

УДК 624.1

**Зайнагабдинов Дамир Альфридович**

Иркутский государственный университет путей сообщения  
Россия, Иркутск<sup>1</sup>  
Ассистент  
[damirmt@mail.ru](mailto:damirmt@mail.ru)

**Быкова Наталья Михайловна**

Иркутский государственный университет путей сообщения  
Россия, Иркутск  
Заведующий кафедрой «Строительство железных дорог, мостов и тоннелей»  
Кандидат технических наук, доцент  
[bikovanm@mail.ru](mailto:bikovanm@mail.ru)

## **Транспортные тоннели и геодинамика горных массивов**

---

<sup>1</sup> 664074, Чернышевского 15, ИрГУПС

**Аннотация.** В статье рассматриваются особенности проектирования транспортных тоннелей при активной геодинамике в неоднородных горных массивах, разбитых на блоки зонами разломов. Актуальность проблемы вызвана развитием повреждений в обделках тоннелей, эксплуатируемых в рамках проектных предпосылок. Проблема заключается в недостаточном учете при проектировании особенностей работы обделок в горных неоднородных массивах. Проводится библиографический анализ форм проявления геодинамики. Отмечается, что для транспортных тоннелей наиболее актуальным является учет сейсмических воздействий и активность разломной тектоники. Приводятся примеры смещения земной поверхности и горных блоков, регистрируемые инструментальными методами. Численным моделированием горной перемычки с Северо- Муйским тоннелем с использованием проектных данных и акселерограммы на землетрясение 5.5 баллов выявлено, что по границам горных блоков в разломных зонах фиксируется смещение до 7 мм и напряжений до 2.5 МПа, опасных для бетонных конструкций. Показано, что для территорий с активной геодинамикой частое повторение сейсмических землетрясений даже малой и средней интенсивности опасно накоплениями геодеформационных воздействий на тоннель. Формируются рекомендации по проектированию тоннелей в зонах разломов на территории активной геодинамики. Выстраиваются цели и задачи автоматизированных систем мониторинга как основы контроля соблюдения проектных условий в течение гарантийного срока и дальнейшей эксплуатации сооружения. При контроле внешних параметров внешних нагрузок и воздействий обращается внимание на важность наблюдений за смещением горных блоков геодезическими системами и контроля напряженно- деформированного состояния обделок в зоне разломов в соответствии с геологическим разрезом. Структура автоматизированной системы мониторинга железнодорожного тоннеля должна включать оперативный, аналитический контур и блок управления движением поездов. Оперативный контур осуществляет сбор данных о параметрах внешних воздействий и реакции на них тоннельных обделок. Аналитический контур включает блок математического моделирования работы конструкций, контроля проектных решений, формирования конструктивно-технологических решений и оценки технической безопасности. Блок управления назначает режим движения поездов в зависимости от контроля критериев опасности, формируемых оперативным и аналитическим контурами и оценкой геодинамической и технической безопасности сооружения.

**Ключевые слова:** транспортные тоннели; активная геодинамика; геодеформационные воздействия; системы мониторинга.

Тоннели приобретают все большее значение в развитии транспортных магистралей. Сложные горные участки преодолеваются железными и автомобильными дорогами с помощью тоннельных пересечений, также активно осваивается подземное пространство под плотно застроенными территориями современных городов. В настоящее время в крупных городах становится все больше не только тоннелей метрополитенов но и автодорожных, железнодорожных и пешеходных подземных пересечений территорий.

Одним из важнейших потребительских свойств тоннелей является их эксплуатационная надежность – способность пропускать грузовые и пассажирские потоки без ограничений в течение срока службы. Эксплуатационная надежность тоннелей обеспечивается полнотой изыскательских работ, проектными решениями, качеством строительного исполнения, системой содержания в период их эксплуатации.

Необходимый конструктивный ресурс создается при проектировании расчетными методами на различные сочетания нагрузок и воздействий. Современные нормативные требования, опыт и практика проектирования транспортных сооружений, как в России, так и за рубежом, безусловно, учитывают особенности работы конструкций в сложных инженерно-геологических условиях. В связи с тяжелыми последствиями большое внимание при развитии нормативной документации в научно-практической литературе уделяется защите сооружений при сейсмических событиях. Нормами и практикой проектирования в России (СП 14.13330.2011) принято рассчитывать транспортные тоннели на сейсмические воздействия. Считается, что сооружения сложно защитить при катастрофических землетрясениях выше 9 баллов по шкале MSK-64, а сейсмические события меньше 7 баллов не опасны для подземных сооружений. Однако, повреждения и трещины, проявляемые в транспортных тоннелях при их строительстве и эксплуатации даже в пределах нормативно учитываемых сейсмических параметров, показывают, что геодинамика горных массивов и ее влияние на работу транспортных тоннелей далеко не изучены. Землетрясения по разному проявляются в однородных горных массивах и породах, раздробленных блоковой структурой в результате разломной тектоники. Скольжение по границам блоков может оказать внешнее геодеформационное воздействие на обделку тоннеля, не предусмотренное при проектировании сооружения и изменить сложившееся напряженно-деформированное состояние обделок тоннеля. Представляют интерес вопросы геодинамики горных массивов и характер работы транспортных тоннелей в таких условиях.

**Геодинамика горных массивов.** Транспортные тоннели в эксплуатации становятся частью верхних пластов земной коры. В однородных горных массивах тоннели обычно могут эксплуатироваться без повреждений сотни лет. Неоднородные горные массивы формируются в результате факторов геодинамического происхождения, включающих сейсмические события, подвижки по разломам, геохимические и геофизические процессы подземных вод и газов, гравитационные процессы. Транспортные тоннели после строительства в той или иной мере включаются в совместную работу с горным массивом на восприятие геодинамических и геодеформационных воздействий. Для построения адекватных феноменологических и математических моделей этой совместной работы необходимы знания о механизмах формирования земной коры, пространственных и временных особенностях их проявлений [1]. Научные основы современных представлений о формировании земной поверхности и взаимодействии верхних пластов с искусственными сооружениями заложены трудами многих ученых и специалистов в области геологии, геодинамики, в том числе, отечественных (Н. А. Флоренсов [2], Ю. А. Мещеряков [3], Н. И. Николаев [4], Н. А. Логачев [5], В. П. Солоненко [6], С. И. Шерман [7] и других [8-15]).

Модели зарождения и развития тектонических процессов основаны на различных подходах, включающих изучение движения планеты как космического тела, пульсации Земли,

термической конвекции, гравитационного погружения краев плит в зонах Беньофа [15]. Относительно тонкая, хрупкая и жесткая земная кора в результате сложного наложения тектонических движений деформируется с образованием системы рифтовых трещин. По характерным показателям современных подвижек прослеживаются границы блоков, причем в зонах разломов значения подвижек в 3-4 раза превышают средние значения [16]. Наблюдениями отмечается пульсационный характер развития разломов и максимальных напряжений над разломами [8]. В соответствии с геофизическими данными в земной коре существуют большие сжимающие напряжения, достигающие на глубине 1-5 км величины 1-6 кбар (100-600 МПа) [10]. Суммарное поле тектонических напряжений изменяет рельеф земной поверхности. Формы сброса тектонических напряжений известны в виде быстрых сейсмических событий и медленных, измеряемых миллиметрами и сантиметрами в год. Среди медленных движений наиболее известны криповые смещения по разломам [12,17,18]. В фундаментальной геологии принято различать типы геодинамических режимов [5], разделяя их на режимы, связанные с горизонтальным сжатием/растяжением, сдвигом и вертикальными напряжениями сжатия/растяжения. Для прикладных инженерных наук геодинамические процессы представляют интерес в части форм проявления вблизи земной поверхности. При этом выделяются их следующие формы: формирование рельефа, сейсмичность, волновая циклическая динамика и экзогеодинамика [19]. Изучение процессов формирования рельефа и связанных с ними изменений напряжений верхних слоев земной коры осуществляется в рамках задач геоморфологии [3]. Концентраторами напряжений являются разломы, поэтому их поведение разломов в местах расположения важных транспортных объектов должно контролироваться [1, 20].

