



ОПЫТ УПРАВЛЕНИЯ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫМИ РИСКАМИ

ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ СЕВЕРО-МУЙСКОГО ТОННЕЛЯ

М. О. ЛЕБЕДЕВ,
А. Д. БАСОВ,
К. В. РОМАНЕВИЧ

(ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс»)

В СТАТЬЕ ОБОБЩЕНА ИНФОРМАЦИЯ ОБ УСЛОВИЯХ И ТЕХНОЛОГИЯХ СТРОИТЕЛЬСТВА, ИССЛЕДОВАНИЯХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ОСНОВНОГО ТОННЕЛЯ, ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК И ВМЕЩАЮЩЕГО МАССИВА, ВЛИЯНИИ СЕЙСМИЧНОСТИ НА СТРОИТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ И Т. Д. УЧЕТ ПОЛУЧЕННОГО ОПЫТА НЕОБХОДИМ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РЕКОМЕНДАЦИЙ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ВТОРОГО СЕВЕРО-МУЙСКОГО ТОННЕЛЯ.

Северо-Муйский железнодорожный тоннель на Байкало-Амурской магистрали был сдан в эксплуатацию 5 декабря 2003 года. Строительство велось с перерывами 26 лет. Это было связано с необычно сложными природными условиями, недостаточной изученностью трассы на стадии изысканий, отсутствием опыта проектирования и строительства тоннелей в столь сложных горно-геологических условиях.

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОГЕННЫЕ РИСКИ

По инженерно-геологическим и гидрогеологическим условиям строительства Северо-Муйский тоннель длиной 15,3 км и глубиной заложения в гольцовой части до 1 км является одним из наиболее сложных тоннелей мира. Объект располагается в Байкальской рифтовой зоне с сейсмичностью более 9 баллов. Высокая сейсмо-



Рис. 1. Фотографии дискования керна

активность территории связана с неотектоникой — развитием новейших тектонических структур [1]. Характерной особенностью геологии является блоково-разрывное строение Муякан-Ангараканского междуречья.

Горный массив по трассе тоннеля представлен гранитами с коэффициентом прочности по Протодьяконову от $f = 6 \div 14$ до $f = 0,2 \div 4$ с множеством пересекающих трассу разломов разной мощности и обильными водопритоками до $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ на забой. По материалам изысканий было установлено, что трассу тоннеля пересекает 26 разломов, которые сложены разрушенными и обводненными грунтами. Информацию об инженерно-геологических условиях впереди забоев приходилось уточнять уже в процессе строительства по мере проходки.

Встроении тектонических зон отмечались сближенные разрывные нарушения мощностью от 4–5 до 30–45 м и более, в пределах которых горные породы находились в неустойчивом состоянии. Эти зоны состоят из водонасыщенных сильнотрещиноватых скальных пород, в центральной части разлома разрушенных до состояния дресвы, песка и глины, находящихся под высокими гидростатическими напорами. При вскрытии забоями таких участков породы переходили в плавунное состояние, и происходили внезапные выбросы и выносы водо-грунтовых масс в подземные выработки.

Вне зон тектонических нарушений наблюдались проявления горного давления в массивах перенапряженных горных пород на участках тоннеля с глубинами заложения более 300 м. Повышенное горное давление проявлялось в виде шелушения, отщепов, динамического заколообразования и «стреляния» пород на контуре выработок.



Рис. 2. Фотография плитки отщепа с контура разведочной штольни

Наиболее яркие и масштабные динамические проявления горного давления наблюдались со стороны восточного портала тоннеля на глубине около 550 м.

Напряженное состояние массива горных пород подтверждалось по данным разведочного горизонтального бурения с отбором керна (происходило «дискование керна»). Диски имели характерную выпукло-вогнутую форму (рис. 1). При проходке разведочной штольни тех же интервалов горнопроходческим комплексом «Роббинс» непосредственно в призабойной части за оболочкой ротора происходило шелушение, «стреляние» и отслоение в виде плиток вогнутой формы по контуру — в основном стен (рис. 2).

В конце 1988 года при проходке подходной штольни от шахтного ствола и рассечки от разведочной штольни к основному тоннелю интенсивность процесса динамических проявлений горного давления стала возрастать. Началось «стреляние», интенсивное образование трещин, заколы и обрушения отслоившейся породы со стенок. Наибольшие объемы проявления разрушений происходили вначале по стенкам сопряжений: на рассечке между разведочной штольней и основным тоннелем, вблизи нее по смежным штольни и тоннелю стенкам. По материалам геологической документации, горный массив на этом участке представлен биотитовыми гранитами, порфиroidными с жилами пегматитов и мелкозернистых гранитов мощностью до 60 см, слабо трещиноватыми с коэффициентом крепости по М. М. Протодьяконову $f=6\div 10$, которые не требовали крепления.

