

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2021, №1, Том 8 / 2021, N 1, Vol. 8 <https://t-s.today/issue-1-2021.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/01SATS121.pdf>

DOI: 10.15862/01SATS121 (<http://dx.doi.org/10.15862/01SATS121>)

## Анализ работы бетонных обделок горных железнодорожных тоннелей в геодинамически активных районах

Баранов Т.М., Зайнагабдинов Д.А., Быкова Н.М.

ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», Иркутск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Баранов Тимофей Михайлович, e-mail: Baranov-87@yandex.ru

**Аннотация.** В статье рассматривается напряженно-деформированное состояние бетонных обделок железнодорожного тоннеля, расположенного в геодинамически активном горном районе. Целью исследования является оценка влияния внешних факторов, таких как гравитационные и сейсмические воздействия, на деформации и трещинообразование бетонных обделок. Анализ работы обделок выполнен на примере участка Северомуйского железнодорожного тоннеля. Тоннель расположен в различных грунтовых условиях и имеет разнообразные несущие конструкции, анализ работы проведен для участка, находящегося в слаботрещиноватых гранитных породах.

Для назначения уровня сейсмических воздействий был рассчитан сейсмический режим близлежащей к тоннелю территории на основании исторических данных и сейсмического мониторинга местности. Установлено, что появление землетрясений силой 7–8 баллов по шкале MSK-64 в среднем ожидается каждые 10 лет, уровень проектного землетрясения с периодом повторяемости 1 раз за 50 лет соответствует интенсивности 8,7 баллов.

Расчет напряженно-деформированного состояния тоннельных конструкций выполнен методом конечных элементов в программе GTS NX. При анализе учтены конструктивные особенности

основного тоннеля, дренажно-транспортной штольни и сбойки. Расчеты выполнены в линейно-упругой постановке для бетонных конструкций основного тоннеля, сбойки и чугунных конструкций штольни. Грунтовый массив смоделирован материалами по критерию прочности Хоука-Брауна (Hoek E.; Brown E.T.).

Установлено, что при изотропном строении вмещающего скального горного массива тоннельные конструкции хорошо сопротивляются разрушительному воздействию сильных землетрясений. Трещинообразование в бетонных обделках возникает только в случае сильного землетрясения проектного уровня. В то же время наличие различных ниш, сбоек и другой сложной геометрии несущих конструкций ведет к появлению концентраций напряжений и, как следствие, трещин в бетоне при более низких сейсмических воздействиях. Картины распределения трещин согласуются с данными натуральных обследований.

**Ключевые слова:** Северомуйский железнодорожный тоннель; активная геодинамика; сейсмический режим; проектное землетрясение; трещинообразование; обделки тоннелей; монолитный бетон; конечно-элементное моделирование

## Concrete lining work analysis of mountain railway tunnels in geodynamical active regions

Timofey M. Baranov, Damir A. Zainagabdinov, Natalya M. Bikova

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

**Corresponding author:** Timofey M. Baranov, e-mail: Baranov-87@yandex.ru

**Abstract.** Concrete lining work analysis of mountain railway tunnels in geodynamical active regions.

Railway tunnel concrete lining stress-strain state located in a geodynamical active mountainous region were discussed in this article. The study aims to assess the external factors influence, such as gravitational and seismic effects, on concrete lining deformation and cracking. The concrete lining work analysis was performed on the Severomuisk railway tunnel section example. The tunnel is located in different soil conditions and has a variety of supporting structures; the work analysis was performed for a site located in weakly fractured granite rocks.

To assign the seismic impact level, the adjacent to the tunnel area seismic setting was calculated based on historical data and the area seismic monitoring. It has been established that the occurrence of earthquakes with a magnitude of 7–8 on the MSK-64 scale is expected every 10 years on average, the obe level with a recurrence period of 1 time in 50 years corresponds to an 8.7 points intensity.

The tunnel structures' stress-strain state calculation was performed by the finite element method in the GTS NX

program. The analysis takes into account the main tunnel design features, drainage and transport adits, and cross slit. The calculations were performed in a linear-elastic formulation for the main tunnel concrete structures, the cross slit, and the adit's cast-iron structures. The soil mass is modeled by materials according to the Hawke-Brown strength criterion (Hoek E.; Brown E.T.).

It has been established that with an isotropic structure of the enclosing rock mass, tunnel structures resist well the destructive strong earthquakes impact. Crack formation in concrete lining only occurs in the event of a strong design-basis earthquake. At the same time, the various niches presence, cross slit, and other load-carrying structure complex geometry leads to the stress concentrations appearance and, as a consequence, cracks in concrete at lower seismic effects. Crack distribution patterns are consistent with field survey data.

**Keywords:** Severomuisky railway tunnel; active geodynamics; seismic setting; design-basis earthquake; cracks formation; tunnel lining; cast concrete; finite-element modeling

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



## Введение

### Introduction

Сложные геодинамические условия Байкальской рифтовой зоны оказывают влияния на все инженерные объекты инфраструктуры железнодорожных магистралей. Наиболее подвержены геодинамическим воздействиям тоннели, как сооружения, непосредственно контактирующие с активными геологическими структурами. Геодинамические воздействия проявляются в виде криповой скрытой активности разломной тектоники и более известной сейсмической геодинамики.

Учет сейсмических нагрузок в нормативных документах<sup>1, 2</sup> предусматривает оценку работы конструкций с точки зрения наступления предельных состояний первой группы. Причем система нормативной документации предусматривает проектирование сооружений по двум уровням сейсмических воздействий: проектное и максимальное расчетное землетрясение в зависимости от степени сейсмического риска [1].

Использование на современном этапе программно-вычислительных комплексов на базе метода конечных элементов позволяет получать более полное определение компонентов напряженно-деформированного состояния при сейсмических воздействиях и осуществление контроля наступления не только первой, но и второй группы предельных состояний. В таком случае становится возможной оценка влияния инженерно-геологического строения на трещиностойкость бетонных и железобетонных конструкций при сейсмических воздействиях.

В настоящей статье описывается характер работы горного тоннеля на статические и сейсмические нагрузки и обосновывается целесообразность проведения расчетов, связанных с трещиностойкостью бетонных и железобетонных обделок.

## Сейсмичность района Северомуйского железнодорожного тоннеля

### Severomuisk railway tunnel area seismicity

Основные повреждения несущих конструкций обделок эксплуатируемых железнодорожных тоннелей БАМ связывают, как правило, с внешними гидрогеологическими и геодинамическими

---

<sup>1</sup> СП 14.13330.2018 Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81\* (с Изменением N 1).

<sup>2</sup> СП 268.1325800.2016. Транспортные сооружения в сейсмических районах. Правила проектирования. Введ. 17.06.2017. М.: Стандартинформ, 2017.

