

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ
СООБЩЕНИЯ»

На правах рукописи

Злобин Герман Алексеевич

**ОСОБЕННОСТИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ И ИХ
ВЛИЯНИЕ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И
ЭКСПЛУАТАЦИИ КУЗНЕЦОВСКОГО ТОННЕЛЯ
(СЕВЕРНЫЙ СИХОТЭ-АЛИНЬ)**

Специальность 25.00.08 – «Инженерная геология, мерзлотоведение и
грунтоведение»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук,
доцент С.В. Квашук

Хабаровск – 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ:

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. Анализ современного состояния проблемы строительства и эксплуатации горных тоннелей.....	10
1.1 Учет влияния инженерно-геологических условий территории при проектировании и строительстве тоннелей.....	10
1.2 Изучение инженерно-геологических условий тоннельных сооружений в России и зарубежных странах.....	15
1.3. История геологической и инженерно-геологической изученности района....	22
1.4. Общие сведения о технологии возведения тоннеля и штольни.....	25
ГЛАВА 2. Состояние природной среды района Кузнецовского тоннеля.....	29
2.1. Климатические условия.....	29
2.2. Геолого-геоморфологические условия.....	31
2.3. Тектоника и сейсмичность района.....	41
2.4. Речная сеть и подземные воды.....	49
2.5. Характеристика экзогенных геологических процессов.....	55
ГЛАВА 3. Методологическая основа исследования инженерно-геологических условий Кузнецовского тоннеля.....	57
3.1. Методика изучения трещиноватости.....	57
3.2. Методика лабораторных исследований основных физико-механических свойств скальных пород.....	61
3.3. Методика сейсмического микрорайонирования.....	65
3.4. Методика расчета напряженно-деформируемого состояния массива горных пород.....	66
ГЛАВА 4. Геолого-структурные особенности массива, вмещающего Кузнецовский тоннель.....	69
4.1. Специфика геологического строения.....	69

4.2. Структурно-тектонические особенности	76
4.3. Характеристика трещиноватости массива.....	83
4.4. Физико-механические свойства вмещающих пород.....	98
ГЛАВА 5. Прогноз опасных геологических процессов при строительстве и эксплуатации Кузнецовского тоннеля.....	103
5.1. Влияние подземных вод на условия эксплуатации сооружения.....	103
5.2. Напряженно-деформируемое состояния вмещающего массива горных пород после проходки тоннеля.....	114
5.3. Сейсмическое микрорайонирование трассы тоннеля.....	118
5.4. Инженерно-геологическое зонирование трассы тоннеля.....	128
ГЛАВА 6. Рекомендации по проведению комплексного инженерно- геологического мониторинга Кузнецовского тоннеля.....	134
Заключение.....	144
Список литературы.....	146
Приложения.....	160

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Дальний Восток – это самый крупный, молодой и динамично развивающийся регион России. Развитие любого региона начинается с развития инфраструктуры, прежде всего, транспортного комплекса. В отдаленной перспективе на Байкало-Амурской магистрали грузопоток составит 108 млн т в год. Основная часть этого грузопотока далее будет направлена к незамерзающим морским портам Совгавань и Ванино. В этом случае барьерным местом является линия Комсомольск – Советская Гавань, и в особенности, Кузнецовский перевал.

Железнодорожная линия Комсомольск-на-Амуре – Советская Гавань возводилась в военные годы, что обусловило малую механизацию, преобладание ручного труда и массовое применение буровзрывных работ, углы заложения откосов на протяжении всей линии не соответствуют современным нормам проектирования и строительства. На некоторых участках значение угла заложения откоса превышает 45° – 60° , при высоте склонов более 50 метров.

При прохождении составами Кузнецовского перевала применяется двойная и тройная тяга, что не позволяет проводить большие объемы грузов. Для решения проблемы пропускной способности железнодорожной линии в настоящее время строится новый Кузнецовский тоннель, после ввода которого пропускная способность достигнет 30 млн т грузов в год.

Проектирование и строительство осуществляется в сложных инженерно-геологических условиях. Район до сих пор слабо изучен в геологическом отношении. Для него характерны повышенные отметки рельефа его большие градиенты, сложное геологическое и тектоническое строение, высокая сейсмичность, сложные гидрогеологические условия, подверженность опасным геологическим процессам.

Объекты инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования относятся к особо опасным и технически сложным объектам. Это определяет повышенные требования к оценке инженерно-геологических условий

районов строительства и эксплуатации этих сооружений и требует детальных исследований в целях надежной, безопасной и бесперебойной эксплуатации.

Кузнецовский тоннель является уникальным сооружением для транспортной инфраструктуры Дальнего Востока, эксплуатация которого позволяет существенно увеличить объем грузопотоков. Выход из строя или ограничение функционирования подобного сооружения может привести к значительным экономическим, социальным и экологическим потерям. Следовательно, углубленное изучение инженерно-геологических условий массива позволит достоверно определить возможность возникновения опасных процессов и предотвратить или уменьшить их последствия.

Известный факт, что за сравнительно быстрыми этапами проектирования и строительства следует длительный этап эксплуатации объекта. Геологическая среда способна влиять на работу сооружения. Поэтому немаловажно уделить внимание вопросам систематических наблюдений за процессами, способными влиять на устойчивость и надежность конструкции. Проведение комплексного мониторинга геологической среды поможет спрогнозировать возможные осложнения при эксплуатации тоннеля.

Цель работы. Оценить особенности инженерно-геологических условий массива, вмещающего Кузнецовский тоннель, и определить их влияние на устойчивость при строительстве и эксплуатации сооружения.

Основные задачи исследований:

1. Изучить инженерно-геологические условия района строительства тоннеля.
2. На основе выполненных полевых и лабораторных исследований, а также новых материалов, полученных при проходке штольни, выявить особенности геологического строения массива, вмещающего данное сооружение.
3. Определить возможные осложнения при его эксплуатации.
4. На основе выявленных осложнений, разработать рекомендации для обеспечения устойчивости тоннеля при эксплуатации.

Объектом исследования являются инженерно-геологические условия массива, вмещающего Кузнецовский тоннель и припортальные выемки тоннеля.

Основные методы исследований: 1) теоретический анализ материалов изысканий, научной и фондовой литературы; 2) полевые и лабораторные методы исследований трещиноватости горных пород; 3) лабораторные исследования физико-механических свойств горных пород; 4) компьютерное моделирование напряженно-деформируемого состояния массива после проходки тоннеля; 5) расчетные методы сейсмического микрорайонирования; 6) опробование подземных вод и лабораторные анализы их количественного химического и микрокомпонентного состава.

Научная новизна:

1. Установлены новые (дополнительные) характеристики геологического строения и физико-механических свойств пород горного массива, вмещающего тоннель.

2. Получены новые данные о структурных особенностях участка с построением новых диаграмм, схем и пространственных моделей структурных нарушений всех уровней (разломов, трещиноватости и микротрещиноватости).

3. Впервые смоделировано напряженно-деформируемое состояния массива горных пород; на основе полученной модели оценены геомеханические условия исследуемого горного массива.

4. Уточнено изменение сейсмической интенсивности трассы тоннеля с учетом новых данных, полученных в ходе исследования.

5. Получены новые данные, характеризующие гидрогеологические условия массива, с учетом которых был выполнен прогноз характера обводненности тоннеля в эксплуатационный период и ее влияния на работу сооружения.

6. Используются современные зарубежные классификации горных пород массива с целью зонирования трассы тоннеля, учитывающие комплекс проведенных автором исследований.

7. На основе систематизации проведенных исследований разработана и впервые предложена методика проведения мониторинга транспортной природно-технической среды «горный массив – Кузнецовский тоннель».

Защищаемые положения:

1. Особенности инженерно-геологических условий массива, вмещающего Кузнецовский тоннель, определяются его специфическим геологическим строением и структурно-тектонической позицией, диктующей повышенную трещиноватость и, как следствие, значительную неоднородность физико-механических свойств горных пород.

2. Неоднородность инженерно-геологических условий определяет характерное геомеханическое состояние, особенности сейсмической интенсивности и изменчивые гидрогеологические условия массива, вмещающего Кузнецовский тоннель.

3. Выполненное инженерно-геологическое зонирование трассы тоннеля, базирующееся на комплексном рейтинге горного массива, дает основу для долгосрочного мониторинга его состояния с целью надежной эксплуатации и проектирования второй очереди.

Практическая значимость. Полученные автором данные о геологическом строении, структурных неоднородностях, трещиноватости, физико-механических свойствах позволят дать подробную оценку инженерно-геологических условий объекта, что будет актуально при эксплуатации существующей и строительстве второй очереди сооружения. Рекомендации к проведению мониторинга геологической среды могут быть использованы организациями, занимающимися эксплуатацией Кузнецовского тоннеля. Методы и подходы, примененные при выполнении исследования, могут быть использованы при изучении других подземных сооружений в условиях Северного Сихотэ-Алиня на всех этапах существования объекта.

Достоверность научных положений и выводов, сформулированных в диссертационной работе, определяется их соответствием научным трудам и результатам инженерных изысканий, проведенных в районе исследования, а также подтверждается принятой методологической базой, основанной на фундаментальных и достоверно изученных положениях. В основу диссертации положены результаты, полученные в рамках полевых, научно-практических и

лабораторных исследований о влиянии инженерно-геологических условий на безопасность, бесперебойность и устойчивость Кузнецовского тоннеля при эксплуатации.

Апробация работы и публикации. Основные положения, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на научных конференциях: «XXI Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов в г. Нерюнгри» (Нерюнгри, 2010), «Научно-технические проблемы транспорта, промышленности и образования» (Хабаровск, 2010), «Строение литосферы и геодинамика» (Иркутск, 2011), «Научно-технические проблемы транспорта, промышленности и образования» (Хабаровск, 2011), «Проблемы освоения георесурсов» (Хабаровск, 2011), «Превентивные геотехнические меры по уменьшению природных и техногенных бедствий» (Хабаровск, 2011), «Тектоника, магматизм и геодинамика Востока Азии: VII Косыгинские чтения» (Хабаровск, 2011), «Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием Геонауки-60» (Иркутск, 2012), «Голстихинские чтения» (Санкт-Петербург, 2012). Кроме того, результаты исследований использованы при выполнении хоздоговорных работ с непосредственным участием автора: «Оценка инженерно-геологических условий и изучение механических свойств скальных пород Кузнецовского тоннеля» в 2009 году, а также во время работы по гранту при поддержке японо-российского центра молодежных обменов (JREC) по программе «Стажировка в Японии» в 2011 году.

Фактический материал и личный вклад автора. Диссертационная работа подготовлена на основе полевых и камеральных исследований, проводившихся в 2009–2012 годах, выполненных лично автором или с его участием. В том числе были использованы опубликованные и фондовые материалы В.И. Шевченко, В.В. Голозубова, А.Г. Владимирова, отчеты инженерно-геологических изысканий, выполненных под руководством Т.А. Грабовской (ОАО «Дальгипротранс»), О.Г. Порфирьева (ОАО «Экотехпроект») и др. Личный вклад автора: отбор проб горных пород из забоя тоннеля для выполнения лабораторных исследований физико-механических свойств и

микротрещиноватости; лабораторные исследования (включая подготовку образцов) физико-механических свойств горных пород и их анализ, полевое изучение трещиноватости горных пород; анализ фондовых, научных и материалов инженерно-геологических изысканий для определения инженерно-геологических условий и их особенностей; отбор проб подземных вод и гидрогеологическое обследование транспортно-дренажной штольни и тоннеля и их анализ; исследование микротрещиноватости на микроскопе в шлифе; сейсмические расчеты, включая комплекс работ по уточнению исходной сейсмичности, вероятностного анализа сейсмической опасности и сейсмического микрорайонирования; оценка напряженно-деформируемого состояния массива после проходки тоннеля; анализ режимных наблюдений для оценки особенностей геологических, тектонических и гидрогеологических условий района исследования.

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 12 научных работах, в том числе 3 статьях в журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК Минобрнауки РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 159 машинописных страницах, состоит из введения, 6 глав, заключения, библиографического списка из 119 наименований, содержит 48 рисунков, 20 таблиц, 2 приложения.

Автор глубоко признателен своему научному руководителю Квашуку Сергею Владимировичу за постоянную поддержку, помощь и замечания при выполнении данной работы. Также автор очень благодарен коллективу Института Тектоники и Геофизики ДВО РАН к.г.-м.н. Кудымову А.В., Развозжаевой Е.П., Медведевой С.А., Крапивенцевой В.В. и в особенности д.г.-м.н. Кирилловой Галине Леонтьевне за всестороннюю помощь при подготовке материалов и написании диссертации.

Кроме того, автор признателен Кулакову В.В., Малееву Д.Ю., Потапчук М.И. за ценные советы, замечания и помощь в написании отдельных разделов.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ТОННЕЛЕЙ

1.1. Учет влияния инженерно-геологических условий при проектировании и строительстве тоннелей

Тоннели являются объектами, полностью располагающимися в массиве горных пород. Соответственно определяющим фактором устойчивости подземных объектов являются инженерно-геологические условия территории освоения.

На всех стадиях жизнедеятельности объекта должны быть максимально учтены все составляющие инженерно-геологических условий горных массивов, вмещающих тоннель.

В первую очередь это геологическое строение массива горных пород. Необходимо максимально полно и достоверно установить литологию и стратиграфию горных пород. Это позволит выбрать наиболее оптимальный вариант трассы тоннеля, рассчитать оптимальный и надежный тип несущих конструкций сооружения, а также спрогнозировать возможные осложнения при строительстве и эксплуатации (агрессивность по отношению к материалам отделки, выветриваемость, размягчаемость, вымываемость, карст и др). Очень важно выявить прослой более слабых и неустойчивых пород (глинистые прослой, водонасыщенные пески). Недоучет геологического строения может привести к множеству проблем при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей. Неучтенные при изысканиях слои могут существенно отличаться по прочностным параметрам, кроме того они могут обладать специфическими свойствами, такими как размягчаемость, растворяемость, выветриваемость, повышенная фильтруемость и др. Это грозит повышением затрат на усиление конструкций, а также увеличением частоты эксплуатационных ремонтов. В некоторых случаях интенсивная выветриваемость пород приводила к существенным деформациям и выходу из строя дорожного полотна, закрытию автодорожного тоннеля и сооружению нового в стороне от залегания интенсивно-выветриваемых пород.

Присутствие растворимых пород в массиве может свидетельствовать о развитии карста.

Помимо деструктивного влияния, недоучет в некоторых случаях приводит к остановке работ, смене рабочего органа горнопроходческих механизмов и даже к изменению способа проходки. Это может произойти по причине залегания даек магматических горных пород, обладающих очень высокой прочностью относительно вмещающей толщи осадочных пород.

При изучении геологического строения важно в полном комплексе изучить горные породы, слагающие массив. Необходимо проводить исследования гранулометрического и химико-минералогического состава грунтов, лабораторные исследования характеристик водно-физических, физико-механических и теплофизических свойств грунтов. Все это необходимо для выявления особенностей геологического строения и выдачи количественных параметров для проектирования постоянных конструкций тоннельного сооружения.

Часто наиболее важной с точки зрения влияния на устойчивость подземных сооружений является структура массива горных пород. Она создает неоднородность инженерно-геологических условий, создает трудности в их прогнозировании и интерполяции.

В первую очередь необходимо учитывать распространение, характеристику, состав и сферу влияния крупных складчатых и разрывных нарушений. Опыт проходки тоннелей за рубежом и в России показывает, что участки нарушений представляют наиболее сложные, часто их можно пройти только с использованием специальных методов или «завалом». Значительные по объему вывалы при проходке горных тоннелей, как правило, связаны с крупными структурно-тектоническими нарушениями. Тектонические разрывы характерны для дислоцированных массивов в горноскладчатых областях. Разрывы сопровождаются зонами тектонической трещиноватости, мощность которых может достигать сотни метров. Они нередко состоят из раздробленных горных пород, с глиной трения, зеркалами скольжения. Это характеризуется как участок

ослабления массива горных пород. Кроме того, помимо зоны дробления необходимо учитывать и оценивать примыкающие к разлому горные породы, их состояние и физико-механические свойства.

В особенности необходимо учитывать тектонические нарушения, заполнитель которых находится в водонасыщенном состоянии. Прорывы водогрунтовых масс при проходке подобных зон приводят к дополнительным расходам на восстановление оборудования, задержке проходки, и в некоторых случаях к катастрофическим последствиям с выходом из строя техники и человеческими жертвами.

Влияние тектонических нарушений на устойчивость сооружения может проявляться как мгновенно в процессе проходки, так и в процессе эксплуатации после нескольких месяцев и даже лет. Это может происходить вследствие суффозии заполнителя трещин, изменения горного давления и активизации неотектонических движений в массиве.

Важно учитывать новейшую тектонику массива, вмещающего тоннель. Необходимо выявить развивающиеся в новейшее время тектонические нарушения и оценить их характер для дальнейшего прогноза направления и расстояний сдвигов горных масс по разломам.

Важнейшей структурной особенностью массива горных пород является их трещиноватость. Она создает неоднородность и сложность в оценке инженерно-геологических условий, изменяет прочностные, деформационные, фильтрационные и другие свойства горных пород. Устойчивость горных пород в массиве определяется, главным образом, степенью нарушенности и взаимоотношением систем между собой. Оценка трещиноватости и ее учет при проектировании, строительстве и эксплуатации подземных сооружений является одной из первоочередных задач при инженерно-геологических исследованиях. Характеристика трещин свидетельствует об их генезисе, сцеплении, водоносности и позволяет наиболее точно определить их влияние на устойчивость горных пород.

Ориентировка систем трещин в массиве предопределяет объем и форму

вывалов. Поэтому ее необходимо учитывать при проектировании и выборе трассы тоннеля. Характер обрушений горных пород в припортальных выемках также в большей степени зависит от направления трещин и их характеристик.

Оценка и учет трещиноватости горных пород необходим для прогноза активизации вывалов обрушений при проходке, выборе типа оборудования и скорости проходки, проектирования оптимальных несущих конструкций обделки, обеспечения устойчивости припортальных выемок, изучения гидрогеологических условий и др.

Важное значение на устойчивость подземных сооружений оказывают гидрогеологические условия территории освоения. Необходимо установить и учитывать наличие и характер водоносных горизонтов, направление и скорость движения подземных вод, фильтрационные свойства водоносных грунтов, водопритоки в горные выработки, химический состав подземных вод и степень агрессивности их по отношению к материалу обделки сооружения, ожидаемое гидростатическое давление на конструкции сооружения, режим подземных вод.

Обводненность массива горных пород является существенным затруднительным фактором при проходке тоннеля. Требуется дополнительных мероприятий по дренажу инфильтрующихся вод из выработки. Мгновенные прорывы водных и водогрунтовых масс приводят к длительной остановке, проведению работ по осушению участка и восстановлению механизмов. В некоторых случаях это приводило к человеческим жертвам.

Неблагоприятные гидрогеологические условия приводят к существенным проблемам при эксплуатации сооружения. Агрессивные по отношению к конструкциям тоннельного сооружения подземные воды постепенно приводят к потере их функциональности, требуя проведения ремонтно-восстановительных работ, которые ведут за собой большие затраты и приостановку эксплуатации транспортной линии. Учет гидрогеологических условий необходим для планирования горных работ, выбора метода сооружения, проектирования гидроизоляции, дренажа и постоянных конструкций тоннеля, а также выбора и проектирования специальных методов проходки обводненных массивов.

Геоморфологические условия также влияют на выбор трассы тоннеля. Проходка и эксплуатация тоннелей глубокого и неглубокого заложения испытывает различные нагрузки и воздействия среды. Резкие перепады высот и множество различных геоморфологических элементов затрудняют выбор трассы тоннеля и проектирование его конструкций. Риски возникновения гравитационных процессов также в большой степени связаны с характеристикой геоморфологических условий.

Сейсмичность особо воздействует на инженерные сооружения. Несмотря на редкость проявления играет крайне негативную роль для инженерной деятельности. Транспортные сооружения отличаются своей протяженностью, часто проходят через различные геоморфологические, инженерно-геологические, геотектонические и другие условия. Неоднородность строения земной коры приводит к различным сейсмическим воздействиям.

Землетрясения, происходящие в зоне влияния тоннеля, могут привести к разрушительным последствиям. Отказы такого сооружения приводят к тяжелым социальным, экономическим и экологическим последствиям. Учет сейсмичности необходим для проектирования конструкций обделки и припортальных сооружений, а также оценки рисков возникновения природно-техногенных катастроф.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что грамотная оценка и учет особенностей инженерно-геологических условий позволяют обеспечить устойчивость транспортных тоннелей. Кроме того, их учет при проектировании, строительстве и эксплуатации сооружения позволяет оптимально запроектировать постоянные конструкции, мероприятия по гидроизоляции и дренажу, подобрать способ проходки и тип используемого оборудования, обеспечить безопасность и бесперебойность эксплуатации сооружения, понизить риски его отказа и существенно уменьшить затраты в период сооружения и эксплуатации тоннеля.

1.2. Изучение инженерно-геологических условий тоннельных сооружений в России и зарубежных странах

В связи с необходимостью развития транспортной инфраструктуры, ростом численности городов, нехваткой площади и по другим причинам, во всем мире идет освоение подземного пространства.

Многими отечественными и зарубежными учеными говорилось о том, что именно инженерно-геологические исследования наиболее важны при проектировании, строительстве и эксплуатации подземных сооружений. По мнению Б.А. Лысика, «Важность геологического обоснования подземного строительства подчеркивается тем обстоятельством, что ни одна инженерная конструкция не находится в такой зависимости от состава, строения, водообильности и других характеристик горных пород, как подземное сооружение» [Лысиков, 2004].

Характерным и распространенным примером подземного сооружения являются тоннели. Тоннели бывают транспортными, ирригационными, судоходными и т.д. Из них наибольшую распространенность получили транспортные автодорожные и железнодорожные тоннели [Храпов и др., 1989].

Процесс планирования, проектирования, строительства и эксплуатации тоннелей является наукоемким. Поэтому множество ученых из различных сфер науки, начиная с анализа рисков и заканчивая механикой и взрывными технологиями, исследуют тоннели и среду вокруг объекта. Наиболее важным для тоннелей, как для любых подземных сооружений, является инженерно-геологические исследования. Этому вопросу посвящены многие работы отечественных и зарубежных ученых.

Одним из первых ученых, исследующих инженерно-геологических условия тоннелей, является Пашкин Евгений Меркурьевич. Крупный ученый в области специальной инженерной геологии. В его многочисленных работах рассмотрены методологические основы исследований, вопросы влияния структурных и геологических факторов на формирование инженерно-геологических условий строительства тоннелей. Исследованы факторы, влияющие на устойчивость

горных пород при проходке, причины ее нарушения и прогноз. Изучена методика определения параметров вывала на основе математического моделирования с использованием расчетных схем. Описаны принципы взаимодействия массива горных пород и выработки (выбор оптимального сечения, безопасная проходка тектонических зон).

Учеником Пашкина Е.М. Горбушко Р.М. был рассмотрен вопрос типизации инженерно-геологических условий тоннелей на примере г. Москвы для последующего информационного обеспечения тоннельно-проходческих комплексов (ТПМК) [Горбушко, 2007]. В его работе подробно были изучены инженерно-геологические свойства Лефортовского и трассы Серебряноборских тоннелей. Предложен вариант типизации инженерно-геологических условий при строительстве тоннелей с применением ТПМК и разработана методологическая схема проведения инженерно-геологических изысканий для строительства тоннелей с применением ТПМК в Московских условиях.

Большой вклад в изучение влияния инженерно-геологических условий на эксплуатацию транспортных тоннелей внесла Регина Эдуардовна Дашко. Региной Эдуардовной и ее многочисленными учениками были изучены вопросы надежности и длительной устойчивости подземных сооружений Санкт-Петербургского метрополитена [Дашко, 1999; Дашко, Александрова, 2002; Дашко, Котюков, 2006]. В ее работах большое внимание уделено вопросам влияния техногенных факторов на конструкции тоннелей и обеспечения их надежной эксплуатации [Дашко, Котюков 2007а; Дашко, Котюков 2007б; Дашко и др., 2008].

Вопросами инженерно-геологического и гидрогеологического обеспечения эксплуатационной надежности подземных транспортных сооружений занимался ученик Р. Э. Дашко Котюков П.В. [Котюков, 2010]. В его исследовании изучены структурно-тектонические, инженерно-геологические, гидрогеологические и геоэкологические условия по трассам тоннелей Санкт-Петербурга и оценено их влияние на разрушение конструкционных материалов тоннельных обделок. Исходя из исследованных условий проведено зонирование трасс тоннелей и

разработаны рекомендации по обеспечению эксплуатационной надежности перегонных тоннелей.

Надежностью эксплуатации и технологии строительства тоннелей (на примере ж/д тоннелей трасс Абакан–Тайшет и Абакан–Междуреченск) занимался Кудрявцев А.В. [Кудрявцев, 2009]. В его работе рассмотрено влияние инженерно-геологических условий, горного давления, наличия напорных агрессивных вод, значительного и резкого перепада температур, промерзания бетона и окружающих пород на устойчивость тоннельного сооружения. Разработана методика определения параметров и оценки влияния морозобойных трещин на устойчивость и надежность тоннелей, определены оптимальные значения уровня надежности тоннелей в зависимости от их назначения, усовершенствована методика определения смещений окружающих пород от действия различных факторов (глубина их расположения, крепость, трещиноватость и степень обводненности пород, отставание крепи от забоя).

Исследованиями в области изучения инженерно-геологических условий тоннелей на Дальнем Востоке занимался Д.Ю. Малеев. Его работы посвящены комплексному изучению инженерно-геологических условий тоннелей Хинганского массива (Лагар–Аульский, Облученский, Казачинский, Тарманчуканский, Райчихинский тоннели) [Малеев, 1999]. Были исследованы особенности геологического строения и гидрогеологические условия тоннелей, определены физико-механические свойства горных пород и построены корреляционные зависимости. Впервые для трассы вышеперечисленных тоннелей были применены геофизические методы изысканий и сейсморазведка, позволяющие наиболее точно определить особенности геологического строения. Большое внимание уделено вопросам геодинамики, неотектоники и сеймики. Изучены закономерности развития неотектонических процессов, выполнено сейсмическое микрорайонирование, рассчитана оценка сейсмического риска и т.д.

При исследовании работ в области тоннелестроения нельзя не сказать о самом протяженном и уникальном тоннеле Российской Федерации – Северо-Муйском тоннеле. Строительство тоннеля велось в сложнейших инженерно-

геологических условиях, с пересечением большого количества разноранговых разломных зон, в суровом климате и при высокой сейсмичности участка строительства (9 баллов). При строительстве тоннеля были освоены в то время новейшие методы и оборудование (проходка механизированными тоннелепроходческими комплексами, использование механизированной опалубки сечением до 60 м³, применение сейсмо- и термостойкой двухслойной обделки тоннеля и др.). Разработаны и применены новые технологии (химическое закрепление неустойчивых грунтов в зонах тектонических разломов, автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУТП) при строительстве и др.). Строительство Северо-Муйского тоннеля послужило мощным толчком для исследований, по результатам которых опубликовано множество пособий, монографий, статей и др. Научный интерес представляют исследования ученых в области гидрогеологии [Шабынин, 2004; Верхозин, 2005], сеймики [Саньков и др., 1991; Семенов, 2005], неотектоники [Дзюба, Быкова, 2005], геофизики [Дмитриев, 2005] и т.д.

Существенный вклад в изучение Северо-Муйского тоннеля вложила Быкова Н.М. В многочисленных работах автора рассмотрены вопросы надежной и безопасной эксплуатации тоннеля [Быкова, 2004; Быкова, 2005; Быкова и др., 2007; Елисеев, Быкова и др., 2007], организации и методологии различного вида мониторинга состояния тоннеля [Залуцкий, Быкова, 2005; Елисеев, Быкова, 2005; Быкова, Дьяченко, 2006; Быкова, Зайнагабдинов, 2007; Быкова, 2008], измерению деформаций [Быкова и др., 2007], моделирования работы обделки [Быкова, Зайнагабдинов, 2007] и др.

Исследования Северо-Муйского тоннеля, построенного и эксплуатируемого в столь сложных инженерно-геологических условиях, имеют высокую ценность для мирового опыта проектирования, строительства и эксплуатации тоннелей.

Множество зарубежных исследований показывают актуальность и заинтересованность в инженерно-геологическом изучении тоннелей.

Одним из мировых лидеров объема строительства тоннелей является Япония. В настоящее время на ее территории эксплуатируются 3062 железнодорожных

тоннеля общей протяженностью 2450 км при общей длине железных дорог 20700 км, т.е. около 10 % общей длины железных дорог Японии составляют тоннели. [Лысиков, Каплюхин, 2005] Такое развитие отрасли связано со сложным рельефом, инженерно-геологическими условиями, высоким развитием транспортной инфраструктуры и нехваткой территории. В связи с этим, методика инженерно-геологических изысканий в этой стране является наукоемкой, проработанной и надежной, так как опирается на огромный опыт изысканий, строительства и эксплуатации тоннелей. Многочисленные университеты, научно-исследовательские институты, строительные, изыскательские и консалтинговые компании изучают проблемы планирования, проектирования, строительства и эксплуатации тоннелей в сложных природных условиях. В связи с этим выпускается большое количество научных работ по данной тематике.

Строительство тоннелей в Японии имеет свою специфику: высокая сейсмичность территории, часто слабые грунты и сложное геологическое строение, большие и малые глубины залегания трассы тоннелей, сложность применения стандартных методов изысканий и т.д. Большинство работ посвящены этим особенностям.

Известный факт, что Японские острова находятся в зоне повышенной сейсмической опасности. На территории Японии происходит множество землетрясений, в том числе и разрушительных (землетрясение Тохоку 2011), которые наносят повреждения тоннельным сооружениям. Исследованиям воздействия землетрясений на тоннельные конструкции посвящены многочисленные работы [Yashiro et al., 2007; Doi et al., 2007; Asakura et al., 2007; Tachibana et al., 2007; Kobayashi et al., 2009; Kusaka et al., 2010]. В работах данных авторов исследуются поведение тоннельных конструкций при землетрясениях [Asakura et al., 2007; Tachibana et al., 2007], моделируется поведение тоннелей при землетрясениях [Yashiro et al., 2007], применяются расчеты и анализ для прогноза устойчивости и возможных деформаций тоннелей [Doi et al., 2007; Asakura et al., 2007; Kobayashi et al., 2009].

Помимо сейсмологии Японские ученые сталкиваются с проблемой строительства и эксплуатации тоннелей в сложных геологических условиях. Многими авторами затрагиваются вопросы проходки тоннелей в слабых грунтах, часто ослабленных разломами, при которых происходят осадки и вывалы грунта [Matsumoto et al., 2009; Uryu et al., 2009]. Также изучаются и создаются новые методы мониторинга [Terashima et al., 2010], проходки [Yamada et al., 2007] и мероприятий по закреплению грунтов [Tokudome et al., 2007].

Сложно расчлененный рельеф, большие перепады высот в горных районах Японии существенно усложняют процесс инженерно-геологических изысканий. В некоторых случаях крайне сложно применение полевых работ, бурение скважин и т.д., поэтому большое развитие получили геофизические методы исследований. Одним из основных направлений развития является малоглубинная сейсморазведка, позволяющая прогнозировать инженерно-геологические условия при проходке тоннеля. Применению и развитию данного метода посвящено большое количество работ [Kazunori et al., 2005; Sasao et al., 2005; Niwa et al., 2007; Niwa et al., 2009; Murayama et al., 2010]. Интерес представляют исследования применения и развития аэрометодов геофизической разведки, позволяющие с высокой производительностью проводить инженерно-геологические изыскания [Okazaki et al., 2005, Sugimoto et al., 2010; Okazaki, 2011].

Большой интерес представляют работы тайваньских ученых, посвященные 12-километровому тоннелю Сюешань (Hsuehshan), связывающему столичный район Тайбея с Северо-Восточным уездом Илань.

Строительство тоннеля велось в сложных геологических и гидрогеологических условиях, которые значительно затруднили и замедлили строительство, длившееся 15 лет (1991–2006). При строительстве происходили многочисленные вывалы, прорывы грунтовых вод, оползни и т.д., в результате погибло двадцать пять рабочих. К моменту ввода в эксплуатацию Сюешань являлся самым протяженным тоннелем в Азии и 4-м по длине тоннелем в мире.

Материалы, полученные на всех этапах строительства тоннеля, получили развитие во многих работах авторов. В работах затронуты особенности планирования [Mou-Sheng Tsai et al., 2005; Deng-Hue Lee, 2005], проектирования и анализа [Jiann-Jyh Wang, 2005; Sheng-Chun Lee et al., 2005], инженерно-геологических изысканий [Ping-Cheng Hou et al., 2005; Chih-Shae Liu, 2005; Pen-Sheng Chang, Chi-Wen Yu, 2005; Dao-Tze Tsai et al., 2005], проходки [Lung-Chun Chang, Por-Shin Lee, 2005; Hiseh Yu-Shan, Shi Lee-Ping, 2005; Wei-Chaung Lee, 2005], мониторинга и эксплуатации тоннеля [Hsing-Lung Wei et al., 2005; Chao-Chih Chang, 2005] и др. Многочисленные труды ученых о проектировании, строительстве и эксплуатации тоннеля Сюешань внесли большой вклад в развитие тоннелестроения в Азии и в Мире.

Кроме того, интерес представляют работы турецких ученых в области инженерно-геологических исследований тоннеля Дорухан (Dorukhan) [Genis, Basarir et al., 2007], гидротехнического тоннеля Салакьюрт (Sulakyurt) [Basarir, 2006] и автодорожного тоннеля Орду (Ordu) [Sopaci, Akgun, 2008]. Изучению инженерно-геологических условий и причин деформации крепи гидротехнического тоннеля Лам Та Хонг, Тайланд (Lam Ta Khong, Thailand) посвящена работа японских и тайских ученых [Gurung, Iwao, 1997].

Проведенные исследования отражают актуальность изучения инженерно-геологических, геотехнических, гидрогеологических проблем в области тоннелестроения. Проходка горных выработок дает возможность получить точные и достоверные данные о строении и особенностях массива. Изучение инженерно-геологических особенностей и безопасности эксплуатации уникального на Дальнем Востоке сооружения – Кузнецовского тоннеля является важной задачей, позволяющей применить современные методы исследований на отечественном тоннеле.

01.3. История геологической и инженерно-геологической изученности района

Геологические исследования в Северном Сихотэ-Алине начались со второй половины XIX века Ивановым (1898) и Эдельштейном (1897–1898).

Впервые стратиграфическая схема района, мало отличающаяся от современных представлений, была разработана П.С. Вернштейном (1934), которая была уточнена рядом последующих работ А. А. Кириллов (1941); М.Г. Золотов (1948); П.А. Эпов (1949–1950).

В 1934 году были начаты инженерно-геологические исследования масштаба 1:100000 для строительства железной дороги. Наибольший интерес по этим работам представляют результаты бурения и гидрогеологические наблюдения в аллювиальных отложениях.

В 1950 годах на территории листа М-54-XIV была проведена государственная геологическая съемка масштаба 1:200000. Дальнейшая разработка стратиграфической схемы выполнялась В.Н. Плиевым (1956–1955), Ю.М. Вдовиным (1955–1956), Г.М. Левитаном (1959–1960).

В 1969–1972 годах Б.В. Шевченко и другими учеными проведены геолого-съемочные и поисковые работы масштаба 1:50000 в бассейнах верхних течений рек Мули, Уини, Шумной.

Изучение гидрогеологических условий было начато в 1932 году, вдоль проектируемой трассы железной дороги Комсомольск – Советская Гавань. В.А. Булатовым, Г.П. Воларовичем и Г.Д. Аллером были проведены рекогносцировочные маршруты.

В 1934–1936 годах по трассе Лентранспроектom проводились рекогносцировочные инженерно-геологические исследования масштаба 1:100000 и 1:200000, которые сопровождались неглубоким ручным бурением, шурфованием и гидрогеологическими наблюдениями, связанными со водоснабжением будущих станций. В отчетных материалах содержатся сведения о типах подземных вод и водоносных горизонтах, встречающихся вдоль трассы (поровые и пластово-поровые воды аллювиально-делювиальных и элювиально-

делювиальных отложений, трещинные воды скальных пород), а также данные о глубине залегания, условиях питания и разгрузки, режиме, водообильности, температуры и химизме воды.

Тщательные исследования поверхностных вод позволили составить представление о модулях подземного стока на различных породах. Большое внимание было уделено изучению многолетней мерзлоты.

На основе этих работ в 1939–1940 годах по трассе Комсомольск – Совгавань работала Тумнинская экспедиция БАМпроекта ГУЖЦС НКВД. Работы были проведены в полосе шириной 10 км и сопровождались шурфованием, бурением неглубоких скважин и т.д. Были составлены геологическая карта масштаба 1:200000, инженерно-геологическая карта масштаба 1:100000, инженерно-геологический профиль трассы масштаба (горизонтальный) 1:10000, (вертикальный) 1:200, поперечные профили и краткий геоморфологический отчет.

В 1944 году И.В. Райхлиным была проведена гидрогеологическая съёмка, в результате чего была построена сводная гидрогеологическая карта листа М-54 масштаба 1:1000000. Для северной части Сихотэ-Алиня Д.Я. Стерлиным в 1959 году было дано описание типов подземных вод, характеристика существующего водоснабжения и, кроме того, произведено районирование площади.

В 1955–1956 годах по листам М-54-XIV, XV были проведены комплексные геологические и гидрогеологические исследования, в результате чего были составлены карты масштаба 1:200000 [Вдовин, 1956].

В 1962–1964 годах была проведена гидрогеологическая съёмка масштаба 1:500000. В результате этих работ выделены по всей площади северной части Сихотэ-Алиня 10 водоносных комплексов.

Наблюдения за поверхностным стоком ведутся ГМС, которой на реке Мули в поселке Высокогорном был организован гидропост, и с 1974 года выполняются измерения расхода и уровня воды.

В районе проводились аэромагнитные съёмки масштабов 1:1000000, 1:200000 и 1:50000 и гравиметрическая съёмка масштаба 1:1000000.

В 1986 году Рогозиной Л. В. были выполнены поиски подземных источников водоснабжения ст. Высокогорная Дальневосточной железной дороги. Результаты наземных геофизических работ в этом отчете представлены в виде геоэлектрических разрезов, графиков электропрофилеирования и ΔZ , типичных и параметрических кривых ВЭЗ.

Современный этап изучения инженерно-геологических условий района Кузнецовского перевала начался с момента начала проведения инженерно-геологических изысканий для реконструкции Кузнецовского тоннеля.

Первая стадия изысканий была проведена ОАО «Сибгипротранс» в 2004 году. Работниками было проведено комплексное изучение инженерно-геологических условий трассы Кузнецовского тоннеля. В результате получены предварительные данные о геологическом строении, особенностях и физико-механических свойствах грунтов, гидрогеологических условиях и др.

В дальнейшем, в 2005 году были проведены инженерно-геологические и геофизические изыскания подходов к тоннелю ОАО «Дальгипротранс». Комплекс работ включал бурение 220 скважин общей мощностью 2840 п.м., проходку 139 шурфов, вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ), мало-глубинную сейморазведку (МПВ), радиометрические наблюдения. В процессе бурения и проходки шурфов отбирались пробы грунтов нарушенной структуры и монолиты грунтов, а также образцы скальных пород для определения необходимых характеристик физико-механических свойств грунтов, слагающих обследованные участки. Отбирались пробы грунтовой и речной воды для определения агрессивности по отношению к бетону и стали.

В результате инженерно-геологических изысканий были уточнены условия залегания, состав и физико-механические свойства грунтов основания земляного полотна, составлены уточнённый совмещенный продольный профиль и поперечные профили по подходам к восточному и западному порталам.

Научно-исследовательские работы по дополнительной оценке сложности геологических и инженерно-геологических условий тоннельного перехода с выдачей рекомендаций по оптимальным видам и объемам исследований,

рациональным конструкциям земляного полотна производили ученые Дальневосточного государственного университета путей сообщения и крупные специалисты геологического профиля из академических институтов г. Хабаровска.

В 2008 году ОАО «Экотехпроект» произвело инженерно-геологические и инженерно-сейсморазведочные работы с целью комплексного доизучения инженерно-геологических условий строительства Кузнецовского тоннеля. В работе участвовали ученые ДВГИ ДВО РАН, ИГМ СО РАН и АСФ ГС СО РАН под руководством О.Г. Порфирьева и А.Г. Владимирова. Результатом изысканий являются новые данные о геологическом строении, генезисе, условиях залегания и состояния горных пород. Были выявлены и определены границы основных инженерно-геологических элементов. Следует отметить, что на момент проведения изыскательских работ не было произведено бурение скважин по оси тоннеля. Это существенно снизило точность и достоверность инженерно-геологических и инженерно-сейсморазведочных изысканий.

В 2009 году Комсомольской геологоразведочной экспедицией было проведено бурение 7 скважин по оси тоннеля. Также была пройдена транспортно-дренажная штольня. В результате было получено большое количество материала о геологическом строении, генезисе, структурных особенностях массива и т.д. Автором была поставлена задача уточнить, охарактеризовать и проанализировать геологическое строение, структурные особенности, физико-механические свойства и другие характеристики, с использованием новых данных. Это поможет получить наиболее точные и достоверные результаты, характеризующие горный массив.

1.4. Общие сведения о технологии возведения тоннеля и штольни

В настоящее время технологии возведения тоннелей позволяют совершать проходку тоннеля в очень сложных геологических и гидрогеологических условиях, создавать сооружения большой протяженности и поперечного сечения при высокой скорости проходки. Мировой рекорд скорости проходки –

1250 м тоннеля в месяц – поставлен серийным щитом КТ-1-5,6 на участке строительства перегонного тоннеля в Ленинграде на участке от «Пионерской» до «Удельной» в 1981 году [<http://petersburg-history.narod.ru/p678.htm>].

Возведение Кузнецовского тоннеля и транспортно-дренажной штольни производится щитовым способом с использованием роторных тоннельно-проходческих комплексов (ТПК) фирмы Lovat. Для штольни – RMP170SE диаметром 4,3 м, для тоннеля – RME375SE диаметром 9,5 м. Схема проходки тоннеля щитовым способом показана на рис. 1.

Для монтажа и перемещения комплекса до пикета врезки устраивается железобетонное ложе с устройством пути. Монтаж щитового комплекса производится с использованием порталного крана грузоподъемностью 200 т.

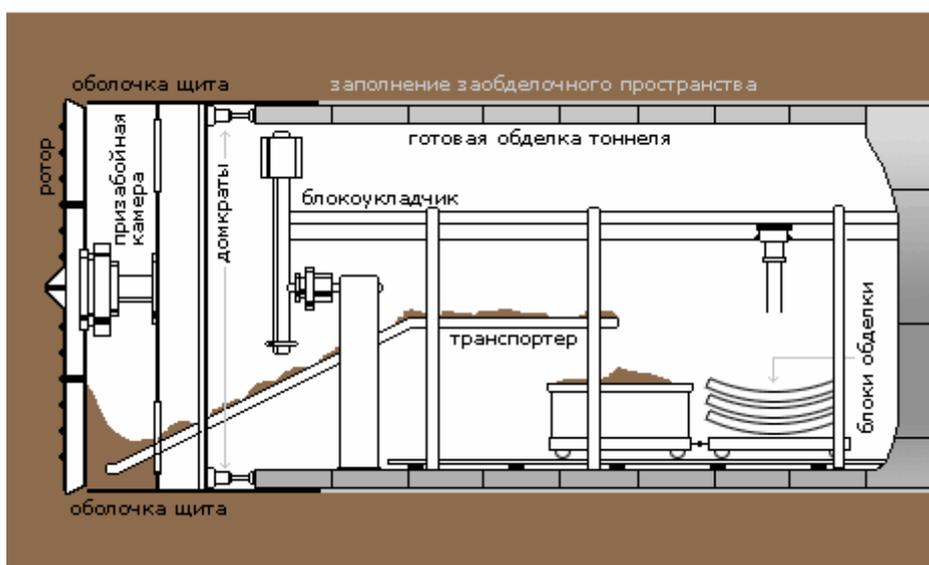


Рис. 1. Схема проходки тоннеля с использованием ТПК [nashemetro.ru/s_tbm.shtml].

Перед началом горнопроходческих работ как по тоннелю, так и по штольне на Восточном портале (параллельно с разработкой выемки) производится укрепление лобового откоса металлическими балками с креплением железобетонными анкерами и укладкой бетона.

До врезки в горный массив предусмотрено предварительное закрепление свода над тоннелем и штольней металлическими трубами, устанавливаемыми в скважины с прокачкой их цементным раствором. Работы по сооружению

опережающего крепления предусматривается выполнять с применением бурового станка БАМ-2 и насосов НБЗ-120/40.

Для старта ТПК монтируется упор. По мере врезки ТПК в массив (заходками по 1,5 м) при помощи блокоукладчика монтируются кольца постоянной обделки. Проходка первых 100 м выполняется с минимальным давлением на забой. Далее нагрузка постепенно увеличивается с доведением ее до расчетной.

Для каждого местоположения ТПК, в результате выполненных специальных изысканий, заранее определены расчетные параметры ведения (давление щитовых домкратов, скорость вращения режущего органа, давление в рабочей зоне). Указанные параметры автоматически поддерживаются с помощью бортового компьютера, и, как правило, соответствуют необходимым. Все параметры постоянно выводятся на дисплей оператора, который в случае возникновения нештатной ситуации может вмешаться в процесс проходки.

Проходка ведется заходами, равными длине одного кольца обделки (1500 мм для тоннеля и 1200 мм для штольни). Кольцо железобетонной обделки состоит из шести нормальных элементов и одного замкового для тоннеля и из пяти нормальных элементов и одного замкового для штольни.

Доставляются железобетонные блоки для монтажа на специальных блоковозках. Блоковозки с обделкой подаются под перегружатель, оснащенный вакуумным захватом, установленным в средней части технологического моста ТПК. С помощью перегружателя блоки, по одному поднимаются на верхнюю часть технологического моста, где укладываются в определенной последовательности на рольганг, по которому перемещаются к блокоукладчику. Монтаж обделки производится после передвижки ТПК на длину 1500 (1200) мм. Перед началом монтажа определяется фактическое положение щита ТПК и последнего установленного кольца, которое сравнивается с расчетными данными. По результату сравнения определяется погрешность ведения ТПК и схема установки очередного кольца.

К моменту завершения проходки, на противоположном портале завершаются работы по сооружению припортальной выемки и портальной стены с отверстием,

равным внешнему диаметру щита плюс вероятностная ошибка его ведения. Отверстие бетонируется неармированным бетоном. При подходе щита к portalу уменьшается нагрузка на щитовые домкраты, ТПК ведется с минимальной подачей до контакта с бетонной стеной. Производится разрушение стены режущим органом, щит выводится в приportalную выемку, где он демонтируется.