На рис. 3 приведены фотографии участков разрушения в результате динамических проявлений горного давления. Причем эти события происходили стремительно, и их продолжительность интервалами была от десятков



Рис. 3. Фотографии разрушений породы у сочленения выработок

секунд до нескольких минут, потом перерыв примерно такой же продолжительности и опять разрушения. Данный процесс по мере произошедших разрушений на контуре выработок постепенно затухал, трещины прорастали и углублялись в массив, создавая зону разгрузки.

Многочисленные природные факторы риска осложнялись техногенным вмешательством. Ярким примером можно назвать наведенную сейсмичность.

Проявление землетрясений слабых и средней интенсивности в подземных условиях во время строительства Северо-Муйского тоннеля наиболее часто приходилось наблюдать, когда забои выработок находились в зонах разломов. Причем, с большой долей уверенности, такие землетрясения считались наведенными, связанными с горными работами. В условиях строительства подземного сооружения, когда в забоях тоннеля ежедневно проводится по несколько взрывов, трудно объективно разделить сейсмические воздействия от этих взрывов и землетрясений. Для анализа таких событий привлекали всю доступную информацию: опрос людей, которые были на момент события в выработке, записи в горных журналах, сейсмометрические материалы.

Наиболее четко взаимосвязи сейсмичности со случаями масштабных динамических проявлений горного давления можно было проследживать, когда одновременно в нескольких раскрытых забоях, находящихся в течение некоторого времени в неустойчивых зонах разломов, начинали очень интенсивно развиваться процессы обрушений и выносов водно-грунтовых масс. Тогда же случались землетрясения в окрестностях тоннеля, с некоторой задержкой или практически в одно и то же время. Более крупным выбросам предшествовали мелкие вывалы-выносы.

Об энергии влияния гидравлических и механических ударов при вывалах-выносах на формирующиеся очаги

землетрясений можно судить по нагрузке, которую эти удары оказывали на забой. При выбросе 200 м^3 и 6000 м^3 она могла достигать соответственно $0,2$ и 6 МПа . Безусловно, что такие удары оказывали влияние на всю геогидродинамическую систему Ангараканской депрессии и гидравлически связанных с ней тектонических нарушений. Известны многие случаи, когда местные слабые землетрясения и динамические проявления горного давления в забоях взаимодействовали между собой.

При проходке зоны Ангараканской депрессии крупная авария с человеческими жертвами случилась 20 сентября 1979 года. Комиссия Министерства транспортного строительства СССР в акте от 25 сентября сделала вывод, что наиболее достоверной причиной аварийного выброса следует считать гидродинамический удар, возникший в результате неспрогнозированного неблагоприятного сочетания техногенных и природных факторов, в том числе сейсмических. Было отмечено, что эти факторы за длительное время ведения горнопроходческих работ по зоне депрессии привели к резкому ослаблению окружающего выработку массива горных пород, вплоть до образования плавунного состояния в рыхлых отложениях, что неоднократно проявлялось в разведочной штольне и ее забое.

При строительстве Северо-Муйского и других тоннелей БАМа произошло еще много подобных случаев. Вывод, который можно сделать на основе имеющихся данных, заключается в том, что существует взаимодействие сейсмических событий в районе подземных выработок с динамическими проявлениями в них горного давления. Эти проявления наиболее опасны, когда забои выработок находятся в неустойчивых обводненных зонах разломов. Поскольку тектоника и сейсмичность в районе Северо-Муйского тоннеля функционируют как единая динамическая система, то и реакция такой систе-

мы на внешние воздействия оказывается практически единовременной.

УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ

Проходка тоннеля велась одновременно со стороны восточного и западного порталов. Для ускорения строительства через каждые 500-600 м между разведочной штольней и основным тоннелем проектом были предусмотрены сбойки для открытия дополнительных забоев. Самое большое количество одновременно работающих забоев в тоннеле и штольне составляло соответственно 10 и 5. При проходке применяли щитовой и горный способы.