факторами, особенно, при пересечении неоднородных горных структур, тектонических разломов.

Современные научные взгляды на степень развития повреждений в обделках горных тоннелей выделили основные закономерности появления остаточных деформаций в тоннелях [2; 3]:

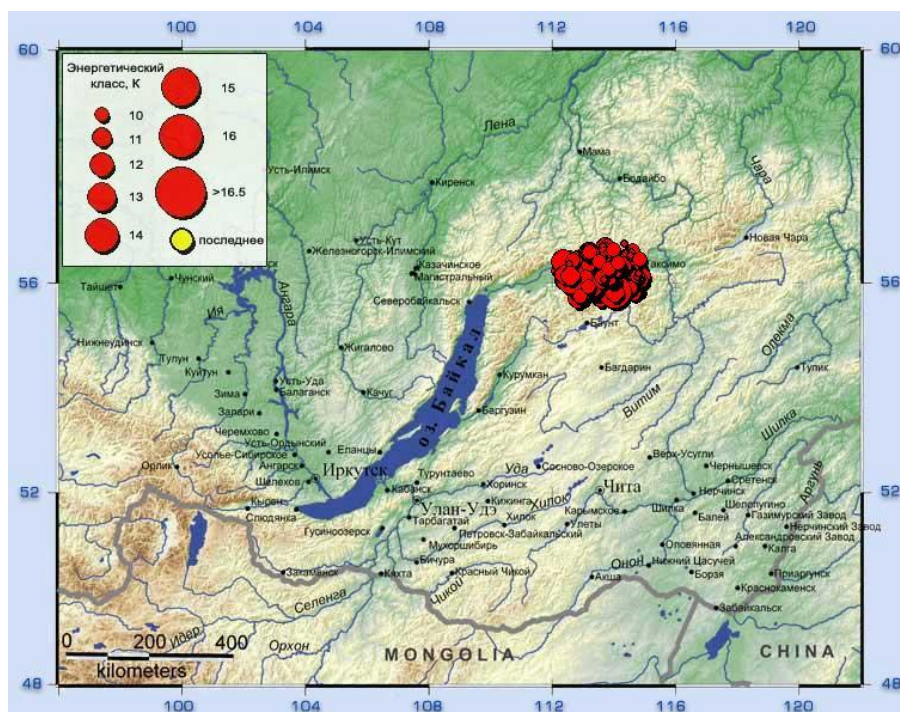
- *степень устойчивости тоннельных обделок при прочих равных условиях пропорциональна крепости грунтов;*
- *случаи обрушения обделок лишь в отдельных местах на ограниченных площадях указывают на то, что существенное увеличение горного давления, обусловливаемое землетрясением, в значительной степени связано с местными нарушениями в массиве грунта;*
- *при пересечении трассой тоннеля тектонических разломов возможно смещение смежных участков обделки (независимо от типа ее конструкции) на расстояние до нескольких десятков сантиметров от первоначальной оси тоннеля в поперечном к оси трассы направлении;*
- *большое влияние на работу подземных конструкций при землетрясениях оказывают свойства вмещающего грунтового массива.*

Одним из показательных сооружений с точки зрения работы в сложных геодинамических условиях является Северомуйский железнодорожный тоннель [4]. Тоннель длиной 15,3 км строился в течение 26 лет и был сдан в эксплуатацию в декабре 2003 года. Подземное сооружение пересекает горную перемычку между Верхнеангарской и Муяканской активно развивающимися рифтовыми впадинами.

Северомуйский тоннель (СМТ) в основном расположен в крепких гранитных породах с коэффициентом крепости по Протоdjяконову до X, расположенных блоками, и пересекает три значительных тектонических нарушения: Ангараканскую депрессию, III-ю и IV-ю тектоническую зону.

По данным Байкальского филиала геофизической службы за 1994–2020 гг. на участке радиусом 100 км, центром которого является п. Северомуйск, произошло 1449 сейсмических событий с энергетическим классом  $K$  более 8 (рис. 1). В таблице 1 приведены статистические данные силы землетрясений и периодов их повторяемости. Расчетные баллы по шкале MSK-64 в эпицентрах землетрясений определены по формуле [5]:

$$I_0 = 0,74K - 2,8 \quad (1)$$



*Рисунок 1. Карта эпицентров землетрясений 01.01.1994–01.10.2020 в 100-километровой зоне СМТ (по данным Байкальского филиала геофизической службы РАН, <http://seis-bykl.ru>)*

*Figure 1. Earthquakes epicentrum map from 01.01.1994–01.10.2020 in the Severomuisk tunnel 100-km zone (according to the Baykal Regional Seismological Centre data, Russian Academy of Sciences, <http://seis-bykl.ru>)*

Вычислен десятичный логарифм среднего периода повторяемости за 26 лет, и построен график сейсмического режима местности (рис. 2) по методическим рекомендациям по сейсмическому микрорайонированию<sup>3</sup>.

Сильные сейсмические события, эпицентры которых потенциально выходят за 100-километровую зону от места расположения тоннеля, т. е. имеющие транзитный характер, могут превышать интенсивность 10 баллов. Такие исследования проводились многими учеными [6; 7] и вошли в назначения расчетной сейсмичности в картах ОСР-2016<sup>4</sup>. По исследованиям Института Земной Кору СО РАН на территории Верхнеангарско-Муйской горной перемычки исторически происходили землетрясения до 11 баллов по шкале MSK-64 [8]. При периоде повторяемости землетрясения в 1000 лет для назначения сейсмического режима местности расчетная интенсивность землетрясений принята равной 10 баллов.

<sup>3</sup> МДС 22-1.2004 Методические рекомендации по сейсмическому микрорайонированию участков строительства транспортных сооружений / сост. Г.С. Шестоперов.

<sup>4</sup> Карта ОСР-2016.