С отставанием от сооружения тоннеля не менее 200 м сооружаются рамы проемов под будущую камеру или нишу. Через 300 м по длине тоннеля устраиваются эвакуационные сбойки. На период производства работ сбойки используются как вентиляционные, транспортные и эвакуационные.

Проходка сбоек ведётся из тоннеля. Перед началом работ устанавливаются железобетонные анкера из штольни ($L=2,5\text{м}$) и тоннеля ($L=3,5\text{м}$) для крепления железобетонных блоков обделки штольни и тоннеля. Анкера крепятся опорными плитами $150\times 150\times 10$ мм.

После окончания работ по проходке тоннеля производятся работы по установке сборных конструкций водоотводных лотков. Лотки монтируются при помощи технологических тележек, оборудованных подъемными приспособлениями. Затем производится устройство верхнего строения пути. После окончания этих работ выполняются работы по монтажу электрических и сантехнических сетей, оборудование обогрева лотков, устройств СЦБ, противопожарной защиты и т.д.

ГЛАВА 2. ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ РАЙОНА КУЗНЕЦОВСКОГО ТОННЕЛЯ

Район Кузнецовского тоннеля находится на участке, ограниченном по широте от $N50^{\circ}09.00'$ до $N50^{\circ}11.00'$ и по долготе от $E139^{\circ}05.25'$ до $E139^{\circ}02.50'$, и располагается на участке Комсомольск-На-Амуре – Советская Гавань Дальневосточной железной дороги. В административном положении участок Кузнецовского тоннеля расположен в Ванинском районе Хабаровского края. Его восточный портал находится в 6 км юго-западнее от пос. Высокогорный в бассейне р. Мули (приток р. Тумнин), где размещена узловая железнодорожная станция. Западный портал расположен в верховьях р. В.Удоми.

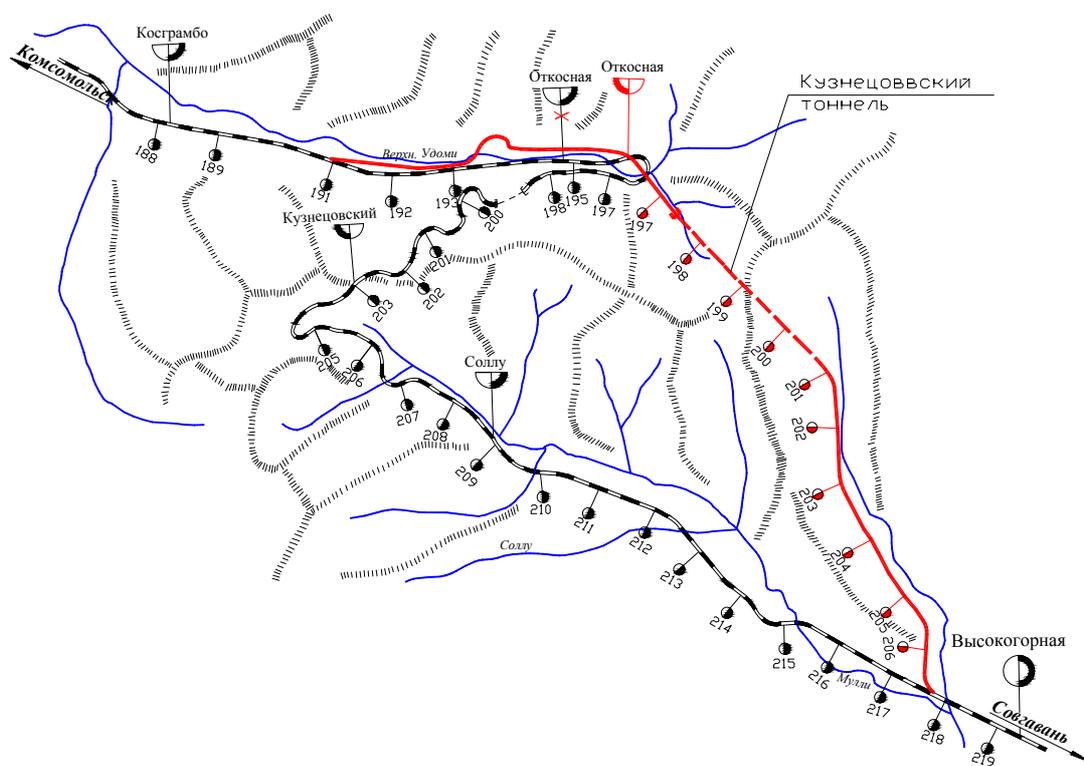


Рис. 2. Схема участка Кузнецовского тоннеля.

2.1. Климатические условия

Близость Тихого океана обуславливает муссонный характер климата района. Большое влияние на климат оказывает горный характер рельефа. Лето непродолжительное, прохладное, со средней температурой $+20^{\circ}C$. Самый теплый месяц – июль. Летние муссоны приносят с океана много дождей. Нередко бывают

продолжительные дожди, грозовые ливни с градом, а в горах – туманы и морось. Наибольшее количество осадков выпадает в июле или августе (до 160 мм).

С наступлением осени (сентябрь) в отдельные годы устанавливается ясная, сухая погода. По ночам отмечаются заморозки, а во второй половине сентября выпадает первый снег, который быстро тает, сохраняясь только на гольцах. Со второй половины октября наступает значительное похолодание, дуют сильные ветра и устанавливается постоянный снежный покров. Зима холодная и суровая. Самая низкая температура января – минус 27 °С. Со времени образования устойчивого снежного покрова высота его постепенно увеличивается и наибольшей величины достигает в феврале-марте. Средняя высота среднего покрова достигает 58 см; в малоснежные зимы 35–39 см; а в многоснежные она может быть 98–115 см. Весна обычно поздняя, снежный покров сходит в мае, на гольцах и вершинах ручьев сохраняется до конца июня.

Таблица 1

Среднемесячная температура воздуха, (°С)

Метеостанция	Янв.	Февр.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.	Декаб.	Средне годовая
Высокогорная (1971)	-23.5	-24.0	-7.5	-1.0	9.0	13	17.5	16.5	12.5	-1.0	-8.5	-19.5	-1.4
Высокогорная (1972)	-26.5	-19.5	-7.5	-7.0	9.0	12	20.5	14.5	11.0	2.2	-12.0	-18.5	-1.7

Среднегодовая температура в районе отрицательная (табл. 1), вследствие чего возможно образование многолетней мерзлоты на северных затененных склонах.

Годовое количество осадков составляет 500–700 мм (табл. 2). Самым засушливым отмечен 1983 год, когда годовая сумма осадков составила 517 мм.

В течение всего года имеет место дефицит влажности, достигающий максимума 5,49 мб в августе, минимальный приходится на декабрь-январь и равен 0,07. Среднемесячная относительная влажность изменяется от 70 до 87 %, среднегодовая равна 78 %.

Наибольшая глубина промерзания почвы составляет 200-230 см и наблюдается в марте. Распространение многолетней и остаточной сезонной мерзлоты носит островной характер.

Таблица 2

Среднемесячное и среднегодовое количество осадков, (мм)

Метеостанция	Янв.	Февраль	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.	Дек.	Хол. пер-д	Гепл. пер-д	Ср. год.
Высокогорная (1971)	2.0	11.0	7.5	25.0	40.0	75.0	105.0	110.0	60.5	20.0	16.5	20.0	77.0	315.0	392.0
Высокогорная (1972)	7.5	16.0	7.5	35.5	30.0	37.5	50.0	110.0	135.0	45.0	12.5	15.0	103.0	448.0	551.0

2.2. Геолого-геоморфологические условия территории

2.2.1 Геоморфологические условия участка

Основным морфологическим элементом района является хребет Сихотэ-Алинь, выполняющий роль водораздела между бассейнами р.Амур и Тихого океана (р.Тумнин).

Горный рельеф местности, с большими перепадами высот и крутыми склонами поверхностей, обусловил формирование рельефа главным образом экзогенными процессами. Наряду с ними немаловажную роль сыграли и эндогенные процессы. Существенное влияние на формирование рельефа оказали литологический состав и крепость пород.

На участке заложения тоннеля выделены следующие типы поверхностей: поверхности, созданные препарацией эффузивных тел и покровов; поверхности эффузивных тел и покровов, созданные совместно эндогенными и экзогенными процессами; крутосклонные денудационно-эрозионные поверхности терригенных и седиментационных образований; денудационно-эрозионные поверхности терригенных образований средней крутизны [Порфирьев и др., 2004].

Поверхности, созданные препарацией эффузивных тел и покровов, приурочены к западному склону седловины перевала.

Вследствие высокой крепости пород, данные поверхности характеризуются резкой расчленённостью, крутыми (25° – 45° , иногда до 55°) склонами. Профиль склонов прямой или слабовогнутый, реже слабовыпуклый. Форма долин распадков и логов V-образная, с симметричными противоположными склонами. Гребневые линии острые, частично обнажены. Только в районе западного портала гребень над осью тоннеля имеет относительно плавный перегиб. Крутизна склонов, как правило, увеличивается к подошвам, выполаживаясь к гребням. Обнажения пород отмечаются в основном на гребнях, имеют небольшую площадь и практически не выступают над поверхностью.

В верхних частях склонов местами отмечены осыпи мелкоглыбового материала. В таких местах отмечены рудименты нагорных террас в виде слабо террасированных поверхностей площадью 20–30 м². Задернованность слабая неполная. Границы с поверхностями другого генезиса плавные.

Поверхности эффузивных тел и покровов, созданных совместно эндогенными и экзогенными процессами, расположены в пределах распространения эффузивных тел и покровов там, где уклоны не превышают 20° – на главной седловине перевала. Поверхность в таких местах выпуклая, с уклоном от 0° до 20° . Гребни округлые, с невысокими куполообразными вершинами. Данные поверхности имеют ограниченное распространение вдоль верхних частей седловин. Обнажённость пород практически отсутствует. Мощность дернины небольшая (5–10 см), покрытие полное. Границы с поверхностями других генезисов располагаются по перегибам склонов.

Крутосклонные эрозионно-денудационные поверхности терригенных и седиментационных образований сформированы на терригенных отложениях пиванской и осадочных отложениях удоминской свит. Основными процессами, формировавшими эти поверхности, явились эрозия, плоскостной смыл и гравитационный снос. Профили склонов прямолинейные и выпуклые имеют крутизну 25° – 35° (редко до 45°). Гребни выпуклые, тупые, сглаженные. Формы долин распадков и логов V и П-образные, нередко асимметричные. Поверхность

слабо задернована, дернина маломощная, в верхних частях гребней местами отсутствует.

Денудационно-эрозионные поверхности средней крутизны выделены из состава поверхностей предыдущего элемента, в местах с менее пологими наклонами склонов. Профили склонов здесь выпуклые, гребни сглаженные, широкие, округлые. Поверхности эти залесены и хорошо задернованы. Границы с другими поверхностями плавные и располагаются по перегибам поверхности.

2.2.2. Геологическое строение района тоннельного перехода

На рассматриваемой территории стратифицированные образования занимают большую часть территории и представлены терригенными образованиями нижнего и верхнего мела, верхнемеловыми эффузивами и четвертичными рыхлыми отложениями.

Значительно развиты интрузивные породы, представленные разномасштабными массивами и многочисленными дайками разнообразного состава, преимущественно кислого (диориты, гранодиориты, граниты), реже телами основных (габбро) и ультраосновных (перидотиты, пикриты и др.) пород. Геологическая карта представлена на рис. 3.

Пионерская свита. Отложения, отнесенные к пионерской свите, распространены в виде тектонического блока в южной части района по бортам р. Мули и в приустьевой части р. Мулинка. Свита подразделяется на две согласно залегающие толщи: толщу массивных алевролитов и толщу слоистых алевролитов.

Толща массивных алевролитов (K₁ рп') распространена на правобережье р. Мули. Выделенная пачка мощностью 175 м состоит из алевролитов черных массивных с единичными прослоями тонкозернистых и мелкозернистых песчаников мощностью 5–10 см. Общая мощность толщи оценивается в 700 м.

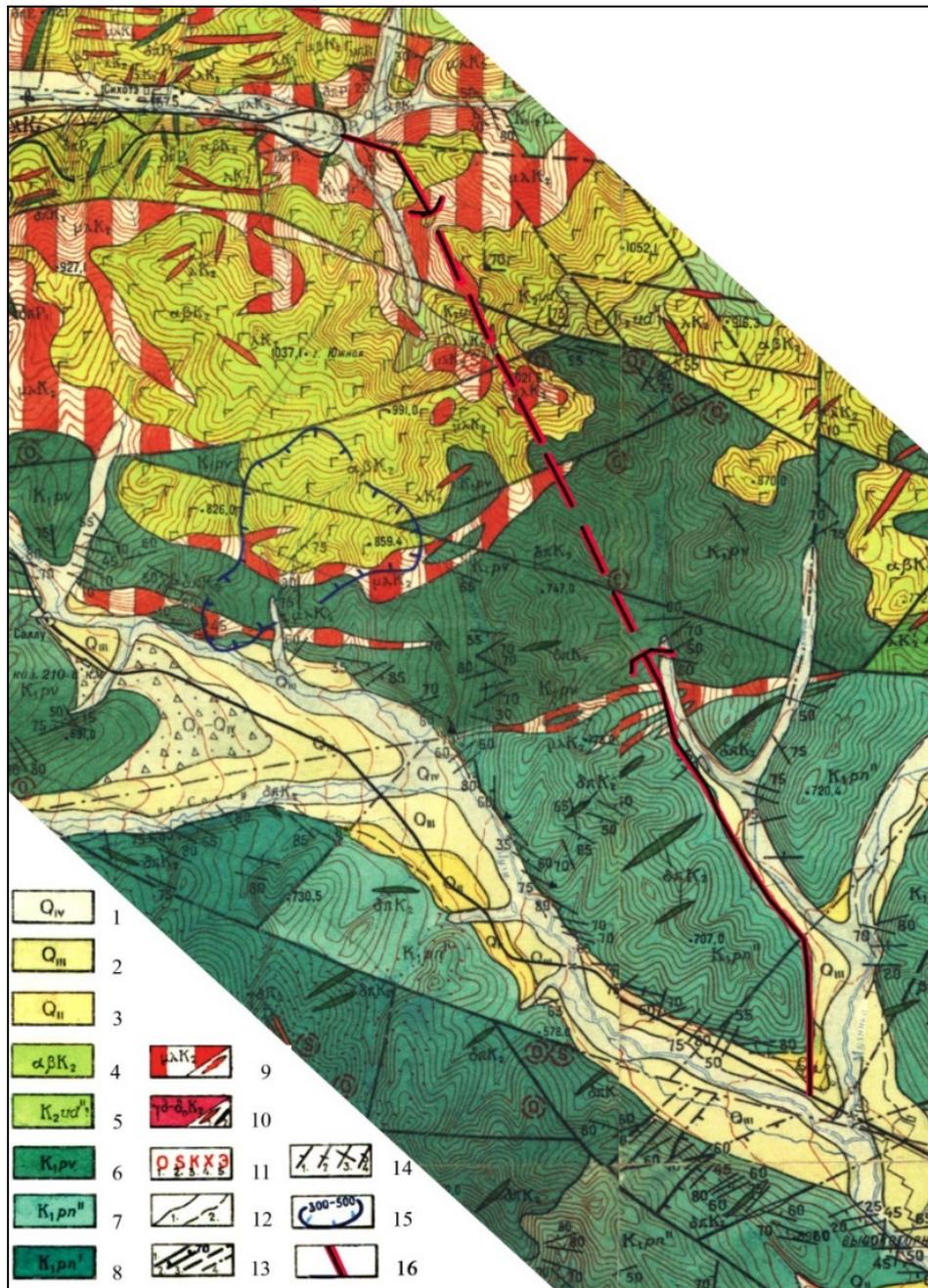


Рис. 3. Геологическая карта Масштаб 1:50 000 [Вдовин, 1961].

1 – современные отложения: галечники с валунами, гравий, пески, глины, щебень; 2 – верхнечетвертичные отложения: гравий, галечники с валунами, пески, суглинки, глины; 3 – среднечетвертичные отложения: галечники с валунами, гравий, суглинки, глины; 4 – толща андезитов-базальтов; 5 – удоминская свита: толща слоистых песчаников и алевролитов, песчаники мелкозернистые слоистые с прослоями слоистых алевролитов, пачки слоистых алевролитов с прослоями слоистых песчаников, пачки ритмичного переслаивания слоистых песчаников и алевролитов, пласты массивных песчаников и алевролитов, редко аргиллитов, линзы седментационных брекчий, гравелитов, мелкогалечных конгломератов; 6 – пиванская свита: толща ритмичного переслаивания слоистых алевролитов и песчаников, редкие пласты алевролитов и песчаников; 7-8 – пионерская свита: 7 – толща алевролитов слоистых с пачками ритмичного переслаивания алевролитов и песчаников; 8 – толща алевролитов массивных с редкими прослоями песчаников; 9 – субвулканические липариты и игнимбриты липаритов, дайки липаритов (λK_2); 10 – гранодиориты, кварцевые диориты. Дайки: 1 – гранодиоритов ($\gamma\delta K_2$); 2 – диоритовых порфиринов, кварцсодержащих диоритовых порфиринов, керсантитов, спессартинов ($\delta\lambda K_2$); 11 – 1 – окварцевание, 2 – сульфидизация, 3 – карбонатизация, 4 – хлоритизация, 5 – эпидотизация; 12 – границы между разновозрастными образованиями: 1 – достоверные, 2 – предполагаемые; 13 – тектонические контакты: 1 – достоверные крутопадающие, 2 – достоверные с указанием направления и угла падения плоскости сместителя, 3 – предполагаемые, 4 – перекрытые рыхлыми отложениями; 14 – элементы залегания слоев: 1 – наклонные, 2 – вертикальные, 3 – горизонтальные, 4 – опрокинутые; 15 – граница кровли интрузива диоритов с указанием глубины ее залегания от поверхности по данным аэромагнитной съемки; 16 – линия проектируемого тоннельного перехода.

Толща слоистых алевролитов (K₁ рп'') обнажается в приустьевой части р. Мулинка, её водоразделе с р. Мули. Отличительными особенностями верхней толщи в сравнении с нижележащей являются преобладание в её разрезе алевролитов со слоистой текстурой и значительное количество песчаников в большинстве своем также слоистых. Разрез толщи можно подразделить на три части. Нижняя часть сложена слоистыми алевролитами с редкими маломощными (до 20 см) прослоями мелкозернистых песчаников, единичными прослоями тонкозернистых слоистых песчаников мощностью до 10 м и пачками ритмичного переслаивания массивных и слоистых алевролитов с мелкозернистыми песчаниками. Мощность этой части составляют 250 метров. Средняя часть толщи состоит из глинистых сланцев и алевролитов с редкими маломощными (до 5 см) прослоями тонкозернистых песчаников. По простиранию состав толщи не меняется, заметно отмечается лишь выклинивание к северо-востоку пластов песчаников. Мощность толщи составляет 750–850 м.

Породы **Пиванской свиты (K₁ рv)** широко развиты к западу в районе Кузнецовского перевала и обнажаются в истоках р. Мули и её водоразделе с р. Мулинка. Свита характеризуется ритмично переслаивающимися тонкослоистыми алевролитами и слоистыми песчаниками с отдельными пластами массивных алевролитов и разнозернистых полимиктовых песчаников. С юга породы свиты отделены разрывным нарушением от пионерской свиты, а на севере площади перекрыты верхнемеловыми эффузивами. Общая мощность свиты около 870 м.

Мощность слоистых флишевых пачек десятки до сотен метров. Флишевые пачки чередуются в разрезе с пластами однородных песчаников и алевролитов мощностью от первых метров до нескольких десятков метров. Песчаники, слагающие такие пласты, имеют среднезернистое сложение и серую окраску.

Удоминская свита (K₂ud). В регионе она по литологическим признакам разделяется на две согласно залегающие толщи: конгломератовую и песчано-алевролитовую. На рассматриваемой территории закартирована только верхняя из них.

Толща слоистых песчаников и алевролитов ($K_2 ud''$). Распространена в северо-западной части площади, в истоках левого составляющего р. Верхняя Удоми – руч. Южный.

Более полное представление о строении толщи получено при изучении её разрезов с помощью канав к востоку от характеризуемой площади. Здесь установлено согласное залегание песчаников и алевролитов на подстилающих конгломератах.

Выше по разрезу отмечается чередование пачек переслаивающихся слоистых алевролитов и слоистых песчаников с пачками алевролитов и аргиллитов. Мощности пачек колеблются от 5 до 70 м, чаще составляют 30-50 м. Строение пачек переслаивания характеризуется частым чередованием прослоев песчаников мощностью от 5 до 40 см, и алевролитов, редко аргиллитов мощностью от 5 до 10 см. Отмечаются также редкие пачки флишоидного переслаивания алевролитов и песчаников. Здесь мощность компонентов составляет 5–15 см. Общая мощность толщи достигает 1300 м.

Толща андезито-базальтов ($\alpha\beta K_2$) распространена на водоразделе рек Верхняя Удоми и Мули. Общая площадь распространения её около 25 км². Толща несогласно залегает на дислоцированных терригенных образованиях мелового возраста. В строении толщи участвуют в основном андези-базальты и в незначительной мере – туфоконгломераты и лавобрекчии, залегающие в низах разреза. Низы разреза толщи изучались по коренным обнажениям вдоль железной дороги от ст. Сихотэ до ст. Кузнецовский, а также по разрозненным коренным выходам вдоль правого борта р. Верхняя Удоми. Обобщенный схематизированный разрез характеризуют следующие породы:

1. Андези-базальты темно-серые с зеленоватым оттенком с редкими слоями и линзами тех же пород с коричневатым оттенком. Контакты слоев извилистые четкие – 90 м.

2. Андези-базальты пестроцветные - чередование зеленовато-серых и коричневых разновидностей. Контакты между ними расплывчатые, форма образуемых тел причудливая – 10 м.

3. Андези-базальты темно-серые миндалекаменные (миндалины составляют до 50 % породы) – 10 м.

4. Лавобрекчии андези-базальтов – 15 м.

5. Андези-базальты темно-серые массивные – 40

6. Лавобрекчии андези-базальтов – 25

7. Андези-базальты темно-зеленые миндалекаменные – 110

Всего 300 м

Верхние горизонты толщи, изученные маршрутными наблюдениями по делювиальным свалам и редким коренным выходам в водораздельной части рек Мули и Верхняя Удоми, сложены андезибазальтами массивными и миндалекаменными зеленовато-серой и сиреневатой окраски.

Общая мощность толщи около 500 м.

Интрузивные породы в пределах описываемой территории распространены незначительно. Представлены разнообразными дайками и телами субвулканических риолитов позднемелового возраста.

Дайки гранодиоритов ($\gamma\delta$ K_2) выявлены на правом берегу р. Мули. Протяженность даек 0,5–1 км, мощность не более 50 м. Простираются С-З. Они прорывают и контактово метаморфизуют отложения пионерской свиты. Породы характеризуются среднезернистой гипидиоморфнозернистой структурой. Состоят они из плагиоклаза (45–50 %), калишпата (до 5 %), кварца (20–25 %), роговой обманки (до 15 %) и единичных зерен биотита.

Дайки диоритовых порфиритов, кварцсодержащих диоритовых порфиритов, керсантитов, спессартитов ($\delta\lambda$ K_2). Многочисленные дайки среднего состава установлены среди осадочных пород на водораздельном пространстве р. Мули–Мулинка и на правом берегу р. Мули. Простираются даек подчинено направлению преимущественно северо-восточных разрывов; редко они контролируются разломами и трещинами субмеридионального, северо-западного направления. Длина даек (по наблюдениям в делювии) колеблется от первых сотен метров до 1 км, редко до 1,5–2 км, мощность до нескольких

десятков метров. В немногочисленных коренных выходах фиксируется крутое (60-90°) их залегание.

Наиболее распространенными породами даек среднего состава являются диоритовые порфириты и кварцсодержащие диоритовые порфириты и керсантиты, редко встречаются спессартиты.

Диоритовые порфириты представляют собой серые, зеленовато-серые мелкозернистые породы с порфировой структурой. Состоят из плагиоклаза (60–75 %) хлоритизированного пироксена (15–25 %), биотита (до 5 %), кварца (1–3 %) и редко калишпата (до 3 %).

Кварцсодержащие диоритовые порфириты отличаются от диоритовых порфиритов повышенным содержанием кварца до 5–10 %.

Субвулканические риолиты и игнимбриты риолитов ($\mu\lambda K_2$).
Дайки риолитов (λK_2). Субвулканические риолиты и игнимбриты риолитов распространены на водоразделе рек Верхняя Удоми, Мули и Мулинка, где пространственно тесно ассоциируют с покровом андези-базальтов верхнемелового возраста. Форма интрузий в плане самая различная – от небольших изометричных штокообразных тел, до значительных по протяженности, с причудливым очертаниями границ, жиллообразно ветвящихся, часто дугообразных тел. Контролируются они разрывными нарушениями субширотного направления. Штокообразные тела изометричной формы, площадью выхода около 0,2–0,3 км² установлены на водоразделе левого притока р. Верхняя Удоми руч. Южный и правого притока р. Мулинка руч. Заросший, непосредственно в зоне проектируемого объекта.

Субвулканические интрузии риолитов и игнимбритов риолитов прорывают весь комплекс терригенно-осадочных отложений и покровы андези-базальтов.

Риолиты – это светло-серые породы с кремовыми, буроватыми и зеленоватыми оттенками, массивные, реже с флюидалной текстурой. Структура их порфировая с фельзитовой, сферолитовой или псевдосферолитовой основной массой.

Игнимбриты риолитов – это породы светло-серого, буровато-серого и сиреневатого цвета, представляющие собой стекловатую массу, в различной степени раскристаллизованную, содержащую лито- и кристаллокласты. Структура пород порфирокластическая с микрофельзитовой, сферолитовой, участками аксиолитовой, пепловой, реликтовой пепловой структурами основной массы. Текстура пород массивная, псевдофлюидальная. Обломки лито- и кристаллокластов занимают до 40 % объема пород.

Длина даек первые сотни метров, иногда 1–1,5 км при мощности от 0,5 м, чаще 2–7 м до 100–150 м (по наблюдениям в делювии). В редких коренных выходах фиксируется крутое (60° – 90°) падение даек.

Дайки риолитов прорывают верхнемеловые осадочные и эффузивные образования и возраст их принимается позднемеловым.

Рыхлые образования четвертичного возраста представлены аллювием надпойменных террас и пойм современных водотоков, делювиально-пролювиальными отложениями предгорных шлейфов, делювиальными отложениями и элювиальными образованиями водоразделов.

К **среднечетвертичным (Q_{II})** отложениям отнесены отложения второй надпойменной террасы в долине р. Мули и в приустьевой части р. Мулинка. В долине р. Мули скважинами вскрыт однообразный разрез среднечетвертичных отложений, представленный плохо сортированными средними и крупными галечниками с редкими валунами, песчано-глинистым заполняющим материалом и невыдержанными прослоями и линзами мелкого галечника. Максимальная мощность отложений в долине р. Мули достигает 11 м.

К **верхнечетвертичным (Q_{III})** отнесены аллювиальные отложения первой надпойменной террасы высотой 2–5 м, широко развитой в долине р. Мули и её притока р. Мулинка.

Отложения первой надпойменной террасы в верховьях р. Мули отличаются плохой сортированностью и однообразным составом. Так, буровыми скважинами, пройденными через долину р. Мули выше устья р. Соллу, вскрыт следующий разрез:

1. Почвенно-растительный слой – 0,2 м.
2. Галечник средний с песчано-глинистым заполнителем – 3,8 м.
3. Галечник мелкий с песчано-глинистым заполнителем – 1,0 м.

Всего – 5,0 м

Ниже устья руч. Соллу в разрезе преобладают крупные галечники и валунники.

Мощность верхнечетвертичных отложений достигает 5–7 м в верховьях р. Мули и 4–5 м по руч. Соллу.

В районе широко развиты **современные русловые и пойменные отложения водотоков (Q_{IV})**, а также элювиальные и делювиальные образования.

Русловой аллювий рек и крупных ручьев района представлен галечниками, валунниками, гравием и, в меньшей мере, песком. В мелких водотоках русловые отложения сложены слабо окатанным крупнообломочным материалом с незначительной примесью гальки и гравия.

Пойменные отложения с поверхности на глубину до 0,5–1 м представлены илистыми и илисто-глинистыми образованиями с незначительной примесью песка, гравия, гальки и редкими валунами. Подстилаются эти отложения галечниками. Мощность современного аллювия в бассейне реки Мули по данным бурения достигает 5 м.

Элювиальные образования и делювиальные отложения покрывают почти сплошным чехлом склоны гор и водораздельные пространства описываемой территории. На участках развития алевролитов и песчаников они представлены, в основном, щебнем с примесью супесчаного или суглинистого материала. На изверженных породах развиты крупноглыбовые осыпи с незначительной примесью щебня и более мелких обломочных фракций.

Мощность делювия, по данным горных работ, колеблется от 0,8–2 м в средней части склонов, до 2,5–3,5 м – у подножий. Мощность элювиальных образований обычно составляет 1–1,5 м, редко достигая 2 м.

2.3. Тектоника и сейсмичность территории

2.3.1. Тектоника района строительства

Район строительства располагается на сочленении двух структурно-формационных зон Сихотэ-Алинской складчатой системы: Центрально-Сихотэ-Алинской и Тумнинской (рис. 4). Первая из них распространена к юго-западу от площади, образована более древними интенсивно складчатými вулканогенно-кремнисто-терригенными образованиями, устойчивого северо-восточного простирания и интерпретируется многими геологами в качестве крупной антиклинорной структуры.

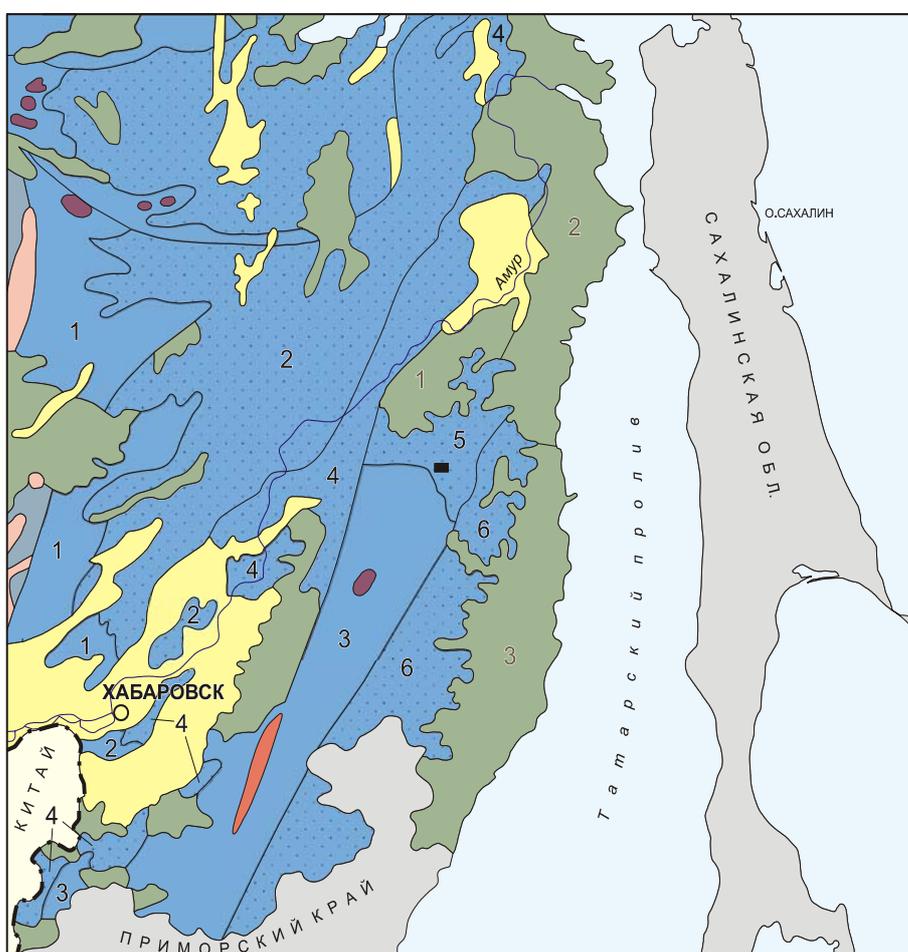
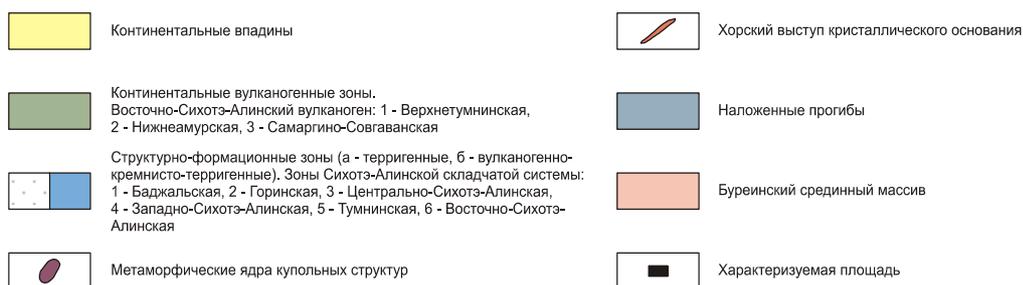


Рис. 4. Схема геолого-структурного районирования [Схема геолого-структурного..., 1986].



Рассматриваемая площадь в целом принадлежит Тумнинской зоне, которая дугообразно с севера окаймляет погружающиеся на С–В структуры антиклинория. Простираение складчатых структур здесь меняется от С–В на субширотное, состав отложений существенно терригенный, складчатость менее интенсивная. Развиты покровные и субвулканические образования Восточно-Сихотэ-Алинского вулканогена.

В тектоническом строении территории выделяются два структурных этажа: нижний, образованный складчатыми терригенными нижне- и верхнемеловыми отложениями и верхний, представленный пологозалегающими с резким несогласием на образованиях нижнего этажа позднемеловыми эффузивами.

Нижний структурный этаж разделен на два подэтажа. *Нижний структурный подэтаж* сформирован терригенными образованиями нижнего мела, залегающими в южной части территории на право- и левобережье р. Мули и её водоразделе с р. Мулинкой. Данные образования разбиты разломами различных направлений на блоки, среди которых можно выделить два основных: южный и северный. Южный блок сложен отложениями пионерской свиты, северный – пиванской свитой. Разграничены они разломом близширотного направления, залеченного трещинообразным телом субвулканических липаритов. Несмотря на такое тектоническое разграничение различий в характере складчатости в двух указанных блоках не наблюдается.

Характерным для нижнемеловых образований является преобладающее субширотное простираение пород. Породы собраны в сильно сжатые широтные линейные складки высоких порядков. Наиболее мелкие из них, с размахом крыльев до нескольких метров, наблюдаются в обнажениях по левому борту р. Мули и её левым притокам. Падение крыльев повсеместно крутое 50° – 70° , до вертикального. В целом преобладают южные и юго-западные падения слоев, что свидетельствует о запрокидывании многих складок на север и северо-восток. В некоторых случаях опрокинутое залегание фиксируется в обнажениях.

В северной части складчатые образования характеризуемого подэтажа перекрыты толщей андези-базальтов верхнего структурного этажа и прорваны субвулканическими интрузиями липаритов и игнимбритов.

Верхний структурный подэтаж представлен терригенными породами (песчаники, алевролиты, аргиллиты, редкие пласты гравелитов и конгломератов) верхней толщи удоминской свиты позднемелового возраста. Данные образования имеют ограниченное распространение в истоках левого составляющего р. Верх. Удоми руч. Южный, в северной приводораздельной части р. Верхняя Удоми с реками Мули и Мулинка. В целом по региону установлено, что данные образования часто характеризуются моноклинальным строением осложненным складками высоких порядков, с размахом крыльев от десятков до первых сотен метров. Углы падения слоев 45° – 65° редко 70° – 85° .

Подстилающих образований не установлено, толща перекрыта покровами андези-базальтов и прорвана телами субвулканических липаритов и игнимбритов позднемелового возраста.

Верхний структурный этаж представлен толщей андези-базальтов позднемелового возраста. Толща плащеобразно залегает на складчатых образованиях нижнего этажа на водоразделе рек Верхняя Удоми – Мули – Мулинка в северной части площади. Разбита крутопадающими разломами субширотного, реже С–В простираний на разномасштабные блоки. Залегание пород субгоризонтальное. Строение толщи осложнено многочисленными трещинными и штокообразными телами субвулканических риолитов и игнимбритов.

2.3.2. Характеристика сейсмичности территории

Район исследований расположен в центре северной части горной системы Сихотэ–Алинь (350 км на северо-восток от Хабаровска). Сейсмическая изученность этой области Приамурья более слабая, чем в других сейсмоактивных областях России, что связано с рядом объективных причин, основными из

которых являются: сравнительно недавнее освоение этой территории и низкий уровень сейсмологических наблюдений.

Макросейсмические данные о землетрясениях раннего периода освоения территории носят отрывочный характер. Землетрясения рассматриваемого региона (с конца XIX века до 1929 года) регистрировались только удалёнными сейсмостанциями, ближайшая из которых располагалась в городе Иркутске. В 1929 году была открыта сейсмостанция во Владивостоке. Поэтому для области исследований до 1951 года представительными были землетрясения с магнитудой $M=6-5$.

Следующий этап в изучении сейсмичности (1951–1973 гг.) характеризуется организацией сейсмических станций на Сахалине, а также установкой на них и ранее открытых станциях сейсмографов регионального типа большой чувствительности. Так, в 1951 г. были созданы сейсмостанции в Углегорске и Южно-Сахалинске (Сахалин), Магадане и Петропавловске-Камчатском, а в 1958 г. также и в Охе (Северный Сахалин). В конце 1966 г. Сахалинским КНИИ была открыта сейсмостанция регионального типа в пос. Тымовском (средняя часть Сахалина). Значительным событием следует считать организацию Сахалинским КНИИ в конце 1970 г. сейсмической станции в Николаевске-на-Амуре (первой станции на территории Приамурья).

После создания сети станций в районе Зейской ГЭС и вдоль трассы БАМ в период с 1979 по 1983 год была достигнута представительность регистрации с $M=2,2$. После 1993 года произошло резкое сокращение сети сейсмологических станций, и представительность упала до $M=3$.

Кроме данных инструментальных наблюдений, существуют геологические признаки сейсмичности и исторические сведения о сильных землетрясениях, произошедших на территории края. Специальные работы, проводимые в зоне БАМа, позволили выявить ряд палеосейсмодислокаций, образовавшихся в результате 9-балльных землетрясений ($M=6.5$), произошедших 300–700 лет назад. Эти структуры расположены в долине р. Амгунь (Амгунь, Галиджак, Омот), р. Кукан, Тырма, хр. Мяо-Чан (Амутская). Описан также ряд

палеосейсмодислокаций на берегу Татарского пролива, предположительно образовавшихся в результате 9-балльных землетрясений.

Существуют исторические сведения о землетрясении, произошедшем 27.06.1865 г. в низовьях реки Амгунь с 6–7-балльной интенсивностью в эпицентре. 23 августа 1888г. в юго-западных отрогах Баджальского хребта произошло землетрясение, ощущавшееся по Амуру как минимум на расстоянии в 400 км. По описанным признакам магнитуда землетрясения оценивается в 6.0–6.5, а поверхностный эффект в 8–9 баллов.

Вероятно, самое сильное из исторических сейсмических событий в Приамурье произошло 23 декабря 1914 г. в низовьях Амура. Его эпицентр располагался в юго-западных отрогах хр. Пуэр на стыке с Удыльской впадиной. Магнитуда его оценивается в 6.3, а расчетная интенсивность в эпицентре составляет 8.5 балла. В районе очага этого сейсмического события продолжают происходить толчки с $M = 4$.

Недалеко от г. Комсомольск-на-Амуре (в зоне сочленения Среднеамурской впадины с хр. Сихотэ-Алинь), 25 мая 1904 г. произошло землетрясение с $M=4.7–5.2$. 11 марта 1924 г. в зоне сочленения северо-восточных отрогов хр. Хоми с южным декансом Удыль-Кизинской впадины произошло землетрясение с $M=5.6$.

Повышенной сейсмической активностью характеризуется и побережье Татарского пролива. Здесь опасность представляют землетрясения, произошедшие как в континентальной части, так и в морской. Из континентальных наиболее известны два Ванинских землетрясения с магнитудой 5.0 и глубиной очага 22 км. Они произошли 19.09.68 г. и ощущались силой в 5 баллов.

На рис. 5 показаны эпицентры землетрясений по инструментальным, историческим и сейсмогеологическим данным. Практически вся территория Хабаровского края является сейсмически активной. Северный Сихотэ-Алинь внутри, которого расположен участок строительства туннеля (широта $50,17^\circ$ долгота $139,07^\circ$), как видно на рис. 5, за исключением своих флангов, сейсмически пассивен. К сожалению, этот вывод не может быть достоверным по

причине малого периода наблюдений и отсутствия специализированных сейсмогеологических исследований. Однако большой сейсмический потенциал сейсмогенерирующих зон на флангах района исследований определил его существенную сейсмическую опасность даже при условиях отсутствия на его территории очагов зон сильных землетрясений.

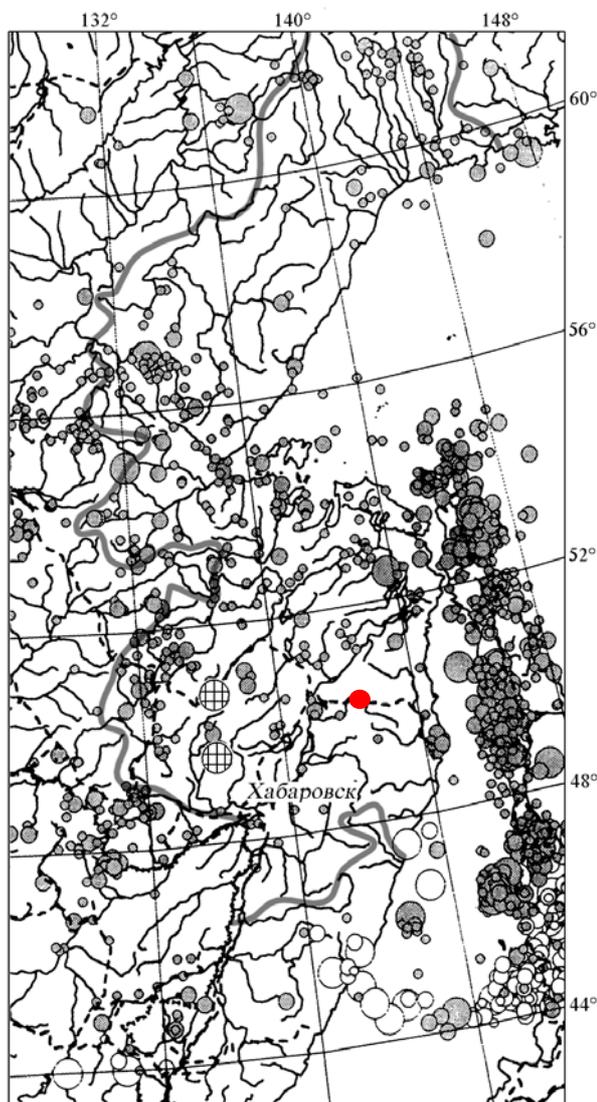


Рис 5. Схема эпицентров землетрясений для территории Хабаровского края за период с 1735 по 2001 гг (по данным каталога ИТиГ ДВО РАН).

Условные обозначения:

- | <i>Магнитуда:</i> | <i>Глубина (км):</i> |
|---------------------------|----------------------|
| ○ - $3.0 \leq M < 4.5$ | ● - $0 \leq H < 70$ |
| ○ - $4.5 \leq M < 6.0$ | ○ - $H \geq 70$ |
| ○ - $M \geq 6.0$ | |
| ⊕ - палеосейсмодислокации | |

В соответствии с картами ОСР-97В и ОСР-97С общего сейсмического районирования участок строительства характеризуется сейсмической интенсивностью в 8 баллов макросейсмической шкалы MSK-64 для средних грунтовых условий.

Зоны ВОЗ Приамуро-Приморского региона выделены по материалам о сейсмогенерирующих структурах, предоставленных в ОИФЗ РАН сотрудниками Института земной коры, Якутского института геологических наук СО РАН и Института морской геологии и геофизики ДВО РАН. Карта активных разломов составлены под руководством В.Г. Трифонова (Геологический институт РАН, Москва). Карта изостатических гравитационных аномалий и их градиентов составлены М.Л. Кабаном (Институт физики Земли РАН). Линеаментная структура региона разработана В.И. Уломовым с участием специалистов из указанных институтов. Доменная составляющая закартирована Н.В. Шебалиным и В.Г. Трифоновым.

На рис. 6 представлен фрагмент карты зон ВОЗ Северной Евразии для территории исследований. Размеры территории и выбор зон ВОЗ обусловлен магнитудами тех сейсмических событий, которые вызывают в них сотрясения в 5,5 и более баллов.

В табл. 3 приведены расстояния, на которых землетрясения разных магнитуд создают сотрясения в 5.5 баллов.