В зависимости от геологических условий при строительстве штольни и тоннеля были опробованы различные технологические схемы [2]. В них определялся порядок ведения работ по разработке породы, крепления забоя, варианты конструкций временной крепи и возведения обделки, типы оборудования, его размещение в тоннеле, расходы материалов, электроэнергии, состав бригад и сроки работ. На основе технологических схем разрабатывались проекты производства работ и технологические карты для конкретных условий строительства.

Отработанные схемы при строительстве тоннеля позволяли определять наиболее эффективные комплексы современного высокопроизводительного оборудования и машин для проходки и возведения различных видов обделки. Для сооружения постоянной обделки тоннеля:

- на припортальных участках в обводненных, неустойчивых, рыхлых и сильнотрещиноватых грунтах с коэффициентом крепости $f = 0,6 \div 2$ использовали сборную обделку из чугунных тубингов диаметром 8,5 и 9,5 м;
- в зонах тектонических разломов и сильнотрещиноватых грунтах с $f = 2 \div 4$ применяли монолитные усиленные железобетонные обделки;
- на участках с устойчивыми и слабо трещиноватыми грунтами с $f \geq 4$ устраивали монолитные бетонные обделки.

При сооружении стволов применялся буровзрывной способ проходки заходками на одно кольцо обделки. Из-за больших напоров трещинножильных вод происходили неоднократные их прорывы в выработанное пространство с выносом песка и мелкообломочного материала. Так, в период с сентября по октябрь 1978 года проходка ствола №3 была приостановлена в связи с прорывом воды в забой дебитом $Q = 90 \text{ м}^3/\text{ч}$. Далее с декабря и по сентябрь 1979 года проходка не производилась из-за внезапного прорыва с дебитом 300–360 $\text{м}^3/\text{ч}$.

При сооружении ствола №2 в результате больших водопритоков пластовых вод ($Q \sim 180 \text{ м}^3/\text{ч}$) с выносом пес-

чаного материала была деформирована чугунная крепь в интервале 42,5–52,5 м.

Для гидроизоляции крепи по всей глубине стволов производился комплекс работ, включающий в себя чеканку швов свинцовой проволокой с контрольной подчеканкой, чеканку цементом БРЦ и контрольный тампонаж тубинговой колонны.

Для понижения уровня подземных вод производилось бурение вертикальных водопонизительных скважин глубиной до 270 м и оборудование их глубинными насосами типа ЭЦВ 10-63-270.

На стволе №1, несмотря на то, что в результате работы скважин уровень подземных вод был понижен с отметки 36 м до 153 м, водоприток значительно уменьшить не удалось. На отметке 70–72 м он составил $\sim 200 \text{ м}^3/\text{ч}$, а на отметке 156 м, при пройденном стволе до глубины 244 м, произошел прорыв трещинножильных вод, приведший к затоплению ствола до отметки 74 м. В связи с наличием больших водопритоков проходка велась в искусственно замороженных породах в интервале 0–302 м. В интервале 72–302 м применялась цементация с шагом 20–30 м.

Для проходки основного тоннеля в зонах разломов в соответствии с государственной научно-технической программой были разработаны и применены практически новые технологии и специальные способы работ. Без их использования осуществить успешное строительство Северо-Муйского тоннеля было бы весьма проблематично и вообще вряд ли возможно.

Так, впервые в нашей стране были разработаны и применены в сложных горно-геологических условиях и на участках разломов [2]:

- технология проходки подземных выработок с устройством арочно-бетонной крепи и двухслойной обделки;
- конструкции опережающих экранов из труб;
- взрыво-инъекционный метод упрочнения грунтов;
- в опытном порядке — замораживание обводненных грунтов жидким азотом.

СТРОИТЕЛЬСТВО СЕВЕРО-МУЙСКОГО ТОННЕЛЯ СТАЛО ДЛЯ ТОННЕЛЬЩИКОВ НАШЕЙ СТРАНЫ СЕРЬЕЗНЫМ ВЫЗОВОМ, С КОТОРЫМ ОТРАСЛЬ УСПЕШНО СПРАВИЛАСЬ. В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ ВОЗНИКЛА НЕОБХОДИМОСТЬ СООРУЖЕНИЯ ВТОРОГО СЕВЕРО-МУЙСКОГО ТОННЕЛЯ, ЧТО ТАКЖЕ ПОТРЕБУЕТ ДЛИТЕЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ УСИЛИЙ ШИРОКОГО КРУГА СПЕЦИАЛИСТОВ.