Пристальное внимание всего мира сосредоточено на сейсмической активности. Землетрясения способны разрушать огромные территории, и не только объекты, созданные человеком. Поэтому создаются карты сейсмического районирования, развиваются расчетные технологии на сейсмические воздействия, совершенствуются конструктивные методы защиты сооружений. Географически на территории России имеются регионы высокой сейсмической опасности, это Кавказ, Байкальская рифтовая зона, Дальневосточные районы. Волновая циклическая геодинамика на современном этапе мало изучена. Известно, что по земной поверхности регистрируются волны с различной периодичностью, амплитудой и частотой [21]. Очевидно, что на разломах как местах структурной неоднородности любые волны земной поверхности будут вызывать напряжения и перемещения. В работе [22] инструментально зафиксированы вертикальные и горизонтальные подвижки на разломах даже на относительно спокойных равнинных территориях. Отмечается пульсационный, знакопеременный характер подвижек на территории от 100 м до 1 километра со значениями разовых амплитуд до 5-7 см. Проявление экзогеодинамики в виде осыпей, оползней, обвалов связано с гравитационными, климатическими и тектоническими процессами. Защита дорожных трасс от этих процессов основана на качестве инженерно-геологических изысканий и опыте разработки защитных сооружений.

Очевидно, для обеспечения эксплуатационной надежности транспортных сооружений, необходимо учитывать проявление всех форм геодинамики, наиболее актуальными являются сейсмические воздействия и активность разломной тектоники. Именно эти факторы являются причиной изменения гидрогеологических, геофизических, геологических и геомеханических условий подземной среды вокруг тоннеля. С точки зрения обеспечения эксплуатационного ресурса сооружений, контактирующих с земной поверхностью, представляют интерес количественные показатели геодинамических и геодеформационных воздействий, к которым относятся: направление и величина возможных смещений горных блоков, скорости и ускорения колебаний. Сейсмические события регистрируются сейсмографами, велосиметрами, акселерометрами. Смещения разломов регистрируются крипметрами [17], космическими

наблюдениями [20], геодезическими съемками [16,18]. Геодезические наблюдения в прошлом веке проводились традиционными средствами геодезии и геотехники [16]. Методами повторного нивелирования выявлено, что в пределах Сибирской платформы выделяются структуры со скоростями смещений реперов свыше 20 мм/год. Земная поверхность при этом прогибается отдельными территориями, испытывая вертикальные смещения восходящего и нисходящего характера. Зафиксировано, что максимальные градиенты вертикальных подвижек земной поверхности в 95% случаях совпадают с расположением разломов в земной коре.

В настоящее время широко используется навигационная спутниковая система (ГНСС или GNNS), которая позволяет определять пространственные координаты в любой точке Земного шара, за исключением околополюсных территорий. Хорошо зарекомендовала себя система глобального позиционирования GPS (США). Активно развиваются отечественная система ГЛОНАСС, европейская Galileo и др. (Япония, Китай, Индия). ГНСС технологии позволяют отслеживать движения земной поверхности по всей планете. Системы мониторинга на базе оборудования ГНСС имеют множество преимуществ, включающих в себя их высокую точность, возможность автоматизированной передачи данных, удобный интерфейс предоставления результатов анализа архивных и оперативных данных. На Рисунке 1 показаны смещения разлома, фиксируемые крипометром в зоне разлома SuperstitionHills за период 2004-2009 годов [17]. Показательно, что для наблюдаемого разлома в этот период криповые смещения проявлялись почти по линейному закону 12 мм в год и мгновенными импульсами до 38 мм.

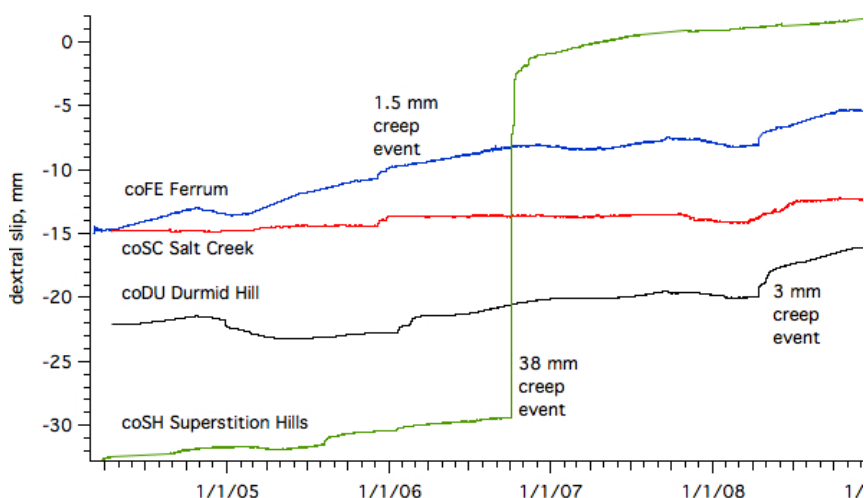


Рис. 1. Смещения по разлому SuperstitionHills [17]

О количественных показателях активности разломов на территории России можно судить по данным архивов геодинамических полигонов. Так, по данным геодинамического полигона на территории Байкало – Амурской магистрали в 1970-1980 г.г. над Северо-Муйским тоннелем регистрировались вертикальные перемещения реперов до 32 мм [23]. Специалистами Института Земной Коры Академии наук РФ [24] установлено, что скорости относительных вертикальных перемещений отдельных блоков, контактирующих по Верхнеангарскому, Перевальному и другим разломам Северомуйской горной перемычки, в 6 раз превышают горизонтальные перемещения и ориентировочно составляют величину 18 мм/год. Только системы мониторинга позволят получить количественную картину проявления величин смещений на границах блоков в зонах разломов для учета внешних геодинамических воздействий в работе транспортных сооружений. Следует учитывать то обстоятельство, что катастрофические сейсмические события происходят с редкой повторяемостью, измеряемой порой сотнями лет, а землетрясения малой и средней интенсивности, которые также могут привести к накоплению необратимых смещений по границам горных блоков, повторяются

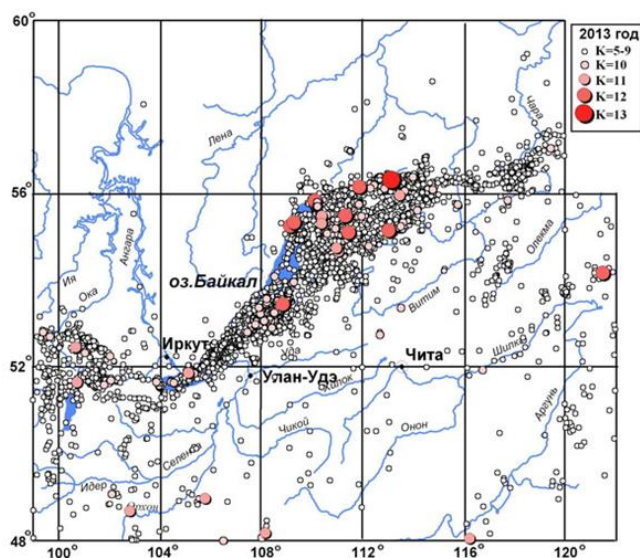
гораздо чаще. На рисунке 2 показана частота повторения землетрясений в районе Байкальской рифтовой зоны в 2013 г. с указанием энергетических классов  $K$ , связанных с интенсивностью сотрясений поверхности земли при землетрясениях в баллах  $I_0$  по шкале MSK-64 с помощью зависимостей [25]:

$$I_0 = 0,74K - 2,8 \text{ для } K \leq 14, \quad I_0 = 1,21K - 9,4 \text{ для } K > 14.$$

