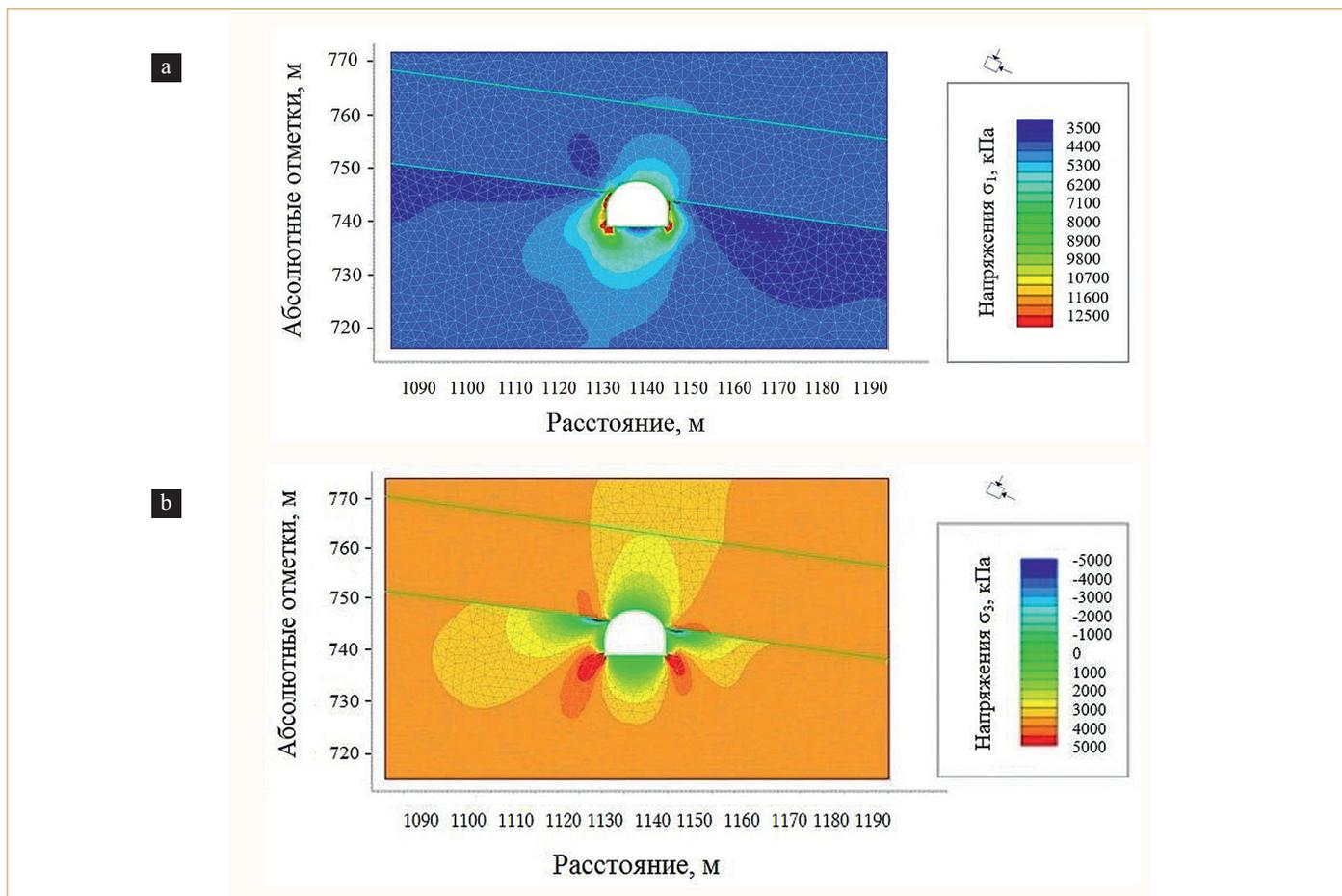


Рис. 10. Распределение напряжений σ_1 (a) и σ_3 (b), формирующееся при создании подземной выработки. Справа сверху — направление главных напряжений

Fig. 10. Distribution of stresses σ_1 (a) and σ_3 (b), formed during the creation of an underground excavation. Top right — direction of main stresses