**Таблица 1 / Table 1**  
**Статистические данные землетрясений в районе СМТ за период 1994–2020 гг.**  
**Earthquakes statistical data in the Severomuisk tunnel area for the period 1994–2020**

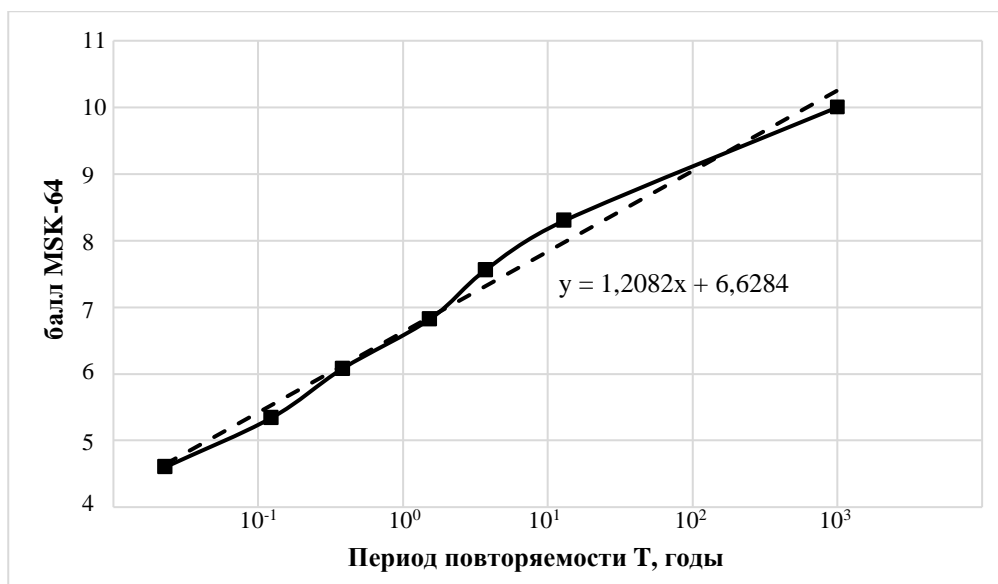
Энергетический класс, К Energy class, K	≤ 10	11	12	13	14	≥ 15
Расчетный балл в эпицентре, I <sub>0</sub> The estimated intensity at the epicenter, I <sub>0</sub>	4,6	5,3	6,1	6,8	7,6	8,3
Количество землетрясений Earthquakes numbers	1144	211	68	17	7	2

Составлена авторами по данным Байкальского филиала геофизической службы РАН, <http://seis-bykl.ru>

Compiled by the authors according to the Baykal Regional Seismological Centre data, Russian Academy of Sciences, <http://seis-bykl.ru>

Можно предположить, что согласно графику сейсмического режима:

1. землетрясения интенсивностью до 6 баллов могут происходить десятками событий в год, что опасно для неоднородных раздробленных горных массивов;
2. землетрясения силой 6–7 баллов – один раз в 1–2 года;
3. землетрясения силой 7–8 баллов – один раз в 2–15 лет;
4. землетрясения силой 8–9 баллов – один раз в 15–100 лет;
5. землетрясения силой свыше 9 баллов – один раз в 5–10 столетий.



**Рисунок 2.** Сейсмический режим местности СМТ и его линейная аппроксимация (рисунок авторов)

**Figure 2.** Severomuisk tunnel area seismic setting and linear approximation (illustration made by the authors)

Фактически за период строительства и эксплуатации известны два сильных землетрясения: 4 января 1989 года 8 баллов и 23 мая 2014 г. – 7 баллов. В то же время, в районе Северомуйского тоннеля произошло два

роя землетрясений: Ангараканский в 1979 г и Муяканский в 2014–2015 гг., характеризующиеся большим количеством сейсмических событий низкой и средней интенсивности от 2 до 6 баллов в течение коротких промежутков времени [9; 10].

В зоне расположения тоннеля наблюдается активность разломной тектоники – в виде смещений границ горных блоков, выбросов агрессивных подземных вод и газов, температурных перепадов. Активная геодинамика дополнительно регистрируются в виде статических подвижек горных блоков. Величины геодеформационных воздействий оцениваются «Системой мониторинга геодинамической безопасности Северомуйского тоннеля», установленной в 2016 году на опытном участке [11].

В связи с достаточно подробными сейсмологическими данными можно установить расчетные уровни сейсмических воздействий на тоннель. Уровень проектного землетрясения (ПЗ) с периодом повторяемости 1 раз за 50 лет устанавливается в 8,7 баллов, что согласно нормам проектирования транспортных сооружений<sup>5</sup> соответствует расчетному ускорению  $3,2 \text{ м/с}^2$ .

Рядовое сейсмическое событие для тоннеля, повторяющееся в среднем 1 раз за 10 лет, имеет более низкий уровень воздействия, соответствующий 7,8 балла или уровню ускорений  $1,7 \text{ м/с}^2$ . Данные регулярно повторяющихся сейсмических событий могут вызывать накопление повреждений в конструкциях обделок в виде сейсмогенного трещинообразования.

Уровень максимального расчетного землетрясения (МРЗ) может быть установлен в зависимости от степени сейсмического риска с периодом повторяемости 200–2000 лет. Как правило, при наличии подробных сейсмологических данных для оценки прочности конструкций за основное воздействие принимается проектное землетрясение (ПЗ).

## Анализ работы тоннеля на горное давление

### Tunnel operation analysis for rock pressure

Внутреннее очертание обделок основного тоннеля соответствует габариту приближения строений «С» для пропуска железнодорожного подвижного состава. Транспортная часть тоннеля преимущественно состоит из подковообразных бетонных и железобетонных обделок (рис. 3) разной толщины и армирования.

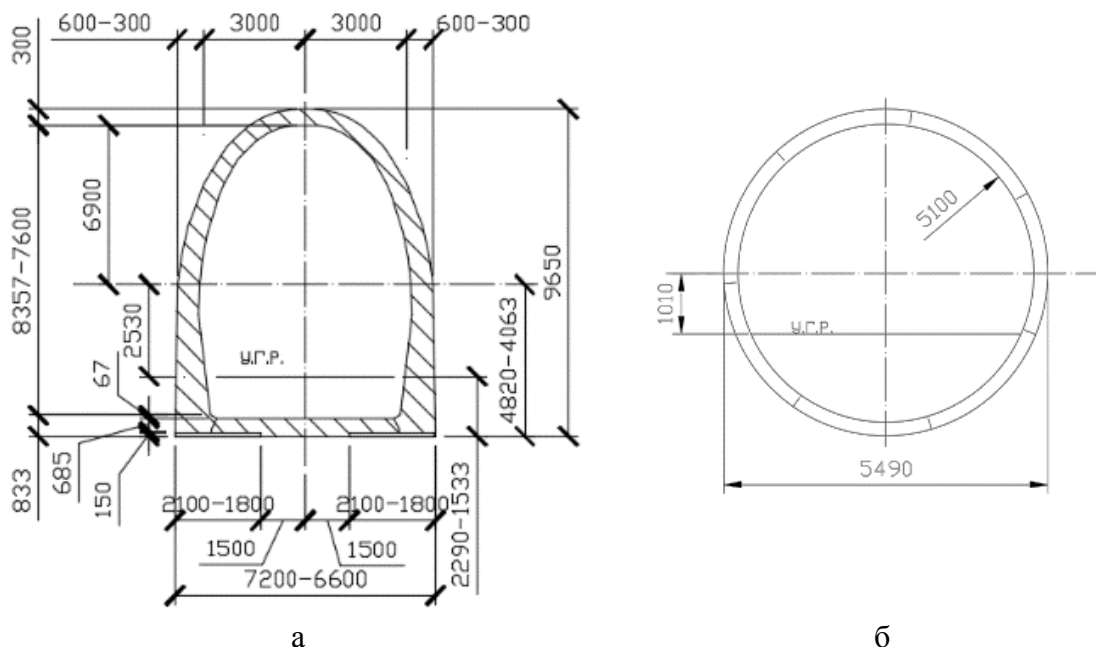
Сечения обделок тоннеля изменяются в зависимости от крепости пород, уровня горного и гидростатического давления на участке

---

<sup>5</sup> СП 268.1325800.2016. Транспортные сооружения в сейсмических районах. Правила проектирования. Введ. 17.06.2017. М.: Стандартинформ, 2017.