Таблица 3

Верхний предел расстояний, на которых землетрясения магнитуды M могут создать сотрясения интенсивностью 5.5 балла

Магнитуда M_{LN}	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
Расстояние, км	40	70	100	150	200	250	300	350

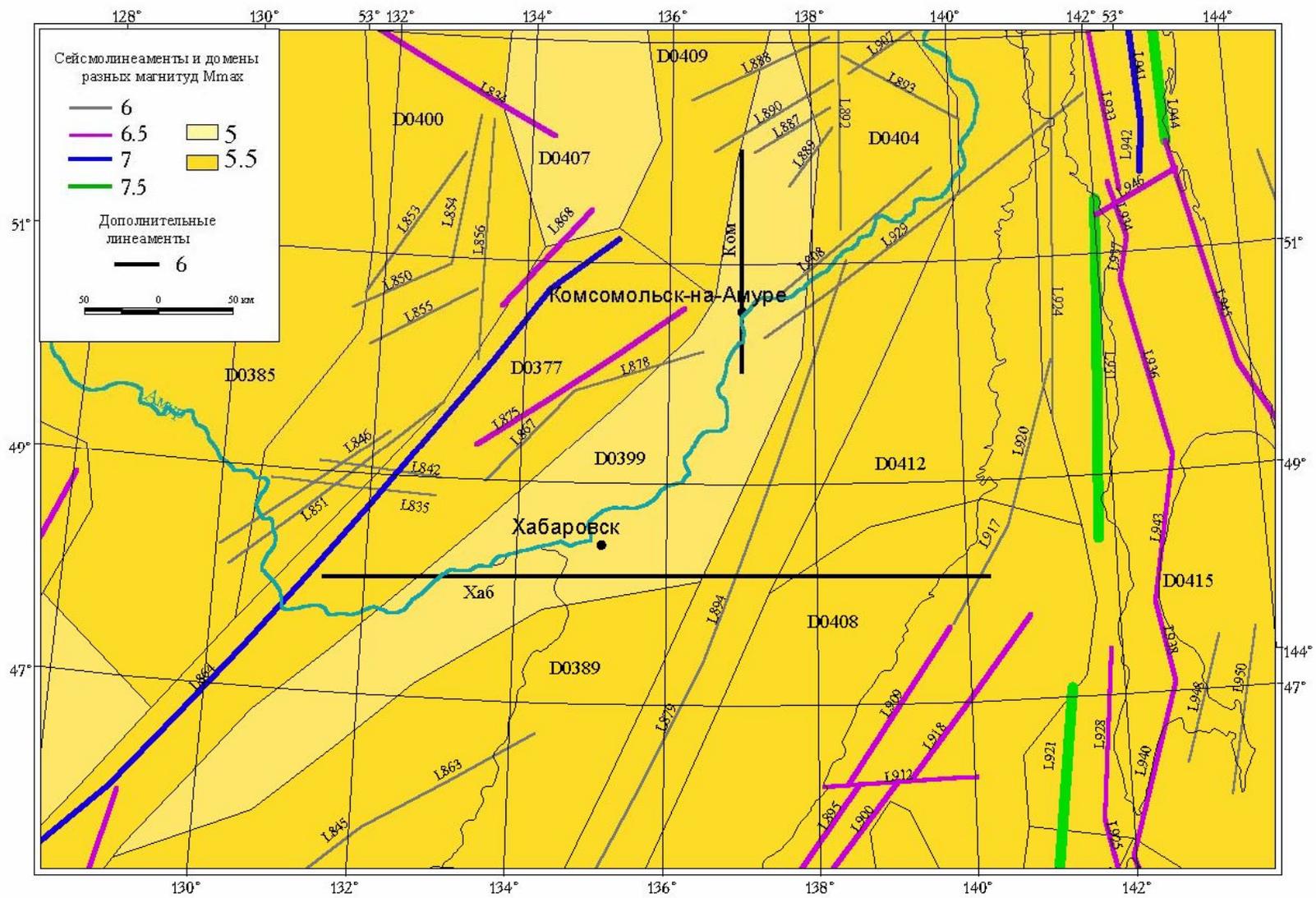


Рис. 6. Фрагмент карты зон возникновения очагов землетрясений [Уломов, 1999].

По карте зон ВОЗ участок строительства расположен в пределах домена характеризующегося $M=5,5$, и окружён линеаментами с $M=6$. Это и определило уровень высокий уровень сейсмичности участка.

По карте ОСР-97-С (рис. 7) участок строительства тоннеля (широта $50,17^\circ$ долгота $139,07^\circ$) расположен на границе 8-балльной зоны.

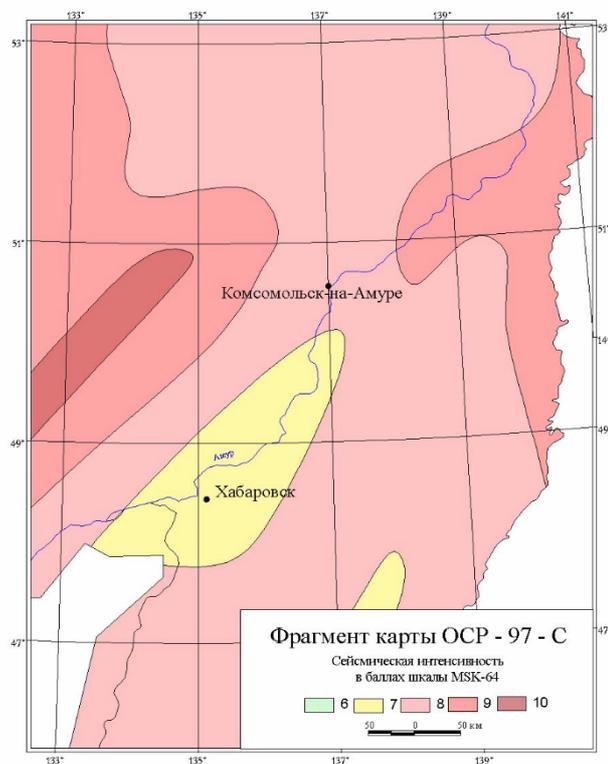


Рис. 7. Фрагмент карты ОСР-97-С [Уломов, 1999].

С учётом того, что при проведении изолиний производилось округлением величины сейсмической интенсивности до целого, истинная сейсмичность его может быть близка к значению 7,6 балла. По карте ОСР-97-С сейсмичность участка возможно на несколько десятых больше 8 баллов.

Уточнение балльности до десятых долей необходимо в случае проведения работ по микросейсмическому районированию.

2.4. Речная сеть и подземные воды

Приуроченность района работ к водораздельной части хребта Сихотэ-Алинь обуславливает наличие рек как бассейна р. Амур, так и Тихого океана (р. Тумнин). В районе Западного портала – верховья р. Верхняя Удоми и её притоки

приурочены к бассейну реки Амур, на Восточном портале – притоки р. Мули (руч. Заросший и Полковой) входят в состав бассейна реки Тумнин.

Долины рек В. Удоми и Мули ориентированы в противоположные стороны, соответственно на запад, северо-запад и юго-восток. Реки Верхняя Удоми, Мулинка и их притоки характеризуются значительными уклонами русел, по строению долин и режиму являются типично горными. Ширина рек и притоков варьирует в пределах 1 – 5 м; глубина 0,1 – 0,8 м; скорость течения 1,5 – 2,0 м/сек.

Мерзлотно-гидрогеологическая изученность района и участка тоннеля весьма слабая. Тоннельный переход располагается в пределах Сихотэ-Алинской гидрогеологической складчатой области. Условия формирования подземных вод определяются наличием поглощающих таликов в истоках и верховьях рек в приводораздельной части хребта и на склонах гор южной экспозиции, а также за счет отепляющей разгрузки напорных трещинно-жильных вод по зонам тектонических нарушений в днища долин рек и движения подземных вод в грунтовых потоках по аллювиальным отложениям.

Количество атмосферных осадков составляет 500 – 700 мм, из которых до 85 % выпадают в летний период. Количество тепла, приносимого инфильтрующимися дождевыми водами в пределах хребта Сихотэ-Алинь в горные породы, составляет 700 – 1000 ккал/м².

В пределах характеризуемой территории выделяются водоносный горизонт современных аллювиальных отложений и водоносные зоны трещиноватости: мел-палеогеновые вулканогенные, верхнемеловые терригенные континентальные, меловые терригенные морские, меловые и палеогеновые интрузивные образования кислого и среднего составов (рис. 8).

Четвертичный водоносный аллювиальный горизонт распространен в долинах рек. Он сложен галечниками с валунами, гравием с песчано-суглинистым заполнителем. Его мощность изменяется от 3 до 12 м.

Подземные воды грунтовые (безнапорные) поровые залегают на глубине 0,5 – 2,0 м. В зимнюю межень уровень подземных вод падает на 0,5 – 3 м.

Водовмещающие породы обладают различной водопроницаемостью. Коэффициент фильтрации изменяется в зависимости от состава заполнителя от 1,5 до 1400 м/сутки.

Подземные воды аллювиальных отложений пресные с минерализацией 0,02 – 0,2 г/л, по составу гидрокарбонатные кальциевые, магниевые-кальциевые, обладают общекислотной агрессивностью.

В зимний период за счет вод аллювиальных отложений формируются наледи, объем которых может достигать 10 – 15 тыс. м³.

Питание водоносного горизонта происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков и разгрузки подземных вод водоносных зон трещиноватости, слагающих борта долин. Разгрузка подземных вод аллювиального водоносного горизонта происходит в реки.

Подземные воды четвертичного аллювиального водоносного горизонта используются для хозяйственно-питьевого и производственного водоснабжения поселков.

Меловая – палеогеновая водоносная зона трещиноватости эффузивных пород приурочена к вулканогенным образованиям, представленным лавовыми разновидностями андези-базальтов и в незначительной мере туфоконгломератами и лавобрекчиями, залегающими в низах разреза.

Водоносная зона в пределах экзогенной приповерхностной трещиноватости пород прослеживается до глубины 100 м при мощности активной зоны выветривания до 45 м. С поверхности до глубины 10 – 15 м наблюдаются открытые трещины шириной 0,1 – 4,0 см. Ниже породы разбиты системой преимущественно тонких пересекающихся трещин, часто выполненных глинистым материалом. По тектоническим разрывным нарушениям прослеживаются зоны дробления пород до глубины 300 – 400 м, мощностью от первых метров до нескольких десятков метров.

Подземные воды зоны экзогенной трещиноватости грунтовые, безнапорные, а в зонах тектонических нарушений и на площади развития многолетнемерзлых пород обычно напорные.

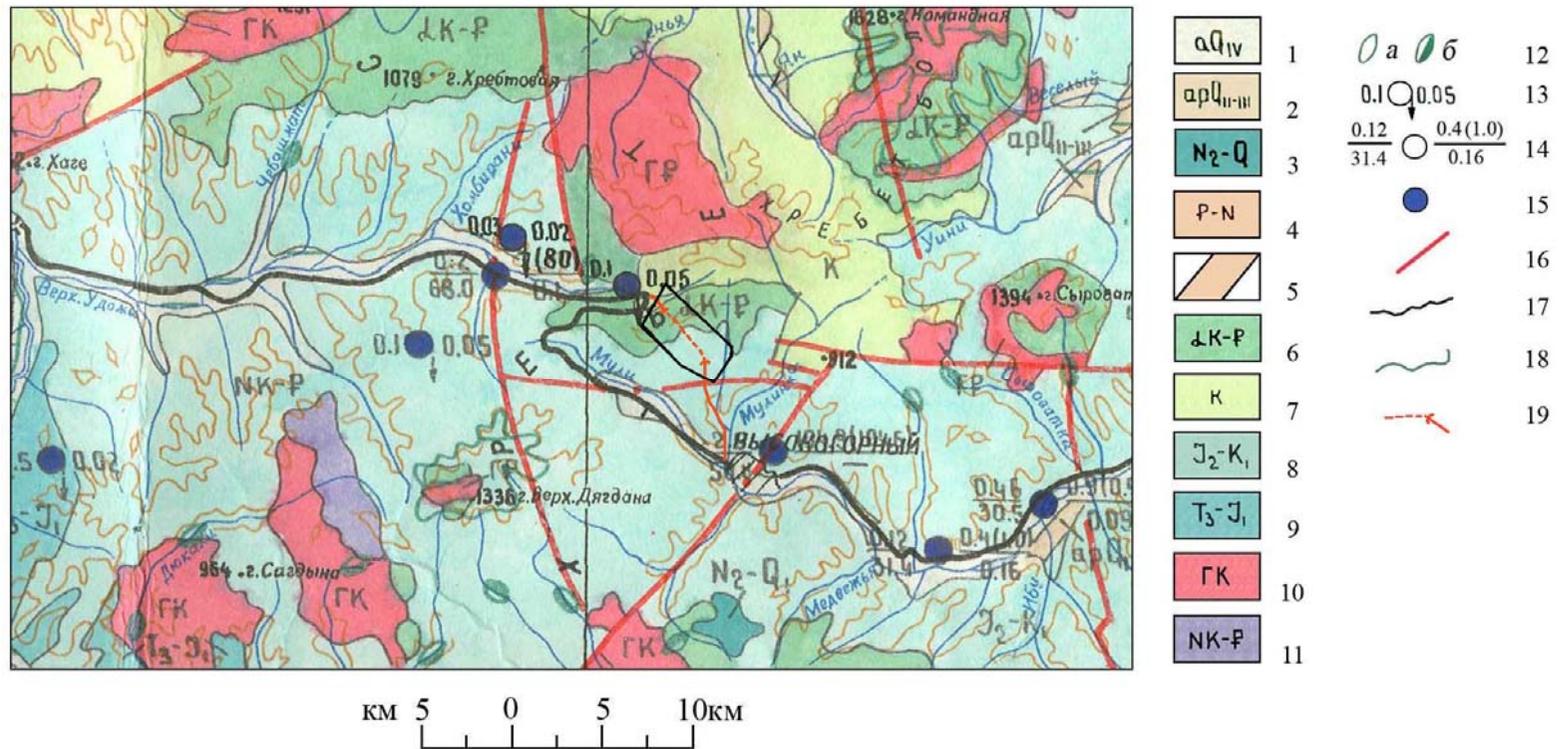


Рис. 8. Мерзлотно-гидрогеологическая карта района Кузнецовского тоннельного перехода через хребет Сихотэ-Алинь [Шуваев, Волков, 1982]
Масштаб 1:500000.

1- водоносный горизонт четвертичных аллювиальных отложений (галечники, пески, гравийники с валунами), 2 – водоносный горизонт средне-верхнечетвертичных аллювиально-пролювиальных отложений (галечники, валунники, щебень, глыбы с суглинистым заполнителем), 3 – водоносный комплекс плиоцен-нижнечетвертичных базальтов (базальты, долериты), 4 - 5 – водоносный комплекс (воды спорадического распространения) палеоген-неогеновых терригенных континентальных отложений (галечники, пески, суглинки глины с линзами бурых углей), 6 – 11 – водоносные зоны трещиноватости: 6 - мел-палеогеновых вулканогенных образований (андезиты, дациты, андези-базальты, их туфы), 7 – меловых терригенных морских (песчаники, алевролиты, аргиллиты, иногда ритмично переслаивающиеся), 8 – среднеюрских-нижнемеловых терригенных морских (алевролиты, песчаники, аргиллиты, глинистые сланцы), 9 – верхнетриасовых-юрских терригенных морских (алевролиты, песчаники, аргиллиты, конгломераты, гравелиты), 10 – меловых и палеогеновых интрузивных кислого и среднего состава (граниты, гранодиориты, гранит-порфиры), 11 – протерозойских интрузивных пород основного состава (габбро, кварцевые диориты, долериты, сиениты, перидотиты), 12 – наледи подземных вод, 13 – родник нисходящий (справа – дебит, л/с, слева – минерализация, г/л), 14 – скважина (слева в числителе – дебит, л/с, в знаменателе – понижение, м, справа в числителе – глубина установившегося уровня, м, в знаменателе – минерализация, г/л), 15 – вода с преобладанием гидрокарбонатного иона, 16 – тектонические нарушения, гидрогеологическое значение которых не выяснено, 17 – границы гидрогеологических подразделений, 18 – установленная граница распространения многолетнемерзлых пород; 19 – линия проектируемого тоннельного перехода

Мощность водоносной зоны трещиноватости в пределах речных долин и нижних частей склонов достигает 40–45 м, вверх по склону она уменьшается. К гребням хребтов водоносная зона трещиноватости обычно выклинивается.

Глубина залегания уровня подземных вод в долинах рек составляет 2–5 м, увеличиваясь в средних частях склонов до 30–50 м.

Коэффициент фильтрации трещиноватой зоны чаще составляет 0,07 – 0,1 м/сутки, увеличиваясь в верхней наиболее трещиноватой приповерхностной части разреза до 0,8 м/сутки, а в зонах тектонических нарушений достигает 8 м/сутки.

В зоне активного водообмена минерализация подземных вод водоносной зоны трещиноватости составляет 0,02 – 0,05 г/л, ниже местного базиса эрозионного вреза в скважинах она достигает 0,1 – 0,15 г/л. По химическому составу подземные воды гидрокарбонатные натриево-кальциевые. Жесткость воды составляет 0,2 – 1,5 мг-экв/л, рН равно 5,6 – 6,7.

Питание подземных вод происходит за счет атмосферных осадков и конденсационного питания. Разгрузка подземных вод осуществляется в долинах рек и ручьев родниками и в аллювиальные отложения.

Режим подземных вод зоны трещиноватости связан с выпадением жидких атмосферных осадков. Годовая амплитуда колебания уровня подземных вод может достигать 10–30 м.

Подземные воды грунтовые, приуроченные к трещиноватой зоне экзогенного выветривания мощностью 60 – 100 м. В зонах разрывных тектонических нарушений вскрываются напорные трещинно-жильные воды.

По химическому составу подземные воды гидрокарбонатные кальциево-натриевые с минерализацией 0,1 – 0,15 г/л.

Питание подземных вод зоны трещиноватости осуществляется за счет атмосферных осадков. Разгрузка подземных вод происходит в долинах рек.

Меловая водоносная зона трещиноватости терригенно-осадочных морских отложений пионерской и пиванской свит сложена алевролитами, ритмично переслаиваемыми алевролитами и песчаниками с отдельными пластами массивных алевролитов и песчаников.

Подземные воды грунтовые, приуроченные к трещиноватой зоне экзогенного выветривания мощностью 60 – 100 м, вскрыты скважинами на глубинах в зависимости от их положения в рельефе на глубине 6 – 51 м.

В зонах разрывных тектонических нарушений вскрываются напорные трещинно-жильные воды. Величина напора по скважинам достигает 28 м, а пьезометрический уровень устанавливается на глубине 1,5 – 24 м. В более глубоких скважинах возможно вскрытие трещинно-жильных вод с величиной напора более 100 м. По химическому составу подземные воды гидрокарбонатные кальциево-натриевые с минерализацией 0,1 – 0,25 г/л, рН равно 6,8 – 8,0.

Питание подземных вод зоны трещиноватости осуществляется за счет атмосферных осадков. Разгрузка подземных вод происходит в долинах рек.

Водоносная зона трещиноватости разновозрастных интрузивных образований кислого и среднего состава представлена разнообразными дайками и телами субвулканических интрузий липаритов, гранодиоритов, диоритовых порфиритов, кварцсодержащих диоритовых порфиритов.

Обводненность пород связана с верхней трещиноватой зоной, мощность которой составляет 40 – 60 м. По зонам тектонических нарушений активная трещиноватость пород прослеживается до глубины нескольких сотен метров.

Подземные воды вскрыты скважинами на глубине от 1,5 – 15 м до 50–80 м. Уровень подземных вод устанавливается на глубине 1 – 16 м. Минерализация подземных вод очень низкая и не превышает 0,1 г/л. По составу воды гидрокарбонатные смешанного катионного состава и, как правило, пригодны для хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Питание подземных вод зоны трещиноватости осуществляется за счет атмосферных осадков. Разгрузка подземных вод происходит в долинах рек.

Таким образом, гидрогеологический разрез на участке тоннельного перехода можно схематизировать в виде двухчленного (снизу – вверх): гидрогеологический массив слагают водоносные зоны трещиноватости с трещинными и трещинно-жильными водами, которые перекрываются водоносным аллювиальным горизонтом, протягивающимся узкой полосой в долинах рек.

2.5. Характеристика экзогенных геологических процессов

В районе распространены экзогенные геологические процессы: осыпи, оползни, обвалы, курумники, делювиальные шлейфы, солифлюкционные подвижки и наледи [Квашук, 2003].

В пределах высокогорной части Сихотэ-Алинского хребта преобладающими и наиболее опасными процессами являются обвалы, осыпи.

В средне- и низкогорных областях обвалы наблюдаются реже и приурочены к выходам коренных пород на крутых склонах, а также в выемках железных и реже автомобильных дорог. Широкому развитию обвалов способствуют: высокая степень расчлененности рельефа, большая обнаженность скальных пород, повышенная тектоническая трещиноватость горных пород, морозное выветривание, интенсивное проявление неотектоники, высокая сейсмичность.

Из всех известных обвалов 68 % приходится на высокогорье и только 15 % - на среднегорные области, а остальные 17 % – на эрозионные берега и подрезанные склоны и откосы.

Наиболее крупные обвалы тяготеют к зонам тектонических сейсмодислокаций (объем их до 600 тыс. м³ и более) с большой крутизной склонов (до 700) и приурочиваются к районам повышенной сейсмичности.

Широкое распространение в пределах Сихотэ-Алинского хребта имеют экзогенные обвалы. Они отличаются малым объемом своей массы (не более 400–500 м³). Обвальные склоны часто имеют крутизну до 45°–65°. Все они приурочены к зонам тектонических нарушений, северная и северо-западная их экспозиция свидетельствует о главной роли морозного фактора выветривания.

Высокогорная часть Сихотэ-Алинского хребта на 30–40 % поражена обвально-осыпными процессами. Они развиты по стенкам цирков и распадков и приурочены, главным образом, к меловым эффузивам, вулканогенно-осадочным толщам, реже к палеогенным эффузивам, гранитоидам в верховьях р. Гур, Акур, Ямби, Маломпу, Тумнин и др. Крутизна склонов колеблется от 50 до 600, относительная высота падения достигает 400м. Величина обломков составляет часто 2–3 м. Экспозиция обрушающихся склонов в основном северо-восточная. На участках развития

интрузивных пород обвалы приурочены к верхним частям распадков. Экспозиция склонов остается той же, крутизна уменьшается, размеры обломков прежние. На более низких отметках (600–800 м) интенсивность обвальных явлений затухает и в средне- и низкогорных областях становится весьма незначительной. В таких областях развиты преимущественно обвалы – вывалы, приуроченные к естественным выходам коренных пород в крутых бортах долин рек. Объем обрушившихся масс редко достигает 100 м³. Размеры обломков разнообразной величины от 0,2 до 1,5 м. Экспозиция склонов северо-восточная или северо-западная. Обвалы такого типа весьма вероятны при подрезке склонов выемками западного и восточного подходов к новому Кузнецовскому тоннелю.

Широко распространены техногенные обвалы, особенно на линии Комсомольск–Советская Гавань. На участке Откосная – Высокогорная (около 25 км) наблюдается 14 обвалоопасных участков, общей протяженностью 700 м.

Они были обследованы учеными ДВГУПС и классифицированы по степени опасности. Количественная и качественная оценка были произведены на основе комплексного инженерно-геологического изучения обвальных участков. В основу классификации были положены местоположение и морфологические особенности участков, тип горных пород, слагающих откосы, наличие тектонических нарушений, степень залесенности откосов выемок и полувыемок, класс трещиноватости [Рац, Чернышев, 1970], коэффициент угрожаемости обвала [Ломтадзе, 1977], степень инженерной защиты и экспертная качественная характеристика состояния участка. Степень опасности подразделялась на три типа – менее опасный, опасный и очень опасный. 7 участков были классифицированы как очень опасные, 3 – опасные и 4 – менее опасные. Из этого следует, что участок железнодорожной линии Комсомольск – Советская Гавань в районе Кузнецовского тоннеля подвержен широкому распространению гравитационных процессов, угрожающих ее эксплуатации.

ГЛАВА 3. МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА ИССЛЕДОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ КУЗНЕЦОВСКОГО ТОННЕЛЯ

3.1. Методика изучения трещиноватости горных пород

Оценка трещиноватости в обнажениях производилась с целью получения полной качественной и количественной характеристики трещиноватости всех частей массива, взаимодействующих с проектируемым сооружением.

Для этого были исследованы характеристики трещиноватости на естественных и искусственных обнажениях, на керне и образцах, извлеченных из забоя.

Изучение трещиноватости в обнажениях заключалось в полевых измерениях элементов залегания трещин, их толщины, длины, генезиса и др., а также в последующей камеральной обработке и расчете основных показателей степени трещиноватости.

Положение трещин в пространстве определялось тремя элементами: азимут простирания, азимут падения и угол падения.

На участке производилось по 25 – 40 измерений параметров в (ширины), l (длины), α (азимут падения), β (угол падения), L (расстояние до соседней трещины в системе) на систему трещиноватости.

В дальнейшем при камеральной обработке велось построение диаграмм трещиноватости. На цифровых изображениях обнажений были подсчитаны площади, занимаемые трещинами и подсчитан коэффициент трещинной пустотности.

Коэффициент трещинной пустотности [Иванов, Тржцинский, 2004]:

$$K_{mp} = \frac{s}{S} \cdot 100, \%, \quad (1)$$

где s – свободное пространство, занимаемое трещинами

S – площадь поверхности пород.

Далее, исходя из рассчитанного коэффициента осуществлялась классификация пород по степени трещиноватости [Нейштадт, 1957].

1. Породы *слаботрещиноватые* ($K_{тр} < 2\%$). Наблюдаются трещины волосные и шириной менее 1 мм. Встречаются единичные трещины шириной до 2 мм. Трещины большей ширины отсутствуют.

2. Породы *среднетрещиноватые* ($K_{тр}$ – от 2 до 5 %). Наряду с трещинами шириной до 1 мм имеют места трещины шириной от 2 до 5 мм и единичные шириной от 5 до 20 мм.

3. Породы *сильнотрещиноватые* ($K_{тр}$ – от 5 до 10 %). Наряду с трещинами шириной до 5 мм наблюдаются трещины шириной от 20 до 100 мм.

4. Породы *очень сильнотрещиноватые* ($K_{тр}$ – от 10 до 20 %) и *исключительно сильнотрещиноватые* ($K_{тр} > 20\%$) наряду с трещинами шириной до 5 мм присутствуют трещины шириной от 20 до 100 мм и более.

Исследование трещиноватости по образцам керна и образцам из забоя проводилось для получения дополнительных данных о степени нарушенности пород массива. Изученные образцы не подвержены процессам гипергенеза и позволяют определить трещиноватость без учета трещин выветривания. Следовательно, наиболее точно определен уровень развития нарушенности массива.

Были проанализированы данные о степени трещиноватости пород при проходке тоннеля. Оценивалось наличие и количество трещин в породе, размер выходящих обломков, характер и скорость проходки. Исходя из этого осуществлялась классификация пород по степени трещиноватости: сильнотрещиноватая, трещиноватая, слаботрещиноватая.

Выполненный комплекс работ позволил наиболее точно и достоверно определить характеристики и степень развития трещиноватости горных пород массива. В процессе исследований были измерены, подсчитаны и проанализированы основные ее показатели, оценено влияние на физико-механические свойства. Эти характеристики позволили выполнить необходимые количественные расчеты, дать оценку развития и влияния трещиноватости на состояние геосистемы.

Исследование микротрещиноватости. Для изучения данного вопроса был выполнен комплекс работ, состоящий: из изготовления прозрачных шлифов, фотографирования их увеличенной с помощью электронного микроскопа поверхности и изучения цифровых изображений. На рис. 8 представлено увеличенное в 60 раз изображение шлифа.

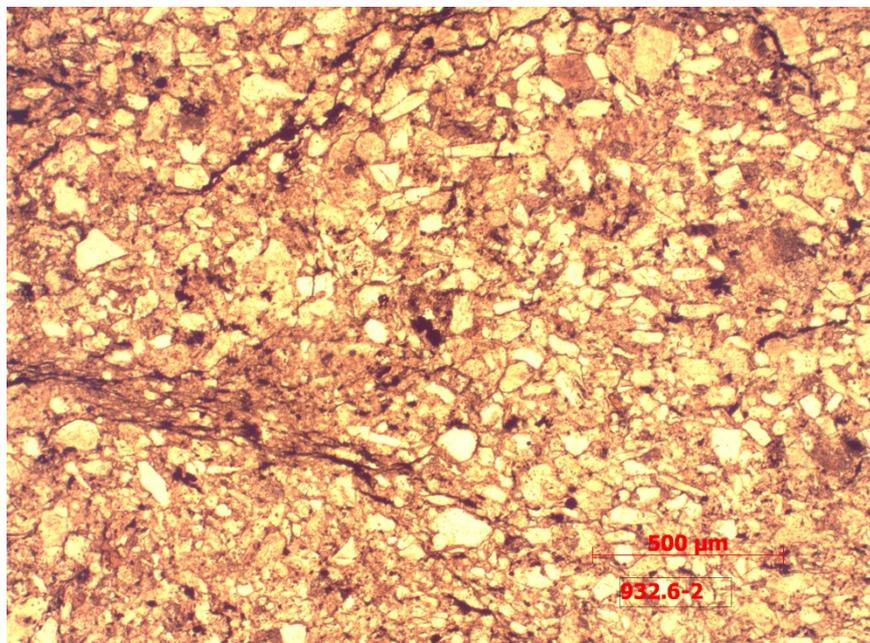


Рис. 9. Цифровое изображение шлифа.

При исследовании микротрещиноватости оценивались качественные и количественные характеристики. Для получения качественной характеристики указывалась форма трещин, открытость или залеченность (заполненность) пустотного пространства. Количественную оценку микротрещиноватости дают ее параметры.

Для получения параметров микротрещиноватости замерялась площадь шлифа S , длина следов трещин l , раскрытость трещин b . Все замеры производились путем переноса изображения шлифа на компьютер и дальнейшей обработки этих изображений. За расчетную величину раскрытости трещины принимается наиболее часто встречаемое значение при измерениях в различных ее частях. По данным замеров в шлифах ширины трещин, мкм, их суммарной длины, мм и площади шлифа, мм² производился подсчет параметров микротрещиноватости [Тугарова, 2004].

Трещинная проницаемость K_T , $1 \cdot 10^{-3}$ мкм²:

$$K_T = A \cdot b^3 \cdot l / S. \quad (2)$$

В зависимости от геометрии систем трещин в формулу проницаемости вводится соответствующий коэффициент А:

1) при одной системе горизонтальных (по отношению к слоистости) трещин $3,42 \cdot 10^6$;

2) при двух взаимно перпендикулярных системах вертикальных трещин $1,71 \cdot 10^6$;

3) при трех взаимно перпендикулярных системах $2,28 \cdot 10^6$;

4) в случае хаотического расположения трещин $1,71 \cdot 10^6$.

Трещинная пористость m_T , %:

$$m_T = b \cdot l / S. \quad (3)$$

Объемная плотность трещин T , 1/м:

$$T = 1,57 \cdot l / S. \quad (4)$$

Для характеристики образца по степени микротрещиноватости использовалась «Классификация пород по степени трещиноватости по Л.И. Нейштадт [Нейштадт, 1957]»:

1. Породы *слаботрещиноватые* ($m_T < 2\%$).
2. Породы *среднетрещиноватые* (m_T – от 2 до 5 %).
3. Породы *сильнотрещиноватые* (m_T – от 5 до 10%).
4. Породы *очень сильно трещиноватые* (m_T – от 10 до 20%) и *исключительно сильно трещиноватые* ($m_T > 20$).

Качественная оценка, рассчитанные величины трещинной пористости, трещинной проницаемости и объемной плотности трещин, а также их классификация характеризуют микротрещиноватость пород данного разреза, участка разреза или определенной литологической разности пород.

3.2. Методика лабораторных исследований основных физико-механических свойств скальных горных пород

Прочностные характеристики горных пород изучались при помощи гидравлической испытательной машины – Servotronic (1500 кН), дополнительной установки для определения предела прочности на растяжение и расчетных формул. Определение предела прочности на сжатие пород производилось в соответствии с ГОСТ 21153.2-84, методом одноосного сжатия образцов правильной формы плоскими плитами.

Образец размещали между стальными плитами (рис. 10), совмещая ось образца с центром нижней опорной плиты испытательной машины, и нагружали до разрушения с равномерной скоростью 1–5 МПа/с.

Фиксировали максимальную величину разрушающей образец силы P в килоньютонах и проводили обработку результатов.

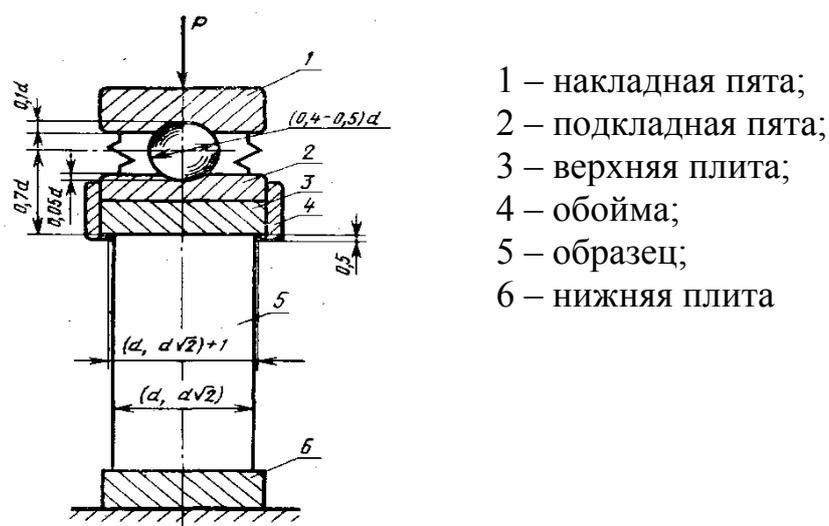


Рис. 10. Схема испытания образцов на одноосное сжатие [ГОСТ 21153.2-84].

Предел прочности при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$ (в МПа для каждого образца) вычисляют по формуле

$$\sigma_{сж(м)} = \frac{P}{S} \cdot 10, \quad (5)$$

где P – разрушающая образец сила, кН;

S – площадь поперечного сечения образца, см²

Определение *предела прочности пород на растяжение* производится в соответствии с методом разрушения цилиндрических образцов сжатием по образующим.

Сущность метода заключается в измерении разрушающей силы, приложенной к образцу через стальные встречно направленные клинья.

Образец размещают в центре устройства испытательной машины между клиньями-прокладками (рис. 11) и образец нагружают до разрушения равномерно со скоростью 1—5 МПа.



Рис. 11. Фото устройства для определения предела прочности на растяжение.

Предел прочности при одноосном растяжении (σ_p) в МПа для каждого образца вычисляют по формуле:

$$\sigma_p^u = K \frac{P}{S} \cdot 10. \quad (6)$$

где K – коэффициент пропорциональности, равный 0,64 при нагружении плитами и 1,00 – при нагружении клиньями;

P – разрушающая сила, кН;

S – площадь разрыва образца, равная произведению диаметра образца на его длину, см^2 .

Определение коэффициента крепости пород по Протодяконову производилось по ГОСТ 21153.1-75, в соответствии с которым при наличии сведений о величине предела прочности пород на одноосное сжатие допускается определение коэффициента крепости пород, по Протодяконову, расчетным методом по формуле

$$f = \frac{\sigma_{\text{нсе}}}{10}. \quad (7)$$

где $\sigma_{\text{сж}}$ – предел прочности на одноосное сжатие, МПа.

Деформационные характеристики горных пород определялись путем ступенчатого нагружения цилиндрических образцов (кернов) на гидравлической испытательной машине – Servotronic (1500 кН), со скоростью нагружения 0,001 кН/с с параллельным замером деформации тензорезисторной станцией ZetLab A17-E18, с наклеиваемыми тензорезисторами 2СКП, EDX 100А, KFG-20 (КС-60).

Количество чувствительных элементов датчиков было два для каждого вида деформаций. Их располагают равномерно по периметру в средней по высоте части боковой поверхности образца без наложения друг на друга.

По результатам испытаний были построены графики зависимостей «напряжение σ – деформация ε ».

Модуль деформации E_{δ} и коэффициент поперечной деформации ν в заданном диапазоне напряжений ($\sigma_{\text{н}}$ – $\sigma_{\text{к}}$) определяются по нагрузочным ветвям зависимостей σ – ε по формулам:

модуль деформации E_{δ} в МПа

$$E_{\delta} = \frac{\sigma_{\varepsilon} - \sigma_{i\varepsilon}}{\varepsilon_{1\varepsilon} - \varepsilon_{i\varepsilon}}; \quad (8)$$

коэффициент поперечной деформации ν

$$\nu = \frac{\varepsilon_{2\varepsilon} - \varepsilon_{2i\varepsilon}}{\varepsilon_{1\varepsilon} - \varepsilon_{i\varepsilon}}. \quad (9)$$

Модуль упругости E_y и коэффициент Пуассона μ определяются в этом же диапазоне напряжений по разгрузочным ветвям зависимостей σ – ε по формулам:

модуль упругости E_y в МПа

$$E_y = \frac{\sigma'_e - \sigma'_i}{\varepsilon'_{1e} - \varepsilon'_{1i}}; \quad (10)$$

коэффициент Пуассона μ

$$\mu = \frac{\varepsilon'_{2e} - \varepsilon'_{2i}}{\varepsilon'_{1e} - \varepsilon'_{1i}}, \quad (11)$$

где σ_k, σ_n - напряжения в конце и начале диапазона при нагружении или разгрузке, МПа;

$\varepsilon_{1k}, \varepsilon_{1n}$ - относительные продольные деформации образца в конце и начале диапазона при нагружении;

$\varepsilon_{2k}, \varepsilon_{2n}$ - относительные поперечные деформации образца в конце и начале диапазона при нагружении;

$\varepsilon'_{1k}, \varepsilon'_{1n}$ - относительные продольные деформации образца в конце и начале диапазона при разгрузке;

$\varepsilon'_{2k}, \varepsilon'_{2n}$ - относительные поперечные деформации образца в конце и начале диапазона при разгрузке;

σ - нормальное напряжение в образце при одноосном сжатии;

$\Delta l_{обр}$ - абсолютная продольная деформация образца по кривой разгрузки;

F - внешняя сжимающая (продольная внутренняя) сила;

ε - относительная продольная деформация образца по кривой разгрузки;

$l_{обр}$ - длина образца;

E - модуль упругости.

Объемная масса горных пород, представленных образцами правильной формы (кернами) определяется методом непосредственных измерений и вычисляется по формуле

$$\rho = \frac{4m}{\pi d^2 h}, \quad (12)$$

где m - масса образца, кг;

d, h - диаметр и длина керна, м.

3.3. Методика сейсмического микрорайонирования

Сейсмическое микрорайонирование подходов участков Кузнецовского тоннеля производилось по методике, рекомендованной РСН 60-86 и РСН 65-87. Расчет приращения (уменьшения) сейсмической опасности основания тоннеля относительно исходной балльности производился в зависимости от сейсмических жесткостей грунтов и глубины заложения уровня грунтовых вод.

При этом использовались следующее выражение:

$$\Delta J = \Delta J_C + \Delta J_B + \Delta J_{PEZ} \quad (13)$$

где: ΔJ – суммарное приращение сейсмической интенсивности в баллах относительно исходной (фоновой) балльности, принимаемой для района исследований в соответствии с РСН 60-86;

ΔJ_C – приращение сейсмической интенсивности за счет различия сейсмической жесткости грунтов на изучаемом и эталонном участке;

ΔJ_B – приращение сейсмической интенсивности за счет ухудшения сейсмических свойств грунтов на изучаемом участке при обводнении (водонасыщении);

ΔJ_{PEZ} – приращение сейсмической интенсивности за счет возможного возникновения резонансных явлений при резком различии сейсмических жесткостей в покрывающей и подстилающей толще пород изучаемого разреза (участков с такими условиями в районе тоннельного перехода нет).

$$\Delta I_C = 1,67 \cdot \lg \frac{V_i \rho_i}{V_j \rho_j}, \quad (14)$$

где ΔI_C – приращение или уменьшение сейсмической опасности в баллах по шкале MSK-64;

V_i и V_j – скорости распространения сейсмических волн на исследуемом и эталонном участках соответственно;

ρ_i и ρ_j – плотность грунта на исследуемом и эталонном участках соответственно.

$$\Delta J_B = K e^{-0,04h^2}, \quad (15)$$

где: K – коэффициент, зависящий от литологического состава грунтов;

h – расчетное положение уровня грунтовых вод.

Сейсмическое микрорайонирование трассы Кузнецовского тоннеля производилось по методике, рекомендованной РСН 60-86 и РСН 65-87, а также экспериментальной методике, разработанной в Институте земной коры СО РАН. Расчет приращения (уменьшения) сейсмической опасности основания тоннеля относительно исходной балльности производился в зависимости от сейсмических жесткостей грунтов и глубины заложения тоннеля. При этом использовались выражение (14) а также

$$\Delta I = 1,1 - e^{0,016(30-h)}, \quad (16)$$

где h – глубина заложения тоннеля, м.

3.4. Методика расчета напряженно-деформируемого состояния массива горных пород

Оценка техногенного поля напряжений, формирующегося при прохождении Кузнецовского тоннеля была выполнена путем численного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород методом конечных элементов (МКЭ).

Согласно существующим научным представлениям, тектонические силы, формирующие тектоническую составляющую тензора напряжений, начинают действовать в литосфере на глубине ниже дна долин и на напряженное состояние возвышенностей влияния не оказывают [Турчанинов и др, 1989]. В нагорной части массива действует гравитационное поле напряжений, в котором вертикальные и горизонтальные компоненты тензора напряжений зависят от глубины и плотности горных пород. Начальные напряжения являются функцией одной вертикальной координаты. Горизонтальный компонент напряжений отличается от вертикального на величину бокового распора, по Диннику $K_p = 0,24$ [Кузьмин, Жуков, 2004]. Сдвиговые компоненты приняты равными нулю.

$$\begin{cases} \sigma_z = \rho g(z - z_0) \\ \sigma_x = \frac{\mu}{1 - \mu} \gamma H = K_p \sigma_z, \\ \sigma_{xz} = 0. \end{cases} \quad (17)$$

где σ_z – вертикальное нормальное напряжение, МПа;

σ_x, σ_y – горизонтальные составляющие тензора напряжений, МПа;

γ – вес пород, кг/м³;

H – глубина от поверхности, м;

μ – коэффициент Пуассона.

Расчеты напряженно-деформированного состояния области массива горных пород проводили при следующих граничных условиях: 1) на поверхности первые главные напряжения, действующие в горизонтальной плоскости σ_1 и вторые главные напряжения σ_2 – в вертикальной плоскости задавались равными 0; 2) на глубине $\sigma_2 = 2,98$ МПа, а $\sigma_1 = 0,72$ МПа (при коэффициенте бокового распора 0,24). По вертикали эти компоненты напряжений аппроксимировались прямолинейной зависимостью.

На разных участках профиля учитывались различия в механических свойствах горных пород.

С помощью математического моделирования метода конечных элементов исследовали изменение уровня напряжений в отдельных точках профиля массива и элементах горных конструкций.

Результаты расчетов представлялись в виде изолиний средних нормальных напряжений $\sigma_{cp} = (\sigma_1 + \sigma_2)/2$ и интенсивности касательных напряжений $\tau_{инт} = (\sigma_1 - \sigma_2)/2$.

Далее производился анализ полученных данных, сопоставление напряжений и прочностных свойств горных пород и выделение участков граничных напряжений.

При оценке прочности горных пород наибольшее признание получили критерии хрупкого и сдвигового разрушения [Макаров, 2006]. Хрупкое разрушение обусловлено превышением максимальных прочностных

характеристик пород в массиве, сдвиговое характеризуется превышением касательных напряжений сил сцепления и трения. Устойчивость массива горных пород оценивали по теории максимальных нормальных сжимающих напряжений, в основе которой лежит сопоставление последних с прочностью пород на сжатие с учетом нарушенности массива: $\sigma_{max} \leq K_s \cdot \sigma_s$, где σ_{max} – максимальные напряжения, действующие в массиве, МПа; K_s – коэффициент структурного ослабления; σ_s – предел прочности пород на сжатие, МПа [Машанов, 1985; Катков, 2003].

ГЛАВА 4. ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МАССИВА, ВМЕЩАЮЩЕГО КУЗНЕЦОВСКИЙ ТОННЕЛЬ

4.1. Особенности геологического строения и физико-механические свойства пород Кузнецовского тоннеля

В отличие от других инженерных сооружений тоннели полностью располагаются в горном массиве. Поэтому их конструкции и способы постройки, стоимость и сроки выполнения, эксплуатации, долговечность и надежность определяются в основном геологическими условиями, в которых сооружается тоннель [Храпов и др., 1989]. Поэтому, для исследования необходимо максимально четко определить геологическое строение массива, вмещающего Кузнецовский тоннель.

В параграфе рассматриваются горные породы, их залегание, петрографическая характеристика и их физико-механические свойства. Основные системы разломов, их особенности и трещиноватость будут рассмотрены в следующих параграфах.

Данные о геологическом строении и инженерно-геологических условиях тоннельного перехода ранее были основаны на результатах крупномасштабной геологической съемки 1973 г., проведенной под руководством Б.Ф. Шевченко, на геолого-структурных исследованиях ученых ДВГИ ДВО РАН (д.г.-м.н. В.В. Голозубов, С.А. Касаткин, к.г.-м.н. В.П. Симаненко, к.г.-м.н. А.И. Малиновский) и Объединенного института геологии, геофизики и минералогии СО РАН (к.г.-м.н. В.Г. Владимиров, к.г.-м.н. В.Д. Хомяков и М.Л. Куйбида), проведенных в 2008 году. А также на результатах анализа сложности инженерно-геологических, неотектонических и гидрогеологических условий реконструкции Кузнецовского тоннеля, выполненного учеными ДВГУПС в сотрудничестве с научными организациями Хабаровска в 2006 г. Но отсутствие сведений о бурении существенно снижало достоверность инженерно-геологических изысканий.

Геологическое строение массива представлялось контактом терригенных пород с эффузивами раннемелового возраста (рис. 12).

Инженерно-геологический разрез по оси Кузнецовского тоннеля

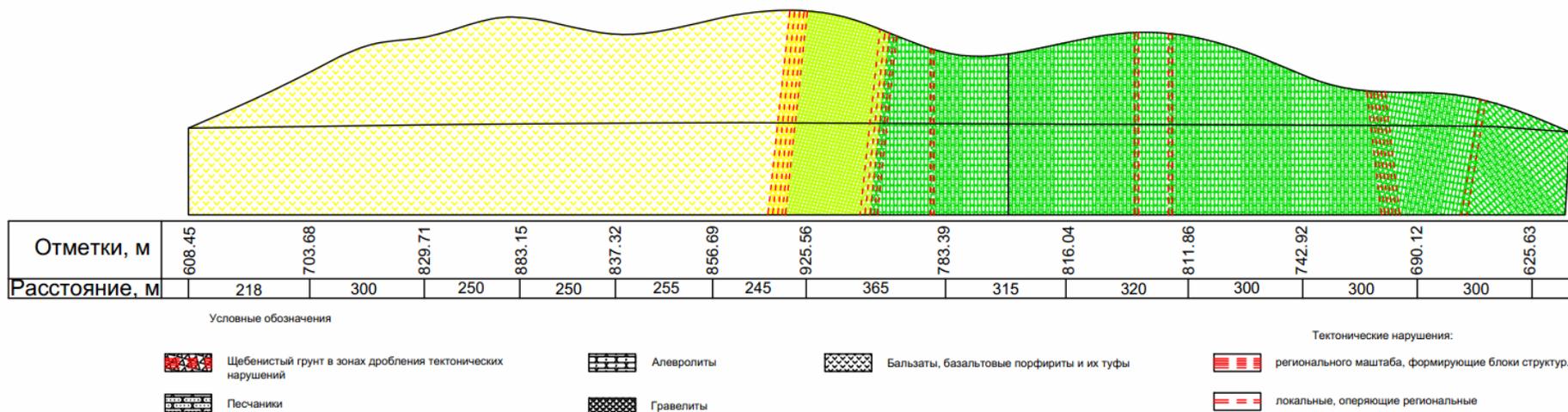


Рис. 12. Схематический инженерно-геологический разрез по оси Кузнецовского тоннеля (проектный этап).

Терригенные породы представлены пиванской, пионерской (ритмичное переслаивание разнозернистых песчаников и алевролитов) и удоминской свитами (гравелиты, конгломераты и песчаники), разделенными разрывными нарушениями. Судя по геологическому разрезу рис. 12, на условном пикете 2000 разрывным нарушением контролируется контакт эффузивов с пиванской свитой, после которого строение массива составляют эффузивы, представленные базальтами, базальтовыми порфиритами и их туфами.