Для проходки зон разломов были усовершенствованы и откорректированы для применения в реальных условиях известные специальные способы работ по инъекционному закреплению грунтов, комплексному водопонижению, заполнению пустот, образованных при выносах породы из сводовой части, и другие. Также впервые в стране применены передовые зарубежные техника и технологии проходки зон разломов.

На удароопасных участках осуществлялся ряд мероприятий по защите тоннельных выработок от негативных последствий динамических проявлений горного давления. Так, на участках с прогнозируемым высоким уровнем напряжений для уменьшения взаимного влияния между тоннелем и штольней были увеличены целики. Для разгрузки напряжений по контуру выработок применялось регулирование скоростей проходки, в том числе с ее остановкой на время от нескольких суток до недели и более.

КОНТРОЛЬ ПРИРОДНЫХ РИСКОВ

Управление природно-техногенными рисками невозможно без их контроля.

При строительстве Северо-Муйского тоннеля постоянно уточнялись инженерно-геологические условия проходки путем опережающего бурения горизонтальных разведочных скважин с отбором керна из забоев разведочной штольни. Для уточнения условий проходки и прогноза состояния грунтов впереди забоя, кроме разведочного бурения, применялись геофизические методы. В частности, метод естественного импульсного электромагнитного излучения (ЕИЭМПЗ) и, в опытном порядке, георадар Московского инженерно-физического института (МИФИ).

Выполнялись натурные исследования напряженно-деформированного состояния обделки. При строительстве тоннеля были смонтированы замерные станции, оснащенные датчиками, фиксирующими местные сум-

ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ РИСКОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ СЕВЕРО-МУЙСКОГО ТОННЕЛЯ ПРИМЕНЯЛСЯ ШИРОКИЙ КОМПЛЕКС ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ, БЕЗ ЧЕГО БЫ НЕВОЗМОЖНО РАЗРАБАТЫВАТЬ И ОСУЩЕСТВЛЯТЬ МЕРОПРИЯТИЯ ПО ЗАЩИТЕ ТОННЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК ОТ ПРОЯВЛЕНИЯ НЕГАТИВНЫХ ФАКТОРОВ В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ.



Рис. 4. Деформометры ПЛДС-400 на одиночной трещине в блоке

марные деформации конструкций от горного давления, гидростатики и температурных воздействий, а также сейсмопроявлений. Вычислялись напряжения в обделках тоннеля, результаты сравнивались с запасом несущей способности. Эти данные служили целям оперативного контроля напряженно-деформированного состояния существующих крепей и обделок, а для новых участков — основой для своевременного вмешательства в конструктивные изменения обделок.

Замерные станции на Северо-Муйском тоннеле монтировались, начиная с 1978 года, в различных горно-геологических условиях. Использовались струнные измерительные преобразователи линейных деформаций типа ПЛДС, предназначенные для измерения относительных линейных деформаций бетонных, железобетонных и других элементов сооружений при контрольных наблюдениях и натурных исследованиях их состояния. Преобразователи закладывались в бетон или устанавливались непосредственно на поверхности сооружений. Инсталлированные в конструкции замерные станции продолжали поставлять информацию об изменениях НДС и на этапе эксплуатации тоннеля, большинство из них и сейчас находятся в работоспособном состоянии.

Учитывая высокую сейсмическую активность района, особое внимание при строительстве и последующей эксплуатации тоннеля уделялось проявлениям напряженно-деформированного состояния в виде остаточных деформаций, зарегистрированных при долговременных наблюдениях на замерных станциях [3,4].

На станции №8 в разведочной штольне на ПК 78+13, расположенной в блоке ВЗ, датчики ПЛДС-400 были установлены через трещину (см. фото — рис. 4), пересекающую блок крепких гранитов.

Происходившие в период строительства землетрясения средней интенсивности приводили к появлению остаточных деформаций на некоторых участках зон тектонических нарушений. В дальнейшем небольшие деформации наблюдались в основном за счет колебаний температуры воздуха в тоннеле.

Сейсмическая опасность различных участков тоннеля была оценена с учетом глубины заложения и конкретных инженерно-сейсмологических условий. Приращенная сейсмическая балльность рассчитывалась по замеренным скоростям сейсмических волн и составляют относительно скального грунта для грунтов в основании тоннеля от $-1,1$ до $+1,7$ балла. Следует отметить, что при данных оценках не учитывали вероятные смещения по существующим разломам, которые при землетрясении в 9 баллов могут быть $1-1,2$ м, а при 10 баллах $-5-7$ м.