использования. Как правило, бетонные обделки расположены в устойчивых слаботрещиноватых гранитах. Качество контакта «порода-обделка» по стенкам тоннеля транспортной зоны, определенное по результатам обследования авторами в 2019 году, хорошее. Различается состояние самих обделок, от удовлетворительного состояния без трещин, до наличия вертикальных, продольных и наклонных трещин. Железобетонные обделки применены, как правило, в трещиноватых породах. Как показали результаты бурения и геофизическое обследование, состояние сцепления обделок с черновой крепью и черновой крепи с горными породами хорошее. Это учтено при моделировании работы обделок.

Дренажно-транспортная штольня (ДТШ) длиной 15 км расположена на расстоянии 15–21 м от транспортного тоннеля и связана с ним с помощью сбоек. ДТШ предназначена для понижения и отведения воды из транспортной зоны Северомуйского тоннеля, а также перевозки служебного персонала, материалов, конструкций и оборудования по узкой колее специализированным тоннельным железнодорожным транспортом. На рассматриваемом участке обделка штольни кругового очертания из чугунных тубингов диаметром 5,49 м (рис. 3б).



**Рисунок 3.** Сечение тоннеля транспортной зоны (а) и штольни (б), находящееся в слаботрещиноватых гранитах (рисунки авторов)

**Figure 3.** Tunnel section of the transport zone (a) and adits (b), located in weakly fractured granites (illustrations made by the authors)

Определение степени сейсмического влияния на трещинообразование в бетонных и железобетонных обделках возможно благодаря современным программным комплексам конечно-элементного моделирования, таким как Midas GTS NX. Анализ напряженно-деформированного состояния железобетонной обделки тоннеля рассмотрен на примере ПК 33+00–



ПК 33+50 восточного участка Северомуйского тоннеля. Численная модель представлена участком транспортного тоннеля с нишей, камерой и сбойкой перехода в дренажно-транспортную штольню, включая саму штольню, а также вмещающим массивом грунта (рис. 4).

Подковообразный в сечении тоннель транспортной зоны, ниши и камеры, а также сбойки между транспортным тоннелем и дренажно-транспортной штольней сооружены в монолитном исполнении. Прочностные характеристики монолитного бетона обделок соответствуют проектным значениям бетона наиболее низкого по замерам класса по прочности В27,5. Расчетные сопротивления бетона приняты равными  $R_b = 14,3$  МПа,  $R_{bt} = 1,05$  МПа. Удельный вес  $\gamma = 24,5$  кН/м<sup>3</sup>, модуль упругости  $E = 31,5$  ГПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,2$ . Математическая модель деформирования конструкций в расчете на начальном этапе принята в линейно-упругой постановке задачи.

Дренажно-транспортная штольня сооружена из чугунных тубингов. Материалы чугунных конструкций соответствуют характеристикам серого чугуна СЧ-21-40. Удельный вес  $\gamma = 72$  кН/м<sup>3</sup>, модуль упругости  $E = 98$  ГПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ . Расчетное сопротивление чугуна сжатию и изгибу принято равным  $R_c = 200$  МПа. Работа обделок учтена в соответствии с требованиями СП 122.13330.2012<sup>6</sup>.

Грунтовый массив смоделирован применительно к гранитным среднетрещиноватым горным породам расчетными моделями Хоука-Брауна, близлежащий к тоннелю грунт смоделирован с небольшой степенью разуплотнения, характерной для горного способа проходки. Преимущество модели скальных грунтов Хоука-Брауна заключается в возможности определять характеристики скального массива, учитывая степень его нарушенности и трещиноватости [12; 13].

По критерию прочности Хоука-Брауна характеристики грунтового массива определяются в исходном состоянии горного массива, а также при его нарушении и разгрузке, возникающей при проходке тоннеля. Так, модуль деформации вмещающего грунтового массива в исходном состоянии определяется по формуле<sup>7</sup>:

$$E_m = 10^{\frac{GSI-10}{40}} \sqrt{R_c/100}, \quad (2)$$

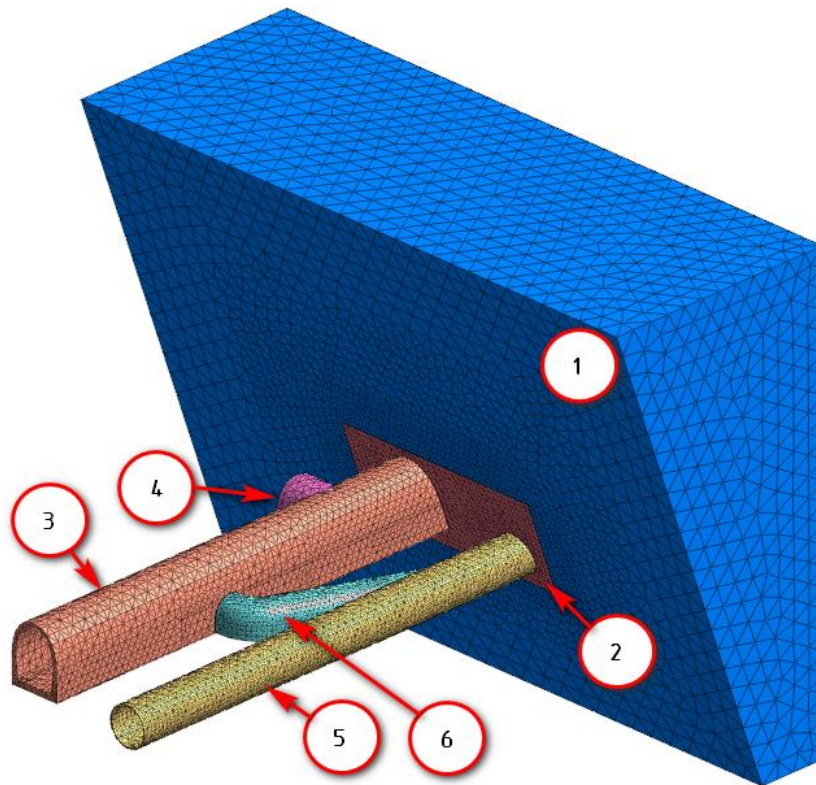
<sup>6</sup> СП 122.13330.2012 «СНиП 32-04-97» Актуализированная редакция. «Тоннели железнодорожные и автодорожные» с утвержденным изменением №1.