В 2009 году помимо бурения скважин в створе будущего тоннеля, была пройдена транспортно-дренажная штольня. В результате было получено большое количество новых данных о геологическом строении, структурных особенностях массива, гидрогеологии и др.

В результате проходки штольни получен разрез, представленный в виде попикетного описания.

После анализа данных и построения карты и разреза последовал вывод, что геологическое строение Кузнецовского тоннеля представляет собой интенсивно дислоцированное терригенное основание, перекрытое вулканическим чехлом (рис. 13) [Квашук и др., 2010].

В общем, строение терригенного основания характеризуется чередованием пачек ритмично переслаивающихся слоистых алевролитов и параллельно слоистых (редко косослоистых) песчаников с мощностью компонентов от 0.5–3 см до 20–40 см. Изредка в разрезе толщи отмечаются пласты черных массивных алевролитов мощностью до 30 м и мелкозернистых песчаников мощностью до 40 м.

Во флишевых пачках с различной мощностью ритмов соотношение слагающих их компонентов (элементов) неодинаково. В пачках с ритмами от 25 до 50 см, как правило, преобладает песчанистый компонент, мощность которого достигает 40 см, мощность же алевролитов – от 1 см в более тонком флише (с ритмами от 1,0 до 6,0 см) до 10–15 см оба элемента равноценны между собой. Слоистость ритмичная. На размытой поверхности глинистого осадка в его основании залегают волнистослоистые алевролиты (алевропесчаники).

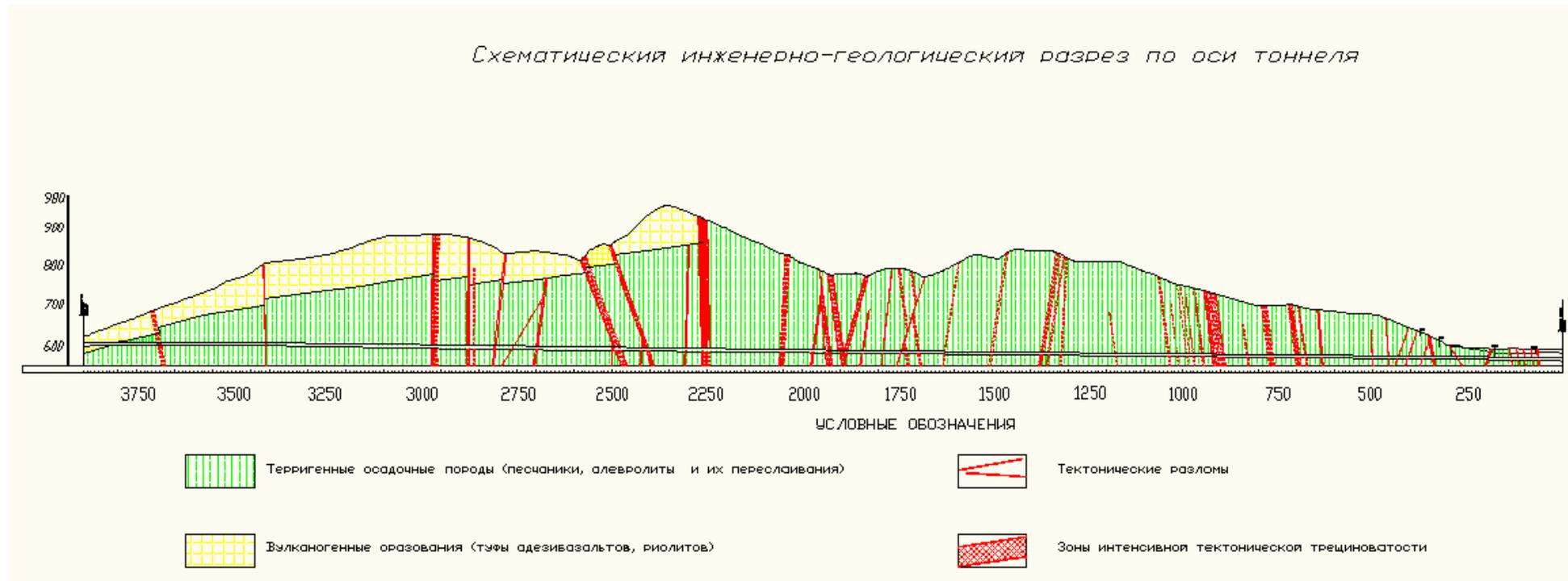


Рис. 13. Схематический инженерно-геологический разрез по оси Кузнецовского тоннеля (по данным материалов проходки транспортно-дренажной штольни).

Вверх количество обломков алевролитовой размерности постепенно увеличивается при уменьшении размерности их от крупно - до мелкоалевритовой. Переход от песчаников к глинистым спайкам достаточно чёткий, между песчаниками и алевролитами постепенный.

Песчаники в ритмах темно-серые, буровато- или зеленовато-серые, чаще мелкозернистые, тонко-ритмично-слоистые, иногда косослоистые, полимиктовые, псаммитовой структуры, массивной текстуры, в различной степени изменены, умеренно катаклазированы и брекчированы. Ритмично слоистая текстура обусловлена присутствием многочисленных тонких (0,5-1,0 мм) прерывистых слоев алевролитов с четкими ограничениями в кровле и постепенными переходами в песчаники в подошве. Обломочный материал присутствует в количестве 97–99 % средней окатанности. В составе обломков отмечаются кварц, плагиоклаз, калишпат, в породе (20–30 %): метасоматиты, микрокварциты, реже – дациты, андезиты, гранитоиды, кремнистые сланцы. Осколки минералов серповидной, рогульчатой формы, витрокласты с обрывистыми ограничениями, замещенные хлоритом и биотитом относятся к примеси (5–10 %) туфогенного материала. Цемент песчаника по типу обволакивания контактовый в основной его массе 1–3 %, по составу вторичный, эпидот-серицит-хлорит-биотитовый.

Алевролиты в ритмах по своим текстурным особенностям близки к песчаникам, но для них более типичны ленточнослоистые текстуры; косослоистые и ритмичнослоистые разности встречаются редко. Обычно темного до чёрного, серовато-тёмного цвета, обусловленного присутствием песчанистого материала. В разрезе толщи они однородны по строению и имеют скорлуповидную отдельность. Для породы характерна алевролитовая структура и массивная текстура. Состав основной массы представлен обломочным материалом (95–97 %) и цементом (3–5 %). Алевролитовый материал (0.01–0,1 мм) содержит небольшую примесь псаммитовых обломков (0,1–0,2 мм). Сложен он полуокатанными, угловатыми, оскольчатыми обломками кварца, плевого шпата, редко графитизированного углистого вещества, а также единичными пластинками серицита, биотита, зерен акцессорных минералов.

Присутствие редких осколков кварца пикообразной и серповидной формы связано с наличием туфогенного материала.

Цемент алевролита первично глинистый в процессе вторичных изменений преобразован в чешуйки серицита с небольшой примесью гидробиотита и хлорита. Более поздние изменения в породе проявились в кристаллизации сульфидов (0,01–0,06 мм), образовании прожилков, гнёзд кварца в ассоциации с цеолитами.

Флишевые пачки чередуются в разрезе с пластами однородных песчаников и алевролитов мощностью от первых метров до нескольких десятков метров.

Среди пород эффузивного типа на площади строительства Кузнецовского тоннеля и прилегающей к нему территории распространены туфы андезитов (андезибазальтов), риолитов и в меньшей степени дацитов. В основании этих вулканических покровов отмечаются в виде линз и горизонтов лавобрекчии.

Туфы андезитов (андезибазальтов). Они представляют собой темно-серую с зеленоватым оттенком породу с характерной псефито-псамитовой и перловой структурой. Основная масса их представлена обломками (65–83 %) вулканических пород (0,1–3,0 мм), значительно реже (до 5 %) вулканического стекла (0,1–0,4 мм) и кристаллокластами (5 %) размером 0,1–0,8 мм. Породы представлены андезитами с микрокстовой структурой интенсивно замещенными серицитом, цеолитами по микролитам плагиоклаза, боулингитом по вулканическому стеклу. Витрокласты выделяются изогнутой формой, обрывистыми концами, флюидальной, миндалекаменной структурой, полностью замещённой гидробиотитом, гидрослюдой, боулингитом. Миндалины сложены кварцем. К кристаллокластам относятся обломки плагиоклаза, темноцветного минерала, как правило, преобразованного в агрегат хлорита, боулингита, эпидота.

Цемент туфа состоит из осколков пород, витрокластов, плагиоклаза темноцветного минерала и тонкого пеплового материала, замещенного хлоритом, боулингитом, гидрослюдой, карбонатом.

Туфы риолитов. Внешне порода имеет преимущественно светлую окраску, по составу и количеству обломочного материала среди них установлены псеmmo-

псефитовые интенсивно изменённые кристалло-витрокластические, витро-кристалло-литокластические, витрокластические, лито-витрокластические их разновидности. Туф риолита состоит из обломков вулканического стекла 10–35 % литокластов от 5–40 % редко до 60–65 % и кристаллокластов до 5–10 %, а также пеплового цемента. Витрокласты характеризуются сильно изогнутой формой, флюидальной, миндалекаменной, перлитовой текстурой. Они полностью замещены альбитом, гидрослюдой, серицитом, гидробиотитом, реже карбонатом и кварцем. К литокластам относятся сферолитовые риолиты, дациты, андезибазальтов, туфогенных и полимиктовых песчаников, альбитовыми метасоматитами, алевролитами. Кристаллокласты сложены плагиоклазом, калишпатом и кварцем.

Цемент туфа состоит из пепловых частиц рогульчатой, серповидной формы и очень тонкого пеплового материала, преобразованного в агрегат альбита с примесью гидробиотита, гидрослюды, серицита с присутствием осколков кварца, полевого шпата.

Туф дацита. Известны витрокластический, витролитокластические, витрокристаллокластические и пепловый туфы и псефито-псаммитовой, псаммо-псефитовой и пепловой структуры, массивной текстуры. Состав пород соответственно различен. Так количество микрокристаллов в них изменяется от 5 до 70 %, витрокластов от 10 до 20%, кристаллокластов от 5 до 10 %. Состоят они в различных соотношениях из обломков вулканических стекол, вмещающих пород (андезиты, песчаники, алевролиты, дациты, пепловые туфы, риолиты). Кристаллокласты сложены плагиоклазом, калишпатом, кварцем. Витрокласты выделяются изогнутой формы, обрывистыми краями, флюидальной текстурой полностью замещенные альбитом, карбонатом, хлоритом, гидрослюдой.

Цемент туфа состоит из тонкого пеплового материала, преобразованного в агрегат гидробиотита, альбита, кварца, хлорита, карбоната, среди которых неравномерно распределены четко оконтуренные пепловые частицы рогульчатой формы.

Исследования элементов залегания основных систем слоистости, произведенные учеными ДВГИ ДВО РАН в 2008 году и автором в последующем, показали что слоистость породы имеет преимущественно крутое падение ($60^\circ - 90^\circ$). Простираение слоистости от субширотного до СЗ ($240^\circ - 300^\circ$).

При направлении тоннеля 320° основное простираение слоистости отклоняется влево от трассы тоннеля на $20^\circ - 60^\circ$. Такие условия являются благоприятными для горно-проходческих работ.

По исследованным данным о проходке штольни и бурения скважин выделены следующие генетические типы горных пород и их ассоциаций: алевролиты, песчаники, переслаивание алевролитов и песчаников, песчаники с прослоями алевролитов, седиментационные брекчии, туфы андезитов, туфоалевролиты.

Анализ данных показал, что массив тоннельного перехода представляет собой интенсивно дислоцированное терригенное основание, перекрытое вулканическим чехлом. Терригенное основание характеризуется чередованием пачек ритмично переслаивающихся слоистых алевролитов и параллельно слоистых (редко косослоистых) песчаников. Изредка в разрезе толщи отмечаются пласты черных массивных алевролитов мощностью до 30 м и мелкозернистых песчаников мощностью до 40 м. Среди пород эффузивного типа на площади строительства Кузнецовского тоннеля и прилегающей к нему территории распространены туфы андезитов (андезибазальтов), риолитов и в меньшей степени дацитов. В основании этих вулканических покровов отмечаются в виде линз и горизонтов лавобрекчии. Слоистость породы имеет преимущественно крутое падение ($60^\circ - 90^\circ$) и простираение от субширотного до СЗ ($260^\circ - 320^\circ$).

4.2. Структурно-тектонические особенности

Скальный массив состоит из двух компонентов: самой породы и ослабленных зон. В однородном скальном массиве, вмещающем тоннель, различаются два вида ослабленных зон: порталные участки и разломные зоны и связанная с ними повышенная тектоническая трещиноватость. Следовательно, для характеристики

скального массива Кузнецовского тоннеля актуально изучение дизъюнктивных нарушений, пересекающих тоннель.

Для изучения разрывов в створе тоннеля использовались следующие данные:

- 1) фрагмент геологической карты листа М-54-ХІV района Кузнецовского тоннеля;
- 2) исполнительная графика по тоннельно-дренажной штольне;
- 3) дешифрованные космоснимки района;
- 4) структурно-кинематический анализ геологических комплексов в створе Кузнецовского тоннеля, проведенных учеными ДВГИ ДВО РАН.

Исследование заключалось в определении элементов залегания тектонических зон и их характеристике. На геологическую карту были нанесены разломные зоны, дешифрованные на космоснимке и ось тоннеля с намеченными зонами тектонической трещиноватости. Таким образом, определялось уточненное положение и элементы залегания разломной зоны.

Данные проходки штольни показывают, что толща тоннеля разбита множеством разломов различной мощности и ориентировки [Злобин и др., 2011, Фомин и др., 2013]. Ниже приведены характеристики наиболее крупных тектонических зон.

Первая разломная зона мощностью 23 метра находится в интервале 184–207 м по оси тоннеля (В-СВ). Породы в зоне сильно трещиноватые, местами раздроблены, средней и слабой устойчивости. Трещины различных систем через 0.2–0.5 м, трещины послойного кливажа через 0.15–0.25 м. Наблюдаются отслоения и обрушение отдельных кусков породы. Водопритоки в зоне составили 11.05 м³/ч.

Следующая разломная зона мощностью 11 м пересекает ось тоннеля в интервале 342–371 м. Породы трещиноватая и сильно трещиноватая, средней устойчивости. В зоне наблюдается сильное смятие пород в мелкие складки.

Далее в интервале 539–575 м при проходке тоннеля встречена зона тектонической трещиноватости мощностью 25 м. Породы сильно трещиноватые

до раздробленных, слабоустойчивые, послойный кливаж, многочисленные зеркала скольжения. По трещинам развиты сульфиды и кальцит.

В интервале 674–691 м тоннель пересекает разломную зону мощностью 17 м. Породы неравномерно ороговикованы, смяты в мелкие складки и подроблены в тектонических зонах, сильно трещиноватые, слабой устойчивости. Водоприитоки составили 1.3 м³/ч.

Следующая крупная разломная зона находится в интервале 887–950 м. Породы от слабой до сильной степени трещиноватости, устойчивые и средней степени устойчивости. В интервале 946–947 м произошел вывал породы. Густая сеть трещин залечена кальцитом и кварцем с сульфидами. Зона сопровождается повышенным водопритоком до 12.6 м³/ч.

В интервале 1350–1367 тоннель пересекает зону тектонической трещиноватости мощностью 17 м. Порода плейчатая, часто со следами межпластового скольжения, прожилками кварца и кальцита с сульфидами железа, свинца, реже молибдена, связанные в основном с ороговикованными алевролитами. Отмечается мелкая дисгармоничная складчатость. В интервалах 1330–1335 м, 1347–1355 м, 1444–1450 м, 1493.6–1497.2 м зоны повышенной трещиноватости с вывалами крупных обломков породы по центру забоя. Водоприитоки составили 2.4 м³/ч.

Далее в интервале 1871–1932 м наблюдалась разломная зона мощностью 24 м на пересечении двух взаимно перпендикулярных разломов С-В и оперяющего простирания. Порода сильно трещиноватая до раздробленной, неустойчивая и слабой устойчивости. Неравномерно ороговикована, с многочисленными прожилками и гнездами кварца, кальцита и сульфидов. В интервале 1911–1932 м образовался купол по своду до 1.5 м.

В интервале 2246–2286 м тоннель пересекает наиболее крупную разломную зону мощностью 40 м, находящуюся на контакте терригенных пород и эффузивов. Породы интенсивно трещиноватые до раздробленных, слабой устойчивости. Трещины заполнены глиной трения. В интервалах 2246–2247 м и 2255.6–2256.4

м тектонические нарушения выполнены глиной трения с обломками вмещающих пород.

Девятый разлом мощностью 19 м зафиксирован в интервале 2485–2506 м по оси тоннеля. Черные углеродистые алевролиты с прослоями мелко-тонкозернистых песчаников неравномерно ороговикованы, содержат многочисленные кварц-карбонатные прожилки с сульфидной минерализацией по трещинам. В интервалах 2487 и 2497 м зоны окварцевания с интенсивным кварцевым прожилкованием. В интервалах 2485,5 – 2499 м породы интенсивно трещиноваты с обильным водопритокom 15.1 м³/ч.

Следующая разломная зона мощностью 12 м пересекает ось тоннеля в интервале 2859–2884 м. Породы сильно трещиноватые, местами раздроблены, средней и слабой устойчивости, с тонкой вкрапленностью пирита, редкими кальцитовыми прожилками, пиритизацией по трещинам.

Далее в интервале 2952–2969 м отмечена зона тектонической трещиноватости мощностью 12 м. Зона представлена брекчиями по песчаникам и алевролитам. Породы сильно трещиноватые до раздробленных. Имеются многочисленные швы, заполненные глинисто-щебенистым заполнителем.

В интервале 3662–3679 м разломная зона мощностью 17 м пересекает створ тоннеля. Породы сильно трещиноватые, перемятые, средней устойчивости, присутствуют многочисленные зеркала скольжения и мелкая складчатость.

Последняя крупная разломная зона мощностью 28 м находится в интервале 3853–3881 м. Зона представлена эффузивами – темно-серыми до черных андезит-базальтовыми порфиритами с прослоями их лавобрекчий и миндалекаменными порфиритами. Отмечаются прослойки светло-зеленых андезитов и дайки светло-серых риолитов в интервале 2869,7–3870,9 мощностью около 1 м. Порода сильно трещиноватая, местами до раздробленной, неустойчивая.

В створе тоннеля распространены также разломные зоны меньших порядков: интервалы 342–371 м, 674–703 м, 1330–1356 м, 2485–2506 м, 2859–2884 м, 2962–2979 м, 3662–3679 м. Все зоны объединяет повышенная трещиноватость, слабая

устойчивость породы, обильные водопритоки, вывалы и интенсивное окварцевание и сульфидная минерализация.

В отличие от преобладающих на Сихотэ-Алине протяженных и крупных дизъюнктивов северо-восточного направления на рассматриваемой площади наиболее развиты субширотные северо-западные разломы; северо-восточные разломы отмечаются в юго-восточной части района.

С использованием данных об элементах залегания разломов, автором была создана 3–D модель массива, вмещающего тоннель, с нанесенными разломами [Злобин и др., 2011] (рис. 14).

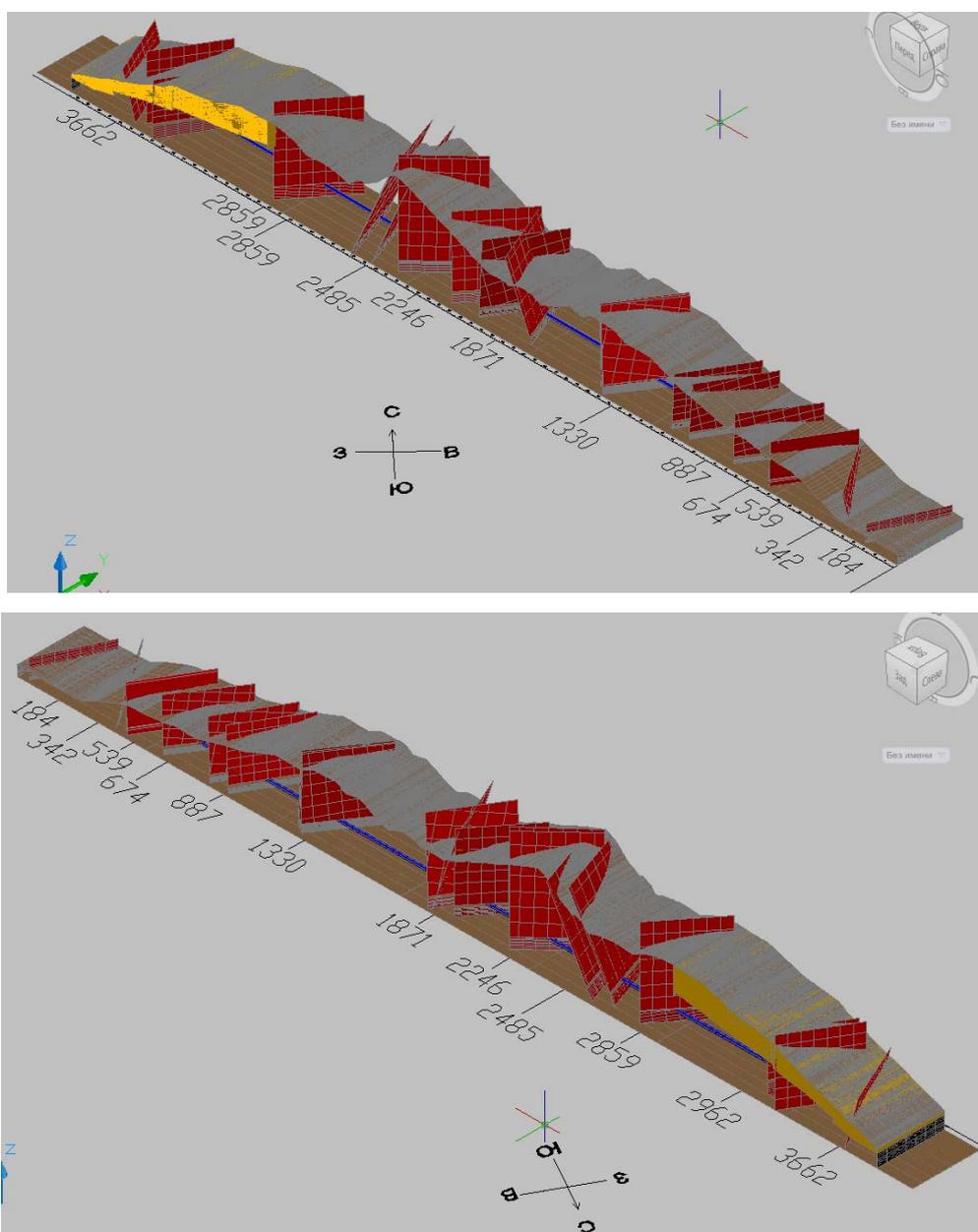


Рис. 14. 3–D модель массива, вмещающего Кузнецовский тоннель, с нанесенными разломами (сверху – северо-восточная экспозиция, снизу – юго-западная экспозиция).

Анализ полученных данных показал, что всего створ тоннеля пересекают 17 разломных зон [Злобин, Квашук, 2011]. Самая крупная зона (интервал 2246–2286 м) мощностью около 40 м. Суммарная мощность составляет 334 м, что равно 8,5 % от длины тоннеля.

Отмечается закономерное изменение физико-механических свойств и устойчивости горных пород при переходе от монолитной породы к тектонически трещиноватой. Например, предел прочности на сжатие песчаника, не ослабленного трещинами, составляет 160 МПа, а трещиноватого 45 МПа. Исходя из того, что в некоторых зонах горная порода ослаблена трещинами до раздробленного состояния, различия в физико-механических свойствах могут достигать десятков раз. Соответственно изменяется и устойчивость породы с устойчивой и средней устойчивости до слабой устойчивости и неустойчивой.

Вывалы горных пород отмечались в интервалах 184–207 м, 1330–1335 м, 1347–1355 м, 1444–1450 м, 1493.6–1497.2 м, 1911–1932 м. Пространственно вывалы происходили по центру забоя, на стенках и в кровле выработки. Самый крупный вывал, общим объемом около 25 м³ отмечен в интервале 1911–1932 м в кровле выработки.

Для большинства зон тектонической трещиноватости характерно присутствие сульфидной минерализации и карбонатизации. Сульфиды представлены зернами и гнездами пирита, галенита, сфалерита, местами образующая гнезда массивной руды размером до 5 см. Также отмечены многочисленные зоны интенсивного кварцевого прожилкования (интервалы 887–950 м, 1350–1367 м, 1871–1932 м, 2485–2506 м). В интервалах 2246–2286 м, 2952–2969 м тектонические зоны переработки пород. Трещины и швы в этих зонах залечены глиной трения. Некоторые из них выполнены седиментационными брекчиями или глиной трения с обломками горной породы (интервалы 2255.6–2256.4 м, 2952–2969 м).

Водопритоки в зонах, в целом, небольшие. Местами обильные, доходят до 55 м³/ч (интервал 2485–2489 м). После установки обделки отмечались течи из межтубинговых швов и технологических отверстий.

Исследования являются частью комплексного изучения геологического строения и позволяют наиболее точно определить структурные особенности массива. Эти данные являются исходными для изучения сейсмичности, напряженно-деформируемого состояния, возможных водопритоков. Позволяют судить о влиянии структурных нарушений на безопасность эксплуатации тоннельного сооружения.

4.3. Характеристика трещиноватости массива горных пород

Особое внимание ученых в области инженерной геологии привлекла трещиноватость горных пород и ее значительная роль в формировании инженерно-геологических условий строительства и эксплуатации сооружений. Этими вопросами в разное время занимались крупные ученые России и Зарубежья. Еще в 1924 г. М.И. Евдокимов-Рокотовский отмечал: «Наиболее существенной, неблагоприятной для туннельных работ особенностью горных пород приходится считать только их трещиноватость». Позже этим вопросом занимались известные ученые: М.В. Рац, Г.А. Голодковская, В. Д. Ломтадзе и многие другие. Большой вклад в изучение вопроса влияния трещиноватости на подземные конструкции внес Е.М. Пашкин. В его работах охарактеризовано влияние трещиноватости на устойчивость пород, определены основные типы зон разгрузки и вывалов, основные типы трещин, влияющих на характеристики вывалов. На современном этапе, вопросы трещиноватости и ее влияния на горный массив были подробно изучены в ходе структурных исследований трасс тоннелей Адлер – «Альпика-Сервис» коллективом ученых НИПИ «Ленметрогипротранс» [Штыров, Арнаутов, 2011].

Трещиноватость горных пород создает неоднородность среды и влияет на множество факторов – прочностные свойства горных пород, характер и объем водопритоков, размеры вывалов, выветривание и др.

Сложностью в оценке трещиноватости при строительстве Кузнецовского тоннеля является способ проходки, при котором невозможно измерить и описать нарушения непосредственно в забое. Также в связи с тем, что район тоннеля практически полностью перекрыт чехлом четвертичных отложений, оценка

трещиноватости велась по немногочисленным обнажениям. Поэтому было выполнено комплексное исследование трещиноватости, состоящее в изучении трещин на обнажениях, на образцах пород из забоя и керна, а также микротрещиноватости в шлифе.

Целью работы является оценка основных характеристик и распространения трещиноватости в массиве, вмещающем Кузнецовский тоннель, а также влияние на горные породы.

Для выполнения поставленной цели был выполнен комплекс мероприятий включающий: замер элементов залегания трещин и оценка количественные характеристики трещиноватости на обнажениях по трассе тоннеля. Обработать полученный материал и построить диаграммы и розы трещиноватости. Определить влияние трещиноватости на прочностные свойства горных пород.

Результаты полевых исследований. В 2008 году на участке Кузнецовского тоннеля были пробурены скважины по трассе тоннеля, сооружена выемка западного портала и дорога для выполнения буровых работ. В результате были созданы новые искусственные обнажения непосредственно по трассе тоннеля, на которых автором были выполнены замеры трещиноватости (рис. 15).

Задачей исследования было определение качественных и количественных показателей трещиноватости массива горных пород.

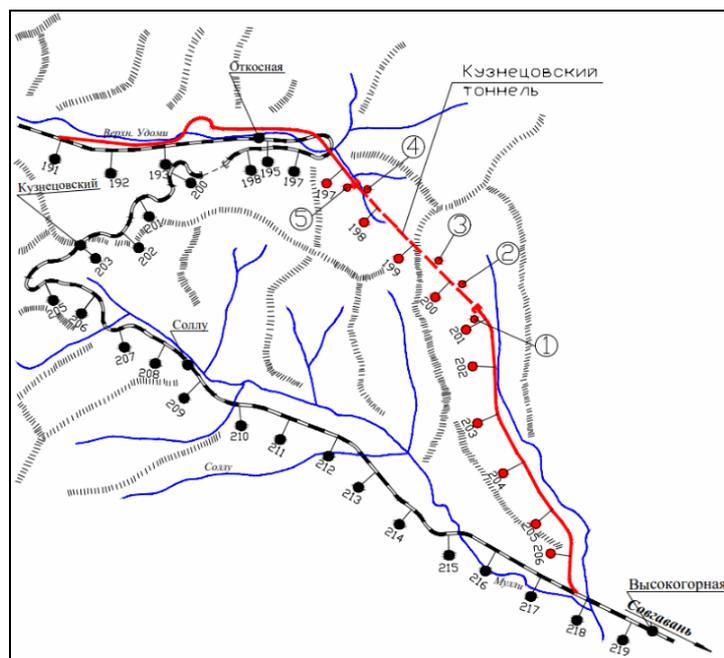


Рис. 15. Схема расположения участков замеров трещиноватости.

1 – восточный портал; 2 – обнажение в районе скважины № 3; 3 – обнажение в районе скважины № 5; 4 – обнажение в районе скважины № 10; 5 – западный портал.

Участок Восточного портала. Участок восточного портала представляет собой выемку протяженностью около 200 м, сложенную интенсивно дислоцированными терригенными породами мелового возраста, с преобладанием темно-серых алевролитов.



Рис. 16. Фото выемки Восточного портала.

На диаграмме преобладают: наклонные трещины широтного простирания (А – аз.пр. 170–180°, аз.пад. 260°–270°, уг.пад. 50°–70°), крутонаклонные северо-восточного простирания (Б – аз.пр. 75°–80°, аз.пад. 165°–170°, уг.пад. 80°–90°; В –

аз.пр. 40° – 50° , аз.пад. 310° – 320°) и наклонные трещины северо-западного простирания (Г – аз.пр. 320° – 330° , аз.пад. 230° – 240° , уг.пад. 40° – 50°).



Рис. 17. Фото обнажения у Восточного портала.

Трещины прямолинейные с шагом 5–30 см. Большинство трещин открытые, зияющие с шириной раскрытия от 0.5 до 25 см, нередко заполненные песчано-глинистым и глинисто-дресвяным материалом.

По степени трещиноватости породы относятся к сильнотрещиноватым. Коэффициент трещинной пустотности равен 7,08 %.

Западный портал представляет собой горную выработку, выполненную уступами, необходимыми для защиты портала от гравитационных процессов. Это условие позволило набрать большое количество замеров. Автором были измерены элементы залегания и количественные показатели.

Геологическое строение участка портала представлено нижнемеловыми вулканическими горными породами (туфами андезибазальтов, риолитов).



Рис. 18. Фото выемки Западного портала.

На фоне общей хаотичности, выделяются системы трещин: крутые трещины преимущественно широтного и северо-восточного простирания падением на юго-юго-восток и север (А – аз.пр. 85° – 90° , аз. пад. 355° – 0° , уг.пад. 70° – 85° ; Е – аз.пр. 80° – 85° , аз. пад. 170° – 175° , уг.пад. 60° – 80° ; Е1 – аз.пр. 50° – 60° , аз. пад. 140° – 150° , уг.пад. 60° – 70°), системы северо-западных нарушений падением на юго-запад и северо-восток (Б – аз.пр. 310° – 320° , аз. пад. 40° – 50° , уг.пад. 60° – 70° ; Д – аз.пр. 310° – 320° , аз. пад. 220° – 230° , уг.пад. 70° – 80° ; Ж – аз.пр. 320° – 330° , аз. пад. 240° – 250° , уг.пад. 20° – 30°), северо-восточные системы трещин с западным и юго-восточным падением (В – аз.пр. 30° – 40° , аз. пад. 340° – 350° , уг.пад. 60° – 70° ; Г – аз.пр. 20° – 30° , аз. пад. 110° – 120° , уг.пад. 70° – 80°);).

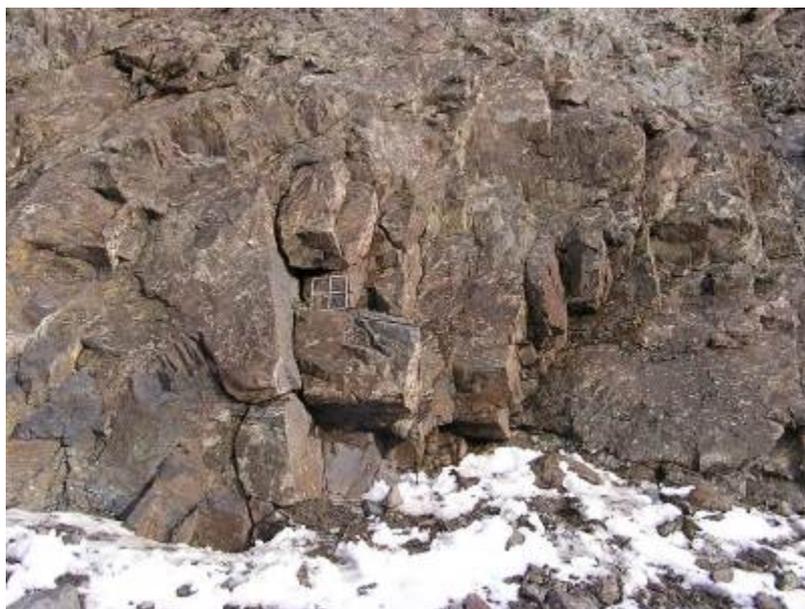


Рис. 19. Фото обнажения в районе Западного портала.

Породы на участке интенсивно раздроблены, перемяты. Коэффициент трещиной пустотности равен 3,15%. Трещины одиночные и системные, неравномерно распространены в массиве, прерывистые, длиной от 5 до 120 см, открытые, шириной от 0,25 до 5 см. Поверхности плоскостей трещин неровные, бугристые, сухие. Некоторые заполнены песчано-глинистым заполнителем, предполагаемо гравитационного происхождения, и кварц-сульфидными прожилками. Наблюдается зона дробления мощностью около 25 см, заполненные глиной трения, с крутым падением около 80° , СЗ простиранием ($300\text{--}310^\circ$).

Обнажения в районе скважин № 3 и 5. Сложностью в оценке трещиноватости на участках служила небольшая площадь обнажений, пригодных для измерений. Вследствие этого, не удалось набрать достаточное количество данных для построения диаграмм трещиноватости. Поэтому была построена сводная диаграмма трещиноватости на оба участка (рис. 20).

Диаграммы трещиноватости (сетка Вульфа, нижняя полусфера) всех участков представлена на рисунке 21.

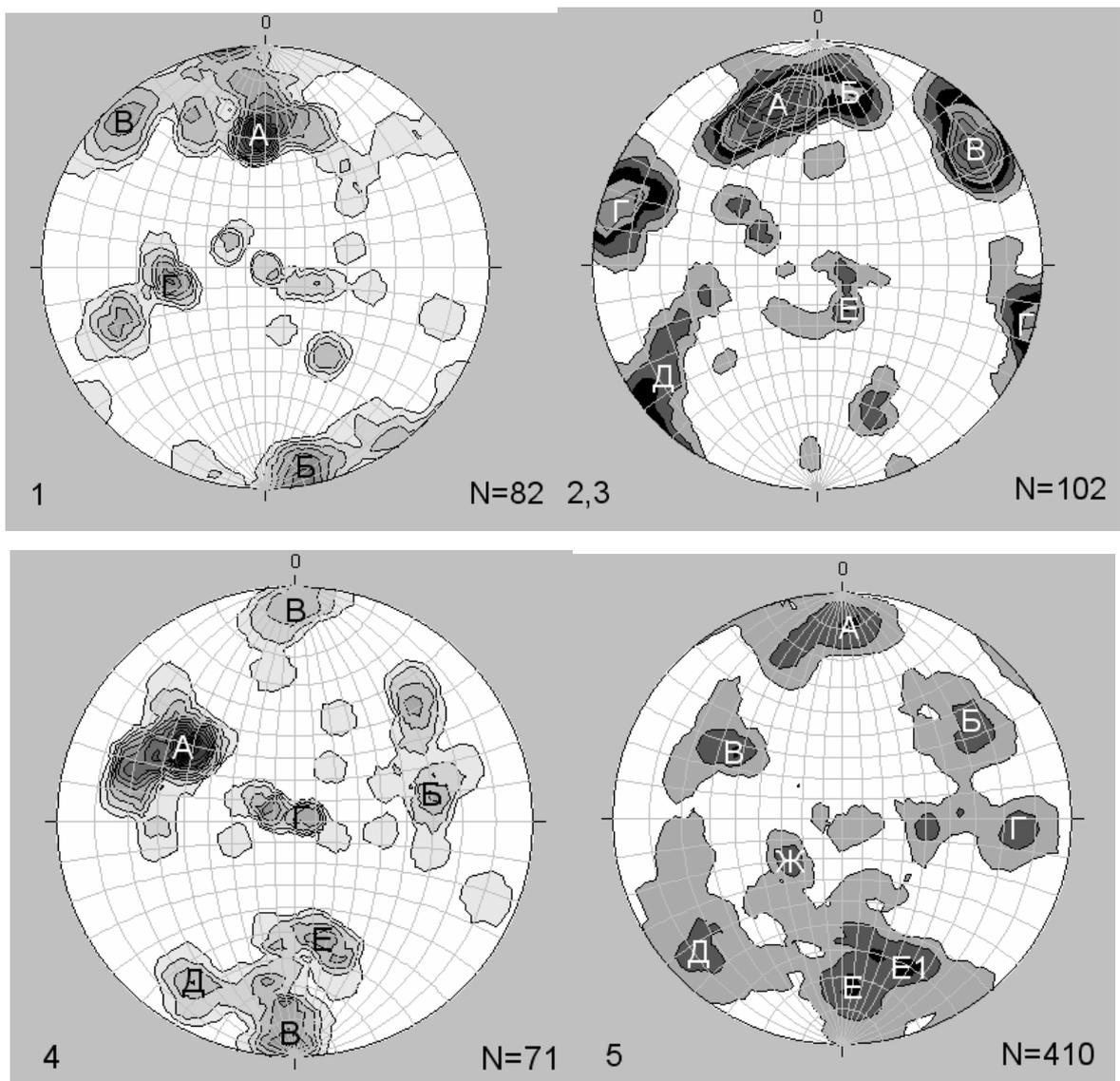


Рис. 20. Сводная диаграмма трещиноватости. 1 – Участок Восточного портала; 2 – Участок Западного портала; 3 – скважина № 3; 4 – скважина № 5; 5 – скважина № 10.

Диаграмма распределения трещиноватости демонстрирует преобладание крутонаклонных северо-восточных (А – аз.пр. 70° – 80° , аз.пад. 340° – 350° , уг.пад. 50° – 70° ; Г – аз.пр. 20° – 30° , аз.пад. 110° – 120° , уг.пад. 80° – 90°) и северо-западных (Б – аз.пр. 280° – 290° , аз.пад. 10° – 20° , уг.пад. 60° – 80° ; В – аз.пр. 320° – 330° , аз.пад. 50° – 60° , уг.пад. 80° – 90° ; Д – аз.пр. 330° – 340° , аз.пад. 240° – 250° , уг.пад. 80° – 90°) трещин. Подчиненными являются системы наклонных нарушений северо-восточного простирания (Е – аз.пр. 20° – 30° , аз.пад. 110° – 120° , уг.пад. 20° – 30°).



Рис. 21. Фото обнажений в районе скважин (слева – скв. № 3, справа – скв. № 5).

Коэффициент трещинной пустотности равен 5.52 % (скважина № 3) и 6.11 % (скважина № 5), что соответствует сильнотрещиноватым породам (Нейштадт). Трещины равномерно распространены в массиве, длиной от 10 до 25 см, открытые, шириной раскрытия до 2 см, некоторые заполнены песчано-глинистым материалом. Плоскости трещин увлажненные, по некоторым сочится вода.

В районе скважины № 10 дорогой вскрыты эффузивные породы, представленные туфами андезибазальтов и риолитами. Пространственно преобладают системы наклонных северо-восточных (А – аз.пр. 30°–40°, аз.пад. 300°–310°, уг.пад. 40°–50°; Е – аз.пр. 60°–70°, аз.пад. 150°–160°, уг.пад. 40°–50°) и северо-западных нарушений (Б – аз.пр. 340°–350°, аз.пад. 70°–80°, уг.пад. 60°–70°; Д – аз.пр. 300°–310°, аз.пад. 210°–220°, уг.пад. 70°–80°), крутых широтных (В – аз.пад. 180°, уг.пад. 80°–90°) трещин. Менее развита система пологих близширотных нарушений (Г – аз.пад. 0°–10°, уг.пад. 0°–10°).



Рис. 22. Фото обнажения в районе скважины 10.

Породы интенсивно раздроблены и выветрелы. Коэффициент трещинной пустотности равен 7,02 %, что соответствует сильнотрещиноватым породам (по Нейштадт). Трещины прерывистые, длиной от 5 до 40 см, в большинстве открытые, шириной до 4 см, некоторые заполнены песчано-глинистым материалом.

В массиве горных пород Кузнецовского тоннеля выделяются основные системы трещин – это нарушения преимущественно северо-восточного и северо-западного простирания и крутого падения. Ориентировка основных систем практически совпадает с направлениями разрывов, пересекающих трассу тоннеля. Это можно проследить на рисунке 23, где показана схема направлений разрывных нарушений и диаграммы трещиноватости соответствующие участкам замеров. Неточность совпадения ориентировок связана с погрешностью при измерениях и схематическим направлениям дизъюнктивов. Исходя из этого, можно сделать вывод, что трещины основных систем можно трактовать как тектонические, и трещиноватость массива в первую очередь обусловлена разрывной тектоникой района строительства [Квашук и др, 2011а]. Вторичное значение при этом имеют системы экзогенной трещиноватости и оперяющие трещины.

Существенное влияние в формировании вывалов в рабочее пространство подземных сооружений оказывает неблагоприятная ориентировка трещин. Несколько протяженных выдержанных трещин различных систем могут являться причиной крупных обрушений даже в массивах с высокой прочностью пород.

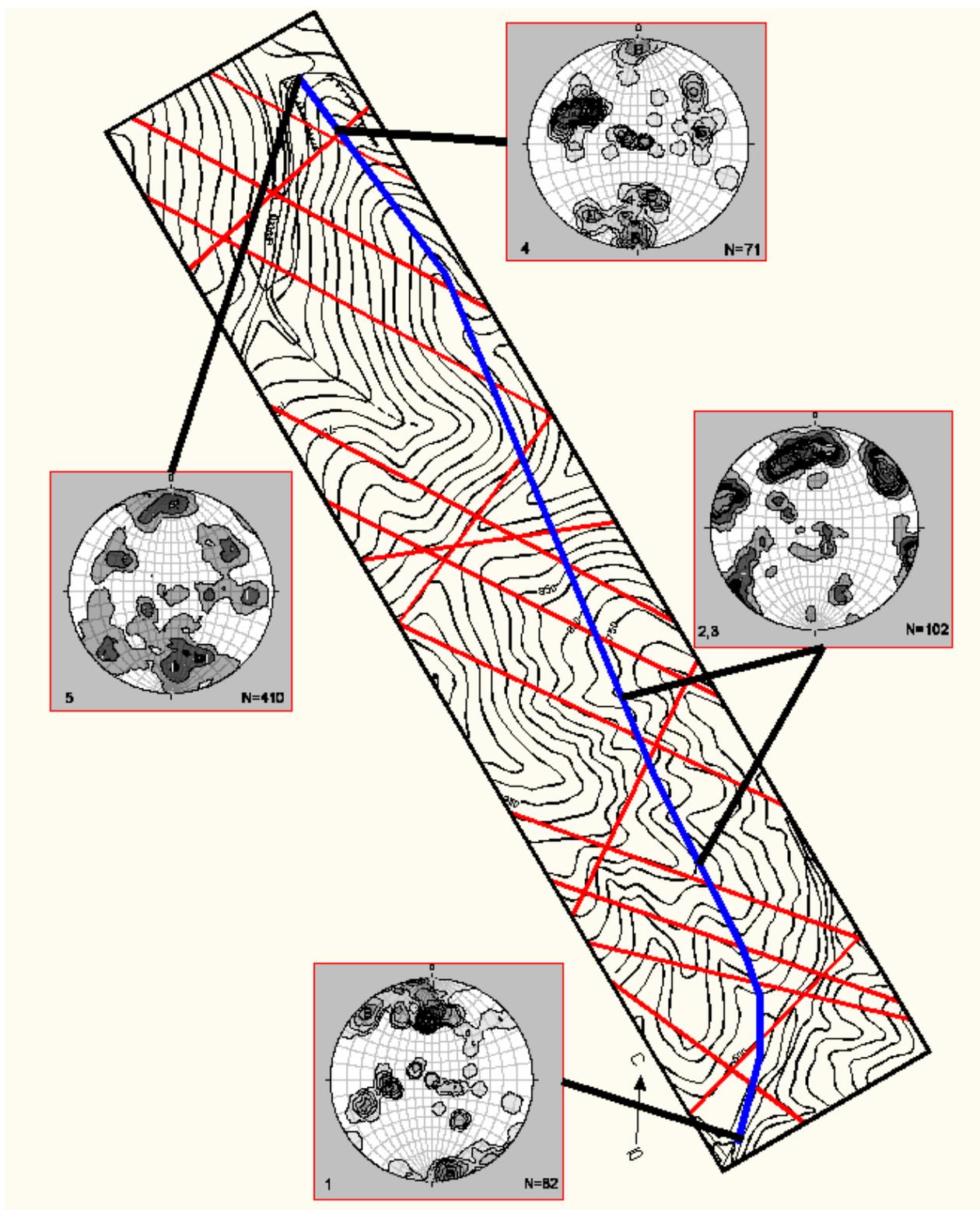


Рис. 23. Схема направления разрывов и диаграммы трещиноватости.

Автором была выполнена оценка формирования неустойчивых блоков, сформированных трещинами систем, изученных при полевых исследованиях. При этом рассчитывались различные комбинации 3 систем, взаимопересечение которых формирует блоки в кровле и стенках выработки, способные к обрушению.

Было учтено, что трасса тоннеля в плане имеет криволинейную форму, и было выделено 3 участка – юго-восточная часть тоннеля (азимут простирания трассы – 14), центральная часть тоннеля (азимут простирания трассы – 323), северо-западная часть тоннеля (азимут простирания – 314). Для каждого участка использовались ориентировки систем трещин, зафиксированные на обнажениях в непосредственной близости от них. Результаты представлены в табл. 4, 5, 6.