По данным сейсмогеологов, уже при землетрясениях 5-6 баллов и более скальные блоки по тектоническим зонам дробления могли переходить в движение и создавать угрозу разрушений в тоннеле. Исследования, проведенные после начала строительства показали, что:

- перемычка, в которой располагается тоннель, является самой сейсмоактивной в Байкальской рифтовой зоне, а в ней наиболее активна зона Перевального разлома;

- перемычка разделяет направления вспарывания разрывов при землетрясениях: восточнее они ориентированы на восток, на западе — к западу; с одной стороны это несколько снижает сейсмическую опасность для тоннеля, но с другой — растягивающие напряжения в массиве способствуют раскрытию трещин, что обеспечивает гидравлическую связь различных систем трещин и водопритоки, намного превышающие расчетные;

- при землетрясении 9 баллов и выше в тоннеле по зонам разломов возможны вертикальные смещения до $1-1,2$ м и раскрытия трещин;

- сильные землетрясения могут сопровождаться опасными явлениями в виде смещений блоков пород, гидравлическими ударами.

На недостатки проведенных работ по сейсмическому микрорайонированию тоннелей указывал член-корреспондент РАН В. П. Солоненко [5]. Представляется, что до сих пор ряд вопросов сейсмомикрорайонирования тоннелей остается нерешенным.

Инструментальные данные о сейсмичности в районе расположения Северо-Муйского тоннеля получали с помощью регистрации местных землетрясений специально организованной в 1976 году локальной сетью сейсмостанций, а также по данным подземной сейсмостанции (рис. 5, 6), установленной в одной из вспомогательных штолен в зоне Ангараканской депрессии [6,7].

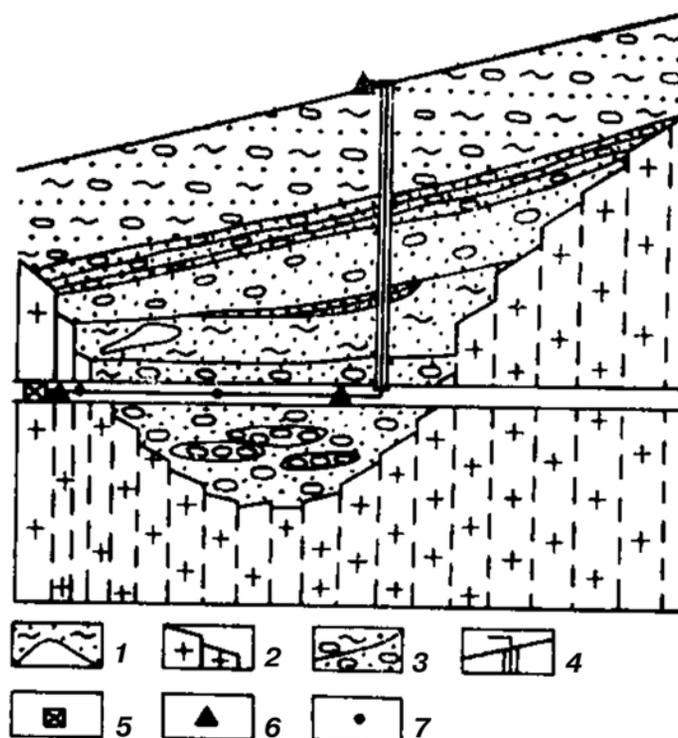


Рис. 5. Схема расположения сейсмических датчиков в зоне Ангараканской депрессии: 1 — рыхлые приповерхностные отложения; 2 — трещиноватые граниты; 3 — грунты зоны депрессии; 4 — скважина с соединительным кабелем от сейсмостанции к сейсмоприемникам на поверхности; 5 — сейсмостанция; 6 — сейсмоприемники на грунтах; 7 — сейсмоприемники на обделке тоннеля



Рис. 6. Аппаратура подземной сейсмической станции во вспомогательной (дренажной) штольне со стороны западного портала в зоне Ангараканской депрессии

Это позволило изучать взаимосвязи между местными землетрясениями и изменениями напряженно-деформированного состояния горных пород вблизи подземных выработок, особенно в местах, где случались аварийные ситуации с выносом водно-грунтовых масс из забоев при проходке зон тектонических нарушений, а также на участках динамических проявлений горного давления.