### Особенности работы тоннелей в условиях геодинамики горных массивов.

Воздействие землетрясений на наземные и подземные сооружения разных типов исследовалось во многих странах, где землетрясения происходят довольно часто: в России, Японии, США, Канаде и других. Отмечено, что по ряду причин подземные сооружения по сравнению с наземными в меньшей мере подвержены сейсмическим воздействиям:

- подземные сооружения не входят в резонанс, а реагируют на землетрясения таким же образом, как окружающий их массив грунта;
- масса тоннелей не оказывает влияния на параметры сейсмических волн, так как погонная масса тоннеля мало отличается от замещенной им погонной массы грунта;
- подземные сооружения обладают большим коэффициентом демпфирования, так как энергия рассеивается в окружающий массив грунта, что существенно уменьшает колебания;
- демпфирование в подземных сооружениях в пересчете на вязкое трение может достигать 20% от критического значения, в то время как в наземных строительных конструкциях (стальных и железобетонных) этот коэффициент не превышает 2-4%.



**Рис. 2.** Карта эпицентров землетрясений Прибайкалья за 2013 г.

([http://www.seis-bykl.ru/modules/Seismo\\_ce/images/god\\_b/2013.jpg](http://www.seis-bykl.ru/modules/Seismo_ce/images/god_b/2013.jpg)).

Несмотря на такие положительные, с точки зрения сейсмостойкости, свойства подземных сооружений, при землетрясениях конструкции тоннелей повреждаются. Анализ разрушений тоннелей при сейсмических воздействиях показал, что наиболее часто тоннели разрушаются при следующих условиях: при пересечении зон разломов в местах изменения жесткости тоннельной обделки; в местах пересечения границ слоев грунта с существенно различными характеристиками (жесткостями); при всплытии тоннелей из-за разжижения

грунтов; из-за больших поперечных, перпендикулярных оси тоннеля деформаций грунта, возникающих при распространении сейсмических волн.

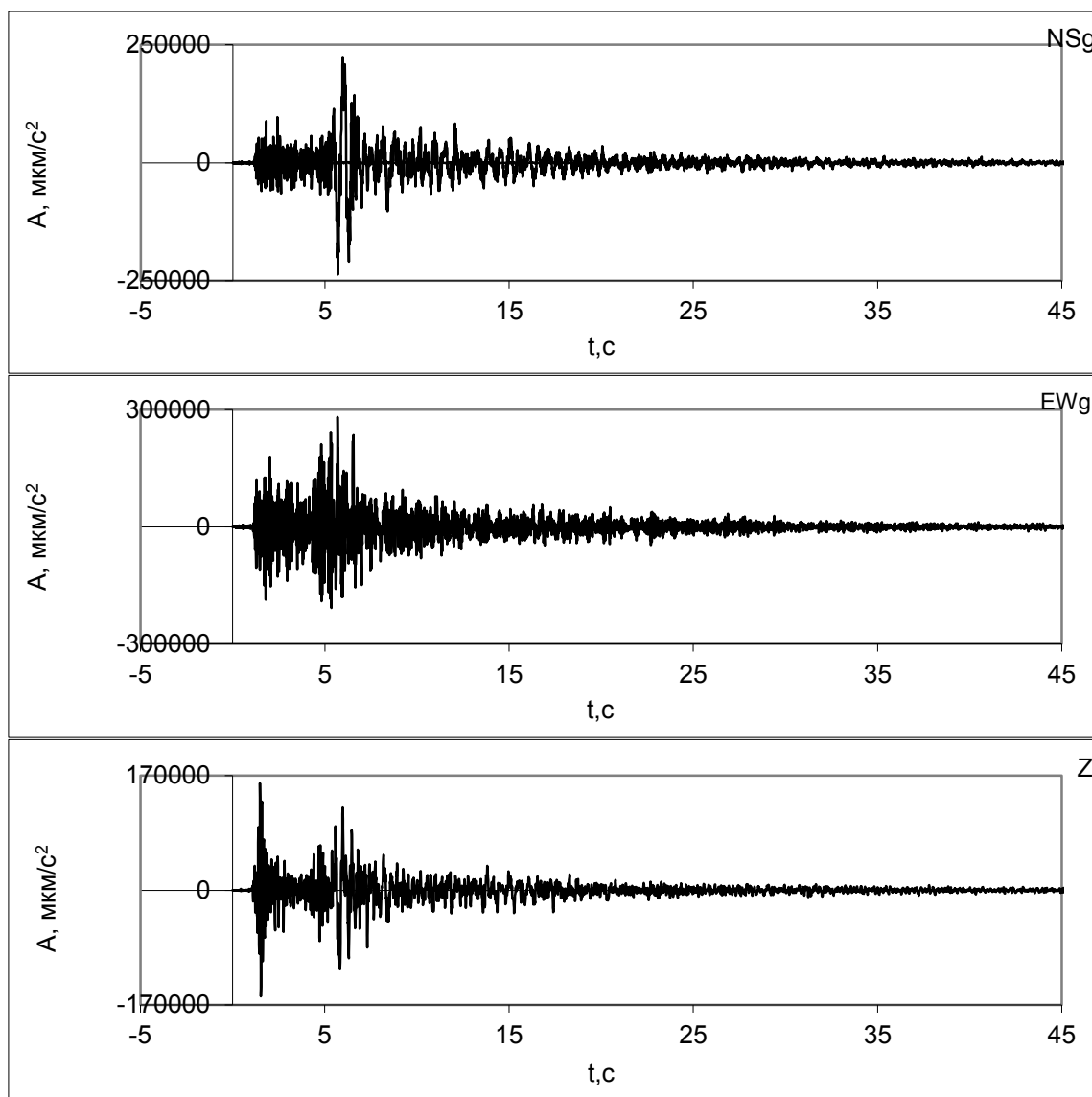
Оценка влияния геодформационных воздействий в результате смещений горных блоков на обделку транспортного тоннеля может быть определена аналитическим, численным моделированием и инструментальными наблюдениями.

Объектом исследования выбран Северо-Муйский тоннель Байкало-Амурской железнодорожной магистрали, построенный в горной перемычке между двумя развивающимися впадинами Байкальской рифтовой зоны. Условия эксплуатации тоннеля осложнены множеством разломов, чередованием скальных гранитных блоков с зонами дробленого грунта. Исследование совместной работы системы «горный массив – обделка тоннеля» с учетом геодинамики горных блоков представляет особый интерес.

Инструментальные наблюдения [26] в течение ряда лет показали, что тоннель подвержен неравномерному пространственному деформированию, положение максимальных деформаций в стенах тоннеля и асинхронности деформирования стен (изгиб в плане) совпадает с пересечением зон дробления по геологическому разрезу (крупные тектонические нарушения).