Таблица 4

Результаты оценки формирования неустойчивых блоков по системам трещин. Центральная часть тоннеля

Комбинация	Трещина_1	Трещина_2	Трещина_3	Объем блока, м³
1	Система Б	Система Г	Система Д	493.617
2	Система Б	Система В	Система Д	156.25
3	Система Г	Система Д	Система Е	113.578
4	Система А	Система Б	Система Д	44.379
5	Система В	Система Д	Система Е	4.673
6	Система А	Система Д	Система Е	1.924
7	Система А	Система Г	Система Е	1.041
8	Система В	Система Г	Система Е	0.337
9	Система Б	Система В	Система Е	0.068
10	Система А	Система Б	Система Е	0.031
11	Система Б	Система Д	Система Е	0.028
12	Система А	Система Б	Система Г	0.002
13	Система А	Система Б	Система В	0.001

Таблица 5

Результаты оценки формирования неустойчивых блоков по системам трещин. Юго-восточная часть тоннеля

Комбинация	Трещина_1	Трещина_2	Трещина_3	Объем блока, м³
1	Система А	Система В	Система Г	4.675
2	Система Б	Система В	Система Г	2.134

Результаты оценки формирования неустойчивых блоков по системам трещин. Северо-западная часть тоннеля

Комбинация	Трещина_1	Трещина_2	Трещина_3	Объем блока, м ³
1	Система А	Система Г	Система Д	102.613
2	Система В	Система Г	Система Д	33.303
3	Система Б	Система Д	Система Е	32.315
4	Система Б	Система Г	Система Д	32.123
5	Система А	Система Б	Система Д	16.12
6	Система Б	Система В	Система Д	15.574
7	Система А	Система Д	Система Е	11.925
8	Система В	Система Д	Система Е	2.544
9	Система Б	Система В	Система Е	0.481
10	Система В	Система Г	Система Е	0.043
11	Система А	Система Б	Система Е	0.024
12	Система А	Система Г	Система Е	0.014
13	Система А	Система В	Система Е	0.005
14	Система Б	Система В	Система Г	0.002
15	Система А	Система В	Система Г	0.001

Как видно из результатов, существующие в изучаемом горном массиве трещины способны к формированию обрушений объемом около 540 м³ массой порядка 1400 т. Наиболее крупные и опасные вывалы прогнозируются в кровле выработки и реже в стенках. Учитывая наличие протяженных разрывных нарушений и трещин, а также состояние стенок трещин в особенности в приразломных зонах – существует вероятность образования крупных неустойчивых блоков.

Рассчитанные значения коэффициента трещинной пустотности свидетельствуют о высокой степени трещиноватости массива [Квашук и др., 2011г]. Следовательно, степень нарушенности является определяющим фактором в физико-механических свойствах горных пород массива.

В терригенных породах, слагающих большую часть массива, развиты открытые трещины, иногда зияющие, с раскрытием до 100 мм. В совокупности с высокой степенью трещиноватости, это приводит к увеличению проницаемости и соответственно более активному доступу агентов выветривания вглубь массива и ускорению процесса изменения горных пород.

Исследование микротрещиноватости горных пород

При полевых и лабораторных исследованиях горных пород, автор столкнулся с проблемой широкого распространения скрытой или микротрещиноватости. На этапе определения физико-механических свойств внешне монолитные образцы разрушались при их изготовлении или при приложении нагрузки. Распространение микротрещиноватости также было отмечено геологами, документирующими буровые работы.

В связи с этим, весьма актуально определение степени развития и характеристики микротрещиноватости пород тоннеля. В целях данного исследования автором были отобраны образцы из забоя, изготовлены прозрачные шлифы и исследованы их цифровые изображения в 140-кратном увеличении.

Результатами исследования являются данные о количественных и качественных характеристиках микротрещиноватости, изученные на 50 цифровых изображениях шлифов. При дальнейшем анализе автором не учитывались параметры изображений, на которых присутствуют трещины раскрытостью более 100 мкм. Результаты представлены в прил. 1.

Анализ показал, что 32,5 % изученных образцов имеют высокую и очень высокую степень трещиноватости, 28,5 % – среднетрещиноватые, остальные слаботрещиноватые или не имеют микротрещин. Среднее значение трещинной пористости равно 4,43%, что соответствует верхней границе среднетрещиноватых пород, трещинной проницаемости – $0,35 \cdot 10^{-3}$ мкм², объемной плотности трещин – 0,018 1/мкм. Присутствуют образцы исключительно сильнотрещиноватые со значениями трещинной пористости 21,7 и 20,2 %.

Для большинства образцов характерно развитие густой сети микротрещин, достигающих в размерах 10 % площади изображения шлифа. Микротрещины объединяются в сетчатые зоны и распространяются по площади шлифа или создают более крупную протяженную извилистую трещину (рис. 24 А), отмечается концентрация мелких извилистых микротрещин, образующих зону, которая в дальнейшем перетекает в пустотное пространство. На рис. 24 Б, в однородной массе песчаника четко выделяется зона повышенной

микротрещиноватости линзовидной формы. Также распространены относительно крупные, прямолинейные, четко выраженные нарушения, пересекающие изображения шлифа (рис. 24 Г и 24 Е). Для песчаников характерно развитие множества тонких волокнистых микротрещин, распространенных в основном в цементе песчаника. Для алевролитов – большое количество тонких прерывистых, протяженных извилистых и крупных, прямолинейных, четко выраженных трещин (рис. 24 Д). Отмечались зоны повышенной микротрещиноватости на контакте песчаника и алевролита, представленные крупными неровными и прямолинейными трещинами на границе пород и множеством тонких волокнистых ответвлений (рис. 25 4).

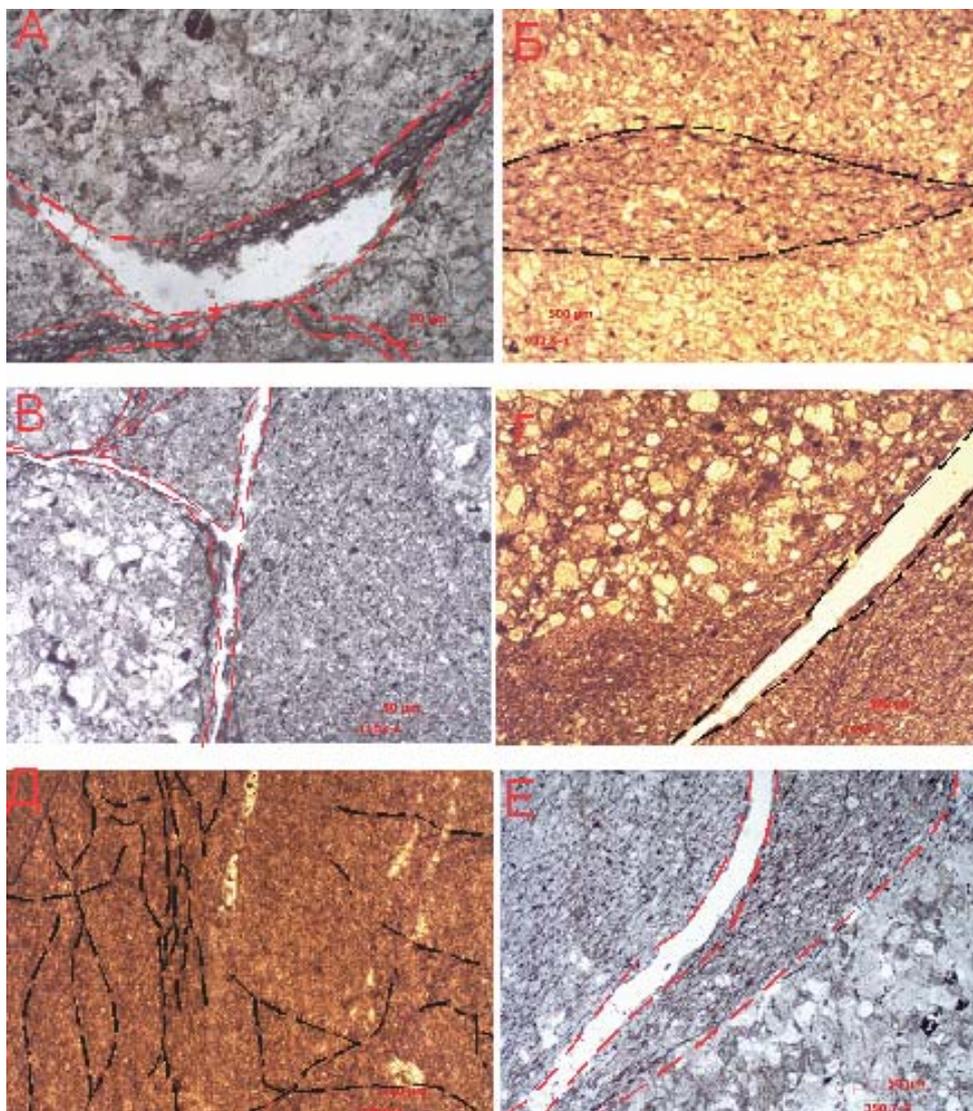


Рис. 24. Изображения характерной микротрещиноватости горных пород.

Присутствуют образцы с незначительной степенью микротрещиноватости и с ее отсутствием. На некоторых изображениях отмечается неоднородность распространения трещиноватости, при которой часть площади подвержена множественным нарушениям, а другая без видимых трещин.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, в массиве горных пород Кузнецовского тоннеля широко развита микротрещиноватость. В большинстве изученных образцов присутствовали микронарушения. Преобладают породы с высокой и очень высокой степенью микротрещиноватости. Характер микронарушений аналогичен макроуровню, что возможно говорит об образовании микротрещин посредством тектонических процессов.

В ходе исследований выделены типичные виды микротрещин. Для песчаника – это мелкие, извилистые микротрещины, распространенные, в основном, в цементе песчаника, объединяющиеся в густую сетчатую зону или в более крупную извилистую микротрещину корневидной формы; для алевролита – четко выраженные крупные (толщиной 70–90 мкм) прямолинейные протяженные или тонкие (толщиной 20–30 мкм) извилистые протяженные микротрещины. Данный вид нарушений связан, по всей видимости, с характером деформации горных пород (песчаник – хрупкое разрушение, для алевролита – пластичное).

Микротрещины в горных породах играют роль опережающих в появлении макротрещин. Изменение напряженно-деформируемого состояния вследствие строительства тоннеля или воздействие агентов выветривания может привести к образованию новых и развитию существующих трещин.

Микротрещиноватость является скрытым фактором снижения показателей физико-механических свойств, поэтому при исследованиях горных массивов необходимо детально оценивать трещиноватость на всех уровнях и ее влияние на горные породы, слагающие массив.

Помимо характеристики трещиноватости на обнажениях, изучалась степень нарушенности породы из забоя. Во время проходки штольни, при режимных наблюдениях была проведена классификация горных пород по степени

трещиноватости (сильнотрещиноватые, трещиноватые, слаботрещиноватые) При этом, оценивалось наличие трещин в образцах, размер выходящих обломков и скорость проходки. Автором были проанализированы данные по всей длине проходки и построен график изменения степени трещиноватости по длине тоннеля (рисунок 25).

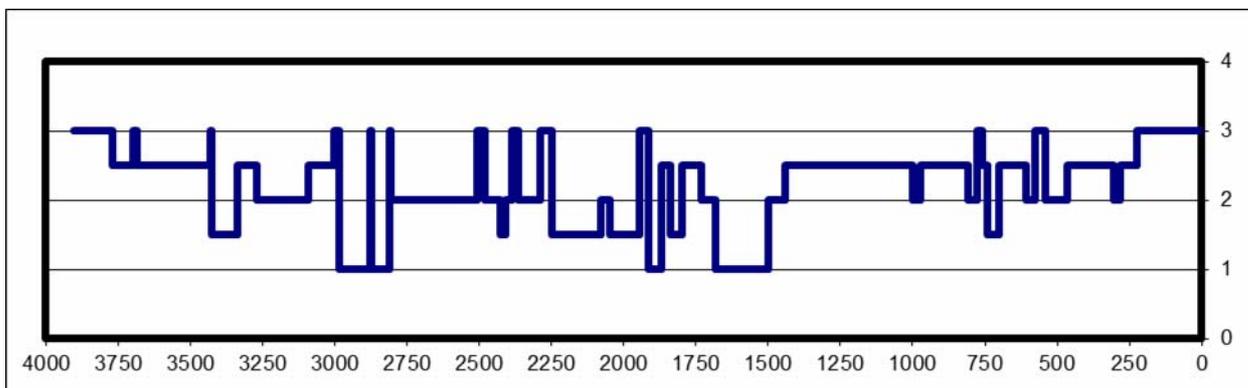


Рис. 25. Изменение степени трещиноватости по длине тоннеля.

1 – слаботрещиноватая, 2 – трещиноватая, 3 – сильнотрещиноватая.

На рис. 25 показано, что большая часть трассы тоннеля (2550 м) сложена сильнотрещиноватыми и трещиноватыми породами (около 65%), слаботрещиноватые 33 %, а нетрещиноватых пород около 2 %. Из этого следует, что оценивать физико-механические свойства горных пород необходимо с поправкой на структурное ослабление.

Как показывают данные, большая часть трассы тоннеля находится в трещиноватых и сильнотрещиноватых горных породах. Наиболее нарушенными являются участки 0–1440 м и 3500–3900 м условного пикета. Это связано с широким распространением разрывных нарушений и активным воздействием агентов выветривания, вследствие меньшей глубины выработки в сравнении с другими участками.

Полученные в ходе исследования данные о трещиноватости и ее влияния на горные породы массива Кузнецовского тоннеля, могут быть использованы для зонирования массива, оценки одновозрастных скальных пород Северного Сихотэ-Алиня и при освоении исследованной территории.

4.4. Физико-механические свойства вмещающих пород

Исследования физико-механических свойств горных пород массива, вмещающего Кузнецовский тоннель, проводились на этапе инженерно-геологических изысканий. При этом в качестве образцов были использованы отдельные обломки с поверхности без испытаний керна разведочных скважин.

Основные физико-механические свойства, изученные на этапе инженерно-геологических изысканий, представлены в табл. 7.

Таблица 7

Физико-механические свойства пород Кузнецовского тоннеля (по данным ОАО «Сибгипротранс»)

Горные породы/Физико-механические свойства	Предел прочности на сжатие в сухом состоянии, МПа	Предел прочности на сжатие в водонасыщенном состоянии, МПа	Плотность, кг/дм ³	Коэффициент крепости	Модуль упругости, МПа *10 ⁴	Модуль деформации, МПа *10 ⁴
Алевролиты	60	26	2,63	5–6	1,77	0,68
Песчаники	127	108	2,6	12–13	3,26	1,25
Конгломераты гравелиты	-----	-----	2,62	8-10	2,17	0,97
Базальты, базальтовые порфириты	121	90	2,58- 2,71	11-14	6,5	2,16

В дальнейшем были проведены инженерно-геологическое бурение с отбором керна и проходка разведочной транспортно-дренажной штольни, что позволило провести испытания образцов с горизонтов расположения тоннеля.

Автором были исследованы физико-механические свойства горных пород. Сводная таблица физико-механических свойств представлена в прил. 2. Усредненные основные показатели представлены в табл. 8.

Проведенные исследования позволяют сделать выводы о том, что все породы классифицируются как прочные и очень прочные, очень плотные по классификации ГОСТ 25100-2011. Наибольший предел прочности на сжатие у алевролитов, а на растяжение у песчаников. Слабая прочность песчаников объясняется, высокой степенью трещиноватости. У однородных образцов

Таблица 8

Физико-механические свойства пород массива, вмещающего Кузнецовский тоннель (данные автора)

Горные породы/Физико-механические свойства	Предел прочности на сжатие в сухом состоянии, МПа	Предел прочности на сжатие в водонасыщенном состоянии, МПа	Предел прочности на растяжение, МПа	Плотность, кг/дм ³	Коэффициент крепости	Модуль упругости, МПа · 10 ⁴	Модуль деформации, МПа · 10 ⁴
Седиментационные брекчии	104,029	70,85	8,87	2,642	10,4	1,038	1,408
Переслаивание алевролитов и песчаников	105,82	152,39	6,87	2,633	10,58	1,213	1,336
Песчаники	85,78	121,53	12,37	2,662	8,578	1,242	1,44
Алевролиты	112,87	52,797	9,47	2,652	11,29	1,237	1,536
Песчаники с прослоями алевролитов	77,13	75,01	5,83	2,649	7,71	1,044	1,19
Туф андезита	89,13	75,5	8,47	2,715	8,91	1,403	1,417
Туф риолита	80,23	47,08	4,65	2,676	8,02	1,153	1,157

песчаников предел прочности на сжатие доходил до 280 МПа, а на растяжение до 22 МПа. Плотность пород отличается незначительно (2,63-2,72 кг/дм³). По крепости породы тоннеля относятся к 1–3 категориям по шкале М.М. Протодьяконова от высшей степени крепости до крепких. Надежность определения свойств пород при данном количестве образцов равна 80–90 %.

Исследования ФМС позволяют сделать выводы о том, что все породы классифицируются как прочные и очень прочные, очень плотные. По крепости породы тоннеля относятся к 1–3 категориям по шкале М.М. Протодьяконова от высшей степени крепости до крепких.

Опытные определения прочностных и деформационных свойств горных пород Кузнецовского тоннеля показали, что трещиноватость существенно влияет на их параметры. В качестве примера, в табл. 9 приведены прочностные свойства трещиноватых и нетрещиноватых пород.

Таблица 9

Прочностные свойства трещиноватых и нетрещиноватых пород

Наименование породы	Предел прочности на сжатие, МПа		Предел прочности на разрыв, МПа	
	Трещин.	Нетрещин.	Трещин.	Нетрещин.
Переслаивание алевролитов и песчаников	88,246	176,614	5,620	8,092
Песчаники с прослоями алевролитов	26,042	253,935	2,873	10,742
Алевролиты	78,416	201,102	2,297	21,773
Песчаники	47,245	200,623	5,276	22,973

Из таблицы видно, что различия в показателях свойств горных пород достигают порядка. Так, прочность на сжатие нетрещиноватых песчаников с прослоями алевролитов практически в 10 раз больше, чем ослабленных трещинами, а прочность на растяжение – в 5 раз. Схожие параметры у всех пород тоннеля. Это условие является определяющим при характеристике физико-механических свойств массива.

Для оценки изменения прочностных свойств были построены графики их изменения по длине тоннеля (рис. 26 и 27). Для этого использовались данные об испытанных образцах с различной степенью трещиноватости и геологическом строении массива. Далее приведены графики изменения прочностных свойств по трассе тоннеля.

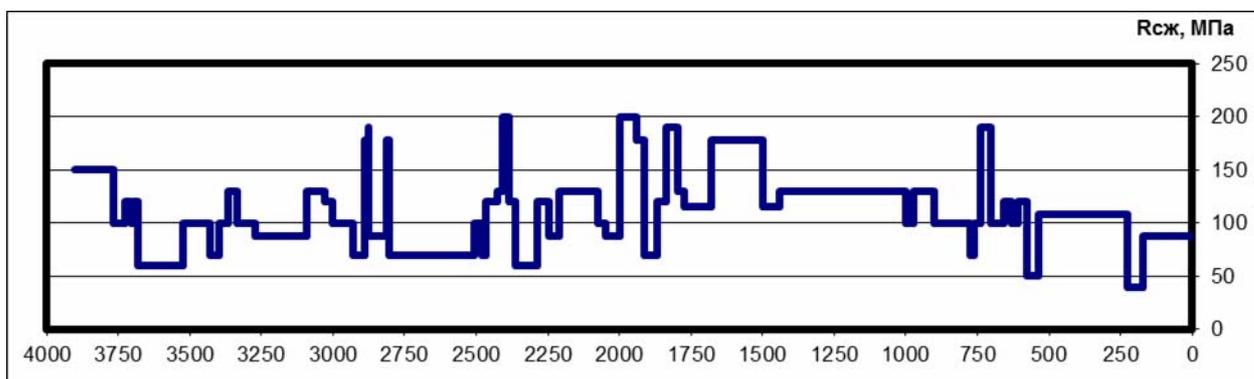


Рис. 26. Изменение прочности на сжатие по длине тоннеля.

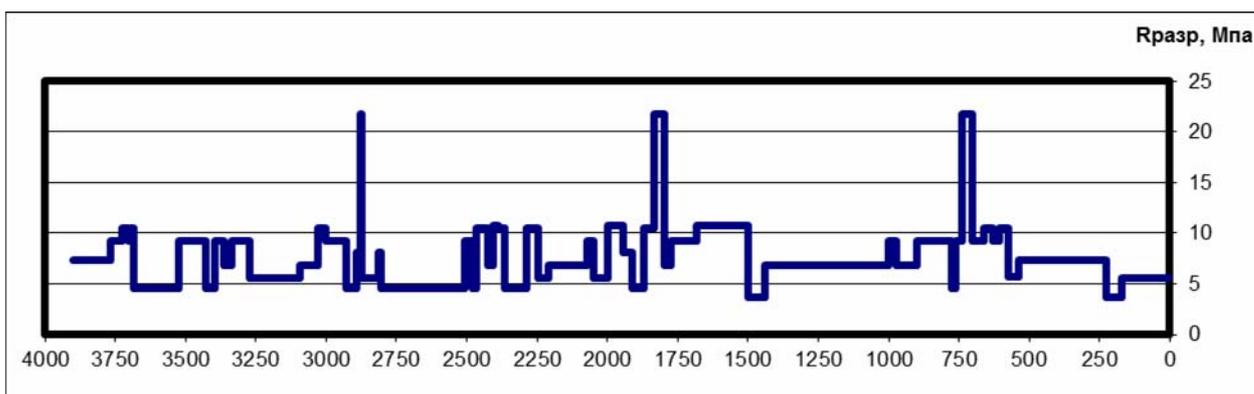


Рис. 27. Изменение прочности на разрыв по длине тоннеля.

Влияние трещиноватости на физико-механические свойства особо отмечается на показателях предела прочности на разрыв. Так прочность на растяжение монолитного песчаника достигает 23 МПа, что в 10 раз больше трещиноватого аналога. Различия между прочностью на сжатие и прочностью на разрыв достигают 20 раз [Квашук и др, 2011б, 2011в].

Из рис. 26 видно, что основная масса значений прочности на сжатие расположена в интервале 100–150 МПа, что соответствует очень прочным породам по классификации ГОСТ 100-95. Средняя прочность на сжатие равна 114 МПа, на растяжение – 10 МПа. Несмотря на высокие осредненные показатели, на графиках четко проявляется неоднородность значений. Присутствуют участки их понижения, где предел прочности на сжатие ниже 50

МПа, а на растяжение ниже 5 МПа, что соответствует горным породам средней прочности. Также отмечены резкие возрастания прочностных свойств, которые связаны с высокой прочностью нетрещиноватых песчаников. Особенно это заметно на графике изменения прочности на разрыв, где значения доходят до 23 МПа.

Прочностные свойства трещиноватых пород существенно отличаются от монолитных аналогов. Это создает неоднородность среды, осложняя характеристику массива в целом и проектирование конструкций тоннеля.

Несмотря на существенные различия в прочностных свойствах, породы характеризуются как прочные. Протяженных участков резкого понижения показателей прочности не отмечено. В основном это относительно небольшие (до 40 м) зоны тектонической трещиноватости.

ГЛАВА 5. ПРОГНОЗ ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ КУЗНЕЦОВСКОГО ТОННЕЛЯ

5.1. Влияние подземных вод на условия эксплуатации сооружения

Современный этап изучения гидрогеологических условий района начался с проведения инженерно-геологических изысканий для строительства тоннельного перехода. Проектно-изыскательскими организациями был выполнен ряд инженерно-геологических и геофизических работ, отбор проб грунтовых вод из скважин вблизи тоннеля, рассчитан прогнозный водоприток. Несмотря на проведенные работы, гидрогеологическая изученность массива, вмещающего тоннель, оставалась слабой. Не имелось информации о составе, характеристике и объеме грунтовых вод непосредственно в массиве и зонах тектонических нарушений, участков повышенной обводненности. В целях определения степени влияния на геоэкологические условия района тоннеля авторами был выполнен комплекс гидрогеологических исследований.

В качестве фактического материала использовались гидрометрические измерения, выполненные во время режимных наблюдений при проходке транспортно-дренажной штольни и результаты геохимических исследований грунтовых вод, выполненных при изыскательских работах.

Полевые работы включали обследование транспортно-дренажной штольни на предмет обводненности, ее характеристику и отбор проб грунтовых вод, инфильтрующихся в выработку.

Лабораторные исследования заключались в проведении количественного химического и изотопного анализов. Количественный химический анализ был проведен лабораторией института водных и экологических проблем. Изотопный анализ выполнен лабораторией института тектоники и геофизики методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой прибором ICP-MS Elan DRC II PerkinElmer.

В работе использовались данные о количестве водопритоков во времени в период строительства тоннеля (январь 2010 г. – июнь 2011 г.) (рис. 28).

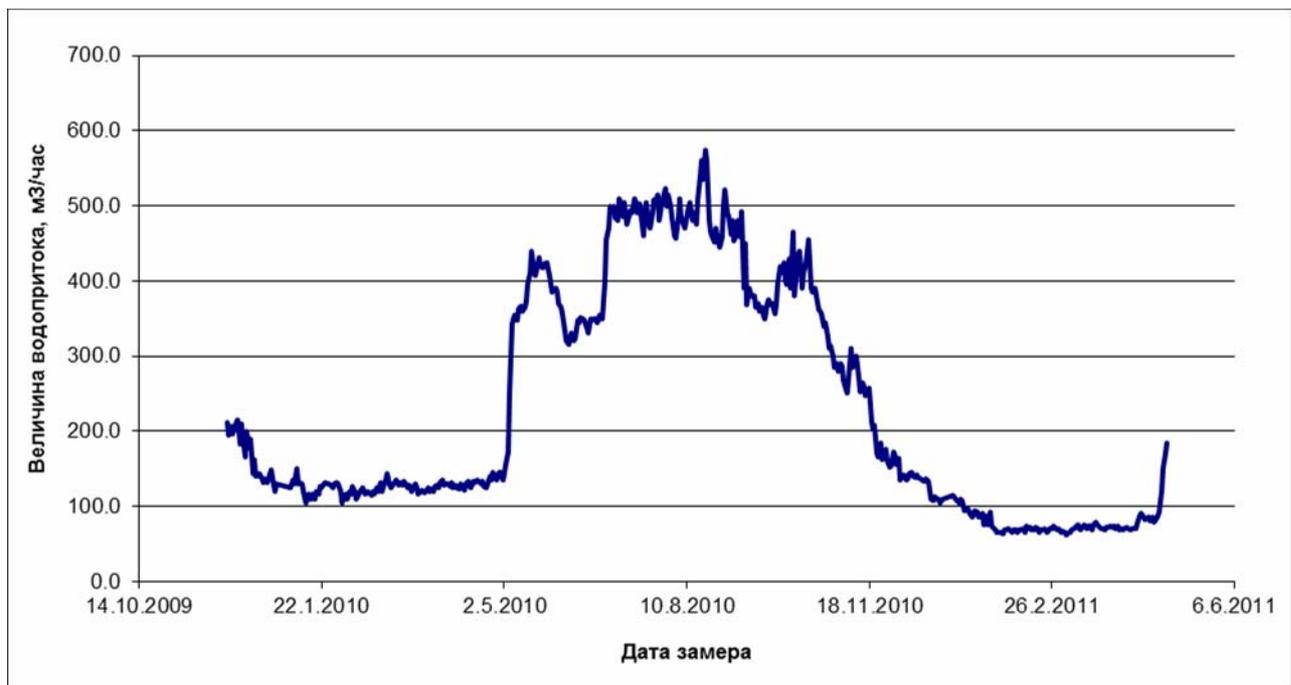


Рис. 28. Изменение величины водопритока во времени

В период с начала января по начало мая величина водопритоков сохранялся практически на одном уровне. Небольшое различие значений, по всей видимости, обуславливалось проходкой зон повышенной трещиноватости, которые имеют высокую проницаемость. Резкий рост произошел в первой половине мая, являющейся периодом интенсивного снеготаяния, при котором объем водопритока увеличился в 3 раза (от 140 м³/ч до 445 м³/ч). После окончания инфильтрации оттаявшего снега произошло резкое снижение водопритока, и в течение июня уровень был практически одинаковый. Небольшой рост в это время может быть связан с нарастанием длины выработки. Наибольшее количество осадков на данной территории выпадает в июле и августе. Это также проявилось в обводненности тоннеля. С конца июня наблюдалось резкое повышение водопритока, который в дальнейшем колебался на уровне 460–570 м³/ч. Скачкообразное изменение водопритока, по всей видимости, было связано с колебанием количества атмосферных осадков и проходкой зон повышенной трещиноватости. После окончания дождливого периода, в первую половину сентября произошло понижение водопритока до июньского уровня (350–370 м³/ч). Во второй половине сентября – начале октября выпадает первый снег, который быстро тает, сохраняясь только на гольцах. Этот период отчетливо

проявился в объеме водопритока за соответствующий период. Со второй половины октября наступает значительное похолодание, дуют сильные ветра и устанавливается постоянный снежный покров. С этого момента и до середины января наблюдалось постепенное понижение объема водопритока. После чего он стабилизировался на уровне 60-70 м³/час и аналогично с 2010 г. с конца апреля – начала мая произошло резкое его повышение. Наибольший объем водопритока зафиксирован 20.08.2010 г. и составляет 564 м³/ч. Наименьший зафиксирован 6.03.2011 г. и равен 62 м³/ч. Среднее значение водопритока за период с января 2010 по июнь 2011 – 230,3 м³/ч.

Помимо измерения величины водопритока фиксировалось распространение водопроявлений в штольне и тоннеле. Характер течей различный, представлен в форме капеза со свода, струйных водопритоков из межтубинговых швов и технологических отверстий.

На рис. 29 представлены схема распространения течей в штольне (а) и тоннеле (б). Для определения зависимости течей от структурных нарушений ниже показана схема трещиноватости по оси тоннеля.

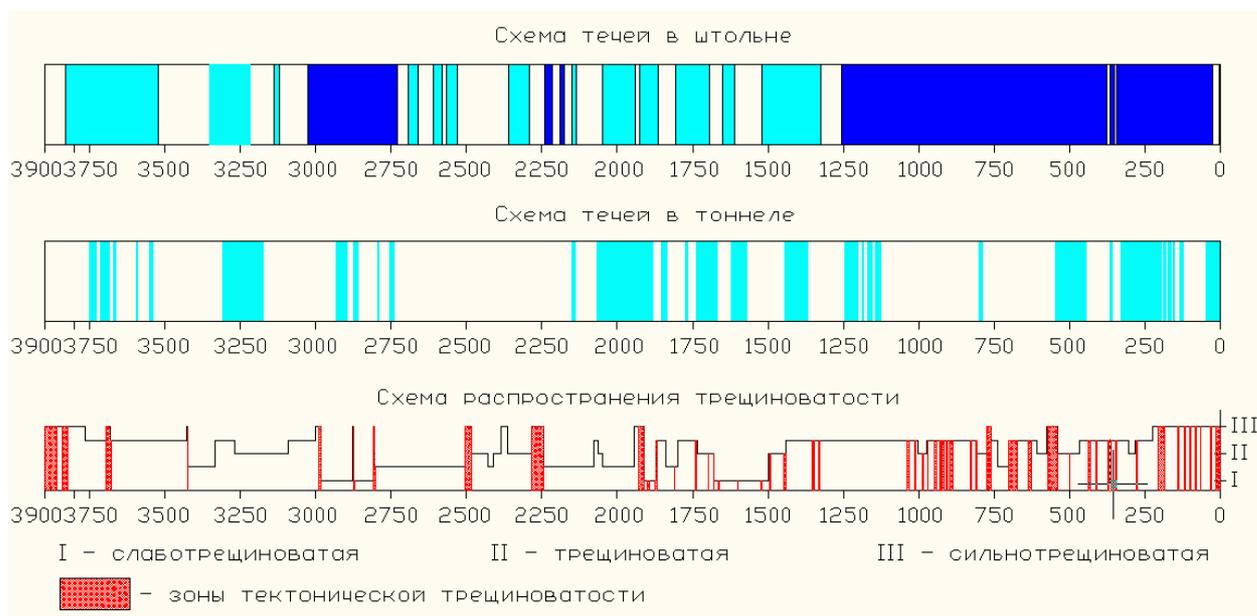


Рис. 29. Схемы течей в штольне и тоннеле и схема распространения трещиноватости: III – сильнотрещиноватая, II – трещиноватая, I – слаботрещиноватая.

Серым цветом указаны места, где были отмечены водопроявления. В связи с неравномерностью распространения течей черным цветом указаны места повышенной обводненности и значительных водопритоков.

Основные водопритоки при строительстве тоннельного комплекса были встречены при проходке штольни. Особенно были обводнены участки в интервалах 25–343 м, 375–1255 м, 2175–2190 м, 2215–2420 м, 2731–3025 м. условного пикета. В них были отмечены многочисленные струйные и струйные с напором течи из технологических отверстий и межтубинговых швов, стены обделки на этих участках были покрыты водяной пленкой. В отдельных течах были зафиксированы водопритоки с дебитом около 1200 л/ч, но в основном объем притока в течах составляли порядка 30–180 л/ч, реже 360–540 л/ч. Остальные участки характеризовались слабыми, реже струйными и струйными с напором течами из технологических отверстий и межтубинговых швов и капезом со свода. Стены обделки на протяжении этих участков в основном сухие, кроме промежутков в интервале 1301–1326 м., 2530–2547 м., 2553–2565 м. и 2581–2600 м условного пикета, где стены влажные со слабым подтеканием воды.

В отличие от штольни, в тоннеле наблюдались умеренные водопритоки. В основном течи характеризовались слабым подтеканием из технологических отверстий, реже из межтубинговых швов. Струйных напорных вод на протяжении тоннеля зафиксировано не было. Стенки обделки – сухие, кроме участка в интервале 1671–1698 м, где стены увлажненные.

Для определения взаимосвязи структурных нарушений и обводненности была использована схема распространения трещиноватости. Анализ трех графиков показал, что прямой, четко прослеживаемой связи мест концентрации течей и тектонических зон нет. В целом, обводненность связана с повышенной фоновой трещиноватостью массива и, следовательно, повышенной проницаемостью. Исключением являются участки в интервалах 1500–1681 м и 2843–2984 м, где при слабом уровне фоновой трещиноватости имеет место обводненность. В этом случае причиной течей, по всей видимости, служат зоны тектонической раздробленности, распространенные в этих интервалах.

Фактический материал геохимических исследований представлен результатами химического анализа грунтовых вод из скважин, находящихся на подходах к тоннелю. Среди пробуренных скважин, в которых были отобраны образцы грунтовых вод, наиболее близкое расположение к створу тоннеля имеют скважины № 604, 606, 11, 12, 48. Скважины № 11, 12, 48 находились в районе восточного портала и были пройдены в толще осадочных горных пород, скважины № 606, 608 в районе западного портала и пройдены в эффузивных породах. Глубина скважин от 5 до 40 метров. Глубина отбора проб варьируется от 2,5 до 9,6 м. На рис. 30 показано схематическое расположение скважин в районе строительства тоннеля.

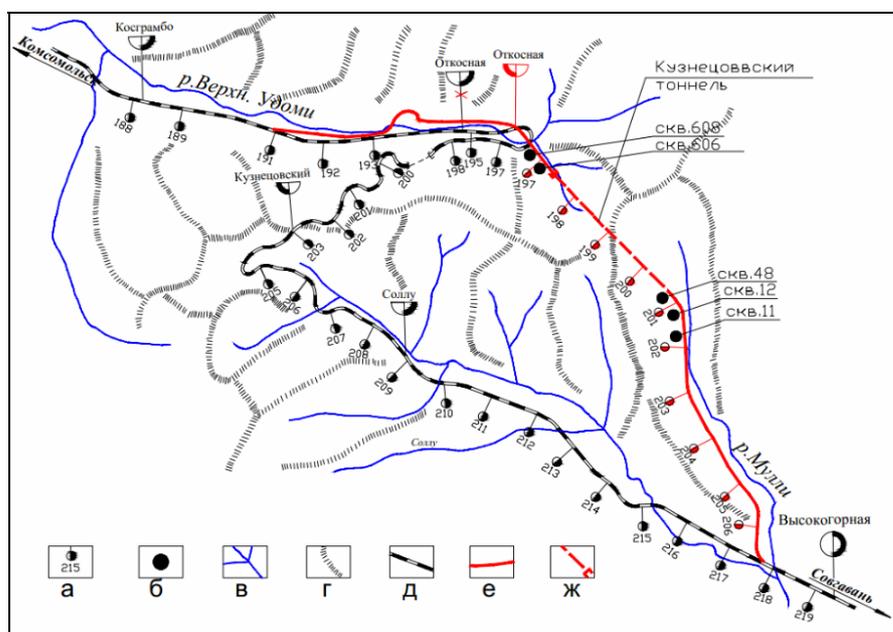


Рис. 30. Схематический план расположения исследуемых скважин.

а – пикетаж ж/д линии; *б* – исследуемые скважины; *в* – речная сеть; *г* – рельеф; *д* – существующая ж/д линия; *е* – новые участки ж/д линии; *ж* – Кузнецовский тоннель.

Результаты количественного химического анализа приведены в табл. 10.

Подземные воды из скважин слабосоленоватые, мягкие, общая жесткость варьируется от 0,7 до 2,8 мг.экв/л. В основном нейтральные за исключением образцов из ручья в районе скважины № 11, где являются слабокислыми.

**Результаты количественного химического анализа грунтовых вод из
скважин**

Характеристики № скважины	Глубина отбора, м	рН	Катионы мг/литр				Анионы, мг/литр				Минерализа ция, мг/литр
			Na+K	Ca	Mg	NH ₄	Cl	SO ₄	HCO ₃	CO ₃	
11	9.6	6.81	2.07	26.05	2.43	0.1	3.76	4.12	85.4	0	123.93
11 ручей	0.1	6.41	8.74	12.02	3.65	0.2	3.76	13.58	54.9	0	96.85
12	4.5	7.46	14.72	14.03	7.3	0.1	3.76	25.92	79.3	0	145.13
48	2.8	7.34	4.37	28.06	8.51	0.1	2.34	16.05	115.9	0	175.33
606	5	6.85	23.69	14.03	4.86	0.1	2.34	27.57	91.5	0	164.09
608	2.5	7.16	4.37	36.07	12.16	0.1	2.34	20.93	18.25	0	228.53

По составу встречены воды гидрокарбонатные кальциевые (скв. № 11, 48), гидрокарбонатно-сульфатные натриево-кальциевые (скв. № 11 ручей), гидрокарбонатно-сульфатные натриевые (скв № 12, 606), гидрокарбонатно-сульфатные натриево-кальциево-магниевые (скв № 608). Отличием поверхностных вод ручья в районе скважины № 11 от подземных вод заключается в пониженной минерализации, повышенном содержании сульфат аниона, гидрокарбонатов и кальция.

Полученные представления о гидрогеологических условиях являются неполными. Гидрометрические измерения актуальны на стадии строительства выработки. Высокие водопритоки, связанные с проходкой обводненных зон, после были сработаны, и дебит уменьшился. Данные геохимических исследований в полной мере не информируют о химическом составе грунтовых вод массива, так как скважины расположены на подходах к тоннелю. Для установления гидрогеологического режима и определения геоэкологических последствий в 2012 году авторами было произведено гидрогеологическое обследование тоннеля, с целью отбора проб воды, определения участков обводненности и их характеристик. На момент осмотра существенных водопроявлений в тоннеле не было, за исключением небольших течей из технологических отверстий в районе восточного портала. Обводненность массива удалось оценить при обследовании транспортно-дренажной штольни. Характерными видами водопритоков в штольне являются струйные напорные и безнапорные течи из технологических отверстий, капез со свода, водяная пленка

на железобетонной обделке. На рис. 31 показаны примеры обводненности в транспортно-дренажной штольне.

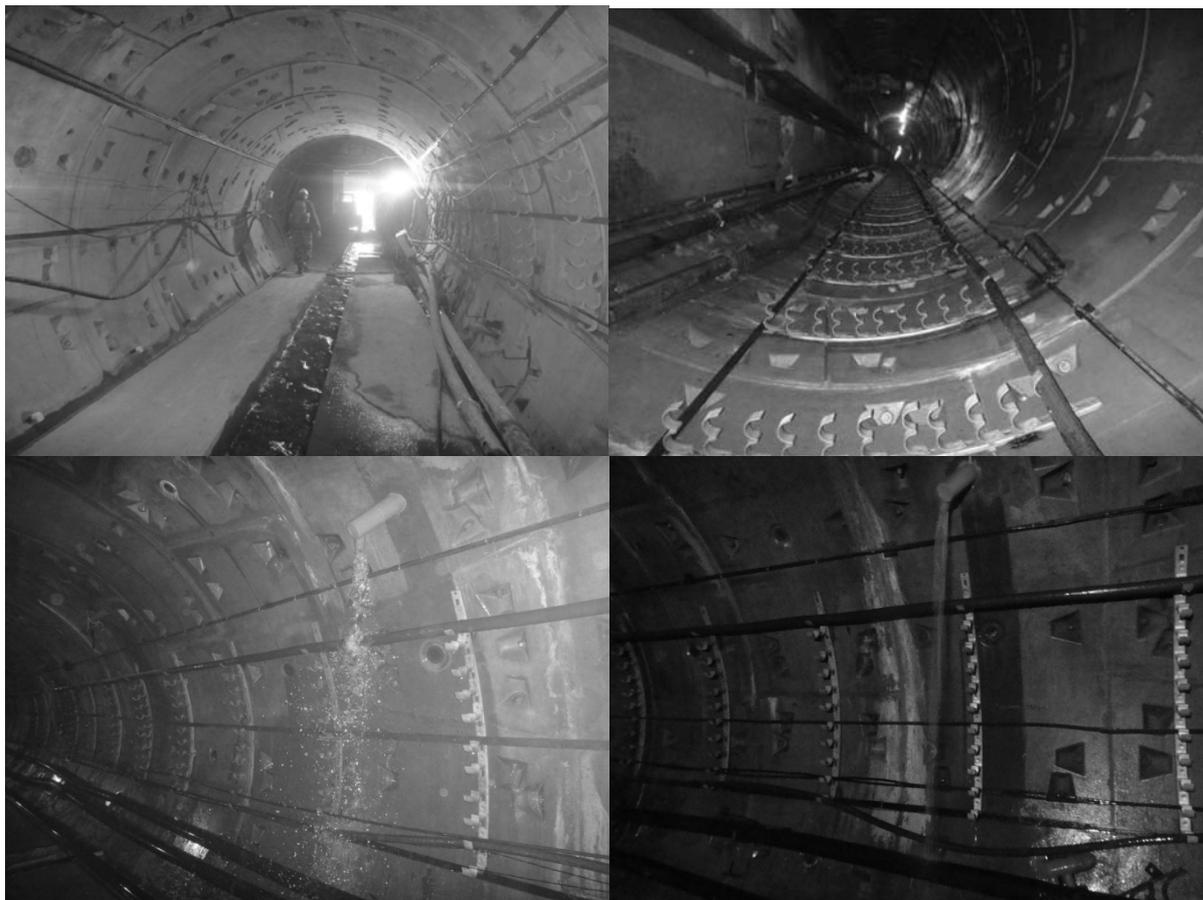


Рис. 31. Характер обводненности в транспортно-дренажной штольне: *а*– стены штольни сухие; *б* – стены штольни покрыты водяной пленкой; *в* – струйные безнапорные течи, *г* – струйные напорные течи из технологических отверстий.

Существенные водопроявления сконцентрированы в восточной части выработки, в особенности на интервале 0–274. На протяжении всего интервала из всех технологических отверстий выходят струйные напорные воды. Температура воды в лотке на момент обследования 3–4 °С, при температуре в остальной части штольни 7–8 °С. Остальная часть выработки малообводнена. Водопроявления представлены в основном слабыми течами из технологических отверстий, изредка капежом со свода. Выделяется участок 3900–3096 м условного пикета, в котором несмотря на редкие течи, более 800 метров железобетонной обделки покрыты водяной пленкой. На рис. 32 показана схема распространения течей в штольне и схематический геологический разрез.

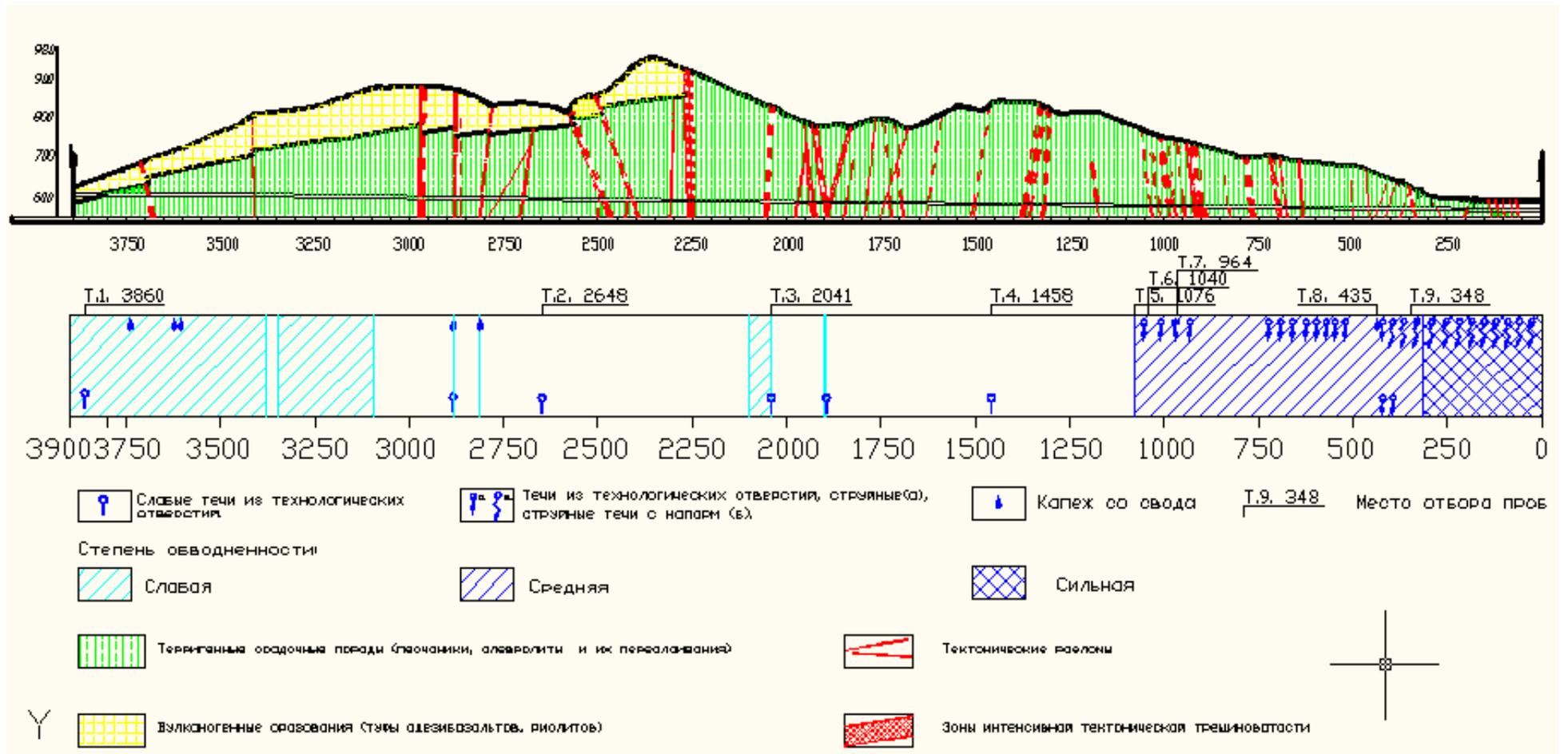


Рис. 32. Схема распространения обводненности в Кузнецовском тоннеле и схематический геологический разрез.