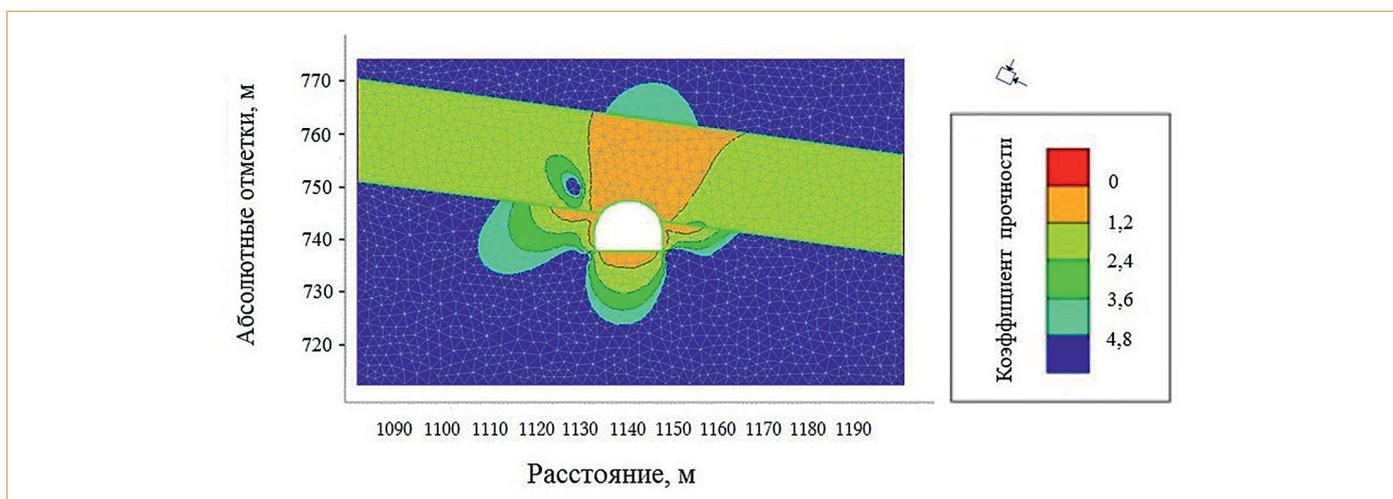


Рис. 11. Отношение прочности пород к величине действующих напряжений (коэффициент прочности) в массиве, вмещающем подземную выработку. Справа сверху — направление главных напряжений

Fig. 11. Ratio of soil strength to the value of effective stresses (strength coefficient) in the massif containing the underground excavation. Top right — direction of main stresses

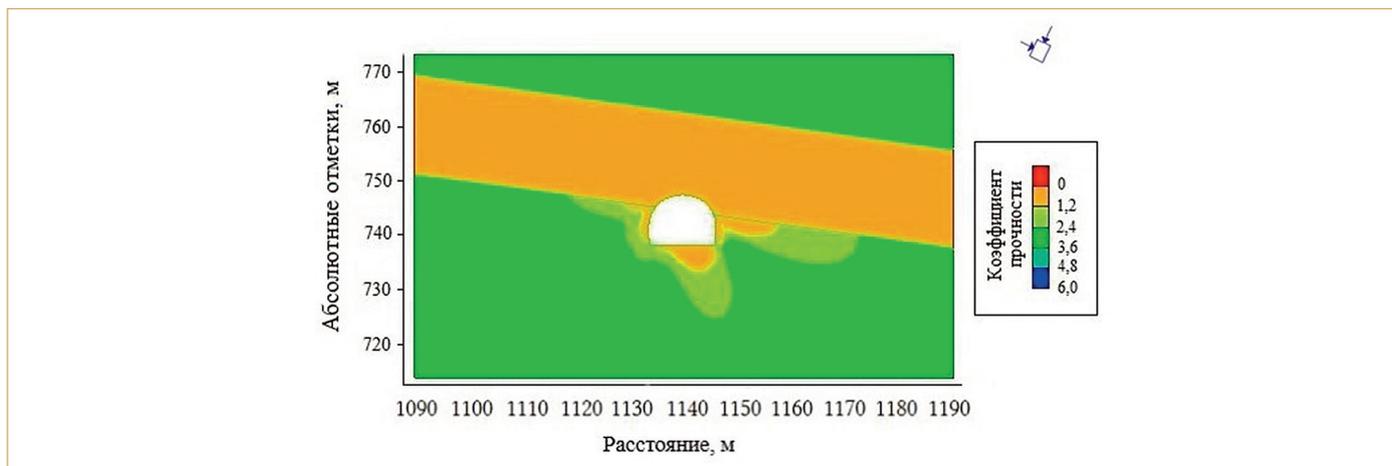


Рис. 12. Отношение прочности грунтов к величине действующих напряжений (коэффициент прочности) в массиве, вмещающем подземную выработку, с учетом действия сжимающих тектонических сил