Численное исследование влияния геодформационных воздействий на работу обделки тоннеля выполнялось с помощью программно-вычислительного комплекса Midas [27]. По проектным данным была составлена плоская численная модель горной перемычки с тоннелем. Модели разных грунтов заданы свойствами: крепких пород из гранита, имеющего модуль упругости  $E=4.9 \cdot 10^4$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu=0.2$  и удельный вес  $\gamma=26.8$  кН/м<sup>3</sup> (зеленый цвет); дробленных скальных пород с характеристиками  $E=1.3 \cdot 10^4$  МПа,  $\nu=0.3$ ,  $\gamma=27.1$  кН/м<sup>3</sup> (красный цвет); грунтов в виде гравийно-песчаной смеси при  $E=1.1 \cdot 10^4$  МПа,  $\nu=0.37$ ,  $\gamma=26.5$  кН/м<sup>3</sup> (розовый цвет) и песка -  $E=1.0 \cdot 10^4$  МПа,  $\nu=0.37$ ,  $\gamma=21.3$  кН/м<sup>3</sup> (голубой цвет). Конечные элементы для грунтового массива приняты в виде трех и четырехугольных плит размерностью 50 м и толщиной 20 м. Для моделирования подковообразных бетонных и круглых чугунных обделок в соответствии с проектными данными использовались элементы балочного типа длиной 50 м. Характеристики свойств материалов обделки приняты для бетона в соответствии с классом по прочности на сжатие В30, для чугуна – в соответствии с маркой чугуна СЧ 21-40. Граничные условия заданы жестким закреплением по основанию горного массива ниже тоннеля на 1 километр. Контакт между балкой и плитой принят в виде жесткого соединения. Для расчета использовались акселерограмма по данным Северомуйской сейсмостанции, записанным 23.08.2007 при землетрясении 5.5 баллов по шкале MSK-64, эпицентр которого находился в 27 км от тоннеля (рисунок 3). Демпфирование условно не учитывалось. На рисунке 4,а показаны максимальные перемещения модели во время сейсмического воздействия при заданных грунтах и на рисунке 4,б – в условно однородных скальных грунтах.

Численное моделирование показало, что сейсмические события средней (нерасчетной) интенсивности в однородном горном массиве сопровождаются плавными волнами с незначительными амплитудами (рис. 4,б), а в неоднородном горном массиве – приводят к смещениям по границам горных блоков, максимальные значения которых составили величину 7 мм. Максимальные продольные напряжения в тоннеле при этом составили величину 2,5 МПа в неоднородном горном массиве и 0,66 МПа - в однородном. Учет демпфирующих свойств грунтов в модели снижает величины перемещений и напряжений, однако задача определения коэффициента демпфирования неоднородного горного массива, составленного скальными и дробленными породами, нуждается в проведении специальных исследований. Учитывая, что количество сейсмических событий за годы эксплуатации превышает сотни и тысячи раз, даже первые импульсы, вызывающие растягивающие напряжения в бетонной обделке на границах блоков, могут стать причиной образования трещин.

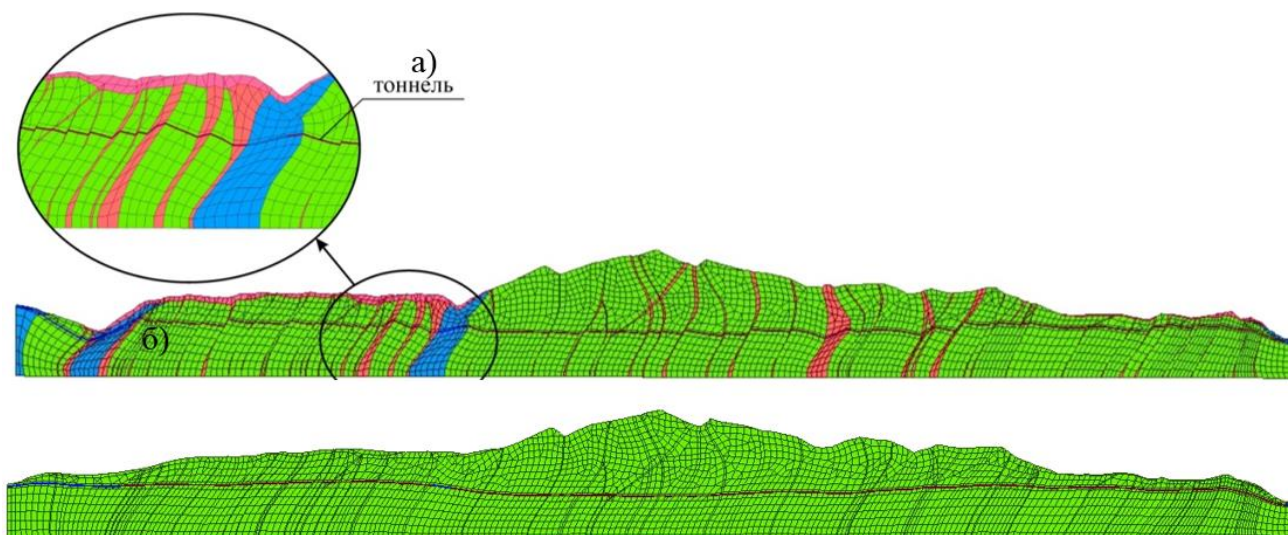


**Рис. 3.** Акселерограммы землетрясения 5.5 баллов по шкале MSK – 64 в районе СМТ 23.08.2007 (направление на север, восток и вертикальное)

Очевидно, наличие структурных неоднородностей в горном массиве при сейсмических событиях даже средней и малой интенсивности является местом концентрации напряжений и при высокой частоте землетрясений способствует развитию деструктивных процессов в подземном сооружении.

Таким образом, численным исследованием установлено, что при расположении транспортных тоннелей в неоднородных горных массивах, границы горных блоков являются местами скачков перемещений, усилий и напряжений при сейсмических событиях ниже 7 баллов. При этом крепкие горные блоки ведут себя «как твердое тело», деформации преимущественно реализуются на границах этих блоков, вероятно, они и приводят к появлению и расширению зон дробления между блоками, где скальный грунт со временем разрушается до состояния песка. Не последнюю роль играют при этом агрессивные подземные воды и газы зон разломов. Всплески перемещений на границах блоков вызывают дополнительные геодеформационные воздействия на обделку тоннеля, что без соответствующей конструктивной защиты может стать причиной образования трещин. Следует учитывать, что если горный блок попадает в область действия активного разлома, то смещения по нему могут происходить без сейсмических волн, в результате «крипового» сдвига.





**Рис. 4.** *Перемещения в мм в тоннеле при сейсмическом событии 5.5 баллов[29]  
а) неоднородный горный массив по проектному разрезу;  
б) условно однородный скальный массив*

Для детального исследования напряженно-деформированного состояния тоннельной обделки при геодинамических воздействиях необходима разработка более подробных моделей. В работе [28] предложены аналитические и численные модели расчета тоннелей при условии смещения горных блоков, выявлено, что зона влияния геодинамических воздействий составляет не более 60-100 м, а на максимальные значения усилий незначительной влияет разница в жесткости разных блоков и жесткость заполнения другим грунтом между блоками. На распределение усилий существенное значение оказывает ширина зоны заполнения между блоками.

Очевидно, что при проектировании следует учитывать вероятные смещения по границам горных блоков в геодинамически активных районах, расчетом на их вероятные значения, определяемые при геодинамическом районировании, назначать конструктивные решения по обделкам. Для контроля соблюдения проектных решений необходима система автоматизированного мониторинга.