Результаты исследований показали, что по характеру обводненности трассу тоннеля можно подразделить на 4 участка.

I участок – в пределах 3900–3096 м. условного пикета. Для него характерна слабая степень обводненности, которая в основном представлена увлажненными стенами обделки и, изредка, капезом со свода.

II участок (3096–1076 м.) – относительно сухой промежуток трассы. Стены обделки в основном сухие, изредка покрыты водяной пленкой. Отмечены слабые течи из технологических отверстий и капез со свода.

III участок (1076–454 м.) отличается повышенной обводненностью. Течи в основном из технологических отверстий, расположенных преимущественно в верхней части тубингов. Течи струйные, в среднем с дебитом 8–10 л/мин, стены по длине участка влажные.

IV участок (454–0 м.) характеризуется как наиболее обводненный. На протяжении всего участка встречены сильные струйные течи с напором из технологических отверстий. Стены покрыты водяной пленкой.

На рис. 3 отмечены места отбора проб грунтовых вод на проведение количественного химического анализа. Результаты анализа представлены в табл. 11. На участках отбора проб № 3, 4, 5, 9 отобраны образцы для изотопного анализа. Его результаты представлены в табл. 12.

Исследованные подземные воды с относительно повышенной минерализацией (пробы № 2, 5, 6, 7, 8, 9) и солоноватые (пробы № 1, 3, 4). [Никаноров, 1988]. Общая жесткость варьируется от 0,12 до 1° Ж. В основном щелочные, за исключением проб № 1 и 10, где воды являются слабощелочными и пробы № 2 – сильнощелочными.

Результаты количественного химического анализа грунтовых вод из Кузнецовского тоннеля

№	Наименование ингредиента	Единицы измерения	Нормативный документ на метод измерения	Результаты количественного химического анализа								
				Проба № 1	Проба № 2	Проба № 3	Проба № 4	Проба № 5	Проба № 6	Проба № 7	Проба № 8	Проба № 9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	pH	Ед. pH	РД 52.24.495-2005	8.4	10.5	8.8	8.6	8.6	8.4	8.8	9.1	7.2
2	Удельная электропроводимость	мкСм/см	РД 52.24.495-2005	151.7	124.9	162.4	186.4	109.9	100.2	101.4	74.9	41
3	Общая щелочность	мг-экв./дм ³	ПНД Ф 14.1:2.245-07	1.12	0.76	1.12	0.88	0.74	0.67	0.65	0.6	0.34
4	Жесткость	Град.жестк.	ПНД Ф 14.1:2.98-97	1	0.12	0.7	0.89	0.7	0.62	0.58	0.58	0.33
5	Кальций	мг/дм ³	ПНД Ф 14.1:2.95-97	17	1.7	13	17	11	10	9	9	5
6	Магний	мг/дм ³	ПНД Ф 14.1:2.98-97	1.8	0.5	0.5	0.5	2	1.8	1.8	1.5	1
7	Натрий	мг/дм ³	РД 52.24.391-2008	8.1	17.2	15.6	15.6	6.9	7.5	8.8	3	1.8
8	Калий	мг/дм ³	РД 52.24.391-2008	3	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0
9	Гидрокарбонаты	мг/дм ³	ПНД Ф 14.2.99-97	65	31	66	53	45	40	37	34	21
10	Карбонаты	мг/дм ³	ПНД Ф 14.1:2.245-07	1.8	7.8	1.2	0.3	0.3	0.3	1.5	1.2	<0,15
11	Хлорид-анион	мг/дм ³	РД 52.24.402-2011	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0
12	Сульфат-анион	мг/дм ³	РД 52.24.405-2005	8.3	9.3	25.8	36.8	12.4	9.3	7.8	5.8	2.3
13	Железо валовое	мг/дм ³	РД 52.24.358-2006	0.09	0.17	0.04	0.05	0.04	0.05	0.03	0.03	0.07
14	Железо общее раств.	мг/дм ³	РД 52.24.358-2006	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.05	0.03	0.03	0.03
15	Аммоний-анион	мг/дм ³	ПНД Ф 14.1:2.1-95	0.07	0.05	0.1	0.08	0.1	0.13	0.13	0.13	0.17
16	Нитрит-анион	мг/дм ³	РД 52.24.381-2006	<0,030	<0,030	<0,030	<0,030	<0,030	<0,030	<0,030	<0,030	<0,030
17	Нитрат-анион	мг/дм ³	РД 52.24.380-2006	1.26	1	<0,04	<0,04	1	1.21	0.78	1.17	1.08
18	Фосфаты	мг/дм ³	РД 52.24.382-2006	<0,030	<0,030	<0,030	<0,030	0.105	0.12	0.097	0.089	0.03

Результаты изотопного анализа грунтовых вод Кузнецовского тоннеля, мкг/дм³

Проба Элемент	Проба №3	Проба №4	Проба №5	Проба №9	Проба Элемент	Проба №3	Проба №4	Проба №5	Проба №9
Li	33.93	50.16	20.05	1.50	Cd	0.01	0.02	0.02	0.04
Be	0.01	0.02	0.01	0.01	Sn	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
B	1.87	2.02	4.47	<0.001	Sb	0.13	0.16	0.50	0.06
Na	S	S	9327.87	2157.00	Te	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Mg	16.71	298.33	1714.55	622.55	Cs	0.28	1.99	3.12	0.45
Al	13.08	6.08	4.50	39.44	Ba	2.08	0.91	0.47	1.34
P	<0.001	<0.001	9.25	8.08	La	0.04	0.06	0.04	0.22
K	126.00	148.26	324.49	236.99	Ce	0.11	0.17	0.11	0.60
Ca	5891.81	7222.46	4708.94	1935.89	Pr	0.01	0.01	0.01	0.05
Sc	1.85	2.14	2.67	1.91	Nd	0.05	0.06	0.04	0.28
Ti	1.04	1.88	0.48	1.15	Sm	0.01	0.01	0.01	0.05
V	<0.001	<0.001	0.05	<0.001	Eu	0.00	0.00	0.00	0.01
Cr	0.19	0.23	0.10	0.29	Gd	0.01	0.01	0.01	0.06
Mn	1.38	11.42	1.00	1.23	Tb	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	105.43	139.01	72.12	91.52	Dy	0.01	0.01	0.01	0.03
Co	0.03	0.04	0.03	0.04	Ho	0.00	0.00	0.00	0.00
Ni	0.70	0.45	0.56	0.64	Er	0.01	0.00	0.00	0.02
Cu	4.20	3.60	5.31	10.57	Tm	0.00	0.00	0.00	0.00
Zn	14.30	15.39	19.66	40.18	Yb	0.01	0.00	0.00	0.01
Ga	0.05	0.11	0.05	0.01	Lu	0.00	0.00	0.00	0.00
Ge	0.06	0.11	0.09	0.00	Hf	0.02	0.01	0.01	0.00
As	0.88	4.28	58.72	0.92	Ta	0.04	0.02	0.02	0.01
Se	<0.001	<0.001	0.32	<0.001	W	1.15	1.01	7.66	0.08
Rb	0.54	1.27	2.47	0.77	Re	0.00	0.00	0.00	0.00
Sr	183.15	731.97	183.84	38.62	Hg	0.35	0.19	0.17	0.09
Y	0.05	0.05	0.03	0.17	Tl	0.00	0.00	0.00	0.00
Zr	0.18	0.24	0.08	0.01	Pb	0.26	0.42	0.16	0.26
Nb	0.11	0.07	0.04	0.03	Bi	0.01	0.01	<0.001	<0.001

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что обводненность горного массива, вмещающего Кузнецовский тоннель, зависит от климатических условий и развития экзогенной трещиноватости и зон повышенной трещиноватости, сопровождающих тектонические нарушения.

На этапе эксплуатации будет проявляться климатическая сезонность процесса изменения величины водопритока. Его количество будет определяться количеством жидких атмосферных осадков в летний период года. Но ожидается небольшое понижение величины водопритоков, в связи с проходкой полного объема горных выработок и дренированием подземных вод, формирующихся в водораздельной части хребта Сихотэ-Алинь. Прогнозный максимальный водоприток не будет превышать 550 м³/ч. Минимальный будет наблюдаться в период с января по май и, по всей видимости, составит 50–70 м³/ч [Злобин, Кулаков, 2014, Zlobin, Kvashuk, 2013].

При проходке тоннеля зафиксированы зоны постоянных концентрации течей, в которых возможна инфильтрация подземных вод в эксплуатационный период. Это участки в интервалах 0–550 м, 1170–2090 м, 2750–2890 м, 3160–3320 м, 3550–3750 м условного пикета, которые четко выделяются на схеме течей в тоннеле. В пределах большинства этих участков, на момент обследования зафиксированы течи. В дальнейшем по ним ожидаются инфильтрации из технологических отверстий и межтубинговых швов, реже - капель со свода.

5.2. Оценка напряженно-деформируемого состояния массива горных пород после проходки тоннеля

Изменение напряженно-деформируемого состояния в массиве горных пород является определяющим в закономерностях развития геомеханических процессов, влияние которых негативно отражается на подземных сооружениях. В нетронutom массиве горные породы находятся в естественном напряженно-тектоническом состоянии с первоначальным напряжением. Техногенное вмешательство в естественное состояние массива горных пород, связанное с проходкой тоннеля приводит к возникновению вторичных напряжений. Любой

горный массив характеризуется естественной неоднородностью, тектоническими нарушениями и трещиноватостью, а наличие вторичных напряжений, имеющих техногенный характер, приводит к деформации естественного состояния массива в виде сжатия и растяжения [Ручкин, 2008]. Следовательно, изучение напряженно-деформируемого состояния массива горных пород является основным в геомеханике.

Целью исследования является определение напряженно-деформируемого состояния массива и оценка устойчивости горных пород после проходки тоннеля.

Исходными данными послужили физико-механические свойства (ФМС) горных пород, исследованные автором. Для каждой разности были определены показатели для трещиноватого массива и среднее значение. На разных участках профиля учитывались различия в свойствах, в зависимости от типа и степени трещиноватости (табл. 13).

Анализ результатов моделирования показал следующее. После проходки Кузнецовского тоннеля на участке между условными пикетами 3100 и 1400 непосредственно над тоннелем формируется зона растягивающих напряжений, что в дальнейшем может вызвать снижение устойчивости кровли тоннеля. В достаточно сложных условиях находится участок между условными пикетами 2900 и 2400, где $\sigma_{cp} = 6,5$ МПа и исходя из того, что значения предела прочности на растяжения для пород этого участка составляют 6,87 МПа, возможно ожидать здесь развития трещин (рис. 33). В горном массиве вблизи поверхности в районе этого участка, где наблюдается зона трещиноватости, напряжения сжатия достигают 12 МПа, касательные напряжения τ_{lim} превышают 21 МПа (рис. 34). Но при этом значения пределов прочности на сжатие трещиноватых вулканитов достаточно высоки, с учетом коэффициента структурного ослабления составляют 43 МПа, и установленные напряжения не являются запредельными.

Свойства пород, используемые при моделировании НДС

Порода	Предел прочности на сжатие		Предел прочности на растяжение		Модуль упругости		Модуль деформации		коэффициент Пуассона		Сцепление		Угол внутреннего трения	
	Сред. знач.	Трещ. массив	Сред. знач.	Трещ. массив	Сред. знач.	Трещ. массив	Сред. знач.	Трещ. массив	Сред. знач.	Трещ. массив	Сред. знач.	Трещ. массив	Сред. знач.	Трещ. массив
Алевролит	102,52	58,33	9,47	2,30	1,24	0,99	1,54	1,25	0,16	0,13	22,05	12,97	45,69	44,71
Песчаник	85,76	37,80	12,37	5,28	1,24	0,48	1,44	0,57	0,19	0,14	17,53	12,03	52,45	44,42
Переслаивание	105,99	70,59	6,87	5,62	1,26	0,82	1,34	0,95	0,18	0,11	15,57	16,35	64,57	63,20
Вулканиды	89,13	61,43	9,43	5,63	1,16	0,49	1,15	0,54	0,23	0,19	29,70	19,19	36,50	37,95

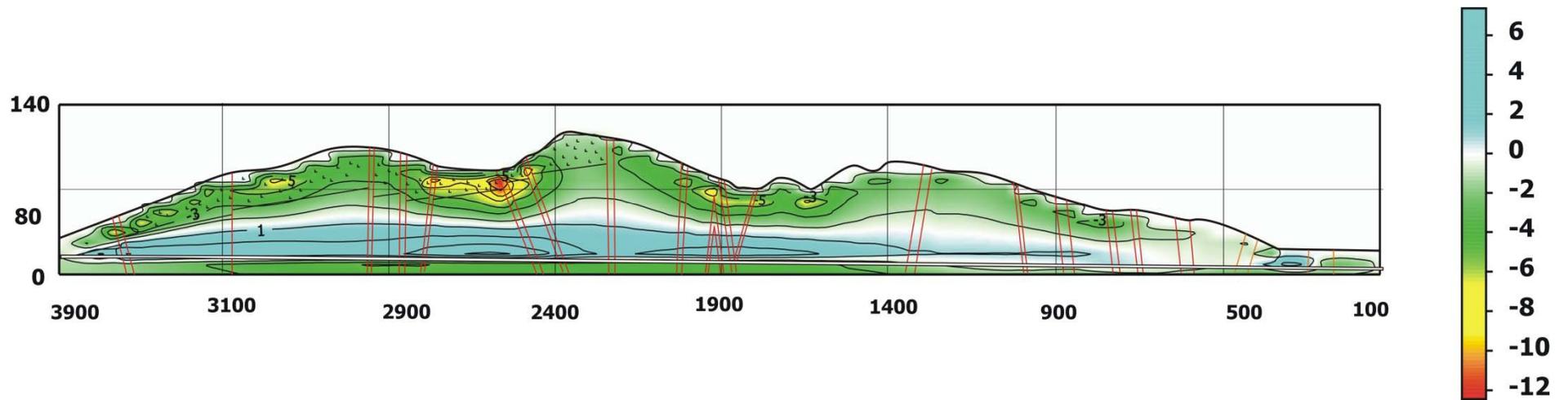


Рис. 33. Распределение $\sigma_{ср}$ в массиве горных пород при прохождении Кузнецовского тоннеля.

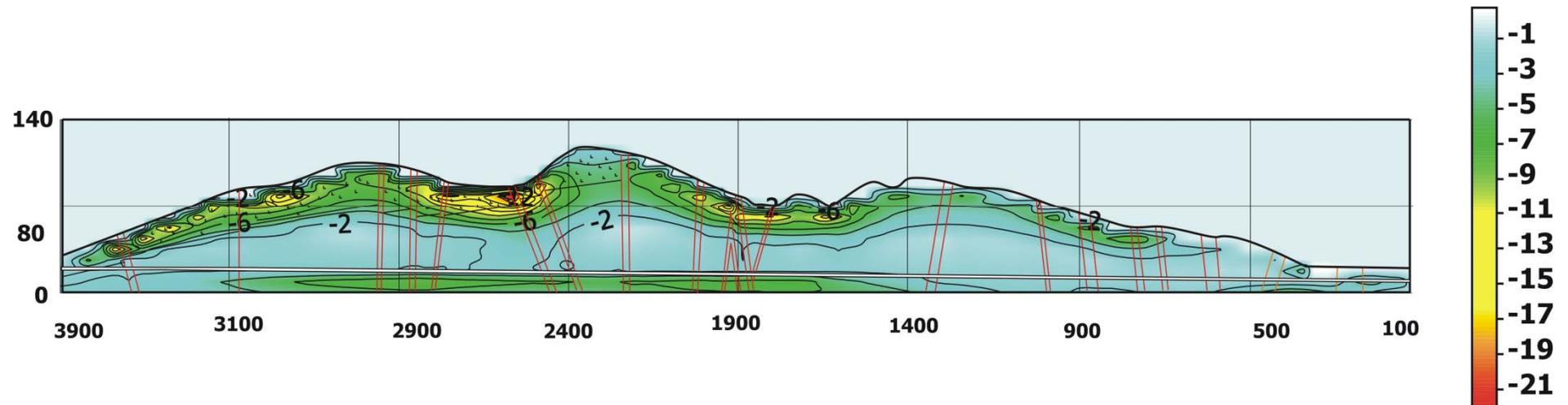


Рис. 34. Распределение максимальных касательных напряжений $\tau_{инт}$ в массиве горных пород.

Полученные результаты оценки устойчивости горного массива, вмещающего Кузнецовский тоннель представлены в табл. 14.

Таблица 14

Прочностные свойства горных пород и расчет предельного напряжения с учетом коэффициента структурного ослабления

Тип породы	K_s коэффициент структурного ослабления	σ_s предел прочности на сжатие, МПа		σ_d максимальное напряжение, МПа	
		среднее значение	трещиноват. массив	среднее значение	трещиноват массив
Алевролит	0,7	102,52	58,33	71,8	40,8
Песчаник	0,8	85,76	37,80	68,7	30,2
Переслаивание	0,65	105,99	70,59	68,8	45,9
Вулканиды	0,7	89,13	61,43	62,4	43

Таким образом, по результатам моделирования и оценки устойчивости горного массива установлено, что в условиях гравитационного поля напряжений геомеханическое состояние массива для сложившейся горнотехнической ситуации можно оценить как достаточно устойчивое [Злобин, Потапчук, 2012, Zlobin, Kvashuk, 2013]. Менее устойчивым является участок между условными пикетами 2900 и 2400. Учитывая высокую степень трещиноватости горных пород в пределах участка, а также распространение микронарушений, можно считать участок потенциального развития трещин и сопутствующих ей процессов (потеря устойчивости, увеличение проницаемости, ухудшения грунтовых условий и др.)

5.3. Сейсмическое микрорайонирование трассы тоннеля

Сейсмичность особо воздействует на инженерные сооружения. Несмотря на редкость проявления, она играет крайне негативную роль для инженерной деятельности. Транспортные сооружения отличаются своей протяженностью, часто проходят через различные геоморфологические, инженерно-геологические, геотектонические и другие условия. Неоднородность строения земной коры приводит к различным сейсмическим воздействиям.

Железнодорожные и автодорожные тоннели относятся к сооружениям с повышенным уровнем ответственности, отказы которых могут привести к

тяжелым социальным, экономическим и экологическим последствиям. Кузнецовский тоннель является значимым объектом Байкало-Амурской магистрали, позволяющим значительно повысить пропускную способность железнодорожной линии Комсомольск – Советская Гавань. Правильная оценка сейсмической опасности является важной задачей, позволяющей понизить риски отказа или дорогостоящего ремонта сооружения.

В отечественном и зарубежном опыте имеется множество разнообразных случаев поведения подземных конструкций при землетрясениях. В одних – рабочие, находившиеся под землей, узнавали о происшедших толчках только поднявшись на поверхность, а в других – тоннели в скальных грунтах были полностью разрушены. [Карапетян и др., 1959; Инженерный анализ..., 1961; Штейнбругге, Моран, 1957; Report of..., 1926]. Транспортные тоннели, которые попадали в район эпицентра сильного землетрясения получали различные повреждения [Дорман, 1986]. Корректная оценка сейсмической опасности также очень важна в экономическом плане. Недооценка сейсмичности может привести к крупным вложениям на восстановление конструкций, а переоценка вызовет неоправданные затраты при строительстве. Поэтому проведение сейсмического районирования является актуальной задачей.

Целью исследования является определение сейсмичности трассы тоннеля. Для достижения цели был выполнен комплекс работ в составе уточнения исходной сейсмичности, вероятностного анализа сейсмической опасности и сейсмического микрорайонирования.

Уточнение исходной сейсмичности. В основу проведенного расчета была положена линеаментно-доменно-фокальная модель зон возникновения очагов землетрясений (ВОЗ) [Уломов, 1987, 1999]. На основе модели сотрудниками ОИФЗ РАН были построены карты зон ВОЗ. На рис. 35 представлен фрагмент карты зон ВОЗ с рассматриваемым участком (показан красной точкой).

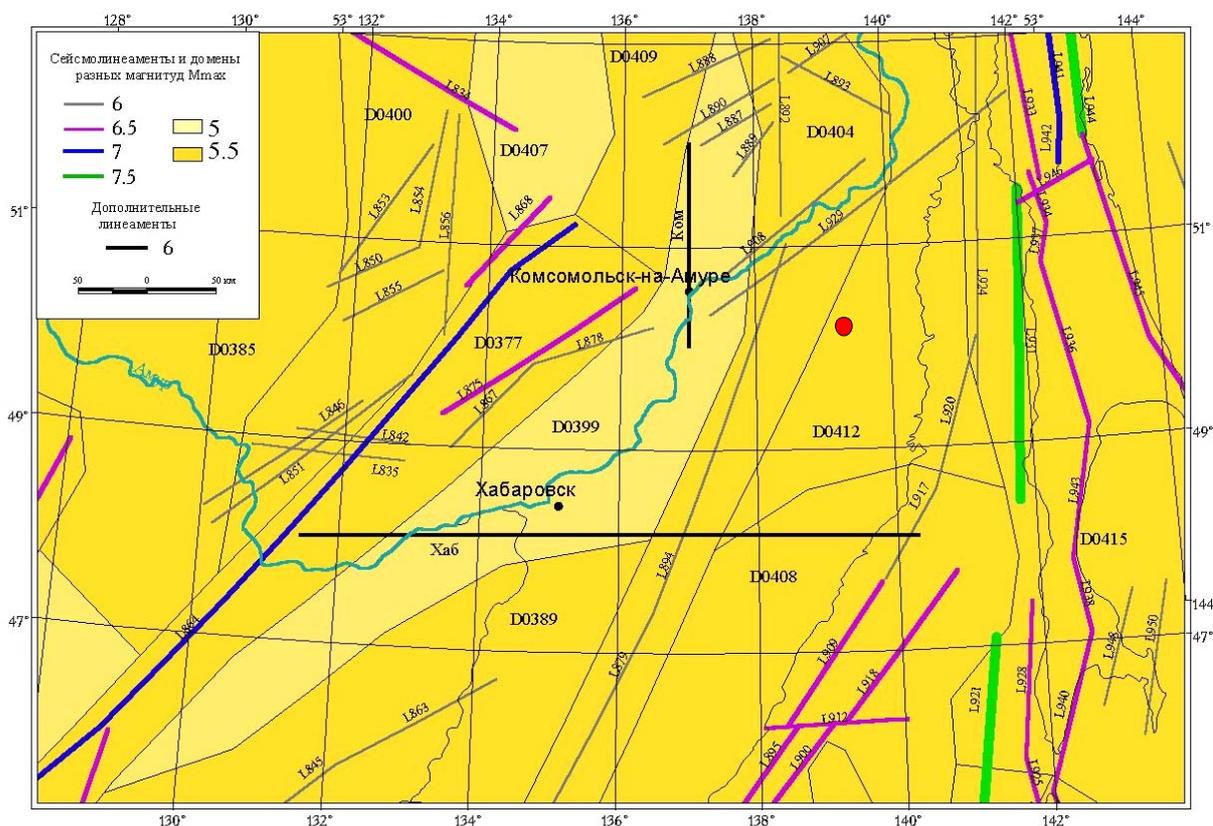


Рис. 35. Фрагмент карты зон ВОЗ [Уломов, 2011].

По карте участок тоннеля расположен в пределах домена, характеризующегося магнитудой 5,5, и окружен линеаменами с магнитудой от 6 до 7,5. После предварительной оценки, были отобраны линеаменты, способные вызывать землетрясения интенсивностью $I > 5,5$ – L931, L920, L924, L894, L929. В качестве значений повторяемости линеаментов были приняты данные, использованные в расчетах карт ОСР-97 (табл. 15).

Таблица 15

Параметры сейсмических линеаментов, использованных в расчете

Название	Mmax	Mmin	Hmax	T7,5	T7,0	T6,5	T6,0	Az	e1	de1	l,km
L931	7,5	5,0	30,0	121	75	140	149	184	90	20	342
L929	6,0	1,7	11,7				786	245	90	20	398
L924	6,0	4,5	14,5				679	185	90	20	463
L920	6,0	2,0	12,0				1835	205	90	20	171
L894	6,0	2,3	30,0				702	165	90	20	158

Значения параметров домена были определены автором. По карте зон ВОЗ максимальная магнитуда искомого домена равна 5,5, а площадь 34717 км². В качестве исходных данных для определения повторяемости землетрясений был

использован каталог, составленный по данным трех источников: Мичиганского технологического института (США), Хоккайдского института сейсмологии (Япония), Института тектоники и геофизики ДВО РАН (Россия). По результатам анализа, в пределах исследуемого домена произошло 11 землетрясений с магнитудой $M \geq 4$. Их характеристики показаны в табл. 16.

Таблица 16

Характеристики землетрясений домена D0412

Широта	Долгота	Глубина очага, км	Магнитуда
48,5	140,6	10	4
46,2	141,5	10	4,1
49,2	140,2	30	4,2
49,3	140,2	30	4,2
46,3	141,7	16	4,2
49,3	140,28	0	4,3
49,2	140,3	30	4,4
46,1	141,6	20	4,5
53,45	141,065	0	4,6
49,2	140,5	10	4,7
49,3	140,3	22	4,8
49,4	140,4	22	5
51	140	33	5,1

На основе полученных данных был построен график повторяемости землетрясений (рис. 36).

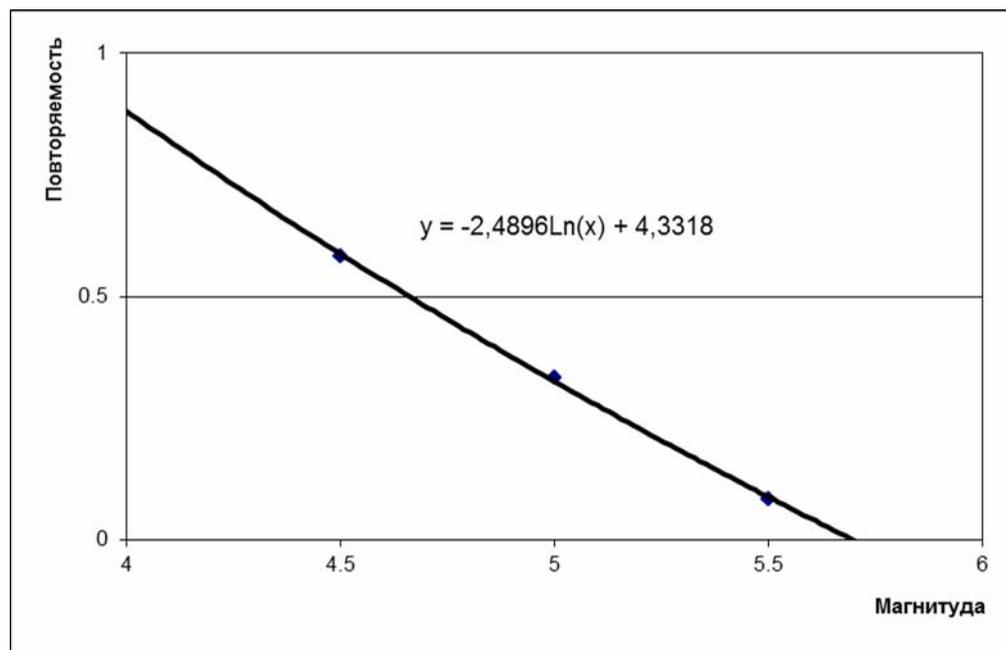


Рис. 36. График повторяемости землетрясений.

В результате были определены параметры домена (табл. 17).

Таблица 17

Параметры домена D-0412

Название	Mmax	Mmin	Hmax	T5,5	T5,0	T4,5	T4,0	S,km ²
D-0412	5,5	1,16	7	11,4	3,07	1,71	1,13	34717

Для расчета сейсмической опасности было принято уравнение затухания микросейсмической интенсивности I_{msk} с расстоянием, предложенными Н.В. Шебалиным (1969):

$$I_i = 1.5M_{LN} - 3.5 \lg R_i + 3,0, \quad (18)$$

где I_i – макросейсмическая интенсивность сотрясений по шкале MSK-64 на гипоцентральной расстоянии R_i , км, от очага;

$$R_i = (\Delta^2 + h^2)^{1/2}, \quad (19)$$

где Δ – эпицентральной расстояние, км, h – глубина очага, км;

M_{LN} – магнитуда землетрясений.

В результате расчета были получены исходные данные для выполнения вероятностного анализа сейсмической опасности.

Таблица 18

Исходные данные вероятностного анализа сейсмической опасности

Зоны ВОЗ	Наименование	Mmax	Mmin	Размеры	Rmax	Rmin
Площадная	D0412	5,5	1,16	34717 км ²	27	3
Линейная	L929, L931, L924, L894, L920	7,5	6	$\Sigma l = 1532$ км	160	50

Для зон ВОЗ рассчитывались вероятности возникновения землетрясений с интенсивностью $I \geq 5,5$, $I \geq 6,0$, $I \geq 6,5$, $I \geq 7,0$, $I \geq 7,5$. Результаты вероятностного анализа сейсмической опасности показаны в виде графиков.

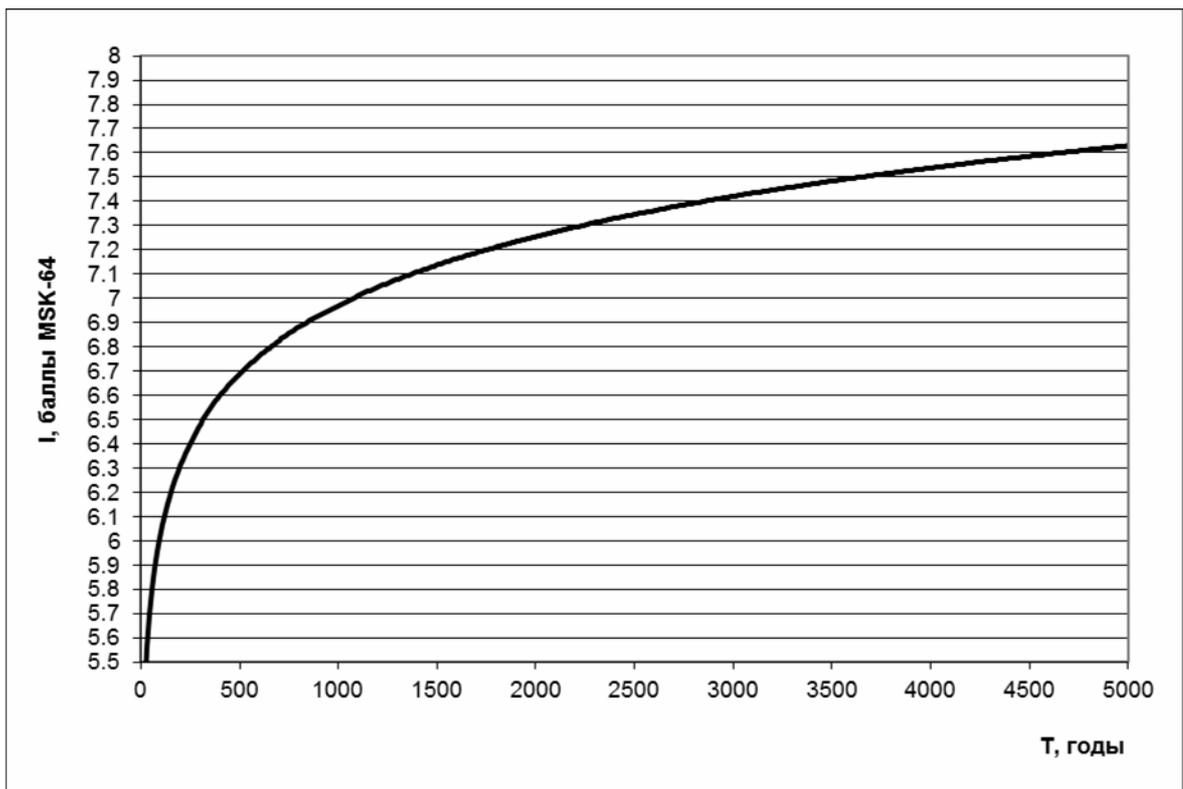
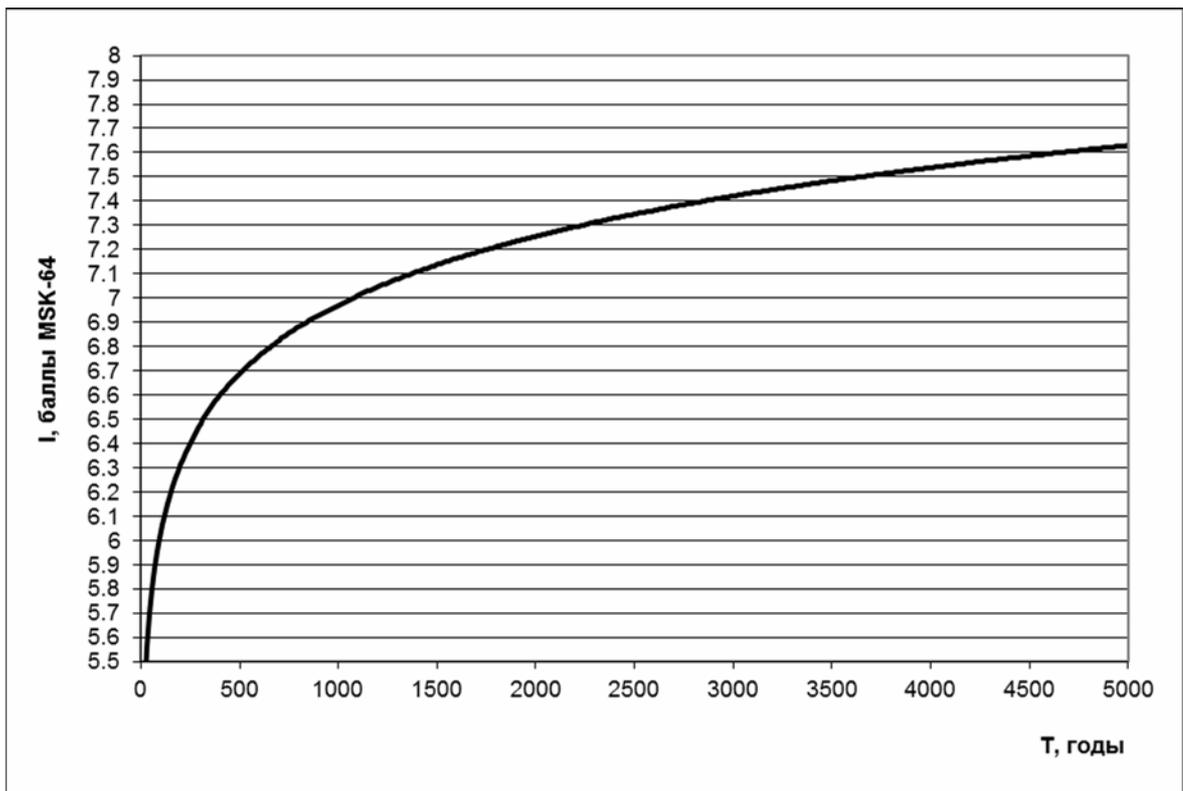


Рис. 37. Вероятностный анализ сейсмической опасности, выраженный в параметрах сейсмической интенсивности (а) и пикового горизонтального ускорения (б).

Исходя из графика уточненная сейсмическая опасность для периода повторяемости $T=100$ лет составляет 7 баллов шкалы MSK-64 для грунтовых условий II категории по СНиП II-7-81* «Строительство в сейсмических районах».

При расчете приращения сейсмической опасности методом сейсмических жесткостей, необходимы данные о скоростях распространения упругих волн и плотности горных пород. Плотность была установлена автором при проведении лабораторных работ. Данные о скоростях распространения волн были определены изыскательскими организациями только на подходах к тоннелю и не отражали объективной картины. Для получения значений скоростей использованы данные о деформационных свойствах горных пород, определенных в лаборатории.

Формулы расчета скоростей распространения продольных и поперечных волн имеют следующий вид:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}; \quad (20) \quad V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (21),$$

где λ, μ – константы Лямэ;

ρ – плотность горных пород, г/дм³.

Константы Лямэ вычислялись по формулам:

$$\lambda = \frac{\nu \cdot E}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}; \quad (22) \quad \mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (23),$$

где E – модуль упругости МПа,

ν – коэффициент Пуассона.

Для выполнения расчета были использованы графики изменения модуля упругости и коэффициента Пуассона по длине тоннеля (рис. 38). При построении графиков учитывалось геологическое строение и степень трещиноватости горных пород, по которым им присваивалось значения свойств.

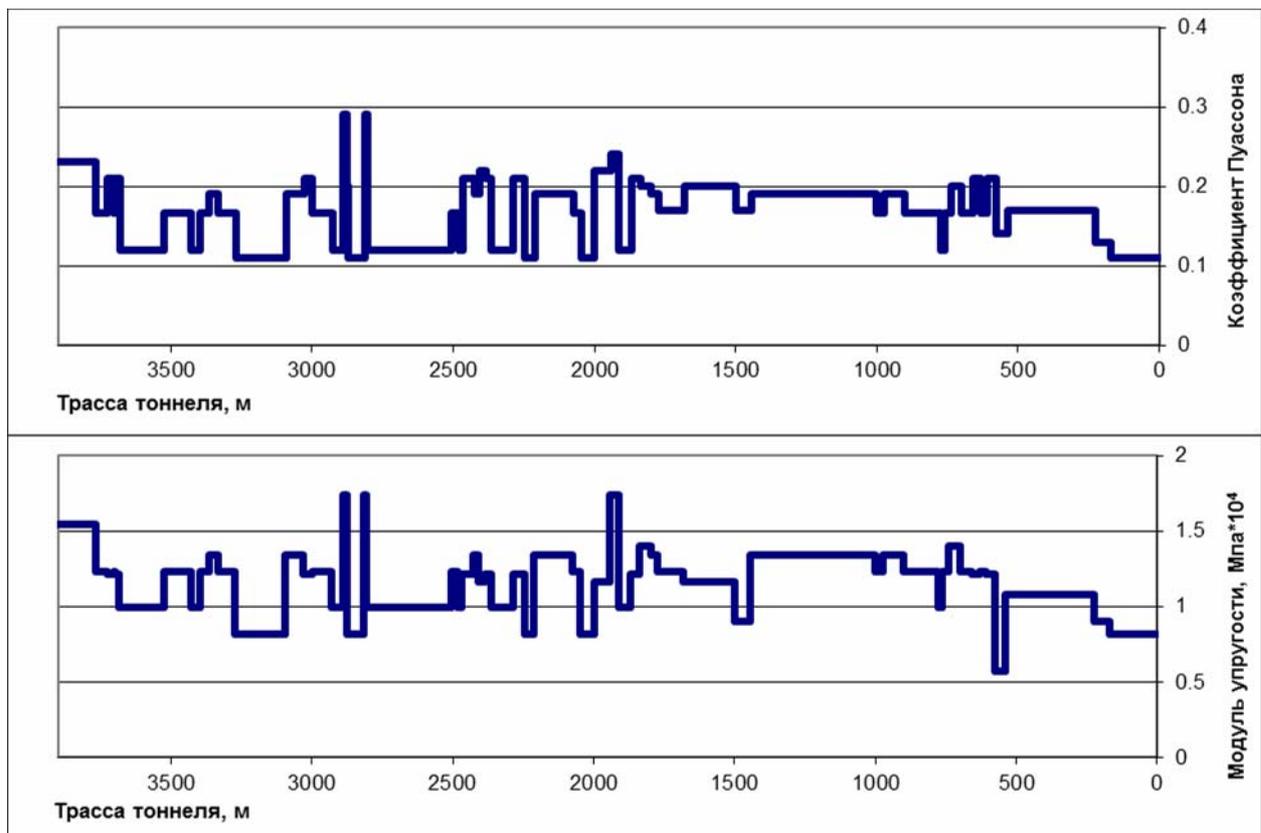


Рис. 38. Графики изменения модуля упругости (а) и коэффициента Пуассона (б) по длине тоннеля.

Результаты вычисления скоростей продольных и поперечных волн представлены в виде графика их изменения по длине тоннеля (рис. 39).

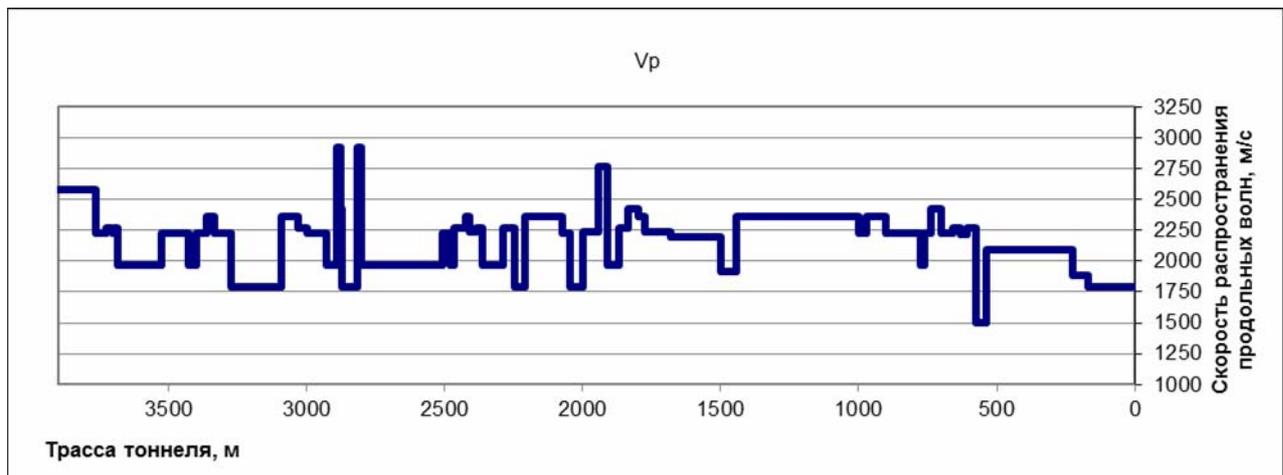


Рис. 39. Изменение скорости распространения продольных (а) и поперечных (б) по длине тоннеля.

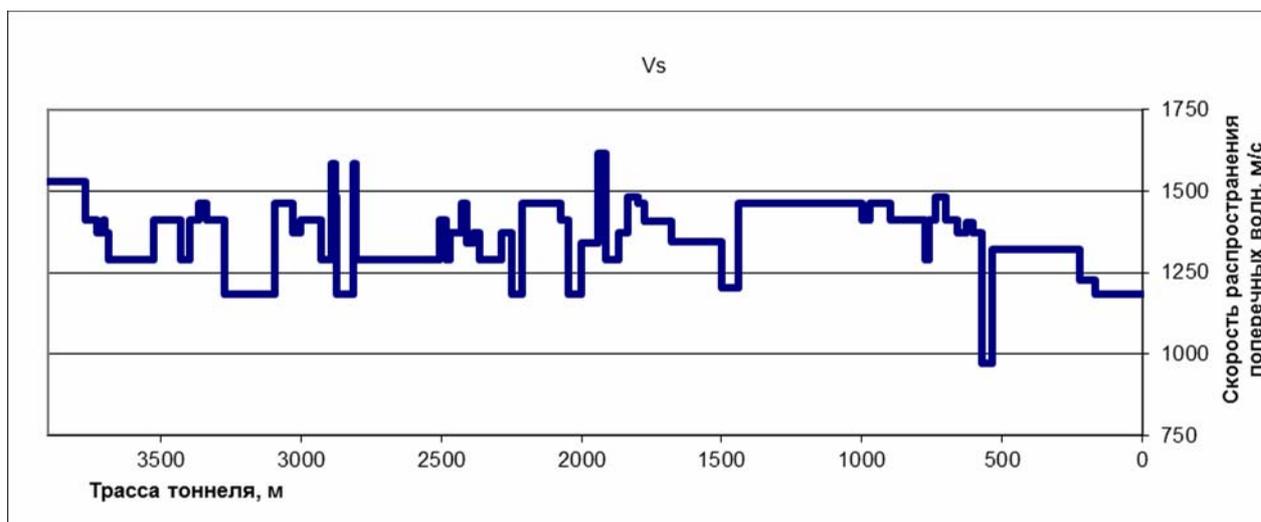


Рис. 39. Окончание.

В качестве эталонного грунта, относительно которого ведется расчет приращения балльности был принят песчаник со значениями $V_s=2230$ м/с и $\rho_s=2,65$ г/дм³. Так как расчет ведется относительно скальных грунтов, то исходная сейсмичность снижается на 1 балл и составляет 5,9 баллов. В результате, расчетная сейсмическая опасность, полученная по методу сейсмических жесткостей составляет для основания тоннеля от 6,46 для участков с повышенной трещиноватостью до 6,23 для участков крепких песчаников, алевролитов, их переслаиваний и вулканитов.

Для определения приращения сейсмичности с глубиной, были использованы значения глубины заложения тоннеля по данным геодезических изысканий, которая изменяется от 32,5 до 365 м. При этом сейсмическая опасность уменьшается на величину от 0,14 до 1,06 балла.

На рис. 40 показана кривая изменения сейсмической опасности Кузнецовского тоннеля, полученная суммарным приращением балльности по методам сейсмической жесткости и уменьшении сейсмичности с глубиной, а также осредненная до 1 балла. Согласно приведенной схеме, припортальные участки тоннеля имеют сейсмическую опасность равную 6 баллов. Участки с условного пикета 365–607 и 3525–3862 характеризуются изменением сейсмичности, вследствие увеличения глубины заложения тоннеля.