Fig. 12. Ratio of soil strength to the value of effective stresses (strength factor) in the massif containing the underground excavation, taking into account the action of compressive tectonic forces

На следующем этапе моделирования в расчет было введено действие тектонических сжимающих напряжений. При этом, в отличие от модели, учитывающей напряжения, формирующиеся под действием только гравитационных сил, при которых ось главных напряжений ориентирована субвертикально, в модели при учете действия сжимающей тектонической силы, равной 10 МПа, ориентировка оси главных напряжений изменяется на субгоризонтальную.

Из приведенного рис. 12 видно, что в условиях действия тектонических сил происходит значительное снижение величин коэффициента прочности (как отношения прочности грунтов к величине действующих напряжений) и отмечается изменение его распределения в породном массиве, окружающем выработку. При этом характер распределения коэффициента прочности непосредственно у границ выработки существенного изменения не претерпевает.

Выводы

1. Инженерно-геологические условия участка строительства Рогунской ГЭС характеризуются сложными геологическими и сейсмотектоническими условиями, с несколькими системами трещин и активными разрывными нарушениями.

2. Используемая программа RS2 (комплекс Rockscience Inc.) позволяет спрогнозировать расположение областей повышенных напряжений в массиве дислоцированных нижнемеловых песчаников и алевролитов вблизи подземной выработки.

3. Проведенные расчеты показали падение напряжений в зоне разрыва, располагающегося в непосредственной близости от рассматриваемого туннеля.

4. При учете действия сжимающих тектонических сил происходит изменение ориентировки оси главных напряжений с субвертикальной на субгоризонтальную.

5. Подземная горная выработка (туннель) существенно меняет картину распределения напряжений в массиве.

6. На участке расположения туннеля выявлена область с критическими значениями коэффициента прочности в кровле выработки, обусловленная наличием слабого слоя нижнемеловых аргиллитов. Размеры этой области достигают двух диаметров полости как в условиях действия только гравитационных напряжений, так и при учете действия тектонических напряжений.

7. В пределах области с критическими значениями коэффициента прочности при строительстве подземных сооружений Рогунской ГЭС возможно проявление неблагоприятных процессов (горные удары, стрельяние пород, вывалы и др.).

Список литературы

1. Золотарев Г.С., 1990. Методика инженерно-геологических исследований. Изд-во Московского университета. Москва.
2. Кожогоулов К.Ч., Никольская О.В., Кадыралиева Г.А., Джакупбеков Б.Т., 2015. Устойчивость бортов нагорных карьеров в зонах влияния тектонических нарушений. Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук, № 2, с. 240–244.
3. Количко А.В., 1981. Инженерно-геологические условия строительства плотины Рогунской ГЭС. Гидротехническое строительство, № 10, с. 1–15.
4. Малинин С.И., 1970. Геологические основы прогноза поведения пород в горных выработках по разведочным данным. Недра, Москва.

5. Несмеянов С.А., 2004. Инженерная геотектоника. Наука, Москва.
6. Осадчий Л.Г., Бахтияров Л.И., 1975. Рогунский гидроузел на реке Вахш. Гидротехническое строительство, № 4, с. 10–13.
7. Протодяконов М.М., Чирков С.Е., 1964. Трещиноватость и прочность горных пород в массиве. Наука. Москва.
8. Старков В.И., 1987. Тектонические деформации земной поверхности на створе Рогунского гидроузла по результатам инструментальных измерений. В сб. статей под ред. М.А. Садовского, Сейсмостойкие исследования в районах строительства крупных водохранилищ Таджикистана. Дониш, Душанбе, с. 49–63.
9. Barton N., Lien R., Lunde J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of rock support. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, No. 6(4), pp. 189–236.
10. Barykina O.S., 1997. The study of tectonic faults in engineering geology. *Proceedings of the International Symposium on engineering geology and the environment*. Athens, Greece, 1987, pp. 45–48.
11. Bieniawski Z.T., 1989. *Engineering rock mass classifications*. John Wiley and Sons, New York, NY, USA.
12. Hoek E., Brown E.T., 1980. Empirical strength criterion for rock masses. *Journal of Geotechnical Engineering Divisions*, Vol. 106, No. GT9, pp. 1013–1046.
13. Hoek E., Brown E.T., 2019. The Hoek–Brown failure criterion and GSI–2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 11, No. 3, pp. 445–463.
14. Kalinin E.V., Barykina O.S., Panasyan L.L., 2015. Mathematical-numerical modeling of tectonic fault zone (Tadzhikistan). *Proceedings of the XII Congress International association for engineering geology and the environment*, Switzerland, Vol. 6, pp. 91–93.