**Системы мониторинга соблюдения проектных условий.** Для контроля соблюдения проектных решений необходима система автоматизированного мониторинга. На современном этапе при строительстве транспортных тоннелей в России используются системы мониторинга [29-31], которые позже остаются для контроля работы тоннеля в эксплуатации. Такие системы мониторинга должны иметь определенные особенности при эксплуатации в неоднородных горных массивах, особенно, в зонах активной разломной тектоники. Целевыми задачами системы автоматизированного мониторинга тоннеля при эксплуатации являются:

1) контроль параметров, характеризующих соответствие условий эксплуатации проектным предпосылкам в течение гарантийного срока и возможная корректировка проектных решений при необходимости;

2) контроль параметров работы и оперативная оценка изменения технического состояния конструкций тоннеля с целью своевременного применения профилактических и ремонтных мероприятий.

При несоответствии контролируемых максимальных величин внешних нагрузок и воздействий проектным решениям прорабатываются варианты возможного конструктивного усиления тоннельных обделок.

Для обеспечения эксплуатационной надежности за пределом гарантийного срока решаются задачи:

- формирования оперативной карты ресурсов конструкций, связанных с их несущей способностью и предельными деформациями;
- прогнозирования вероятных сценариев изменения напряженно-деформированного состояния методами математического моделирования;
- оценки технической безопасности и принятия управляющих решений по ее обеспечению.

*Контроль внешних параметров проявления функциональных нагрузок и природных воздействий* предполагает сбор данных о функциональных транспортных нагрузках, климатических, геодинамических факторах, изменениях горного и гидростатического давления.

Для контроля проектных условий необходимо знать долю вклада каждого фактора в работу конструкций. Приборами метеостанций контролируются температура, влажность и скорость движения воздуха. Геодинамические факторы фиксируются степенью изменения горного и гидростатического давления, параметрами оценки сейсмических воздействий, смещениями контролируемых точек, характеристиками агрессивности подземных вод и газов. Датчики горного и гидростатического давления закладываются при строительстве. Максимальное горное давление можно определить по размерам и плотностям горных пород расчетным путем. Фактическую часть горного давления, которая участвует в работе обделки с учетом ее конструктивных особенностей и способа возведения, можно учесть с помощью датчиков, закладываемых при строительстве или по остаточным напряжениям, определяемым, например, с помощью фотоупругих датчиков и метода разгрузки [26]. Оценка сейсмических воздействий выполняется сейсмостанциями. Смещения горных блоков могут быть определены с помощью автоматизированных геодезических систем. Для транспортных тоннелей предусматриваются наземные и подземные взаимосвязанные геодезические системы. Особое значение имеет вопрос краткосрочного предсказания геодинамических событий с использованием различных геофизических методов. В этом направлении известно много работ: метод регистрации естественных импульсов электромагнитного поля Земли (ЕИМПЗ), контроль акустической эмиссии горных пород в их естественном залегании и др.

Особенно важными представляются наблюдения за смещением горных блоков геодезическими системами и контроля напряженно-деформированного состояния обделок на границах блоков в зонах разломов в соответствии с геологическим разрезом.

Транспортные нагрузки, хотя и в меньшей степени, так же отражаются на работе тоннельных конструкций, особенно, их динамическая составляющая. При контроле транспортных нагрузок могут иметь значение такие параметры, как вес, длина, частота повторяемости и динамические воздействия поездных составов. Вес могут оценивать электронные весы, при увязке данных их работы с автоматизированной системой мониторинга могут фиксироваться длительность и частота повторяемости нагрузки. Динамические воздействия подвижного состава регистрируются акселерометрами.

*Контроль параметров работы тоннельных конструкций выполняется с помощью диагностической аппаратной части.* Реакция на внешние нагрузки и воздействия характеризуется внутренним напряженно-деформационным состоянием конструкций и конструктивных связей. Оценить работу обделки можно с помощью диагностических средств. В качестве диагностических средств, включаемых в автоматизированную систему мониторинга, могут быть использованы: видеоаппаратура с программными средствами распознавания образов при регистрации изменений в картинах водопроявления и образования

трещин; геодезические средства, контролирующие изменение геометрических размеров; электронная аппаратура контроля деформаций конструкций сооружения; аппаратура контроля откликов возбужденных колебаний; диагностические средства изменения свойств материалов.

Диагностика с помощью таких средств может выполняться стационарно или с применением передвижного способа. Стационарно целесообразно установить электронную аппаратуру контроля деформаций сооружения с помощью протяженных или дискретных датчиков, а также аппаратуру контроля отклика частот колебаний. Текущий поток данных деформационного и динамического мониторинга, увязанный с внешними показателями силовой нагрузки, температурных и прочих воздействий, с одной стороны, позволяет выделить долевую часть деформаций от различных внешних показателей, с другой – в оперативном режиме позволяет зарегистрировать любые отклонения, вызванные нештатной ситуацией нагружения. Нештатную ситуацию могут вызвать сверхтяжелая нагрузка, динамические удары, перераспределение горного или гидростатического давления, смещения горных блоков при сейсмических событиях или «криповых» подвижек по разломам, разрыв конструктивных связей, снижение прочности или сплошности бетона в результате развития коррозии материала или трещин, образование пустот в заобделочном пространстве.

Контроль геометрических параметров конструкций увязывается с общей системой геодезического контроля.

Контроль изменения свойств материалов выполняется при периодическом обследовании по специальной программе. При этом проверяется изменение таких показателей бетона, как прочность, водонепроницаемость, морозостойкость, сплошность, плотность, упругие свойства. Оперативно по динамическому мониторингу отслеживается изменение жесткости конструкций в результате изменения свойств материала с помощью динамического мониторинга (контроль и анализ откликов колебаний).

Блок-схема организационной структуры автоматизированной системы мониторинга железнодорожного тоннеля изображена на Рисунке 5. Она включает оперативный контур, аналитический контур и блок управления движением поездов.

Оперативный контур представляет собой систему сбора данных показателей внешних нагрузок и воздействий, параметров реакции тоннеля на эти показатели и формирование соответствующих баз данных этих показателей. Аналитический контур включает блок математического моделирования работы конструкций, блок контроля проектных решений, блока формирования конструктивно-технологических решений и блок оценки технической безопасности. Блок математического моделирования определяет напряженно – деформированное состояние конструкций с использованием показателей оперативного контура, формирует прогностические модели поведения сооружения и определяет опасные величины геодинамических и геодеформационных воздействий. Блок контроля проектных решений выполняет проверки полученных напряжений с использованием метода предельным состояний и экспертных подходов. В случае выхода параметров работы конструкций за пределы проектных предпосылок формируются проекты конструктивно-технологических решений с использованием определенных баз знаний. Блок оценки технической безопасности контролирует опасные величины внешних геодинамических и геодеформационных воздействий для тоннельных конструкций (смещения блоков, ускорения сейсмических событий, показатели горного и гидростатического давления) и передает сигнал опасности в Центр управления режимом движения поездов.