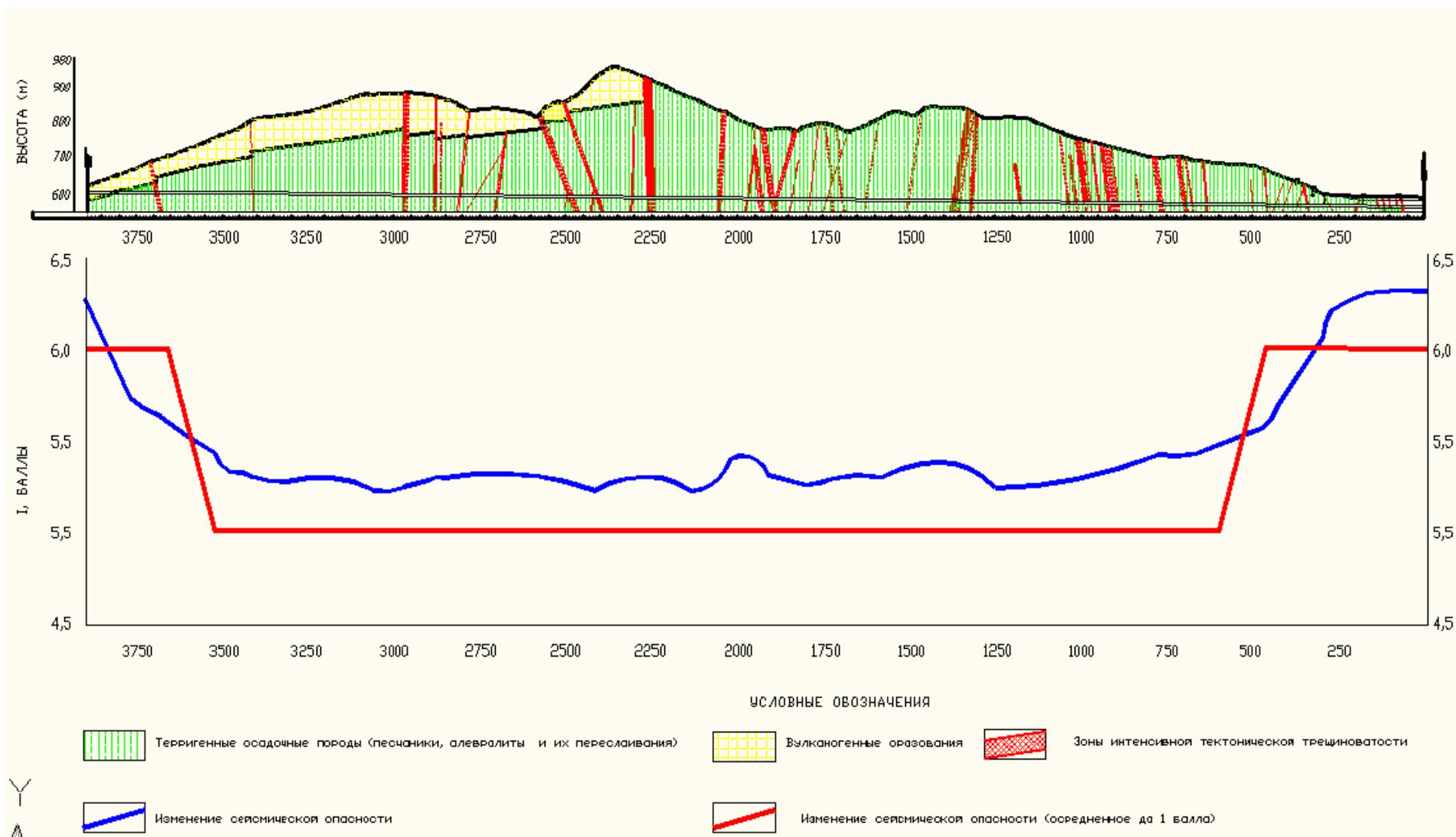


Рис. 40. Сейсмическое микрорайонирование трассы Кузнецовского тоннеля.

Центральная часть, длиной 2,9 км, за счет большой глубины и высоких сейсмических жесткостей оценивается в 5 баллов.

При комплексности исследования остался не раскрытым вопрос сдвигов в разрывах при землетрясениях. Для оценки этого процесса необходимо применение инструментальных методов измерений. Сведения о значениях сдвиговых характеристик в схожих условиях отсутствуют. Для решения этой проблемы рекомендуется проводить работы по мониторингу сейсмичности и движений земной коры, методика которых описана в следующей главе.

5.4. Инженерно-геологическое зонирование трассы тоннеля

Для упрощения комплексной оценки инженерно-геологических условий часто используются различные группирования горного массива по признаку однородности поведения по категориям (например, весьма сложные, сложные и нормальные условия, или класс 1, 2 и т.д.). При этом в зарубежной практике большое распространение получили рейтинговые классификации массива, используемые для обобщения геологических, геомеханических и гидрогеологических данных при проектировании различных сооружений.

Различные ученые, в том числе и отечественные, в разное время занимались разработкой классификаций массивов: Булычев Н.С. (классификация массива по устойчивости) [Булычев, 1982], Дир Д. (Deer D, Rock Quality Designation) [Deere D.U., Deere D.W., 1988], Терцаги К. (Terzaghi K) [Terzaghi, 1965], Бартон Н. (Barton, Q-classification) [Barton et al., 1974], Бьенявский З. (Bieniawski Z.T., Rock Mass Rating) [Bieniawski, 1989], Лобшир Д. (Laubscher D.H., Mining Rock Mass Rating) [Laubscher, 1990].

Для проектирования тоннелей наиболее популярными являются – RMR (Rock Mass Rating), рейтинг массива горных пород, разработанный профессором Бьенявски, и геотехническая классификация Норвежского технологического института Q-classification. Оба вышеназванных рейтинга основаны на присвоении характеристикам массива балльной оценки, совокупность которых в итоге

характеризует качество массива и, исходя из оценки, запроектировать крепление и максимальный устойчивый пролет.

Численное значение Q определяется по формуле:

$$Q=RQD/J_n \times (J_r)/(J_a) \times (J_w)/SRF, \quad (24)$$

где RQD – показатель качества породы;

J_n – показатель количества систем трещин;

J_r – показатель шероховатости поверхности трещин;

J_a – показатель измененности (сцепления) трещин;

J_w – водный фактор;

SRF – фактор снижения напряжений.

Отношение RQD/J_n представляет собой строение массива и является приближенным значением размера блока, с двумя экстремальными значениями 100/0,5 и 10/20. Большие блоки должны быть в несколько раз больше среднего размера блока, а более мелкие фракции – составляют менее половины этого блока, глинистые фракции не рассматриваются.

Отношение J_r/J_a – прочность на сдвиг вдоль поверхности трещин, представляет характеристики шероховатости стенок трещин и материала, заполняющего трещины и их фрикционные свойства. Наиболее благоприятное значение отношение имеет при шероховатых поверхностях трещин, трещинах с низкой степенью выветривания по направлению вдоль контакта.

Отношение J_w/SRF – активный коэффициент напряженного состояния. Параметр J_w представляет собой параметр давления грунтовых вод, которое снижает прочность породы на срез, из-за снижения нормальной составляющей давления. К тому же подземные воды могут привести к эффекту размягчения породы и возможности вымывания глинистых частиц из трещин.

В зависимости от получаемого значения рейтинга производится классификация горного массива по его качеству – от исключительно слабого до исключительно крепкого. Кроме того, результаты расчетов классификации используются при проектировании крепи и параметров устойчивого пролета.

Характеристика горного массива по Q-рейтингу

Q	Описание горного массива
0,01–0,001	Исключительно слабый
0,01–0,1	Крайне слабый
0,1–1,0	Очень слабый
1–4	Слабый
4–10	Средний
10–40	Крепкий
40–100	Очень крепкий
100–400	Чрезвычайно крепкий
400–1000	Исключительно крепкий

Рейтинг профессора Бьенявски рассчитывается следующим образом:

$$RMR = JA1+JA2+JA3+JA4+JA5, \quad (5.8)$$

где JA1 – рейтинг по прочности на одноосное сжатие;

JA2 – рейтинг количественного показателя трещиноватости RQD;

JA3 – рейтинг шага трещин;

JA4 – рейтинг характеристики и состояния трещин;

JA5 – рейтинг обводненности массива.

Характеристика горного массива по показателю RMR

Рейтинг RMR	Класс (категория)	Описание	Степень устойчивости
100–81	I	Очень хороший	Весьма устойчивый
80–61	II	Хороший	Устойчивый
60–41	III	Средний	Средней устойчивости
40–21	IV	Плохой (низкого качества)	Неустойчивый
<20	V	Очень плохой (очень не качественный)	Весьма не устойчивый

Автором был выполнен расчет обеих вышеназванных классификаций для условий Кузнецовского тоннеля. Использование двух рейтингов обусловлено тем,

что RMR не учитывает напряженно-деформируемого состояния массива, в то же время Q не учитывает прочностных свойств горных пород.

В качестве исходных данных для подсчета рейтинговых классификаций были использованы материалы, полученные автором в ходе исследования: прочностные характеристики пород, результаты полевых и камеральных исследований трещиноватости, результаты гидрогеологических исследований, геомеханических расчетов, анализа геологического строения и др.

Применение классификаций подразумевает использование параметра RQD – отношение суммы кусков керна больше 10 см к общей длине выхода керна. Вследствие отсутствия данных по этому параметру в ходе бурения и проходки тоннеля, будет проведено сопоставление имеющихся данных по степени трещиноватости с показателем RQD.

За характеристику нетрещиноватых принимается RQD равный 90 %, слаботрещиноватых – 75 %, трещиноватых – 50 %, сильнотрещиноватых – 30 %. На участках зон разрывных нарушений параметр RQD принимался равным 20 %.

При структурном картировании обнажений в районе тоннеля, было определено, что в основном трещины представлены тремя основными системами. Шаг трещин варьируется от 0.3–1 м для среднетрещиноватых пород, до 0.1–0.25 для сильнотрещиноватых пород. Характеристики стенок трещин принимались исходя из характеристик, снятых на обнажениях, при изучении керна, а также расположения участка съемки.

Для оценки по обводненности были использованы результаты гидрогеологических исследований, проведенных автором и анализ режимных наблюдений, полученных при проходке тоннеля.

Рейтинг напряженно-деформируемого состояния принимался на основе моделирования НДС с характеристикой зон концентрации напряжений, влияющих на качество массива.

В пределах каждого интервала, где изменялась любая составляющая рейтингов было проведено разделение для более детальной характеристики и определения аномальных зон.

Автором произведены расчеты и для наглядности сведены в графики изменения рейтинга по трассе тоннеля, которые показаны на рис. 41 (RMR) и 42 (Q).

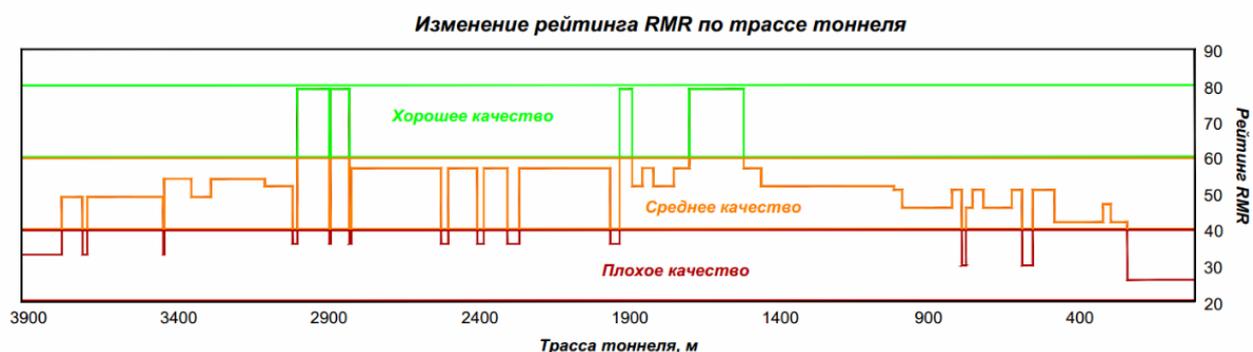


Рис. 41. Изменение рейтинга RMR по трассе тоннеля.

По расчету Rock Mass Rating массив в большей части характеризуется средним качеством со значениями RMR в пределах 40–60. Присутствует закономерное резкое снижение значения рейтинга в пределах многочисленных зон тектонических нарушений, попадающих в зону плохого качества пород. При этом, аномальные зоны в припортальных участках тоннеля имеют пониженные значения рейтинга в сравнении с дизъюнктивами в средней части тоннеля. Это объясняется меньшей прочностью выветрелой толщи, слагающей припортальные участки и их обводненностью. Кроме того, максимально низкими значениями рейтинга характеризуется зона восточного портала. На этом участке плохое качество в основном связано с обводненностью, очень низкой прочностью пород, их высокой степенью трещиноватости и неблагоприятными характеристиками трещин. Этим участкам при проектировании и строительстве второй очереди тоннеля, а также при эксплуатационном мониторинге существующего тоннеля необходимо уделять особое внимание.

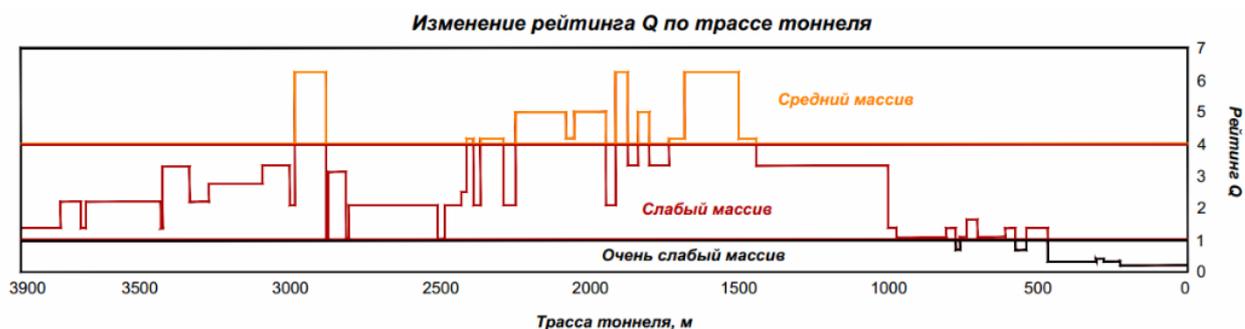


Рис. 42. Изменение рейтинга Q по трассе тоннеля.

Результаты классификации Q несколько отличаются от RMR. В первую очередь, четко выделяется участок с отличным от всей трассы НДС в пределах условных пикетов 2400–3100. Но с точки зрения интервала, характеризующего массив, данное условие не повлияло на снижение его оценки. Кроме того, по данной характеристике большая часть массива относится к слабым породам. Присутствуют очень слабые – это является следствием высокой чувствительности классификации к водопроявлениям. Это условие требует особого внимания при проектировании и строительстве второй очереди. Максимально прочным массивом по Q-рейтингу в Кузнецовском тоннеле является средняя прочность со средним значением 6,33, интервалы закономерно располагаются в центральной части тоннеля. Как видно из рисунка, зоны тектонических нарушений закономерно имеют пониженные значения, но в отличие от RMR рейтинг разломных зон в Q не всегда является наименьшим и меняет качественную принадлежность. Характерная особенность оценки по классификации Q – преобладание продолжительного участка Восточного портала к значениям очень слабого массива. Это является причиной высокой чувствительности используемой рейтинговой системы к водопроявлениям, а также высокой степени трещиноватости и плохого состояния трещин.

Без учета зон дизъюнктивных нарушений трасса тоннеля подразделяется на 3 зоны по RMR. Первая – это зона низкого качества массива – связана с приуроченностью участка к коре выветривания и обводненности участка. Вторая и основная – зона средней прочности, занимающая большую часть трассы. В данных условиях – высокая степень трещиноватости и ее характеристики предопределили приуроченность к среднему качеству. И последняя зона – хорошее качество – за счет высокой прочности и низкой трещиноватости, а также отсутствия водопроявлений в средней части тоннеля.

Результаты зонирования позволяют обобщить накопленный материал и сформировать целостную картину ИГУ массива, вмещающего тоннеля, позволяет комплексно выявить проблемные участки, требующие особенного внимания в эксплуатационный период и при строительстве второй очереди.

ГЛАВА 6. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОВЕДЕНИЮ КОМПЛЕКСНОГО ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

За относительно краткосрочным этапом проектирования и строительства объекта следует длительный этап его эксплуатации. На протяжении этого этапа необходимо обеспечить надежность, безопасность, долговечность и максимально уменьшить экологический эффект сооружения на геологическую среду. Для выполнения задачи необходим выбор оптимального состава работ для проведения мониторинга геологической среды, учитывая особенности конкретного объекта. Рекомендуемые исследования имеют высокую ценность, так как решают важную задачу обеспечения надежности конструкции и могут дать богатый материал исследователям, который поможет при проектировании и строительстве сооружений в условиях северного Сихотэ-Алиня.

Создание методики проведения мониторинга основано на концепции диагностического прогнозно-профилактического мониторинга предложенной для Северо-Муйского тоннеля учеными ИрГУПСа [Быкова и др, 2007].

В основе мониторинга лежит геоинформационная система, включающая начальный банк данных геологической среды и сооружения, формируемый на стадии ввода сооружения в эксплуатацию и различные направления мониторинга геологической среды. Далее происходит обработка информационных потоков, на основе которых строятся прогнозные феноменологические, математические и экспертные модели и осуществляется подготовка стратегии управления, с учетом критериев безопасности, надежности и долговечности и требований нормативных документов. При этом устанавливаются режимы ремонтных, профилактических работ, работы транспорта и персонала. Принципиальная блок-схема представлена на рис. 43.

Подобная технология реализована помимо Северо-Муйского тоннеля на ряде важных транспортных объектов: мостовой переход через реку Ангара, Коршуновский и Байкальский тоннели.



Рис. 43. Блок-схема мониторинга геологической среды.

В состав космического мониторинга необходимо включить наблюдения за климатическими условиями и их изменениями. Следует ежедневно фиксировать фактические показатели количества атмосферных осадков, температуры, влажности воздуха, направления и скорости ветра.

Геодезический мониторинг необходим для инструментальных измерений современной подвижности тектонических нарушений. Для выполнения этой задачи рекомендуется применять современные технологии космогеодезических измерений. Принцип рекомендуемых исследований основан на методике, применяемой учеными Института горного дела УрО РАН [Панжин, 2000а, Панжин, 2000б, Панжин, Голубко, 2000]. Технология, разработанная сотрудниками ИГД, позволяет применять одночастотные GPS приемники, получая точность, сравнимую с дорогостоящими двухчастотными приемниками. Основная идея этой технологии состоит в том, что один из приемников (базовый) помещается в точку с заранее известными координатами, так называемую базовую станцию, и ведет непрерывные спутниковые наблюдения весь сеанс GPS-съемки. Остальные приемники помещаются в точки, пространственное

положение которых определяется относительно базовой станции. Определение величин смещений и деформаций производится путем многократных переопределений координат реперов и геометрических элементов длин и превышений специально оборудованных наблюдательных станций. Под наблюдательной станцией понимается система наблюдательных пунктов, которые закладываются на земной поверхности, в толще горных пород и в конструктивных элементах сооружений. В условиях района Кузнецовского тоннеля, рекомендуется устанавливать железобетонные реперы, конструкция которых рекомендована «Правилами закрепления пунктов геодезической сети» (рис. 44)

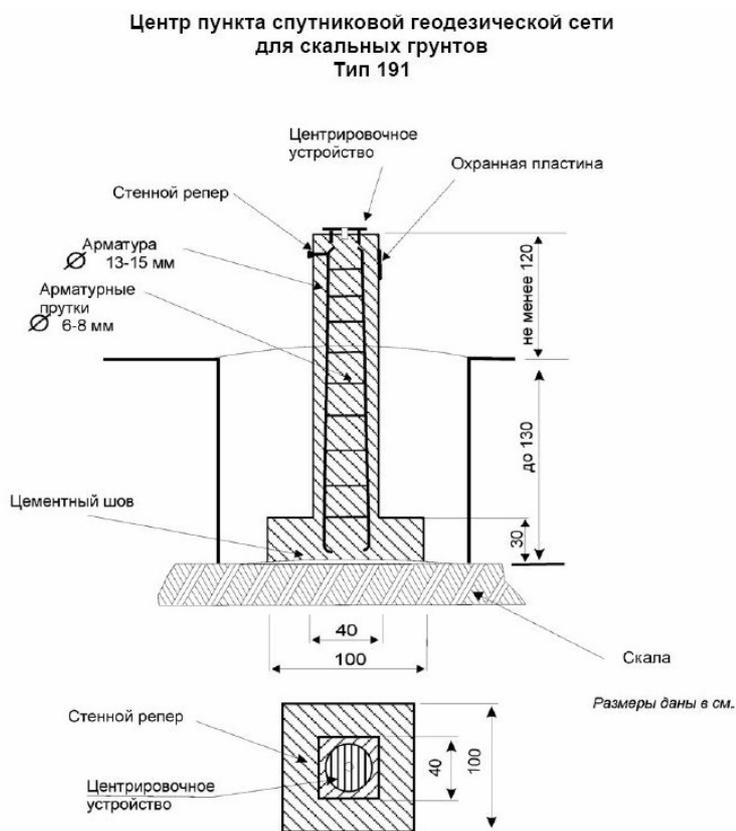


Рис. 44. Конструкция железобетонного репера [Правила..., 2001].

При планировании размещения пунктов необходимо учитывать неблагоприятные факторы, влияющие на точность приема сигнала. В данном случае это электрический шум, многолучевой ход радиосигнала и ограниченная видимость на спутники.

Устанавливать наблюдательные пункты следует таким образом, чтобы было возможно наиболее точно определить динамику движения разломов. Для

массива тоннеля рекомендуется закреплять реперы в бортах разрывных нарушений (рис. 45).

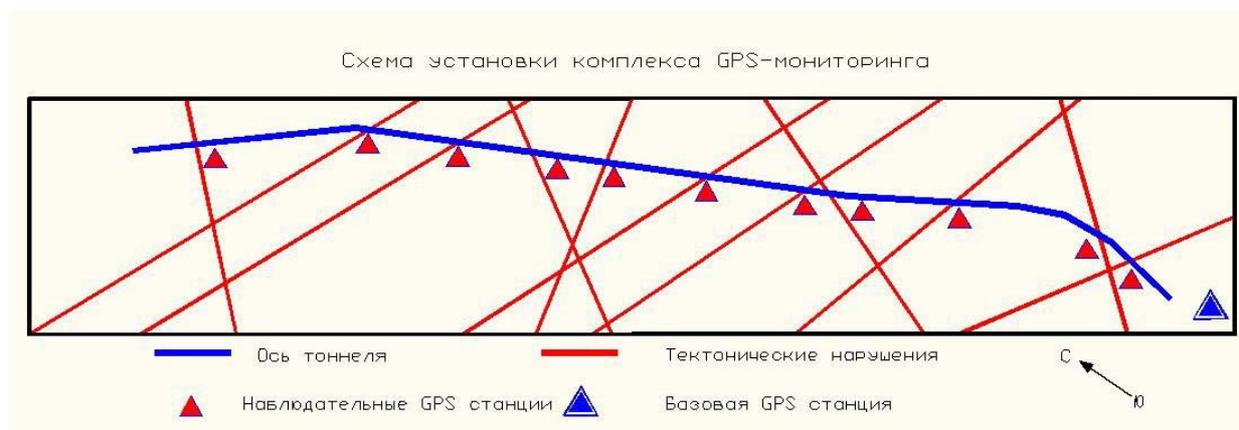


Рис. 45. Схема расположения наблюдательных станций.

В первый год рекомендуется проводить измерения 1 раз в месяц. Неблагоприятное воздействие электрического шума можно исключить еще на стадии проектирования наблюдательной станции, в этом случае необходимо избегать закладки рабочих и опорных реперов на расстоянии ближе чем 25–50 м от линий электропередач, трансформаторных подстанций и контактной сети электрического транспорта. Воздействие многолучевого хода спутникового радиосигнала удастся устранить как путем экранирования приемника, так и во время обработки базовых линий путем исключения из нее спутников с некачественным радиосигналом. Поэтому основное внимание при планировании спутниковых наблюдений отводится моделированию препятствий для прохождения спутникового радиосигнала. Учитывая специфику данного вида работ – многократное переопределение координат реперов наблюдательной станции – задача планирования препятствий прохождения сигнала решается довольно просто, с использованием набора шаблонов, уже имеющихся для большинства реперов станций, где производятся наблюдения. По полученным в результате моделирования графикам распределения количества видимых спутников и фактора PDOP, составляются примерные маршрутные листы таким образом, чтобы собственно наблюдения велись в периоды времени с наименьшим PDOP, а в периоды, когда фактор PDOP достаточно высок, совпадали с перемещениями приемника между реперами и центрированием прибора.

Камеральная обработка измерений производится при помощи специальных программных комплексов. В итоге, полученные пространственные координаты реперов, длины линий и превышений между реперами подвергаются дальнейшей обработке. Результаты наблюдений за сдвижением и деформациями горных пород являются основой для геодинамического мониторинга.

Геологический мониторинг. Объектами наблюдений геологического мониторинга являются припортальные выемки тоннеля. Рекомендуется периодически (2 раза в год) оценивать состояние горных пород, слагающих выемки [Квашук и др., 2012]. Развитие трещиноватости, вымывание заполнителя трещин, динамическое воздействие могут привести к активизации опасных геологических процессов.

В качестве рекомендуемых мероприятий предлагается выполнять наблюдения за эталонными участками, фиксировать участки развития гравитационных процессов и оценивать скорость денудации склонов. За эталонные следует принимать участки наиболее приближенные к железнодорожному пути, которые могут угрожать безопасности и бесперебойности движения в пределах выемок. Необходимо выполнять разновременные расчеты коэффициента трещинной пустотности, блочность и другие количественные показатели трещиноватости. Также оценивать состояния заполнителя трещин и отслеживать развитие нарушений, направленных неблагоприятно по отношению к оси тоннеля. В результате, необходимо получить качественные и количественные данные о характере трещинообразования горных пород природно-техногенной среды тоннеля.

При возникновении гравитационных процессов необходимо отметить расположение и объем снесенных обломков. Для прогноза активизации экзогенных процессов рекомендуется выполнять оценку скорости денудации склонов с помощью метода цифровой фотограмметрии, активно развиваемой учеными ДВГУПС [Квашук и др., 2012]. Суть метода заключается в построении разновременных объемных моделей откоса и расчета объема отступления стенки обнажения по расчетным сечениям. Для этого необходимо получить множество

фотоснимков рельефа, на основе которых строится цифровая модель местности (ЦММ). В дальнейшем, происходит обработка ЦММ и построения объемной модели с помощью специализированного программного комплекса, разработанного сотрудниками ДВГУПС совместно с ОАО «Центринформ». После чего по расчетным сечениям (рекомендуется шаг 1 м) вычисляется площадь отступления стенки откоса. Тем самым, определяется объем снесенного материала. Имея несколько одновременных отсчетов можно оценить скорость денудации склонов и спрогнозировать характеристики опасных геологических процессов.

Проведения гидрогеологического мониторинга рекомендуется проводить два раза в год – в период активного проявления атмосферных осадков (с ноября по май) и в сухой период (с мая по ноябрь). В состав работ входит гидрогеологическое обследование, гидрометрические и геохимические исследования.

Гидрогеологическое обследование заключается в осмотре состояния тоннеля и транспортно-дренажной штольни на предмет водопроявлений. Необходимо фиксировать обводненные участки, характер и месторасположение течи.

Гидрометрические исследования представляют собой измерение объема и температуры инфильтрующихся грунтовых вод.

Геохимические исследования состоят из определения изменения химического и микрокомпонентного состава грунтовых вод. Для этого необходимо отбирать пробы на закрепленных участках и выполнять лабораторные исследования количественного химического и микрокомпонентного анализов подземных вод. Схема рекомендуемых точек отбора проб представлена на рис. 46.

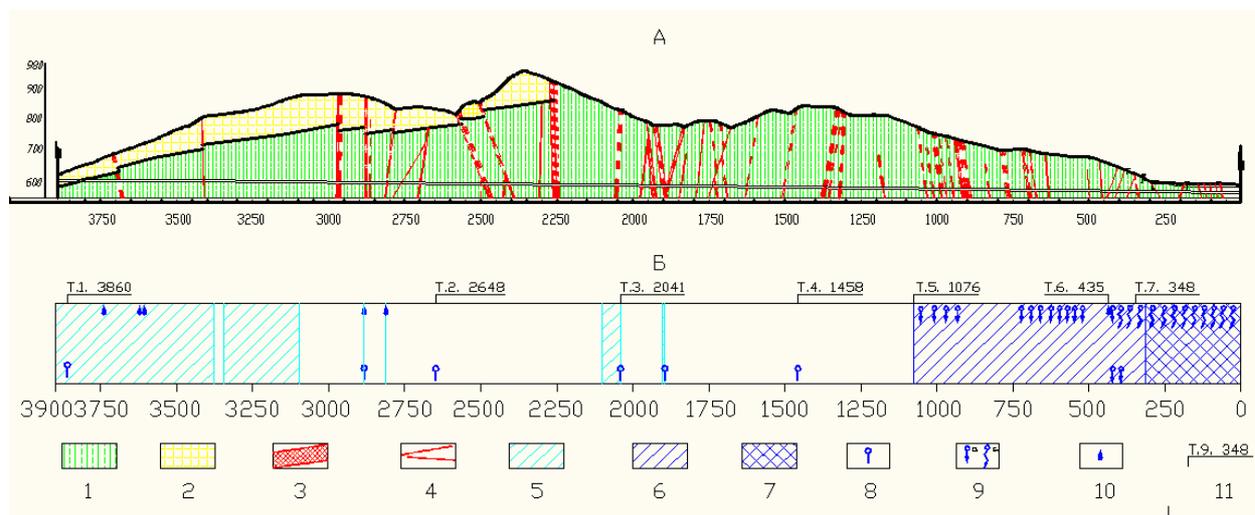


Рис. 46. Геологический разрез и схема описания водоявлений при обследовании: 1 – терригенные горные породы (песчаники и алевролиты); 2 – эффузивные горные породы; 3 – зоны тектонической трещиноватости; 4 – тектонические швы и трещины; 5 – участки слабой обводненности; 6 – участки средней обводненности; 7 – участки сильной обводненности; 8 – слабые течи из технологических отверстий; 9 – течи из технологических отверстий струйные (А), струйные с напором (Б); 10 – капли со свода; 11 – рекомендуемые участки отбора проб подземных вод.

При проведении гидрогеологического мониторинга необходимо уделять особое внимание новым обводненным участкам, не фиксированным при предыдущих наблюдениях. В пределах участков необходимо выполнять комплекс гидрометрических и геохимических исследований, описанных выше.

В качестве *геофизического мониторинга* рекомендуется создать систему сейсмометрической службы, состоящей из сети специальных приборов для измерения ускорений колебаний и деформаций.

Основной задачей инженерно-сейсмометрической службы является накопление и обработка инструментальных данных о поведении конструкций тоннелей и окружающего грунта во время землетрясений различной интенсивности и выдача информации научным и проектным организациям. Эта информация может быть использована для разработки методов прогнозирования возможного развития опасных сейсмических деформаций в тоннельных конструкциях, уточнения аналитических моделей работы подземных конструкций во время землетрясений, оценки влияния различных грунтовых условий и глубины залегания на работу тоннеля. Для измерения ускорений рекомендуется установить трехкомпонентные акселерометры на поверхности и непосредственно

в тоннеле (рис. 47). Поверхностные устройства необходимо установить непосредственно над тоннельными для выявления истинного затухания сейсмической опасности с глубиной.

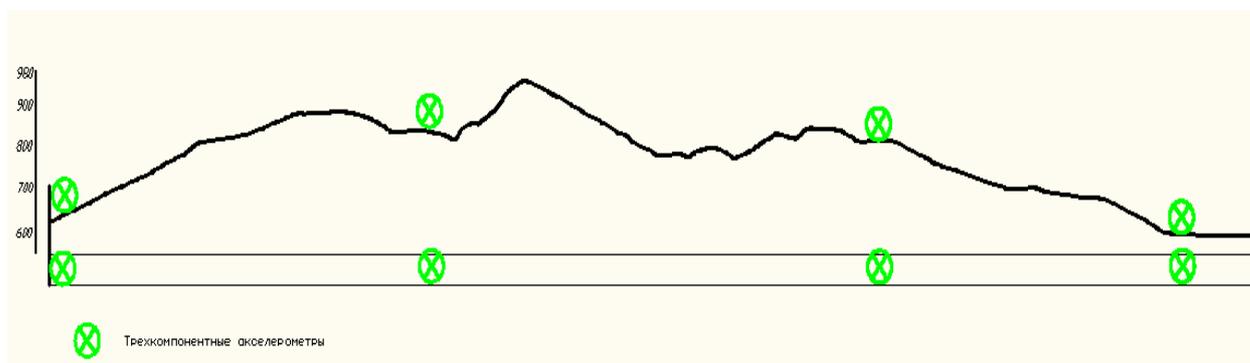


Рис. 47. Схема расположения акселерометров.

Мониторинг деформаций конструкций тоннеля рекомендуется проводить с использованием волоконно-оптической системы мониторинга подземных сооружений [www.lscor.ru]. Волоконно-оптическая система мониторинга состоит из трех основных компонентов – анализатора, непрерывно волоконно-оптического сенсора и специализированного программного обеспечения. Принцип работы заключается в фиксации изменения оптических характеристик волокна внутри сенсоров, при изменении внешних параметров (растяжение, сжатие, температура, акустическое давление и т.д.). Суть метода – установка сенсора вдоль тоннеля на внутренней поверхности свода и стенок (рис. 48)

После установки система в автоматическом режиме может контролировать различные параметры той части тоннеля, на которой установлены сенсоры. При этом точность определения продольной составляющей деформации может достигать 0,05 мм. Полученные значения непрерывно обрабатываются с помощью специализированного программного комплекса (ПК). ПК позволяет отображать в графическом и табличном виде данные, полученные системой в разных частях конструкции, строить зависимости деформации того или иного участка как функцию от времени или приложенной нагрузки, моделировать поведение объекта, прогнозировать места появления нарушений и ослаблений, а

также анализировать зависимость деформаций от периодических, быстроменяющихся процессов (например, транспортный трафик).

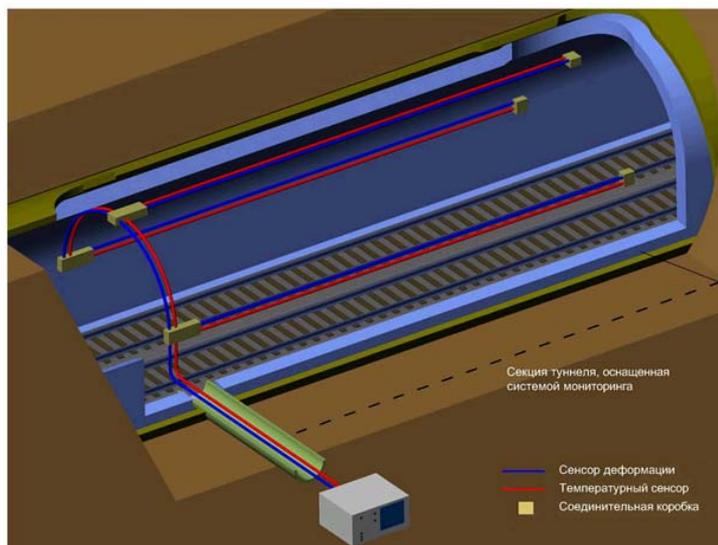


Рис. 48. Пример расположения непрерывных волоконно-оптических сенсоров [www.lscm.ru].

Рекомендуемая система применяется для контроля негативного воздействия различных факторов: 1) деградации прочностных свойств железобетонных конструкций со временем; 2) просадки околотоннельных грунтов; 3) вибрационных воздействий проходящих железнодорожных составов.

Следовательно, рассмотренный вид наблюдений также относится к геотехнической ветке мониторинга и позволит комплексно оценить деформации конструкций с точки зрения геологических процессов и техногенного воздействия.

Геотехнический мониторинг. В ветке геотехнического мониторинга рассматривается проявление геологических процессов со стороны влияния на конструкции тоннеля, а также техногенное влияние на массив, вмещающий тоннель. В первую очередь необходимо проводить обследование состояния железобетонных конструкций обделки и железнодорожного пути на предмет трещинообразования и деформаций. Мониторинг трещинообразования железобетонной обделки рекомендуется проводить 3 раза в год. Наблюдения производятся путем осмотра конструкций обделки. При обнаружении трещин в бетоне необходимо зафиксировать на фотоснимке, обозначить и описать их характеристики: расположение в тоннеле, направление, длина, раскрытость,

водоносность. Для наблюдения за ростом нарушений их края можно оконтурить цветом, что позволит в дальнейшем спрогнозировать возможные изменения. При недоступности непосредственных измерений, замеры следует проводить по фотоснимкам. Обнаруженные трещины необходимо зарисовывать на схеме распространения трещин в тоннеле. При возникновении зон трещиноватости или крупных нарушений, необходимо сопоставить данные с особенностями геологического строения и геомеханических условий. Это позволит выполнить прогноз, что понизит риск возникновения аварийных ситуаций. Вопрос наблюдения за деформациями конструкций рассмотрен в ветке геофизического мониторинга.

В остальную часть геотехнического мониторинга следует включить фиксирование характеристик грузопотоков, проходящих через тоннель (количество составов, масса, количество вагонов и др.) и сведений о проведенных ремонтах и усилениях.

В результате, на базе двух информационных потоков производится прогнозное моделирование. Сопоставление данных различного вида мониторинга позволит наиболее точно выделить опасные геологические процессы, которые могут повлиять на безопасность, бесперебойность и долговечность эксплуатации тоннеля. На основе прогноза разрабатывается стратегия управления сооружением. При этом устанавливаются режимы работы транспорта и персонала, содержание конструктивно-технологических систем, ремонт, реконструкция и профилактические работы.

Рекомендуемая система мониторинга охватывает все процессы, которые происходят в геологической среде в районе тоннеля. Применение подобной схемы, успешно реализованной на ряде важных транспортных объектов, среди которых 15-километровый Северо-Муйский тоннель, позволяет комплексно оценить взаимодействие природно-техногенной среды тоннель–горный массив с достаточной надежностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические результаты и выводы исследования инженерно-геологических условий и оценка безопасности эксплуатации Кузнецовского тоннеля заключаются в следующем:

1. Изучены и проанализированы отечественные и зарубежные исследования, связанные с инженерно-геологическим изучением тоннелей, показана актуальность работ в данной области.
2. Произведен анализ геологической, геофизической, гидрогеологической, инженерно-геологической и сейсмической изученности района строительства, был сделан вывод, что для более безопасной и бесперебойной эксплуатации тоннеля необходимы более точные данные и достоверные результаты.
3. Подобрана оптимальная методика проведения исследования, охватывающая вопросы трещиноватости, физико-механических свойств, сейсмичности и напряженно-деформируемого состояния горных пород, вмещающих тоннель.
4. Исследованы природные факторы, формирующие природно-техногенную систему, и охарактеризованы инженерно-геологические условия как сложные, отличающиеся неоднородностью, сложным геологическим строением, разрывной тектоникой и широким спектром ОГП.
5. Уточнено геологическое строение горного массива тоннеля, которое представляет собой дислоцированное терригенное основание, покрытое вулканическим чехлом.
6. Определены показатели физико-механических свойств горных пород, и проведена их классификация;
7. Выявлено расположение и направление разрывных нарушений, пересекающих створ тоннеля и дана их характеристика.
8. Изучена трещиноватость горных пород на обнажениях и микротрещиноватость в шлифе, в результате получены количественные и качественные показатели нарушенности.

9. Определено распространение и влияние трещиноватости на горные породы и сделаны выводы, что трещиноватость является основным фактором, влияющим на устойчивость сооружения.
10. На основе проведенного расчета напряженно-деформируемого состояния, установлено геомеханическое состояние массива после проходки тоннеля и выявлены неблагоприятные участки.
11. Проанализированы гидрогеологические особенности тоннеля, отобраны образцы и сделаны анализы грунтовых вод, что позволило охарактеризовать обводненность и сделать ее прогноз на эксплуатационный период.
12. Определена исходная сейсмическая опасность участка и на ее основе произведено сейсмическое микрорайонирование тоннеля.
13. Используются современные зарубежные классификации горных пород массива с целью зонирования трассы тоннеля, учитывающие комплекс проведенных автором исследований
14. Подобран оптимальный набор инженерно-геологического мониторинга, охватывающего все процессы, происходящие в рассматриваемой природно-техногенной среде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булычев, Н.С. Механика подземных сооружений: учебное пособие / Н.С. Булычев. – М., Недра, 1982. – 270 с.
2. Быкова, Н.М. Геотехническая надежность протяженных транспортных сооружений / Н.М. Быкова // Современные технологии, системы управления и математическое моделирование. – Иркутск: ИрГУПС. – 2004. – № 1. – С. 55-61.
3. Быкова, Н.М. Как обеспечить надежную, безопасную и экономически эффективную эксплуатацию Северо-Муйского тоннеля / Н.М. Быкова // Современные технологии, системы управления и математическое моделирование. – Иркутск: ИрГУПС. – 2004. – № 2. – С. 40-45.
4. Быкова, Н.М. Особенности работы Северо-Муйского тоннеля в условиях активной геодинамики / Н.М. Быкова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС. – 2005. – № 4 (8). – С. 169-174.
5. Быкова, Н.М. Геотехнический мониторинг транспортных тоннелей / Н.М. Быкова, С.В. Елисеев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС. – 2005. – № 4. – С. 177-180.
6. Быкова, Н.М. Диагностический прогнозно-профилактический мониторинг Северо-Муйского железнодорожного тоннеля / Н.М. Быкова, А.А. Дьяченко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС. – 2005. – № 4. – С. 110-114.
7. Быкова Н.М. Математическое моделирование работы тоннельных обделок с учетом геодеформационных воздействий в зонах разломов земной коры / Н.М. Быкова, Д.А. Зайнагабдинов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС. – 2007. – № 1. – С. 37-46.
8. Быкова, Н.М. К вопросу мониторинга и прогнозирования поведения транспортных тоннелей при обеспечении их безопасности / Н.М. Быкова, Д.А. Зайнагабдинов // Проблемы и перспективы изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации российских железных дорог: материалы Всерос. науч.-практ. конф., 10-11 окт. 2007 г.. – Иркутск, 2007. – Т. 1. – С. 90-97.

9. Быкова, Н.М. Измерение деформаций в стенах обделки и путевом бетоне Северо-Муйского тоннеля с использованием фотоупругих датчиков / Н.М. Быкова, А.С. Исайкин, А.Н. Моргунов, Д.А. Зайнагабдинов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС. – 2007. – № 1 (13). – С. 69-74.
10. Быкова, Н.М. Протяженные транспортные сооружения на активных геоструктурах. Технология системного подхода / Н.М. Быкова. – Новосибирск: Наука, 2008. – 212 с.
11. Вдовин, Ю.М. Геологическая карта СССР м-ба 1:200000. Серия Сихотэ-Алинская. Лист М-54-ХV. – М. Госгеолтехиздат. – 1961.
12. Верховин, И.И. Условия обводненности Северо-Муйского тоннеля / И.И. Верховин, М.А. Тугарина, Ю.Н. Диденков, Л.Л. Шабынин, А.М. Реуцкая, М.А. Алтынникова, А.Ю. Легун // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС. – 2005. – № 4 (8). – С. 152-159.
13. Волоконно-оптическая система предупреждения опасных процессов в туннелях [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://lsc.com.ru/tunnel.html> 16(8)2012.
14. Голодковская, Г.А. Инженерно-геологическая типизация и изучение скальных массивов / Г.А. Голодковская, М. Матула, Л.В. Шаумян. – М.: Изд-во МГУ, 1986. – 272 с.
15. Горбушко, Р.М. Информационное инженерно-геологическое обеспечение проходки тоннелей комбайнами с пригрузом забоя: на примере г. Москвы. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук / Р.М. Горбушко. – Москва, 2007. – 22с.
16. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. Издание официальное. – М. Стандартинформ, 2013. – 42 с.
17. ГОСТ 21153.2-84 Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 11 с.
18. Дашко, Р. Э. Особенности геоэкологического состояния подземного пространства исторического центра Санкт-Петербурга / Р. Э. Дашко //

Геологический научно-популярный журнал «Минерал». – 1999. – № 2 (3). – С. 48–50.

19. Дашко, Р. Э. Геоэкологические аспекты развития и активизации природно-техногенных процессов и явлений в подземном пространстве Санкт-Петербурга / Р. Э. Дашко, О. Ю. Александрова // Геологический научно-популярный журнал «Минерал». – 2002. – № 1 (4). – С. 59–65.

20. Дашко, Р.Э. Инженерно-геологическая и геоэкологическая оценка биокоррозии строительных материалов в подземном пространстве Санкт-Петербурга / Р.Э. Дашко, П.В. Котюков // Эколого-геологические проблемы урбанизированных территорий: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции (19-20 декабря 2006 г.). – Екатеринбург: Изд-во УГГУ. – 2006. – С. 18-21.

21. Дашко, Р.Э. Исследование биоагрессивности подземной среды Санкт-Петербурга по отношению к конструкционным материалам транспортных тоннелей и фундаментов / Р.Э. Дашко, П.В. Котюков // Записки Горного института. Современные проблемы горной науки. – СПб, 2007а. – Т.172. – С. 217-220.

22. Дашко, Р.Э. Микроорганизмы в подземном пространстве: их роль в разрушении строительных конструкций (на примере Санкт-Петербурга) / Р.Э. Дашко, П.В. Котюков // Гидроизоляционные и кровельные материалы: Сборник докладов 4-ой Международной научно-технической конференции (17-18 апреля 2007 г.). – СПб.: АНТЦ «АЛИТ», 2007б. – С. 103-107.

23. Дашко, Р.Э. Влияние газогенерации в четвертичных отложениях Санкт-Петербурга на условия эксплуатации перегонных тоннелей метрополитена / Р.Э. Дашко, П.В. Котюков, Е.Ю. Шатская // Сергеевские чтения. Международный год планеты Земля: задачи геоэкологии, гидрогеологии и инженерной геологии. Выпуск 10. – М.: ГЕОС, 2008. – С. 208-213.

24. Дашко, Р.Э. Особенности оценки уязвимости и разрушения конструкционных материалов транспортных сооружений в подземном пространстве Санкт-Петербурга / Р.Э. Дашко, П.В. Котюков // Проблемы

снижения природных опасностей и рисков: Материалы Международной научно-практической конференции «ГЕОРИСК-2009». – М.: РУДН, 2009. – Т1. – С. 263-268.

25. Дзюба, А.А. Неотектоника Верхнеагарско-Муйской горной перемычки / А.А. Дзюба, Н.М. Быкова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС. – 2005. – № 4. – С. 119-123.

26. Дмитриев, А.Г. Геофизическое обследование основания пути в Северо-Муйском тоннеле / А.Г. Дмитриев, О.Н. Тирский, Н.М. Быкова, Ю.А. Хрюкин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС. – 2005. – № 4 (8). – С. 124-132.

27. Дорман, И.Я. Сейсмостойкость транспортных тоннелей / И.Я. Дорман. – М.: Транспорт, 1986. – 175 с.

28. Елисеев, С.В. Геотехнический мониторинг транспортных тоннелей / С.В. Елисеев, Н.М. Быкова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС. – 2005. – № 4 (8). – С. 124-132.