References

1. Zolotarev G.S., 1990. *Methodology of engineering-geological research*. Publishing house of the Moscow State University, Moscow. (in Russian)
2. Kozhogulov K.Ch., Nikolskaya O.V., Kadyralieva G.A., Dzhakupbekov B.T., 2015. Pit wall stability in uplands in the zones of influence of tectonic faults. *Fundamentalnyye i Prikladnyye Voprosy Gornykh Nauk*, No. 2, pp. 240–244. (in Russian)
3. Kolichko A.V., 1981. Engineering-geological conditions of the construction of the Rogun HPP dam. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo*, No. 10, pp. 11–15. (in Russian)
4. Malinin S.I., 1970. *Geological bases of forecasting the behavior of rocks in mine workings by exploration data*. Nedra, Moscow. (in Russian)
5. Nesmeyanov S.A., 2004. *Engineering geotectonics*. Nauka, Moscow. (in Russian)
6. Osadchi L.G., Bakhtiyarov L.I., 1975. Rогun hydroscheme on the Vakhsh River. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo*, No. 4, pp. 10–13. (in Russian)
7. Protodjakonov M.M., Chirkov S.E., 1964. *Fracturing and strength of rocks in a massive*. Nauka. Moscow. (in Russian)
8. Starkov V.I., 1987. Tectonic deformations of the Earth’s surface at the site of the Rogun hydroelectric complex based on the results of instrumental measurements. In collection of papers M.A. Sadovsky (ed.), *Earthquake-resistant studies in the areas of large reservoirs construction in Tajikistan*. Donishch, Dushanbe, pp. 49–63. (in Russian)
9. Barton N., Lien R., Lunde J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of rock support. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, No. 6(4), pp. 189–236.
10. Barykina O.S., 1997. The study of tectonic faults in engineering geology. *Proceedings of the International Symposium on engineering geology and the environment*, Athens, Greece, 1987, pp. 45–48.
11. Bieniawski Z.T., 1989. *Engineering rock mass classifications*. John Wiley and Sons, New York, NY, USA.
12. Hoek E., Brown E.T., 1980. Empirical strength criterion for rock masses. *Journal of Geotechnical Engineering Divisions*, Vol. 106, No. GT9, pp. 1013–1046.
13. Hoek E., Brown E.T., 2019. The Hoek–Brown failure criterion and GSI–2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 11, No. 3, pp. 445–463.
14. Kalinin E.V., Barykina O.S., Panasyan L.L., 2015. Mathematical-numerical modeling of tectonic fault zone (Tadzhikistan). *Proceedings of the XII Congress International association for engineering geology and the environment*, Switzerland, Vol. 6, pp. 91–93.

Информация об авторах

БАРЫКИНА ОЛЬГА СЕРГЕЕВНА

Доцент кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, к.г.-м.н., г. Москва, Россия

ФОМЕНКО ИГОРЬ КОНСТАНТИНОВИЧ

Профессор кафедры инженерной геологии гидрогеологического факультета Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе (МГРИ), д.г.-м.н., г. Москва, Россия

ЗЕРКАЛЬ ОЛЕГ ВЛАДИМИРОВИЧ

Заведующий лабораторией инженерной геодинамики и обоснования инженерной защиты территорий, ведущий научный сотрудник кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, к.г.-м.н., г. Москва, Россия

Information about the authors

OLGA S. BARYKINA

PhD (Geology and Mineralogy); Associate Professor in the Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia

IGOR K. FOMENKO

DSc (Geology and Mineralogy); Professor in the Department of Engineering Geology, Faculty of Hydrogeology, Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University; Moscow, Russia

OLEG V. ZERKAL

PhD (Geology and Mineralogy); Head of the Laboratory of Engineering Geodynamics and Substantiation of Engineering Protection of Territories and Leading Research Scientist of the Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia



Источник: <http://News.tajweek.tj>