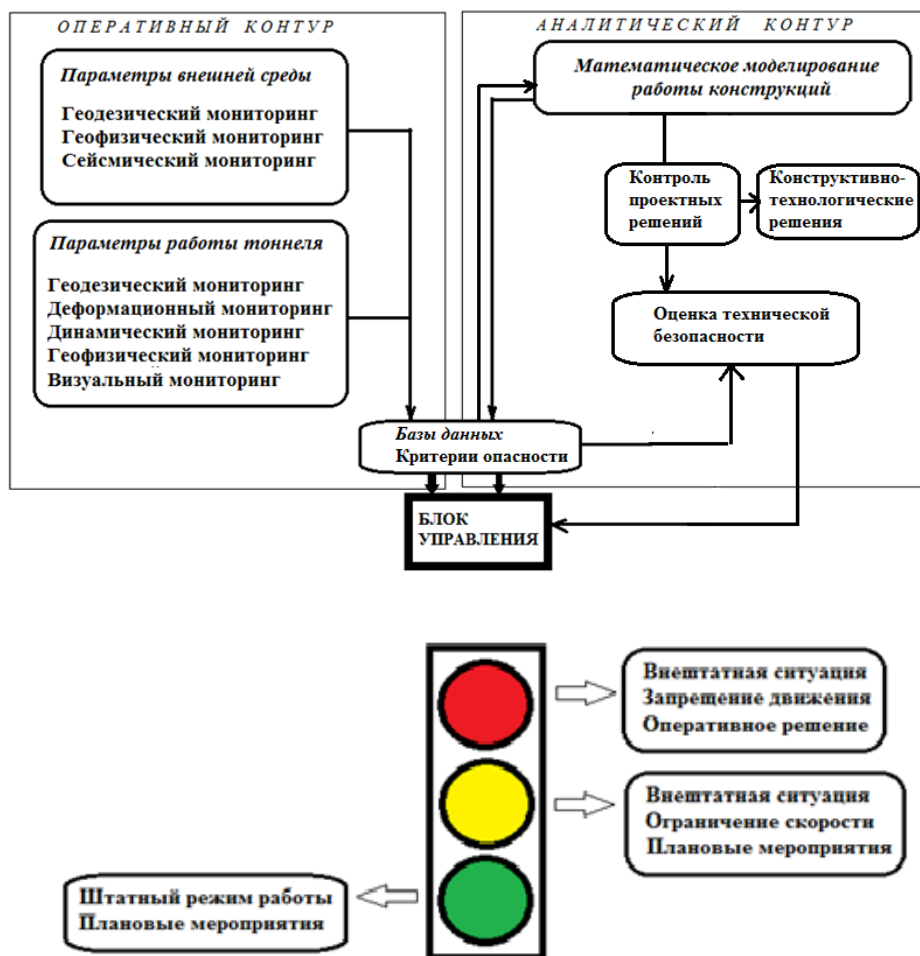


Рис. 5. Блок-схема системы мониторинга

Блок управления имеет 3 режима эксплуатации: «зеленый» – штатный с установленными скоростями движения поездов, с плановыми мероприятиями по содержанию и ремонту тоннеля; «красный» – внештатная ситуация с запрещением движения поездов и оперативными решениями по стабилизации ситуации; «желтый» – внештатная ситуация с возможным ограничением скоростей и оперативно-плановыми мероприятиями по стабилизации ситуации. Выбор режима зависит от критериев опасности, формируемых оперативным и аналитическим контурами и оценкой технической безопасности сооружения. Безопасность как мера защищенности тоннеля должна иметь определенные категории, в зависимости от которых принимаются определенные управленческие решения. Для назначения категорий должна быть разработана специальная методика на основе экспертных исследований с учетом специфики работы сооружения. Эта методика может отражать как контроль не превышения опасных критериев, регистрируемых в оперативном контуре показателями внешних воздействий геодинамического происхождения, так и контроль параметров оценки технического состояния конструкций, выполняемый в блоке математического моделирования конструкций. Представляется логичным назначить 3 категории, соответствующие режимам движения поездов: 1 категория соответствует «зеленому» сигналу, 2 категория – «желтому» и 3 категория – «красному» сигналу.

Кроме оперативной оценки ситуации, автоматизированная система мониторинга должна предупреждать о накоплении тектонических напряжений по изменению магнитных полей, акустическим шумам или каким-либо другим признакам с помощью соответствующей аппаратуры и обязана выдавать готовность «режима особого внимания».

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Быкова Н. М.** Транспортные сооружения на активных геоструктурах. Технологии системного подхода [Текст] / Н. М. Быкова. – Новосибирск : Наука, 2008. – 212 с.
2. **Флоренсов Н. А.** Тектоника – ведущий фактор рельефообразования [Текст] / Н. А. Флоренсов // Проблемы эндогенного рельефообразования. – М. : Наука, 1976. – С. 79–82.
3. **Мещеряков Ю. А.** Рельеф и современная геодинамика [Текст] / Ю. А. Мещеряков. – М. : Наука, 1981. – 277 с.
4. **Николаев Н. И.** Новейшая тектоника и геодинамика литосферы [Текст] / Н. И. Николаев. – М. : Недра, 1988. – 491 с.
5. **Логачев Н. А.** Геодинамические режимы и факторы геодинамической активности литосферы [Текст] / Н. А. Логачев, С. И. Шерман, К. Г. Леви // Геодинамика внутриконтинентальных горных областей : сб. науч. тр. – Новосибирск: Наука, 1990. – С. 299–307.
6. **Солоненко В. П.** Геология и сейсмичность зоны БАМ. Сейсмогеология и сейсмическое районирование [Текст] / В. П. Солоненко, В. В. Николаев, Р. М. Семенов. – Новосибирск : Наука, 1985. – 190 с.
7. **Шерман С. И.** Геология и сейсмичность БАМ. Неотектоника / С. И. Шерман, К. Г. Леви, В. В. Ружич [и др.]. – Новосибирск : Наука, 1984. – 207 с.
8. Современные движения земной коры. Морфоструктуры, разломы, сейсмичность [Текст] / отв. ред. Ю. Д. Буланже. – М. : Наука, 1987. – 188 с.
9. **Дедеев В. А.** Генетические типы тектонических движений [Текст] / В. А. Дедеев, П. К. Куликов. – Сыктывкар, 1985. – 51 с.
10. **Кропоткин П. И.** Тектонические напряжения в земной коре [Текст] / П. И. Кропоткин // Геотектоника. – 1996. – № 2. – С. 3–15.
11. **Павлов О. В.** Геология и сейсмичность зоны БАМ. Инженерная геология и инженерная сейсмология [Текст] / О. В. Павлов, В. И. Джурик, А. Ф. Дренов [и др.]. – Новосибирск : Наука, 1985. – 192 с.
12. **Ружич В. В.** Тектонический крип в зонах сейсмоактивных разломов Прибайкалья и Монголии. Литосфера центральной Азии [Текст] / В. В. Ружич. – Новосибирск : Наука, 1996. – С. 183–185.
13. **Уфимцев Г. Ф.** Морфотектоника Байкальской рифтовой зоны [Текст] / Г. Ф. Уфимцев. – Новосибирск : Наука, 1992. – 215 с.
14. **Levi K. G.** Active faults of the Baikal depression [Text] / K. G. Levi, A. I. Miroshnichenko, V. A. San'kov [and others] // Elf Exploration Production, F-64018. – 1997. – P. 400–434.
15. **Киркинский В. А.** Механизм и цикличность глобального тектогенеза [Текст] / В. А. Киркинский. – Новосибирск : Наука, 1987. – 72 с.
16. **Колмогоров В. Г.** Оценка современной кинематики разломов Сибири по геодезическим данным [Текст] / В. Г. Колмогоров // Методика и результаты изучения пространственно-временных вариаций геофизических полей. – Новосибирск : ОИГГМ СО РАН, 1992. – С. 159–172.
17. **Hudnut K. W.** Behavior of the Superstition Hills Fault During the Past 330 Years / K. W. Hudnut, K. E. Sie // Bulletin of the Seismological Society of America, 1989. – Vol. 79, no. 2. – P. 304–329.