<sup>7</sup> Evert Hoek. Practical Rock Engineering [эл. ресурс. Доступ: <https://www.roscience.com/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf> – 10.11.2020].

где  $R_c$  – предел прочности породы, связанный с коэффициентом крепости по Протоджяконову  $f$  соотношением  $f = 0,1R_c$  МПа;

$GSI$  – геологический индекс прочности, определяемый по соотношениям блочной структуры скального массива и характеристики поверхностей трещин этого массива.

Модуль деформации породы принят равным 6 ГПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,35$ , удельный вес  $\gamma = 25,5$  кН/м<sup>3</sup>. Также применены следующие параметры модели: степень нарушенности скального массива  $s$  и степень сцепления минеральных частиц между собой  $m$  меняется от  $s_i = 0,0022$  и  $m_i = 33$  для ненарушенной породы до  $s_r = 0,00065$  и  $m_r = 1,42$  для нарушенного проходкой тоннеля массива. Значения получены по исходным данным близких по структуре горных пород, приведенных в [12]. Нарушенная проходкой область вокруг обделок задана условно прямоугольной областью и отмечена на рис. 4.



1 – вмещающий грунтовый массив в исходном состоянии; 2 – нарушенный грунтовый массив; 3 – тоннель транспортной зоны; 4 – ниша контактной электросети; 5 – дренажно-транспортная штольня; 6 – сбойка

1 – enclosing soil mass in its initial state; 2 – disturbed soil mass; 3 – transport zone tunnel; 4 – overhead contact network niche; 5 – drainage transport adit; 6 – cross slit

**Рисунок 4.** Общий вид конечно-элементной модели участка тоннеля (рисунок авторов)

**Figure 4.** General view of the tunnel section finite element model (illustration made by the authors)

Поверхность контакта обделки с породой хорошая, принято допущение о полной передаче деформаций с окружающего грунта на обделку. Отмечается, что применение интерфейсных элементов для решения контактной задачи при динамических воздействиях потребует либо значительных расчетных мощностей, либо упрощения исходной модели.

Смоделированный участок тоннеля имеет размеры 50x50x70 метров. Всего в модели 400 000 конечных элементов объемного НДС. Учтены демпфирующие свойства грунтов, исключено отражение сейсмических волн от границ модели при помощи специальных упруго-вязких элементов.

Проходка тоннеля велась в несколько этапов. Сначала сооружалась дренажно-транспортная (разведывательная) штольня, затем с отставанием 100–200 метров велась проходка основного тоннеля и сооружение сбоек. Для учета стадийности возведения и взаимного влияния конструкций тоннеля учтено три стадии возведения:

1. исходный массив грунта, деформации которого приняты за нулевые значения;
2. появление выработок штольни и сбойки и подкрепление их обделками;
3. появление выработки тоннеля транспортной зоны и подкрепление ее бетонной обделкой.

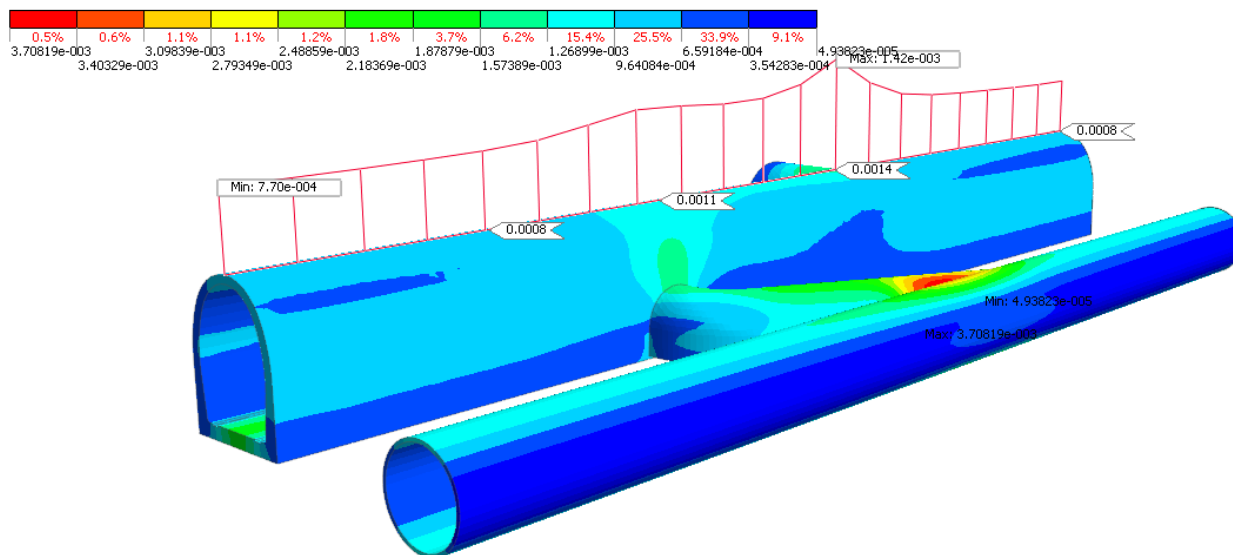
В качестве нагрузок принято гравитационное воздействие, гидростатическое давление для данного типа обделок не учитывалось. Технологические особенности передачи давления на черновой бетон и ползучесть бетона не учитывались, поскольку рассматривалась преимущественно работа обделки в период эксплуатации тоннеля. По результатам расчетов максимальные перемещения наблюдаются в зоне примыкания сбойки к штольне, так как образовавшееся пространство имеет достаточно большие размеры и малый подъем сводов.

Максимальное перемещение свода тоннеля транспортной зоны наблюдается в месте примыкания ниши для размещения устройств контактной сети (лейтера) и составляет 1,4 мм по вертикали (рис. 5).