29. Елисеев, С.В. Северо-Муйский тоннель и технологии системного подхода к управлению безопасности состояния сложных технических объектов / С.В. Елисеев, С.К. Каргапольцев, Н.М. Быкова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС. – 2007. – № 4 (8). – С. 96-100.

30. Залуцкий, В.Т. Геодезический мониторинг для изучения смещений горных блоков в районе Северо-Муйского тоннеля / В.Т. Залуцкий, Н.М. Быкова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС. – 2007. – № 4(8). – С. 133-139.

31. Злобин, Г.А. Оценка инженерно-геологических и геомеханических свойств района Кузнецовского тоннеля (БАМ) / Г.А. Злобин, М.И. Потапчук // Маркшейдерия и недропользование. – 2012. – № 4. – С. 35-39.

32. Злобин, Г.А. Гидрогеологическая обстановка Кузнецовского тоннеля (Северный Сихотэ-Алинь) / Г.А. Злобин, В.В. Кулаков // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология – 2014. – №3. – С. 304-316.

33. Злобин, Г.А. Анализ инженерно-геологических условий кузнецовского тоннеля и их прогноз для строительства второй очереди / Г.А. Злобин, С.В. Квашук // Проблемы комплексного освоения георесурсов: материалы IV Всероссийской научной конференции с участием иностранных ученых (Хабаровск, 27-29 сентября 2011 г.). В 2 т. – Хабаровск: ИГД ДВО РАН, 2011. – Т. 1. – С. 45-52.

34. Злобин, Г.А. Структурно-литологические неоднородности массива вмещающего Кузнецовский тоннель / Г.А. Злобин, Г.Л. Кириллова, А.В. Кудымов // Строение литосферы и геодинамика: Материалы 24 Всероссийской молодежной конференции, 19-24 апреля 2011г. – Иркутск: ИЗК СО РАН. – 2011. – С. 151-152

35. Иванов, И.П. Инженерная геодинамика: учебное пособие / И.П. Иванов, Ю.Б. Тржцинский. – СПб.: Наука, 2001. – 416 с.

36. Инженерный анализ последствий землетрясений в Японии и США. Пер. с англ. В.А. Быховского – М.: Госстройиздат, 1961. – 194 с.

37. Карапетян, Б.К. Изучение сейсмо-взрывных колебаний в тоннеле Армводстроя на Лусаванском песочном карьере / Б.К. Карапетян, С.А. Пирузян // Труды Армянского ин-та стройматериалов и сооружений. – Ленинакан, 1959. – № 1. – С. 53 – 65.

38. Катков, Г.А. Оценка структурного ослабления горных пород / Г.А. Катков, С.А. Толмачев, Н.Т. Бедарев, С.В. Петухов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2003. № 8. – С. 66-67.

39. Квашук, С.В. Барьерные места на Дальневосточной железной дороге / С.В. Квашук // Путь и путевое хозяйство. – 2003. № 5. – С. 32-34.

40. Квашук С.В. Характеристика инженерно-геологических условий Кузнецовского тоннельного перехода на линии (Комсомольск-На-Амуре – Советская Гавань) / С.В. Квашук, П.А. Колтун, Г.А. Злобин // Научно-технические проблемы транспорта, промышленности и образования: труды Всероссийской научно-практической конференции, 21-23 апреля 2010 г. В 6 т. / под ред. О.Л. Рудых. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2010. – Т. 2. – С. 50-54.

41. Квашук С.В. Последствия инженерных ошибок при модернизации транспортных сооружений / С.В. Квашук С.В., П.А. Колтун, Г.А. Злобин // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке: труды Всероссийской молодежной научно-практической конференции с международным участием, 20-22 апреля 2011 г. В 5 т. / под ред. А.Ф. Серенко. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2011а. – Т. 2. – С. 137-142.

42. Квашук С.В. Геодинамические проблемы при транспортном освоении Дальнего Востока России / С.В. Квашук, П.А. Колтун, Г.А. Злобин // Превентивные геотехнические меры по уменьшению природных и техногенных бедствий: сборник трудов IV Международного геотехнического симпозиума (26-29 июля 2011 г.; Хабаровск, Россия, ДВГУПС)/ под ред. С.А. Кудрявцева и А.Ж. Жусупбекова. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2011б. – С. 320-324.

43. Квашук С.В. Условия и причины возникновения опасных геологических процессов на транспортных сооружениях в условиях Северного Сихотэ-Алиня / С.В. Квашук, П.А. Колтун, Г.А. Злобин // Тектоника, магматизм и геодинамика Востока Азии: VII Косыгинские чтения: материалы Всероссийской конференции/ под ред. А.Н. Диденко, Ю.Ф. Манилова. – Хабаровск: ИТиГ им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, 2011в. – С. 379-382.

44. Квашук, С.В. Исследование влияния трещиноватости пород перевальной части Северного Сихотэ-Алиня на устойчивость транспортных сооружений / С.В. Квашук, Г.А. Злобин, П.А. Колтун // Строение литосферы и геодинамика: Материалы 24 Всероссийской молодежной конференции, 19-24 апреля 2011г. – Иркутск: ИЗК СО РАН. – С. 151-152.

45. Квашук С.В. Особенности инженерно-геологических условий перевального участка ж.д. линии Комсомольск – Советская Гавань и рекомендации к проведению эксплуатационного мониторинга / С.В. Квашук, П.А. Колтун, Г.А. Злобин // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований: материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием/ под ред. Тальгамер Б.Л. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2012. – С. 304-309.

46. Корчагин, Ф.Г. Геомеханическая модель Приамурья и ее сейсмоструктурные следствия / Ф.Г. Корчагин, Л.А. Маслов, О.С. Комова // Тихоокеанская геология. – 2000. Т. 19, № 3. – С. 97-104.
47. Котюков, П.В. Инженерно-геологическое и гидрогеологическое обеспечение эксплуатационной надежности подземных транспортных сооружений в Санкт-Петербурге: на примере перегонных тоннелей «Елизаровская – Ломоносовская», «Обухово – Рыбацкое». Дис. ... канд. геол.-мин. наук / П.В. Котюков. – Санкт-Петербург, 2010. – 262 с.
48. Кудрявцев, А.В. Обоснование надежности технологических схем строительства и эксплуатации тоннелей: на примере ж/д тоннелей трасс Абакан – Тайшет и Абакан – Междуреченск. Дис. канд. тех. наук / А.В. Кудрявцев. – Красноярск, 2010. – 159 с.
49. Кузьмин, Ю.О. Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород / Ю.О. Кузьмин, В.С. Жуков. – М: Изд-во МГГУ 2004. – 262 с.
50. Ломтадзе, В.Д. Инженерная геология. Инженерная геодинамика: учебное пособие / В.Д. Ломтадзе. – Л.: Недра, 1977. – 478 с.
51. Ломтадзе, В.Д. Инженерная геология. Инженерная петрология: учебное пособие / В.Д. Ломтадзе. – Л.: Недра, 1970. – 528 с.
52. Ломтадзе, В.Д. Методы лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород: учебное пособие / В.Д. Ломтадзе. – Л.: Недра, 1972. – 312 с.
53. Ломтадзе, В.Д. Инженерная геология. Специальная инженерная геология: учебное пособие / В.Д. Ломтадзе. – Л.: Недра, 1978. – 496 с.
54. Лысиков, Б.А. Использование подземного пространства / Б.А. Лысиков, А.А. Каплюхин. – Донецк: Норд-Компьютер, 2005. – 390 с.
55. Макаров, А.Б. Прикладная геомеханика. Пособие для горных инженеров: учебное пособие / А.Б. Макаров. – М.: Горная книга, 2006. – 391 с.
56. Малеев, Д.Ю. Инженерно-геологические условия горных тоннелей Транссиба на Малом Хингане. Дис. ... канд. геол.-мин. наук / Д.Ю. Малеев. – Хабаровск, 1999. – 142 с.

57. Машанов, А.Ж. Основы геомеханики скально-трещиноватых пород: учебное пособие / А.Ж. Машанов, А.А. Машанов. – Алма-Ата: Наука, 1985. – 286 с.

58. Нейштадт, Л.И. Методы геологического изучения трещиноватости горных пород при инженерно-геологических исследованиях: учебное пособие / Л.И. Нейштадт. – М.: Наука, 1957. – 124 с.

59. Несмеянов, С.А. Инженерная геотектоника: учебное пособие / С.А. Несмеянов. – М.: Наука, 2004. – 780 с.

60. Николаев, В.В. Сейсмотектоника и сейсмическое районирование Приамурья / В.В. Николаев, Р.М. Семёнов, Л.С. Оскорбин. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. – 128 с.

61. Пашкин, Е.М. Инженерно-геологические исследования при строительстве транспортных туннелей / Е.М. Пашкин. – М.: Недра, 1981. – 135 с.

62. Панжин, А.А. Непрерывный мониторинг смещений и деформаций земной поверхности с применением комплексов спутниковой геодезии GPS / А.А. Панжин // Геомеханика в горном деле - 2000: Материалы Международной конференции. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2000а. – С. 320-324.

63. Панжин, А.А. Наблюдение за сдвижением земной поверхности на горных предприятиях с использованием GPS / А.А. Панжин // Известия Уральского государственной горно-геологической академии. Вып.11. Серия: Горное Дело. – Екатеринбург, 2000б. – С. 196-203.

64. Панжин, А.А., Голубко Б.П. Применение спутниковых систем в горном деле / А.А. Панжин, Б.П. Голубко // Известия Уральского государственной горно-геологической академии. Вып.11. Серия: Горное Дело. – Екатеринбург, 2000 – С. 183-195.

65. Рац, М.В. Трещиноватость и свойства трещиноватых пород: учебное пособие / М.В. Рац, С.Н. Чернышев. – М.: Недра, 1970. – 160 с.

66. Республиканские строительные нормы: РСН 60-86. Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Нормы производства работ. – М.: МосЦТИСИЗ, 1986. – 16 с.

67. Республиканские строительные нормы: РСН 65-87. Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Технические требования к производству работ. . – М.: МосЦТИСИЗ, 1987. – 18 с.
68. Ручкин, В.И. Мониторинг за изменением напряженно деформируемым состоянием массива горных пород на больших базах / В.И. Ручкин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. № 4. – С. 202-206
69. Семенов, Р.М. Оценка сейсмоопасности Северо-Муйского района / Р.М. Семенов, О.П. Смекалин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС. – 2005. – № 4 (8). – С. 114-119.
70. Сергеев, Е.М. Инженерная геология: учебное пособие / Е.М. Сергеев. – М.: Изд-во МГУ, 1982. – 247 с.
71. Строительные нормы и правила: СНиП II-7-81*. Строительство в сейсмических районах: нормативно-технический материал. – М.: Госстрой, 2010 – 27 с.
72. Схема геолого-структурного районирования Хабаровского края и Амурской области. Масштаб 1: 10 000 000 / М.В. Мартынюк, И.П. Вольская, С.А. Рямов и др. Гл. ред Л.И. Красный. – Л.: Ленинградская картографическая фабрика ВСЕГЕИ. – 1986.
73. Тоннелепроходческие щиты [Электронный ресурс]. – Режим доступа http://nashemetro.ru/s_tbm.shtml 16(8)2012.
74. Тугарова, М.А. Породы-коллекторы: Свойства, петрографические признаки, классификации: учебно-методическое пособие / М.А. Тугарова. – СПб., 2004. – 36 с.
75. Турчанинов, И.А. Основы механики горных пород: учебное пособие / И.А. Турчанинов, М.А. Иофис, Э.В. Каспарьян. – Л.: Недра, 1989. – 488 с.
76. Уломов, В.И. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1:8000000. Объяснительная записка и список городов и населённых пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах / В.И. Уломов, Л.С. Шумилина. – М., 1999. – 57с.

77. Уломов, В.И. Сейсмогеодинамика и сейсмическое районирование Северной Евразии / В.И. Уломов // Вулканонология и сейсмология. – 1999, № 4-5. – С. 6-22.

78. Фомин А.Н., Кириллова Г.Л., Костырева Е.А., Меленевский В.Н., Злобин Г.А. Трещиноватые коллекторы и углеводородный потенциал позднеюрско-раннемелового терригенного комплекса Северного Сихотэ-Алиня / А.Н. Фомин, Г.Л. Кириллова, Е.А. Костырева, В.Н. Меленевский, Г.А. Злобин // Тихоокеанская геология – 2013. – Т.32 – №3. – С. 93-102.

79. Храпов, В.Г. Тоннели и метрополитены / В.Г. Храпов, Е.А. Демешко, С.Н. Наумов, А.Н. Пирожкова. – М.: Транспорт, 1989. – 383 с.

80. Шабынин, Л.Л. Гидрогеологические условия Северо-Муйского тоннеля БАМ / Л.Л. Шабынин. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2004. – 94 с.

81. Штейнбругге, К.В. Инженерный анализ последствий землетрясений 1952 г. в Южной Калифорнии. Пер. с англ. / К.В. Штейнбругге, Д.Ф. Моран – М.: Госстройиздат, 1957. – 270 с.

82. Штыров, В.Г. Изучение тектонических парагенезов и их влияние на строение горного массива / В.Г. Штыров, А.И. Арнаутов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2011. – №05(069). – С. 404 – 417.

83. Шуваев, А.С. Инженерно-геологические и мерзлотно-гидрогеологические условия восточного участка региона БАМ / А.С. Шуваев, Ю.П. Волков. – Хабаровск: Гидроспецгеология, 1982. – 210 с.

84. Bieniawski, Z.T. Engineering rock mass classification / Z.T. Bieniawski. – New York: John Wiley&Sons, 1989. – 251 p.

85. Deer, D.U. The RQD index in practice / D.U. Deer, D.W. Deer // Proceedings Symposium. Rock Classification Engineering Purposes, ASTM Special Technical Publications 984, 1988 – Philadelphia – P. 91-101.

86. Anagnostou, G. Tunneling through geological fault zones / Georg Anagnostou, Kalman Kovari // International symposium on design, construction and operation of long tunnels, 2005 509-520.
87. Terzaghi, K. Sources of error in joint surveys. Geotechnique / Karl von Terzaghi // Publications of The Institution of Civil Engineers, London, 1965 – P. 287-304.
88. Asakura, T. Study on behavior of lining during earthquakes in shallow tunnel / Toshihiro Asakura, Youshiuji Kojima, Masaichi Nonomura, Hidetsug Miabayashi, Atsumi Isogai // Proceedings of tunnel engineering, JSCE (5), 2007 – P. 209-213
89. Basarir, H. Engineering geological studies and tunnel support design at Sulakyurt dam site, Turkey / Hasan Basarir // Engineering geology. – 2006. – Volume 8, Issue 4. – P. 225-237.
90. Chang, C. Geological and geotechnical overview of the Hsuehshan tunnel / Chi-Tso Chang, Ping-Cheng Hou, Chin-Shae Liu, Ting-Huai Hsiao // International symposium on design, construction and operation of long tunnels, 2005. – Taipei, Taiwan. – P. 45-49.
91. Doi, T. Numerical analysis on seismic behavior of ground-lining interaction for NATM tunnels / Tadashi Doi, Kazuo Nishimura, Tsuyoshi Domon // Proceedings of tunnel engineering, JSCE (5), 2007 – P. 209-213
92. Laubscher, D.H. A geomechanics classification for rating rock mass in mine design / D.H. Laubscher // Journal South African Institute of Mining and Metallurgy. – 1991. – № 10 – P. 257-273.
93. Geniş, M. Assessment of the dynamic stability of the portals of the Dorukhan tunnel using numerical analysis / Melih Geniş // International journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2010. – Volume 47, Issue 8. – P. 1231-1241.
94. Geniş, M. Engineering geological appraisal of the rock masses and preliminary support design, Doeukhan Tunnel, Zonguldak, Turkey / M. Geniş, H. Basarir, A. Ozarslan, E. Bilir, E. Balaban // Engineering geology. – 2007. – Volume 92, Issues 1-2. – P. 14-26.

95. Gurung, N. Observations of deformation and engineering geology in the Lam Ta Khong tunnel, Thailand / Netra Gurung, Yushiro Iwao // *Engineering Geology*. – 1998. – Volume 51, Issue 1. – P. 55-63.
96. Hirasaka, Y. Experimental study on mechanical behavior of shallow overburden tunnel in improved ground / Yrie Hirasaka, Ying Cui, Kiyoshi Kishida, Makoto Kimura, Tomomi Iura // *Proceedings of tunnel engineering, JSCE (5)*, 2010 – P. 193-204
97. Hou, P. Geological exploration of the Hsuehshan tunnel – review and discussion / Ping-Cheng Hou, Ting-Huai Hsiao // *International symposium on design, construction and operation of long tunnels*, 2005. – Taipei, Taiwan. – P. 105-112.
98. Kazunori, N. Imaging ground conditions ahead of the tunnel face using the seismic reflective survey / Nishioka Kazunori, Murakami Koji, Yamamoto Takuji, Shirasagi Suguru, Aoki Kenji // *International symposium on design, construction and operation of long tunnels*, 2005 – P. 91-99.
99. Kobayashi, M. A study of seismic displacement of cut and cover tunnel on longitudinal section / Masahiko Kobayashi, Yasumiki Yamamoto, Shogo Otake, Yousuke Inoue, Fukutaro Umebayashi // *Proceedings of tunnel engineering, JSCE (5)*, 2009 – P. 263-268
100. Kusaka, A. Seismic behavior of mountain tunnel affected by difference of lining structure / Atsushi Kusaka, Hideto Mashimo, Nobuharu Isago, Katsunori Kadoyu // *Proceedings of tunnel engineering, JSCE (5)*, 2010 – P. 1-8
101. Lee, D. Hsuehshan tunnel route selection and study / Deng-Hue Lee // *International symposium on design, construction and operation of long tunnels*, 2005. – Taipei, Taiwan. – P. 35-43.
102. Liu, C. Geological model of Hsuehshan tunnel / Chin-Shae Liu // *International symposium on design, construction and operation of long tunnels*, 2005. – Taipei, Taiwan. – P. 67-72.
103. Matsumoto, K. Shallow tunnel construction right under important structures / Koji Matsumoto, Nagatika Uryu, Hideo Endo, Akira Sato // *Proceedings of tunnel engineering, JSCE (5)*, 2009 – P. 1-8

104. Matsumoto, K. Construction of tunnel in unconsolidated ground that receives intense geological processes / Koji Matsumoto, Hideo Endo, Kazuhiko Mizutani, Fukao Furukawa // Proceedings of tunnel engineering, JSCE (5), 2009 – P. 63-71

105. Okazaki, K. Geological information for the results of helicopter-borne survey and other tunnel records over the accretionary complex area / Kenji Okazaki, Yoshihiko Ito, Katsuhito Aoki, Masayuki Sakakibara, Minoru Okumura // International symposium on design, construction and operation of long tunnels, 2005. – Taipei, Taiwan. – P. 144-152

106. Phienweij, N Tunneling for infrastructure development in Thailand / Noppadol Phienweij // Tunneling and Underground Space Technology. – 1998. – Volume 13, Issue 3. – P. 312-330.

107. Sasao, H. Vertical seismic prospecting system to investigate the behavior of surrounding bedrock in excavation work / Haruo Sasao, Toshihiro Asakura // International symposium on design, construction and operation of long tunnels, 2005. – Taipei, Taiwan. – P. 45-49.

108. Sopaci, E. Engineering geological investigations and the preliminary support design for the proposed Ordu Peripheral Highway Tunnel, Ordu, Turkey / Evrim Sopaci, Haluk Akgün // Engineering Geology. – 2008. – Volume 96, Issues 1-2. – P. 43-61.

109. Toshida, S. Application of helicopter-borne electromagnetic methods of tunnel rock mass evaluation in granite that receives hydrothermal alteration / Toshida Sugimoto, Katsushi Kawato, Hideo Sakai // Proceedings of tunnel engineering, JSCE (5), 2010 – P. 259-266.

110. Tachibana, N. A study of damage of mountain tunnels caused by 1995 South Hyogo prefecture earthquake and 2004 Mid Niigata Prefecture Earthquake / Naoki Tachibana, Yoshiyuki Kojima, Karuhide Yashiro, Toshihiro Asakura, Masaichi Nonomura // Proceedings of tunnel engineering, JSCE (5), 2007 – P. 215-219

111. Terada, Y. Construction of railway tunnel with small earth cover and small clearance between twin tunnels under existing railway / Yuichiro Terada, Youhei

Teduka, Kenjiro Numazava, Hiroyuki Minakami // Proceedings of tunnel engineering, JSCE (5), 2010 – P. 337-344.

112. Terashima, Y. Development of tunnel face monitoring system and case study on poor ground / Yoshihiro Terashima, Isao Ogawa, Koko Kumagai, Hiroaki Matsuda, Tamiyuki Maraoka // Proceedings of tunnel engineering, JSCE (5), 2010 – P. 219-223.

113. Tokudome, O. Countermeasure to prevent displacement in weak mudstone ground influenced by faults and folds / Osamu Tokudome, Toshirou Ootsu, Masaaki Hirose, Kazuya Sawada // Proceedings of tunnel engineering, JSCE (5), 2007 – P. 29-34

114. Tsai, D. Application of tunnel seismic prediction for the Hsuehshan tunnel / Dao-Tze Tsai, Fu-Lang Hwang, Hsin-Mei Shin, Shan-Chih Kao, Jung-Sung Tseng, Lee-Ping Shi // International symposium on design, construction and operation of long tunnels, 2005. – Taipei, Taiwan. – P. 171-176.

115. Uryu, N. Tunnel excavation in a squeezing ground and on unconsolidated gravel layer / Nagachika Uryu, Kouzou Menda, Masahiro Hashizume, Hideo Kinashi // Proceedings of tunnel engineering, JSCE (5), 2009 – P. 55-61

116. Yamada, H. Design and construction of auxiliary method for weakly ground condition with large displacement / Hiroyuki Yamada, Yoshifumi Kato, Shuuichi Omura, Satoshi Kubota // Proceedings of tunnel engineering, JSCE (5), 2007 – P. 51-58

117. Yashiro, K. Model test on behavior of tunnels under deformation of the ground upon earthquake / Karuhide Yashiro, Naoki Fachibara, Yoshiyuki Kajima, Masaichi Nonomura, Toshihiro Asakura // Proceedings of tunnel engineering, JSCE (5), 2007 – P. 63-71

118. Yu C. Application of three-dimensional geological models to the construction of the Hsuehshan tunnel / Chi-Wen Yu // International symposium on design, construction and operation of long tunnels, 2005. – Taipei, Taiwan. – P. 145-148.

119. Zlobin H. Kuznetsovsky tunnel: studies of geological, geomechanical and hydrogeological features for safe and durable operation / H. Zlobin, S. Kvashuk // Proceedings of The 5th International geotechnical symposium, 2013 – Incheon, Korea. – P. 103-106.

Значение параметров и характеристика микротрещиноватости

№ изображения	Длина следов трещин, мкм	Раскрытость трещин, мкм	Коэффициент А	Трещинная пористость, %	Трещинная проницаемость, мкм ²	Объемная плотность трещин, 1/мкм	Характеристика микротрещин
230-1	5933	33	0,00171	4,9156	0,0919	0,0023	Многочисленные тонкие. Трещины извилистые пересекающие цемент и обломки песчаников создающие в некоторых местах густые сетчатые зоны
230-2	10067	126	0,00171	31,9775	8,6812	0,0040	Представлен крупной микротрещиной и множеством тонких волокнистых трещин создающих густую сеть. В основном распространены в цементе песчаника.
275,5-1	10467	81	0,00171	21,3738	2,3980	0,0041	Несколько крупных микротрещин (200 мкм), залеченных кварцем. Помимо, большое количество извилистых, тонких микротрещин, пересекающих и дробящих заполнитель и частицы песчаника, образуют густую сеть трещин различной ориентировки.
275,5-2	0	0	0,00171	0,0000	0,0000	0,0000	Видимых трещин нет
275,5-3	6467	49	0,00171	7,9886	0,3280	0,0026	Крупная неровная микротрещина (250 мкм), пересекающая изображение шлифа и сеть тонких микротрещин.
304,6	145	12	0,00171	0,0439	0,0001	0,0001	Небольшая тонкая извилистая микротрещина
328-1	5212	39	0,00171	5,1034	0,1333	0,0021	Две неровные микротрещины, параллельные друг другу, состоящие из сети извилистых микротрещин, различной раскрытости. И сеть разветвленных разнонаправленных микротрещин, пересекающих цемент и крупные обломки частиц
328-2	5201	276	0,00171	36,1885	47,1394	0,0021	Крупная неровная микротрещина (раскрытием до 500 мкм), пересекающая изображение шлифа и сеть тонких микротрещин.

№ изображения	Длина следов трещин, мкм	Раскрытость трещин, мкм	Коэффициент А	Трещинная пористость, %	Трещинная проницаемость, мкм ²	Объемная плотность трещин, 1/мкм	Характеристика микротрещин
328,5-1	4467	34	0,00171	3,8289	0,0757	0,0018	Неровная микротрещина, различной раскрытости (от 50 до 130 мкм), пересекающая изображение шлифа. Густая сеть тонких извилистых микротрещин, отдельные - мелкие, распространены в обломках песчаника.
328,5-3	5333	84	0,00171	11,2934	1,3626	0,0021	Две крупные (50-130 мкм) пересекающиеся микротрещины. Густая сеть извилистых тонких микротрещин, распространенная по всей площади шлифа.
344,7-1	1933	400	0,00171	19,4125	53,3313	0,0008	Крупная прямолинейная трещина (470 мкм), секущая изображение шлифа. Заполнена кварцем.
350-1	3667	167	0,00171	15,4384	7,3626	0,0015	Очень густая сеть микротрещин, переходящая в созданное ей пустотное пространство, занимающее около 10 % площади шлифа. И отдельные тонкие разнонаправленные микротрещины.
350-2	2067	412	0,00171	21,4690	62,3164	0,0008	Крупная прожилка кварца, раскрытием от 300 до 500 мкм. И многочисленные мелкие тонкие волнистые нарушения.
350,7-1	8004	27	0,00171	5,4481	0,0679	0,0032	Прямолинейная трещина и многочисленные ответвленные извилистые микротрещины более мелкого порядка.
350,7-2	4869	70	0,00171	8,5571	0,7200	0,0019	Крупная (140 мкм), волнистая, четко выраженная трещина и густо развитая сетчатая зона возле нее. Выделяется микротрещина слоистости на границе алевролита и песчаника.
350,7-3	3667	49	0,00171	4,5298	0,1860	0,0015	Выраженная выклинивающаяся микротрещина и множество тонких извилистых микротрещин.
391,2-1	2144	13	0,00171	0,7027	0,0020	0,0008	Несколько тонких извилистых прерывистых трещин и отдельные мелкие трещины в обломках песчаника

№ изображения	Длина следов трещин, мкм	Раскрытость трещин, мкм	Коэффициент А	Трещинная пористость, %	Трещинная проницаемость, мкм ²	Объемная плотность трещин, 1/мкм	Характеристика микротрещин
534-1	4588	13	0,00171	1,5036	0,0043	0,0018	Множество тонких закрытых волокнистых трещин, секущих цемент и обломки песчаника.
534-2	5700	21	0,00171	3,0176	0,0228	0,0023	Густая сеть извилистых трещин
605,6	1887	13	0,00171	0,6184	0,0018	0,0007	Множество тонких прерывистых извилистых микротрещин, пересекающих цемент песчаника
724,6-1	540	13	0,00171	0,1770	0,0005	0,0002	Тонкая протяженная извилистая микротрещина
724,6-2	0	0	0,00171	0,0000	0,0000	0,0000	Видимых трещин нет
832-1	2254	42	0,00171	2,3866	0,0720	0,0009	Прямолинейная четко выделенная трещина и густая сеть ответвлений
932,6-1	10244	27	0,00171	6,9728	0,0869	0,0041	Четко выделенная густая сеть трещин, состоящая из множества прерывистых коротких нарушений, занимающая около 25 % площади изображения.
932,6-2	4268	20	0,00171	2,1519	0,0147	0,0017	Множество волокнистых протяженных трещин, секущие цемент и обломки песчаника, соединяющиеся в густую сеть трещин.
932,6-3	8604,5	28	0,00171	6,0738	0,0814	0,0034	Несколько пересекающихся извилистых микротрещин, распространенных в основном в цементе песчаника.
1103-1	3668,5	64	0,00171	5,8947	0,4146	0,0015	Четко выраженная трещина с ответвлением и сетчатая зона, состоящая из продолговатых извилистых микротрещин на контакте песчаника и алевролита.
1103-2	2640	53	0,00171	3,5274	0,1694	0,0010	Прямолинейная раскрытая трещина, пересекающая площадь шлифа и небольшое количество прерывистых микротрещин меньших порядков.
1103,2	5062,3	13	0,00171	1,6591	0,0048	0,0020	Две прямолинейные параллельные микротрещины, контролирующие густую сетчатую зону.

№ изображения	Длина следов трещин, мкм	Раскрытость трещин, мкм	Коэффициент А	Трещинная пористость, %	Трещинная проницаемость, мкм ²	Объемная плотность трещин, 1/мкм	Характеристика микротрещин
1321-1	8070,7	20	0,00171	4,0693	0,0278	0,0032	Несколько четко выраженных параллельных микротрещин одного порядка, пересекающие изображение шлифа.
1321-2	4108	201	0,00171	20,8162	14,3810	0,0016	Крупная выклинивающаяся микротрещина, раскрытием до 400 мкм и параллельная ей крупная густая сетчатая зона, состоящая из извилистой средней крупности микротрещины и множества мелких тонких неровных микротрещин.
1321-3	0	0	0,00171	0,0000	0,0000	0,0000	Видимых трещин нет
1321-4	7644	20	0,00171	3,8541	0,0264	0,0030	Несколько четко выраженных параллельных микротрещин одного порядка, пересекающие изображение шлифа.
1401-1	4535	14	0,00171	1,5940	0,0054	0,0018	Две прямолинейные разнонаправленные микротрещины, пересекающие изображение шлифа.
1401-2	2947	196	0,00171	14,5616	9,5657	0,0012	Крупная кварц-сульфидная прожилка, мощностью от 100 до 350 мкм, несколько извилистых разнонаправленных микротрещин и множество прерывистых тонких микротрещин, объединяющиеся в некоторых местах в сетчатые зоны.
1475-1	2001	53	0,00171	2,6736	0,1284	0,0008	Густая сеть тонких волосных микротрещин на контакте песчаника и алевролита. Множественные извилистые микротрещины, секущие цемент и обломочный материал песчаника.
1475-2	4744	108	0,00171	12,9164	2,5762	0,0019	Крупная, четко выраженная, выклинивающаяся микротрещина пересекающая изображение шлифа в большей части находится на контакте алевролита и песчаника.

№ изображения	Длина следов трещин, мкм	Раскрытость трещин, мкм	Коэффициент А	Трещинная пористость, %	Трещинная проницаемость, мкм ²	Объемная плотность трещин, 1/мкм	Характеристика микротрещин
1475-3	2268	600	0,00171	34,3059	211,1870	0,0009	Крупная открытая трещина, раскрытостью около 600 мкм, секущая границу песчаника и алевролита. Большое количество тонких извилистых микротрещин в песчанике.
1485-1	3802	14	0,00171	1,3419	0,0045	0,0015	Несколько тонких волокнистых разнонаправленных микротрещин
1485-2	2868	16	0,00171	1,1568	0,0051	0,0011	Тонкие волокнистые микротрещины, некоторые параллельны.
1485-3	5602,3	22	0,00171	3,1072	0,0257	0,0022	Тонкие волокнистые разнонаправленные микротрещины
1544	1550	27	0,00171	1,0550	0,0132	0,0006	Несколько небольших неровных трещин
1632-1	5169	16,7	0,00171	2,1762	0,0104	0,0020	Две пересекающиеся волокнистые микротрещины раскрытием до 40 мкм, несколько тонких неровных длиной от 200 до 400 мкм и область сетчатой зоны, занимающей около 4 % изображения шлифа
1632-2	4475,7	12	0,00171	1,3540	0,0033	0,0018	В центре изображения отмечается область развития микротрещиноватости, представленная многочисленными непрерывными и прерывистыми волокнистыми микротрещинами раскрытием до 30 мкм.
1632-3	0	0	0,00171	0,0000	0,0000	0,0000	Видимых трещин нет
1677-1	7737,2	62,1	0,00171	12,1129	0,7988	0,0031	Несколько параллельных и взаимно-перпендикулярных непрерывных микротрещин, раскрытием до 30 мкм. Одна крупная прямолинейная микротрещина, раскрытием до 200 мкм, заполненная кварцем.
1677-2	4098,9	94	0,00171	9,7134	1,4676	0,0016	Две крупные (50-200 мкм) параллельные выклинивающиеся трещины, пересекающие изображение шлифа и густая сетчатая зона, представленная извилистыми, прерывистыми трещинами меньших порядков.

№ изображения	Длина следов трещин, мкм	Раскрытость трещин, мкм	Коэффициент А	Трещинная пористость, %	Трещинная проницаемость, мкм ²	Объемная плотность трещин, 1/мкм	Характеристика микротрещин
1869-1	9447,4	14	0,00171	3,3344	0,0112	0,0037	Многочисленные тонкие непрерывные извилистые разнонаправленные микротрещины.
1869-2	5214,1	14	0,00171	1,8403	0,0062	0,0021	Неровная микротрещина, пересекающая изображение шлифа, состоящая из множества извилистых микротрещин и ответвлений
1994	2145	18	0,00171	0,9734	0,0054	0,0008	Несколько тонких извилистых протяженных микротрещин

Результаты лабораторных исследований механических свойств пород Кузнецовского тоннеля

№№ скважин	№№ лабораторных проб	Интервал глубины опробования	Породы	Плотность, ρ , кг/дм ³	Скорость продольных волн V_p м/сек	Модули упругости		Модуль деформации $E_{деф.}$ МПа $\times 10^4$	К-т удельного упругого отпора кгс/см ³	К-т Пуассона μ	Предел прочности на одноосное			Прочность по Протодьяконову	Удельное сцепление С МПа	Угол внутр трения, ϕ град	Кажущийся угол вн. трения, ϕ град	Теплопроводность Вт/м ² С	Удельная теплоемкость Дж/м ³ С ⁻¹ 0 ⁴
						Статический, $E_{ст.}$ МПа $\times 10^4$	Динамический, $E_{дин}$ МПа $\times 10^4$				Растяжение МПа	Сжатие МПа	Сжатие в водонасыщенном состоянии МПа						
2	2-3	30,0-35,0	Седиментационная брекчия	2,52							3,4	31,23	32,50	3,1	18,48	44,42	57,9	5950	0,903
2	2-3	30,0-35,0	Седиментационная брекчия	2,662									66,071						
4	4-1	33,5-35,5	Седиментационная брекчия	2,662	5930	1,16	1,96	1,47	9671	0,15		189,85	220,86	18,9				5750	0,915
4	4-1	33,5-35,5	Седиментационная брекчия		5750	1,03	1,83	2,01	8583	0,13		214,55	38,692	21,4					
5	5-1	34,0-37,0	Седиментационная брекчия								2,297								
2	2-5	35,0-40,0	Седиментационная брекчия								2,616							5930	0,902
2	2-5	35,0-40,0	Седиментационная брекчия	2,637									47,582		10,65	65,45			
2	2-5	35,0-40,0	Седиментационная брекчия	2,743									39,372						
4	4-1	35,0-40,0	Седиментационная брекчия	2,632															
2	2-5	40,0-45,0	Седиментационная брекчия		5950									13,5					
2	2-5	40,0-45,0	Седиментационная брекчия								3,683	51,44		5,1					

№№ скважин	№№ лабораторных проб	Интервал глубины опробования	Породы	Плотность, ρ,	Скорость продольных волн V _p	Модули упругости		Модуль деформации E _{деф.}	К-т удельного упругого отпора	К-т Пуассона μ	Предел прочности на одноосное			Прочность по Протодьяконову	Удельное сцепление С	Угол внутр трения, φ	Кажущийся угол вн. трения, φ	Теплопроводность	Удельная теплоемкость
						Статический, E _{ст.}	Динамический, E _{дин.}				Растяжение	Сжатие	Сжатие в водонасыщенном состоянии						
2	2-5	40,0-45,0	Седиментационная брекчия									47,77		4,7					
2	2-5	40,0-45,0	Седиментационная брекчия									88,59		8,8					
5	5-2	71,0-73,0	Седиментационная брекчия		5730	1,15		1,39	9583	0,23	29,876		75,141	7,3	31,36	36,86	53,5		
5	5-2	71,0-73,0	Седиментационная брекчия		4730	1,06		0,72	8833	0,202			46,6						
5	5-3	92,8-100,8	Седиментационная брекчия		3800	0,78		1,45	6574	0,31									
5	5-3	92,8-100,8	Седиментационная брекчия		4140														
5	5-3	92,8-100,8	Седиментационная брекчия		5080														
3	3-6	106,0-112,0	Седиментационная брекчия									9,2							
3	3-6	106,0-112,0	Седиментационная брекчия									21,773							
5	5-6	160,0-162,0	Седиментационная брекчия									4,608							
3	3-2	25,0-50,0	Переслаивание алевролитов и песчаников	2,61							5,624	141,29	106,04	14,1					
3	3-2	25,0-50,0	Переслаивание алевролитов и песчаников	2,623								104,97	250	10,4	16,35	65,94	49,1		
3	3-2	25,0-50,0	Переслаивание алевролитов и песчаников										131,42						

№№ скважин	№№ лабораторных проб	Интервал глубины опробования	Породы	Плотность, ρ ,	Скорость продольных волн V_p	Модули упругости		Модуль деформации $E_{деф.}$	К-т удельного упругого отпора	К-т Пуассона μ	Предел прочности на одноосное			Прочность по Протодьяконову	Удельное сцепление С	Угол внутр трения, ϕ	Кажущийся угол вн. трения, ϕ	Теплопроводность	Удельная теплоемкость
						Статический, $E_{ст.}$	Динамический, $E_{дин.}$				Растяжение	Сжатие	Сжатие в водонасыщенном состоянии						
4	4-2	62,0-64,0	Переслаивание алевролитов и песчаников			1,74		0,99	8704	0,22								0,31	0,553
4	4-2	62,0-64,0	Переслаивание алевролитов и песчаников			0,82	1,63	0,99	6830	0,15	8,14								
4	4-2	62,0-64,0	Переслаивание алевролитов и песчаников			0,87	1,67	1,63	7250	0,11									
3	3-4	75,0-100,0	Переслаивание алевролитов и песчаников	2,637								5,62	86,57	97,908	8,6			0,424	0,658
3	3-4	75,0-100,0	Переслаивание алевролитов и песчаников	2,629									113,31	226,85	11,3				
3	3-4	75,0-100,0	Переслаивание алевролитов и песчаников	2,617									119,19	102,15	11,9	14,78	63,2	48,3	
5	5-7	193,0-196,0	Переслаивание алевролитов и песчаников	2,687	5320	1,22	2,01		10166	0,199	8,092	70,59			7,0			0,399	0,711
5	5-7	193,0-196,0	Переслаивание алевролитов и песчаников		6020	1,34	2,13	1,32	11139	0,24									
5	5-7	193,0-196,0	Переслаивание алевролитов и песчаников		4360	1,44	2,23	1,39	12000	0,19									
5	5-7	193,0-196,0	Переслаивание алевролитов и		5400	1,4	2,19	1,53	11163	0,18									

№№ скважин	№№ лабораторных проб	Интервал глубины опробования	Породы	Плотность, ρ ,	Скорость продольных волн V_p	Модули упругости		Модуль деформации $E_{деф.}$	К-г удельного упругого отпора	К-г Пуассона μ	Предел прочности на одноосное			Прочность по Протодьяконову	Удельное сцепление С	Угол внутреннего трения, ϕ	Кажущийся угол внешнего трения, ϕ	Теплопроводность	Удельная теплоемкость
						Статический, $E_{ст.}$	Динамический, $E_{дин.}$				Растяжение	Сжатие	Сжатие в водонасыщенном состоянии						
			песчаников																
5	5-7	193,0-196,0	Переслаивание алевролитов и песчаников		6360	1,19	1,98	1,89	7333	0,17									
5	5-4	117,0-119,0	Песчаник	2,608		1,64	2,42	1,91		0,18	18,637	160,498	282,55	16,0	30,37	51,34		0,578	1,05
5	5-4	117,0-119,0	Песчаник	2,602					13666			94,3512		9,4					
5	5-8	223,0-226,0	Песчаник	2,703	5950	0,57	1,38	0,62	4750	0,22	5,654	44,90	57,425	4,4	13,63	49,72	52,5	0,257	0,417
5	5-8	223,0-226,0	Песчаник	2,638	6170						5,276	79,46	50,563	7,9	12,029	59,38	49,0	0,431	0,691
5	5-8	223,0-226,0	Песчаник	2,746	4930						10,492	37,796		3,7	13,84	44,42	53,8		
5	5-8	223,0-226,0	Песчаник	2,677								62,15		6,2					
5	5-9	240,0-243,0	Песчаник	2,71	6330	1,85	2,62	2,89	15416	0,21	9,606	91,71	104,78	9,1	16,81	52,64	49,8		
5	5-9	240,0-243,0	Песчаник	2,609	5910	1,83	2,61	1,23	15287	0,189	9,042	115,32		11,5	18,53	57,17	49,2		
5	5-10	252,0-255,0	Песчаник		6100	1,21	2,00	0,57	4000	0,26	22,973								
5	5-10	252,0-255,0	Песчаник		6380	1,11	1,91	1,38	10078	0,14									
5	5-11	262,0-265,0	Песчаник		5580			1,48	9250		17,291		88,375						
5	5-11	262,0-	Песчаник										144,07						

№№ скважин	№№ лабораторных проб	Интервал глубины опробования	Породы	Плотность, ρ ,	Скорость продольных волн V_p	Модули упругости		Модуль деформации $E_{\text{деф.}}$	К-т удельного упругого отпора	К-т Пуассона μ	Предел прочности на одноосное			Прочность по Протодьяконову	Удельное сцепление С	Угол внутр трения, ϕ	Кажущийся угол вн. трения, ϕ	Теплопроводность	Удельная теплоемкость
						Статический, $E_{\text{ст.}}$	Динамический, $E_{\text{дин}}$				Растяжение	Сжатие	Сжатие в водонасыщенном состоянии						
		265,0																	
5	5-11	262,0-265,0	Песчаник									214,88							
5	5-1	34,0-37,0	Алевролит		3310	1,23	2,02	1,86	10266	0,2	2,297		13,692					0,666	1,07
5	5-1	34,0-37,0	Алевролит		3800	1,31	2,10	1,25	10916	0,12			15,125					0,692	1,11
3	3-6	106,0-112,0	Алевролит	2,63								9,2	62,73		12,97	44,71	50,3		
3	3-6	106,0-112,0	Алевролит											31,13	46,66				
3	3-6	106,0-112,0	Алевролит	2,695								9,2	58,334		6,2				
3	3-6	106,0-112,0	Алевролит	2,689								21,773	148,94		5,8				
3	3-6	106,0-112,0	Алевролит	2,616									160,88	13,014	14,8,				
5	5-6	160,0-162,0	Алевролит	2,63	5770							4,608	81,69	170,09	16,0			0,754	1,253
5	5-6	160,0-162,0	Алевролит		5600	1,05	1,85		8750	0,18					8,1				
5	5-6	160,0-162,0	Алевролит			1,4	2,19	1,74	10833	0,167									
5	5-6	160,0-162,0	Алевролит			1,38	2,17	1,35	10666	0,14									
5	5-6	160,0-162,0	Алевролит			0,99	1,79	1,4	11500	0,177									
5	5-6	160,0-162,0	Алевролит			1,3	2,09	1,5	8250	0,13									
5	5-6	160,0-162,0	Алевролит					1,65											

№№ скважин	№№ лабораторных проб	Интервал глубины опробования	Породы	Плотность, ρ ,	Скорость продольных волн V_p	Модули упругости		Модуль деформации $E_{деф.}$	К-т удельного упругого отпора	К-т Пуассона μ	Предел прочности на одноосное			Прочность по Протодьяконову	Удельное сцепление C	Угол внутр трения, ϕ	Кажущийся угол вн. трения, ϕ	Теплопроводность	Удельная теплоемкость
						Статический, $E_{ст.}$	Динамический, $E_{дин.}$				Растяжение	Сжатие	Сжатие в водонасыщенном состоянии						
4	4-2	62,0-64,0	Песчаник с прослоями алевролитов								2,873			3,2					
4	4-3	94,0-96,0	Песчаник с прослоями алевролитов	2,63	6000	0,92	1,72	1,22	7666	0,17	3,728	32,349	11,942	20,3	6,07	50,88	49,9	0,652	1,05
4	4-3	94,0-96,0	Песчаник с прослоями алевролитов	2,695	3230	1,36	2,15	1,39	9666	0,21		203,15		2,0				0,251	0,465
4	4-3	94,0-96,0	Песчаник с прослоями алевролитов	2,689								20,834						0,645	1,018
4	4-4	118,0-120,0	Песчаник с прослоями алевролитов	2,616	2520	1,13	1,93	1,43	9416	0,18	7,386	75,997	37,938	7,5	13,44	53,87		0,427	0,735
4	4-4	118,0-120,0	Песчаник с прослоями алевролитов	2,63	5930	0,99	1,79	1,04	8274	0,17	2,806	93,935	53,496	9,3	9,28	68,04		0,383	0,659
4	4-4	118,0-120,0	Песчаник с прослоями алевролитов	2,63	6170	0,9	1,70	0,96		0,13	9,111	74,881	193,45	7,4	14,57	50,19 ₁		0,718	1,077
4	4-4	118,0-120,0	Песчаник с прослоями алевролитов		5680														
3	3-8	118,0-124,0	Песчаник с прослоями алевролитов	2,695								108,57	62,93	10,8,				0,695	1,078
3	3-8	118,0-124,0	Песчаник с прослоями	2,689								7,317	76,479	0,7				0,604	0,969

№№ скважин	№№ лабораторных проб	Интервал глубины опробования	Породы	Плотность, ρ ,	Скорость продольных волн V_p	Модули упругости		Модуль деформации $E_{деф.}$	К-т удельного упругого отпора	К-т Пуассона μ	Предел прочности на одноосное			Прочность по Протодьяконову	Удельное сцепление С	Угол внутр трения, ϕ	Кажущийся угол вн. трения, ϕ	Теплопроводность	Удельная теплоемкость
						Статический, $E_{ст.}$	Динамический, $E_{дин}$				Растяжение	Сжатие	Сжатие в водонасыщенном состоянии						
			алевролитов																
4	4-5	134,0-136,0	Песчаник с прослоями алевролитов		5340	0,14	0,97	1,17	9495	0,2	4,175		75,921						
4	4-5	134,0-136,0	Песчаник с прослоями алевролитов		6050	1,02	1,82	1,16	8500	0,16	10,742		87,916						
4	4-5	134,0-136,0	Песчаник с прослоями алевролитов			1,08	1,88	1,15	9033	0,22									