18. **Sylvester A. G.** Near-Field Tectonic Geodesy / A. G. Sylvester // Studies in Geophysics. Active Tectonics. National Academy Press. – Washington, 1986. – [Electronic resource]. URL :[http://www.nap.edu/openbook.php?record\\_id=624&page=165](http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=624&page=165). 19.04.2014.
19. **Быкова Н. М.** Геодинамика и работа протяженных транспортных сооружений [Текст] / Н. М. Быкова // Сейсмостойкое строительство. – 2004. – № 4. – С. 17–22.
20. **Ревзон А. Л.** Природа и сооружения в критических ситуациях [Текст] / А. Л. Ревзон, А. П. Камышев. – М. : Триада, 2001. – 207 с.
21. **Tveritina T. Yu.** Wave Tectonics of the Earth [Text] / T. Yu. Tveritina // Geodynamics & Tectonophysics, 2010. – V. 1, № 3. – P. 297–312.
22. **Кузьмин Ю. О.** Современные суперинтенсивные деформации земной поверхности в зонах платформенных разломов [Текст] / Ю. О. Кузьмин // Геологическое изучение и использование недр : информ. сб. – М., 1996. – Ч. 4. – С. 43–53.
23. **Быкова Н. М.** Северо-Муйский тоннель: из XX в XXI век [Текст] / Н. М. Быкова, С. И. Шерман. – Новосибирск : Наука, 2007. – 186 с.
24. **Саньков В. А.** Разломы и сейсмичность Северо-Муйского геодинамического полигона [Текст] / В. А. Саньков, Ю. И. Днепровский, С. Н. Коваленко [и др.]. – Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1991. – 111 с.
25. **Солоненко А. В.** Энергетическая классификация землетрясений / А. В. Солоненко, В. М. Кочетков // Сейсмическое районирование Восточной Сибири и его геолого-геофизические основы. – Новосибирск : Наука, 1977. – С. 79–91.
26. **Зайнагабдинов Д.А.** Измерения деформаций в стенах обделки и путевом бетоне Северо-Муйского тоннеля с использованием фотоупругих датчиков [Текст] / Н. М. Быкова, А. С. Исайкин, А. Н. Моргунов, Д. А. Зайнагабдинов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2007. – № 1 (13). – С. 69–74.
27. **Зайнагабдинов Д.А.** Оценка сопротивления чугунных обделок железнодорожных тоннелей геодинамическим воздействиям // Транспортное строительство. - № 10, -2014. – С. 10-13.
28. **Зайнагабдинов Д. А.** Модели для расчета тоннелей, пересекающих активные разломы [Текст] / Д. А. Зайнагабдинов, Май Дык Минь // Наукоедение : интернет-журнал, 2013. – №3. – Режим доступа <http://naukovedenie.ru/PDF/25tvn313.pdf>. – 18.04.2014.
29. **Безродный К. П.** Геотехнический мониторинг при строительстве Северо-Муйского тоннеля [Текст] / К. П. Безродный, А. С. Никулин, В. Г. Трунев // Тоннельное строительство России и стран СНГ в начале века : тр. Междунар. практ. конф. – М. : [б.н.], 2002. – С. 436–439.
30. **Безродный К. П.** Автоматизированная система управления технологическими процессами (АСУ ТП) в железнодорожных тоннелях Олимпийской трассы [Текст] / К. П. Безродный, И. В. Кульгин, М. О. Лебедев // Наука и транспорт – 2009. – № 1. – С. 24–26.
31. **Фролов Ю.С.** Обеспечение эксплуатационной надежности железнодорожного тоннеля при проходке над ним автотранспортных тоннелей на трассе дублера Курортного проспекта в Сочи [Текст] / Ю.С. Фролов // Промышленное и гражданское строительство: сб. научн. тр. ПГУПС. - № 6, 2012.-С. 17-19.

**Рецензент:** Заместитель Председателя Поволжского отделения Российской академии транспорта, академик РАТ, доктор технических наук, профессор Овчинников Игорь Георгиевич.

**Damir Zainagabdinov**  
Irkutsk State Transport University  
Russia Irkutsk  
[damirmt@mail.ru](mailto:damirmt@mail.ru)

**Natalia Bykova**  
Irkutsk State Transport University  
Russia Irkutsk  
[bikovann@mail.ru](mailto:bikovann@mail.ru)

## Transport tunnels and mountain massifs geodynamics

**Abstract.** The article deals with transport tunnels projecting in the presence of active geodynamics in impure mountain massifs broken into blocks by fault zones. The relevance of the problem is caused by damages of tunnels lining growth, exploited at the conjuncture of project prerequisites. The problem consists in the insufficient account with features of linings in impure mountain massifs. It is carried out the bibliographic analysis of geodynamics form emergence. It is noted that the most actual for transport tunnels is account of seismic influence and tectonic fault activity. There are given examples of territorial surface and mountain blocks shifts, registered by instrumental methods. It is revealed by numerical modeling of mountain crossing point with Severo-Muyiskiy tunnel using projecting data and accelerogram on earthquake at 5.5 point, that there is a shift up to 2.5 MPa on the borders of mountain blocks which is dangerous for concrete constructions. It is shown that frequent iteration of seismic earthquake even small and average intensity is dangerous by accumulation of geodeformational influences on tunnels at active geodynamics territories. The purposes and tasks of automatic monitoring systems are built as the control basis of project conditions observance during the warranty period and further exploitation of a construction. Under the control of external parameters of external load and pressures, the attention is paid on the importance of observations over mountain blocks shift by geodesic systems and of control tense deformational condition of linings in fault zones in compliance with geological section. The automatic system of monitoring railway tunnels has to include operational, analytical contour and train dispatching unit. The operational contour is carrying out data collection about external influences parameters and tunnels lining reaction on it. Analytical contour includes mathematical modeling unit of construction work project control decisions, the formation of constructive – technological decisions and technical safety estimate. The train dispatching unit appoints the movement mode of trains depending on danger criteria formed by operational and analytical contours and geodynamics on technical safety estimate of construction.