Напряженное состояние обделок тоннеля и грунтового массива оценивается эквивалентными напряжениями, определяющимися по формуле Мизеса:

$$\sigma_3 = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}, \quad (3)$$

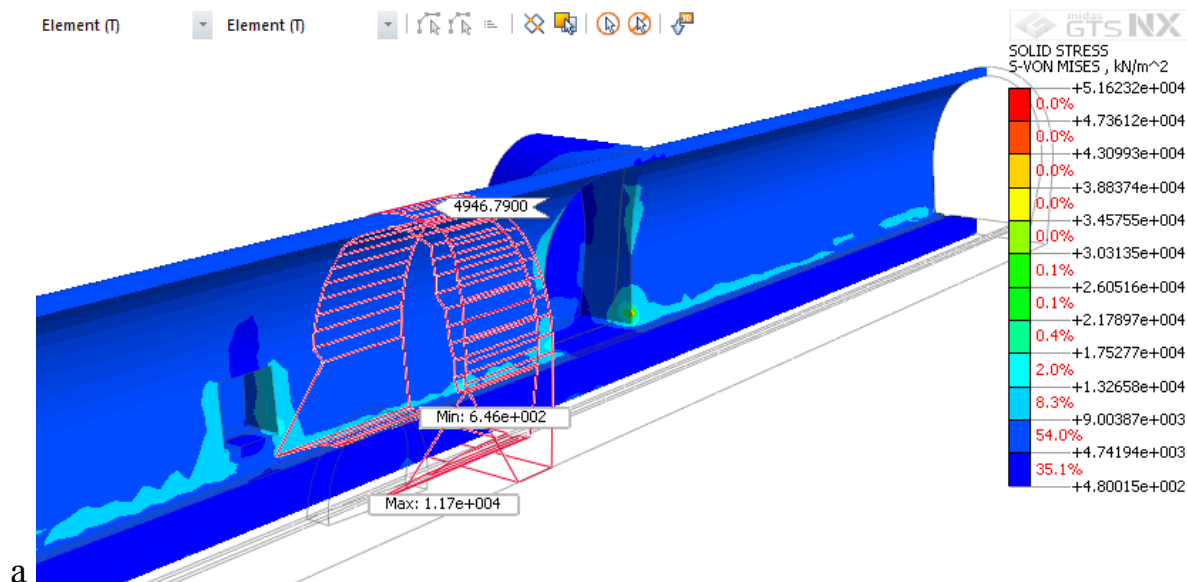
где  $\sigma_{1,2,3}$  – главные напряжения.

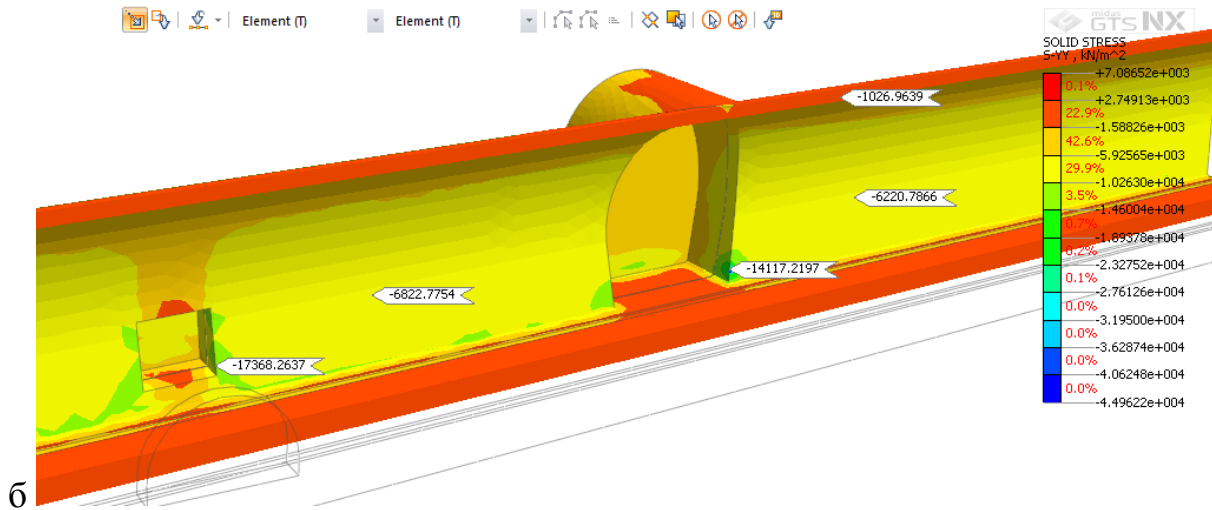


**Рисунок 5.** Суммарные перемещения обделки после возведения тоннеля (рисунок авторов)

**Figure 5.** The total lining displacement after the tunnel construction (illustration made by the authors)

На рис. 6а приведены эквивалентные напряжения по северной стенке тоннеля. По своду и стенкам тоннеля эквивалентное напряжение не превышает 6,5 МПа, напряжение в основном получено от действия вертикальной сжимающей компоненты. В местах концентрации напряжения растяжения достигают 7 МПа, что приводит к появлению трещин в угловых гранях ниш. Проведенное в 2019 году обследование обделок СМТ выявили характерные повреждения обделок в местах расположения ниш, проявляющиеся в виде вертикальных и наклонных трещин от граней длиной 1–2 м и раскрытием до 0,5 мм (рис. 7).