Регистрирующая аппаратура размещалась в подземной выработке, а сейсмоприемники устанавливались на поверхности и в выработках. Глубина заложения тоннеля в точке установки сейсмоприемников на поверхности и в тоннеле составляла около 120 м. Полученные результаты показывали, что сейсмические колебания от восьми зарегистрированных землетрясений были интенсивностью около 4 баллов. Амплитудный уровень колебаний на дневной поверхности над тоннелем превышал максимальные амплитуды колебаний в тоннеле в $3\pm 0,6$ раза, что в приращениях сейсмической балльности составляет разницу почти в 1,5 балла.

В период инструментальных наблюдений в исследуемом районе не происходило ощутимых и сильных землетрясений, по которым можно было бы оценить реальную сейсмическую опасность в тоннеле. Анализ записей землетрясения 6 июня 1983 года ($I_0 = 3$ балла, эпицентральное расстояние $\Delta = 40-45$ км, глубина очага $H = 15-20$ км), зарегистрированного подземной сейсмостанцией, показал, что реальное затухание амплитуд колебаний — с глубиной меньше расчетного. В спектре колебаний присутствуют два максимума на низких и на относительно высоких сейсмических частотах [6].

В целом для контроля природно-техногенных рисков при строительстве Северо-Муйского тоннеля применялся широкий комплекс геомеханических и геофизических исследований, без чего было бы невозможно разрабатывать и осуществлять мероприятия по защите тоннельных выработок от проявления негативных факторов в сложных горно-геологических условиях.

ВЫВОДЫ

Строительство Северо-Муйского тоннеля стало для тоннельщиков нашей страны серьезным вызовом, с которым отрасль успешно справилась. В настоящее время возникла необходимость сооружения Второго Северо-Муйского тоннеля, что также потребует длительной концентрации усилий широкого круга специалистов.

В некоторой степени задача строительства нового тоннеля упрощается тем, что сейчас мы обладаем более подробными знаниями о геологическом и гидрогеологическом строении вмещающего массива, а также возможностями современных технологий и организационно-технических решений. Кроме того, произошли значительные совершенствования систем контроля и управления рисками в подземном строительстве, апробированных в условиях сооружения большого количества транспортных тоннелей в различных регионах. Разработано «Методическое руководство по комплексному горно-экологическому мониторингу при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей». Благодаря применению современных телекоммуникационных средств налажена оперативная обработка данных, которая расширяет возможности анализа текущей ситуации и сокращает время между началом воздействия негативного фактора и принятием управляющего решения, что, в свою очередь, повышает степень защищенности объекта.

Тем не менее, учет опыта контроля и управления природно-техногенными рисками при строительстве существующего тоннеля чрезвычайно важен при разработке рекомендаций для сооружения Второго Северо-Муйского тоннеля. ■

Литература

1. Сейсмоструктура и сейсмичность района строительства БАМ. Сб. статей /АН СССР, Междуведомственный совет по сейсмологии и сейсмостойкому строительству при Президиуме АН СССР, Инс-т земной коры СО РАН СССР; отв. ред. М.М. Одинцов. — М.: Наука, 1980. 203 с.
2. Технический отчет об изысканиях, проектировании и строительстве 1974-1989 гг. «Байкало-Амурская железнодорожная магистраль. Тоннели». — М.: ТИИР, 1999.
3. Басов А.Д. Остаточные деформации и сейсмическая опасность зон разломов в условиях подземных выработок. // Вопросы инженерной сейсмологии. 2010, т. 37, №2, с. 34-47.
4. Басов А.Д. Локальные нарушения напряженно-деформированного состояния геологической среды и землетрясения в районе Северо-Муйского тоннеля // Вопросы инженерной сейсмологии. 2010, т. 37, № 1. С. 68-78.
5. Солоненко В.П., Николаев В.В., Семенов Р.М., Демьянович М.Г., Курушин Р.А., Хромовских В.С., Чипизубов А.В.. Геология и сейсмичность зоны БАМ. Сейсмогеология и сейсмическое районирование. Новосибирск: Наука, 1985. 192 с.
6. Басов А.Д., Иванов Ф.И., Павлов О.В., Потапов В.А., Сильвестров С.Н. Организация подземной сейсмостанции на Северомуйском тоннеле. / Сб. «Сейсмостойкость транспортных и сетевых сооружений». — М.: Наука, 1986. С. 81-84.
7. Павлов О.В., Потапов В.А., Седых А.И. К оценке относительной сейсмической опасности тоннелей. // Геология и геофизика. — Новосибирск: Наука СО, 1990. С. 109-115.