**Keywords:** transport tunnels; active geodynamics; geodeformational influences; monitoring systems.



## REFERENCES

1. Bykova N. M. Transportnyie sooruzheniya na aktivnyih geostrukturah. Tehnologii sistemnogo podhoda [Tekst] / N. M. Bykova. – Novosibirsk : Nauka, 2008. – 212 s.
2. Florensov N. A. Tektonika – veduschiy faktor relefoobrazovaniya [Tekst] / N. A. Florensov // Problemy endogennoye relefoobrazovaniya. – M. : Nauka, 1976. – S. 79–82.
3. Mescheryakov Yu. A. Relief i sovremennaya geodinamika [Tekst] / Yu. A. Mescheryakov. – M. : Nauka, 1981. – 277 s.
4. Nikolaev N. I. Noveyshaya tektonika i geodinamika litosfery [Tekst] / N. I. Nikolaev. – M. : Nedra, 1988. – 491 s.
5. Logachev N. A. Geodinamicheskie rezhimy i faktory geodinamicheskoy aktivnosti litosfery [Tekst] / N. A. Logachev, S. I. Sherman, K. G. Levi // Geodinamika vnutrikontinentalnyih gornyyih oblastey : sb. nauch. tr. – Novosibirsk: Nauka, 1990. – S. 299–307.
6. Solonenko V. P. Geologiya i seysmichnost zonyi BAM. Seysmogeologiya i seysmicheskoe rayonirovanie [Tekst] / V. P. Solonenko, V. V. Nikolaev, R. M. Semenov. – Novosibirsk : Nauka, 1985. – 190 s.
7. Sherman S. I. Geologiya i seysmichnost BAM. Neotektonika / S. I. Sherman, K. G. Levi, V. V. Ruzhich [i dr.]. – Novosibirsk : Nauka, 1984. – 207 s.
8. Sovremennyye dvizheniya zemnoy koryi. Morfostrukturyi, razlomyi, seysmichnost [Tekst] / otv. red. Yu. D. Bulanzhe. – M. : Nauka, 1987. – 188 s.
9. Dedeev V. A. Geneticheskie tipy tektonicheskikh dvizheniy [Tekst] / V. A. Dedeev, P. K. Kulikov. – Syktyivkar, 1985. – 51 s.
10. Kropotkin P. I. Tektonicheskie napryazheniya v zemnoy kore [Tekst] / P. I. Kropotkin // Geotektonika. – 1996. – # 2. – S. 3–15.
11. Pavlov O. V. Geologiya i seysmichnost zonyi BAM. Inzhenernaya geologiya i inzhenernaya seysmologiya [Tekst] / O. V. Pavlov, V. I. Dzhurik, A. F. Drenov [i dr.]. – Novosibirsk : Nauka, 1985. – 192 s.
12. Ruzhich V. V. Tektonicheskiy krip v zonah seysmoaktivnyih razlomov Pribaykalya i Mongolii. Litosfera tsentralnoy Azii [Tekst] / V. V. Ruzhich. – Novosibirsk : Nauka, 1996. – S. 183–185.
13. Ufimtsev G. F. Morfotektonika Baykalskoy riftovoy zonyi [Tekst] / G. F. Ufimtsev. – Novosibirsk : Nauka, 1992. – 215 s.
14. Levi K. G. Active faults of the Baikal depression [Text] / K. G. Levi, A. I. Miroshnichenko, V. A. San'kov [and others] // Elf Exploration Production, F-64018. – 1997. – P. 400–434.
15. Kirkinskiy V. A. Mehanizm i tsiklichnost globalnogo tektogeneza [Tekst] / V. A. Kirkinskiy. – Novosibirsk : Nauka, 1987. – 72 s.
16. Kolmogorov V. G. Otsenka sovremennoy kinematiki razlomov Sibiri po geodezicheskim dannym [Tekst] / V. G. Kolmogorov // Metodika i rezultaty izucheniya prostranstvenno-vremennyih variatsiy geofizicheskikh poley. – Novosibirsk : OIGGM SO RAN, 1992. – S. 159–172.
17. Hudnut K. W. Behavior of the Superstition Hills Fault During the Past 330 Years / K. W. Hudnut, K. E. Sie // Bulletin of the Seismological Society of America, 1989. – Vol. 79, no. 2. – P. 304–329.



18. Sylvester A. G. Near-Field Tectonic Geodesy / A. G. Sylvester // Studies in Geophysics. Active Tectonics. National Academy Press. – Washington, 1986. – [Electronic resource]. URL :[http://www.nap.edu/openbook.php?record\\_id=624&page=165](http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=624&page=165). 19.04.2014.
19. Bykova N. M. Geodinamika i rabota protyazhennykh transportnykh sooruzheniy [Tekst] / N. M. Bykova // Seysmostoykoe stroitelstvo. – 2004. – # 4. – S. 17–22.
20. Revzon A. L. Priroda i sooruzheniya v kriticheskikh situatsiyah [Tekst] / A. L. Revzon, A. P. Kamyishev. – M. : Triada, 2001. – 207 s.
21. Tveritinova T. Yu. Wave Tectonics of the Earth [Text] / T. Yu. Tveritinova // Geodynamics & Tectonophysics, 2010. – V. 1, № 3. – P. 297–312.
22. Kuzmin Yu. O. Sovremennyye superintensivnyye deformatsii zemnoy poverhnosti v zonah platformennykh razlomov [Tekst] / Yu. O. Kuzmin // Geologicheskoe izucheniye i ispolzovanie nedr : inform. sb. – M., 1996. – Ch. 4. – S. 43–53.
23. Bykova N. M. Severo-Muyskiy tonnel: iz XX v XXI vek [Tekst] / N. M. Bykova, S. I. Sherman. – Novosibirsk : Nauka, 2007. – 186 s.
24. Sankov V. A. Razlomy i seysmichnost Severo-Muyskogo geodinamicheskogo poligona [Tekst] / V. A. Sankov, Yu. I. Dneprovskiy, S. N. Kovalenko [i dr.]. – Novosibirsk : Nauka. Sib. otd-nie, 1991. – 111 s.
25. Solonenko A. V. Energeticheskaya klassifikatsiya zemletryaseniy / A. V. Solonenko, V. M. Kochetkov // Seysmicheskoye rayonirovaniye Vostochnoy Sibiri i ego geologo-geofizicheskiye osnovy. – Novosibirsk : Nauka, 1977. – S. 79–91.
26. Zaynagabdinov D.A. Izmereniya deformatsiy v stenah obdelki i putevom betone Severo-Muyskogo tonnelya s ispolzovaniem fotouprugikh datchikov [Tekst] / N. M. Bykova, A. S. Isaykin, A. N. Morgunov, D. A. Zaynagabdinov // Sovremennyye tehnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye. – 2007. – # 1 (13). – S. 69–74.
27. Zaynagabdinov D.A. Otsenka soprotivleniya chugunnykh obdelok zheleznodorozhnykh tonnelnykh geodeformatsionnyim vozdeystviyam //Transportnoye stroitelstvo. - # 10, - 2014. – S. 10-13.
28. Zaynagabdinov D. A. Modeli dlya rascheta tonnelnykh, peresekayuschikh aktivnyye razlomy [Tekst] / D. A. Zaynagabdinov, May Dyik Min // Naukovedeniye : internet-zhurnal, 2013. – #3. – Rezhim dostupa <http://naukovedenie.ru/PDF/25tvn313.pdf>. – 18.04.2014.
29. Bezrodnyiy K. P. Geotekhnicheskyy monitoring pri stroitelstve Severo-Muyskogo tonnelya [Tekst] / K. P. Bezrodnyiy, A. S. Nikulin, V. G. Trunev // Tunnelnoye stroitelstvo Rossii i stran SNG v nachale veka : tr. Mezhdunar. prakt. konf. – M. : [b.n.], 2002. – S. 436–439.
30. Bezrodnyiy K. P. Avtomatizirovannaya sistema upravleniya tehnologicheskimi protsessami (ASU TP) v zheleznodorozhnykh tonnelnykh Olimpiyskoy trassy [Tekst] / K. P. Bezrodnyiy, I. V. Kulgin, M. O. Lebedev // Nauka i transport – 2009. – # 1. – S. 24–26.
31. Frolov Yu.S. Obespecheniye ekspluatatsionnoy nadezhnosti zheleznodorozhnogo tonnelya pri prohodke nad nim avtotransportnykh tonnelnykh na trasse dublera Kurortnogo prospekta v Sochi [Tekst] / Yu.S. Frolov //Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo: sb.nauchn.tr. PGUPS. - # 6, 2012.-S. 17-19.