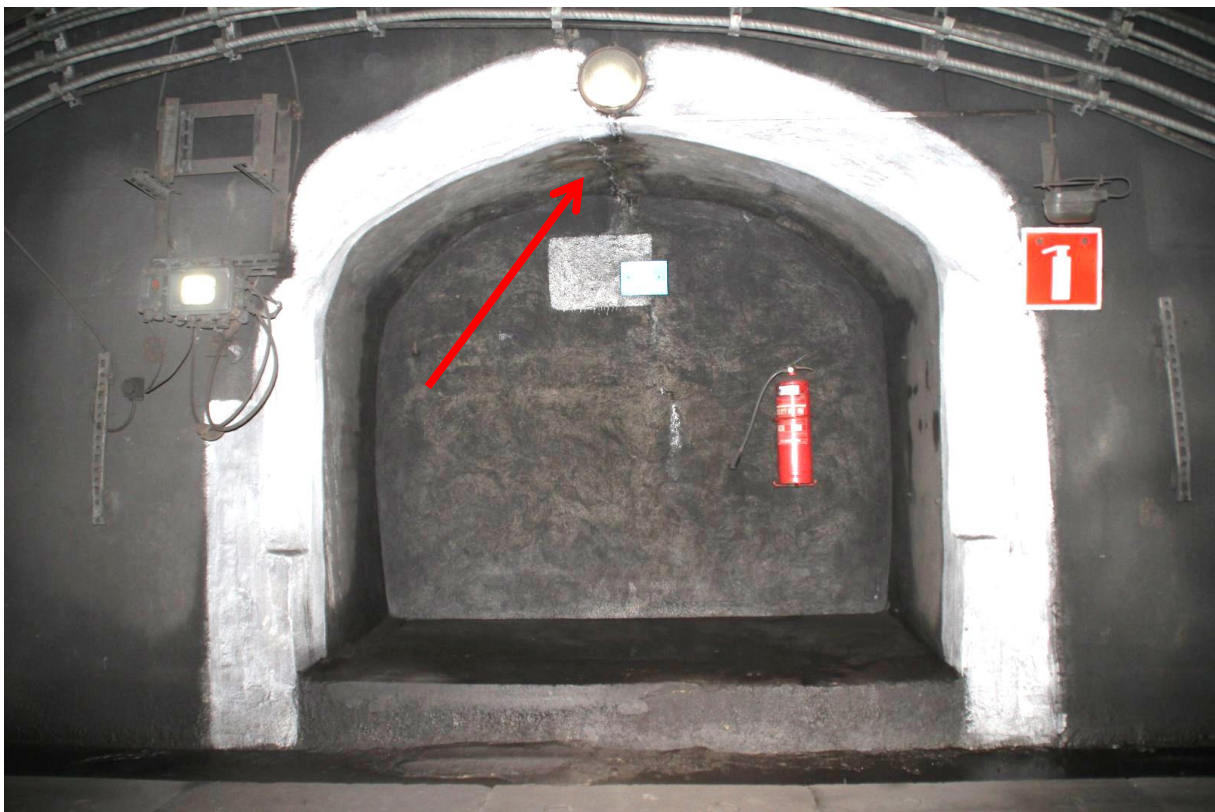




**Рисунок 6.** Распределение напряжений по северной стенке тоннеля:  
а – эквивалентные по Мизесу; б – нормальные вертикальные (рисунки авторов)

**Figure 6.** Pressure distribution along the tunnel's northern wall:  
a – von Mises equivalent; b – normal vertical (illustrations made by the authors)

Аналогичная картина наблюдается по южной стенке, где концентрации напряжений сосредоточены у проема сбойки. В этих местах также следует ожидать появления трещин в бетоне. Вертикальные нормальные напряжения по стенкам тоннеля сжимающие показаны на рис. 6б сжимающие, в основном составляют 6–7 МПа, в местах концентрации – до 17 МПа.





*Рисунок 7. Трещины в нишах тоннеля транспортной зоны (фотографии авторов)*

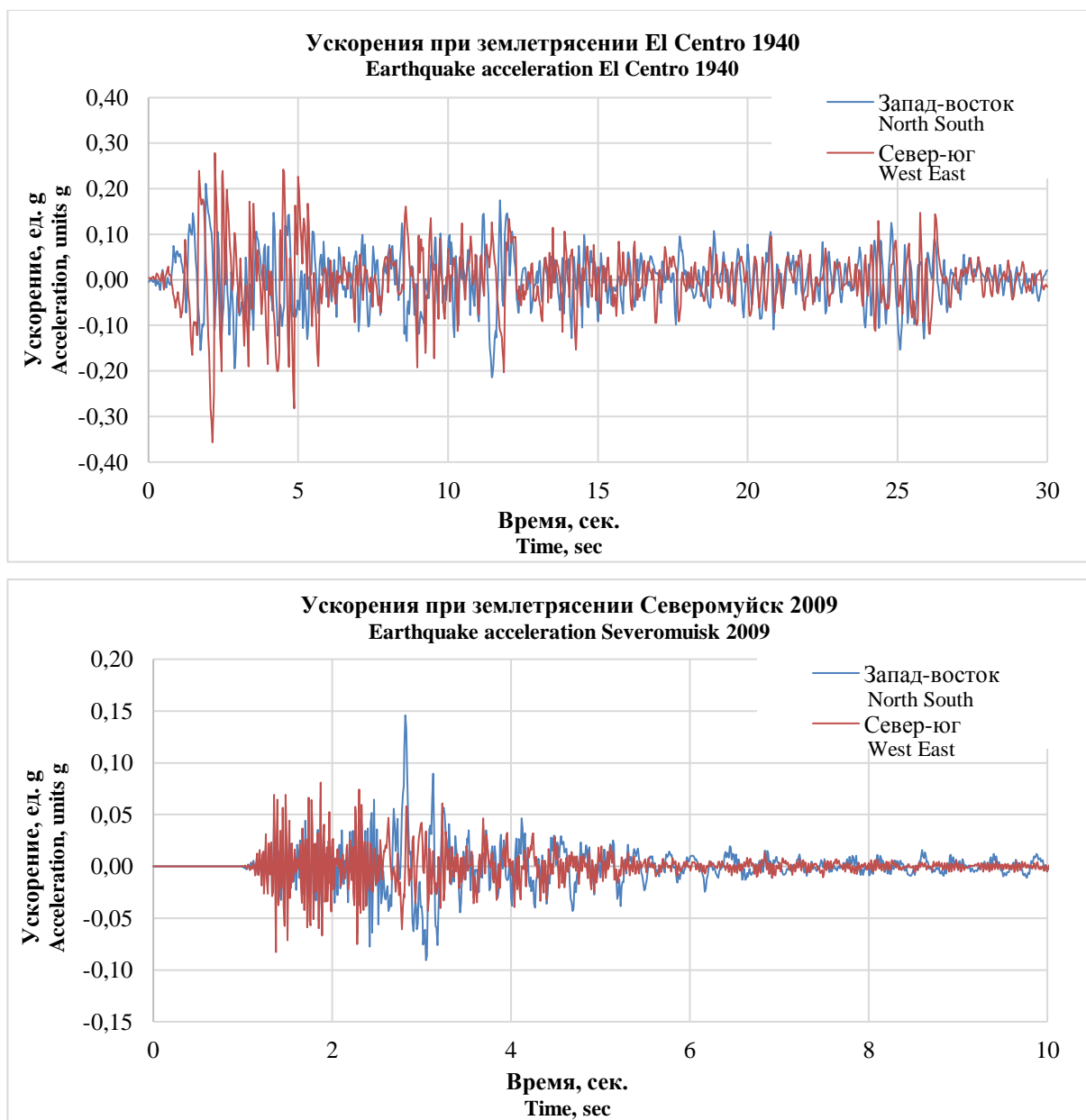
*Figure 7. Cracks in the transport zone tunnel niches (photos made by authors)*

## Анализ работы на сейсмические нагрузки

### Work analysis for seismic loads

В качестве расчетного сейсмического воздействия на уровне ПЗ приняты акселерограммы известного землетрясения, «El Centro» 1940 года с пиковыми ускорениями до 0,36 g (353 см/с<sup>2</sup>, 8,8 балла). Данное воздействие является одним из наиболее достоверно зафиксированных землетрясений большой мощности, произошедшим на глубине 16 км с магнитудой 6,9, что соответствует геодинамическим характеристикам зоны расположения тоннеля [14]. Расчетным воздействием для оценки трещинообразования назначена акселерограмма землетрясения от 3.01.2009 с расчетным пиковым ускорением 0,146 g (143 см/с<sup>2</sup>, 7,5 баллов), зафиксированная в Северомуйске (рис. 8).

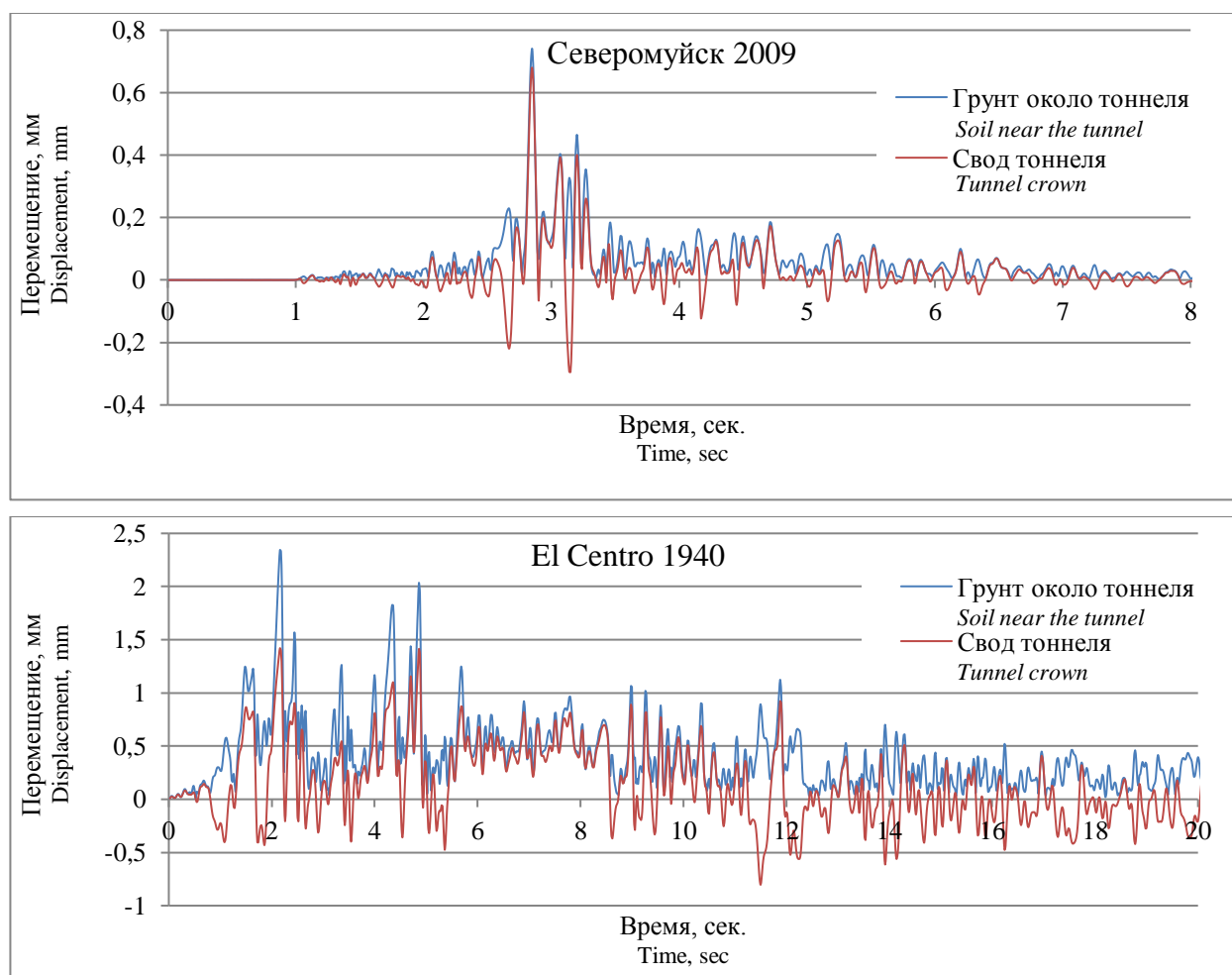
Расчеты проведены прямым динамическим методом. В результате построена огибающая максимальных напряжений и перемещений в своде и стенках тоннеля транспортной зоны, штольне, сбойках и нишах.



*Рисунок 8. Акселерограммы расчетных землетрясений (рисунки авторов)*

*Figure 8. Operating basis earthquake accelerograms (illustrations made by the authors)*

На рис. 9 приведен график полных перемещений точек на своде тоннеля и вмещающего массива грунта около свода транспортного тоннеля. При воздействии землетрясения с ускорением поверхности грунта  $143 \text{ см/с}^2$  перемещения вмещающего массива составили  $0,74 \text{ мм}$ , свода обделки тоннеля  $0,68 \text{ мм}$ . Реакция на сильное землетрясение с пиковыми ускорениями до  $350 \text{ см/с}^2$  показала максимальные перемещения свода обделки на величину  $1,4 \text{ мм}$ , окружающего массива грунта до  $2,3 \text{ мм}$ . Ускорения обделок составили  $400 \text{ см/с}^2$ , что больше исходного на  $15 \%$ .



**Рисунок 9.** Полные перемещения свода тоннеля и окружающего массива грунта на расстоянии 2 м от свода тоннеля (рисунки авторов)

**Figure 9.** Tunnel crown and the surrounding soil mass full movement at a 2 m distance from the tunnel crown (illustrations made by the authors)

Как правило, трещины в бетоне тоннельных обделок образуются при превышении главными растягивающими напряжениями расчетных сопротивлений бетона. Фактическое состояние бетонных обделок СМТ достаточно разное: от конструкций без повреждений до наличия вертикальных, горизонтальных и наклонных трещин явно силового характера (рис. 10).

При действии относительно слабого землетрясения растягивающие напряжения во всех бетонных конструкциях тоннеля не превышают 230 кПа, что в совокупности с постоянными сжимающими напряжениями не должно вызывать трещины в бетонных обделках.

Сильное сейсмическое событие, которое можно рассматривать как уровень ПЗ (El Centro 1940), вызывает дополнительные главные растягивающие напряжения в своде тоннеля транспортной зоны в 0,7–1 МПа. По стенам тоннеля в верхней трети высоты наблюдаются растягивающие напряжения 1–1,3 МПа, а в трещиноватых грунтах до свыше



1,3 МПа – это места потенциального образования трещин обделки, а на участках примыкания сбоек, ниш контактной электросети и других зонах концентрации напряжений – свыше 3 МПа (рис. 11). При этом расчетное сопротивление бетона растяжению  $R_{bt,ser}$  составляет 1,6 МПа.



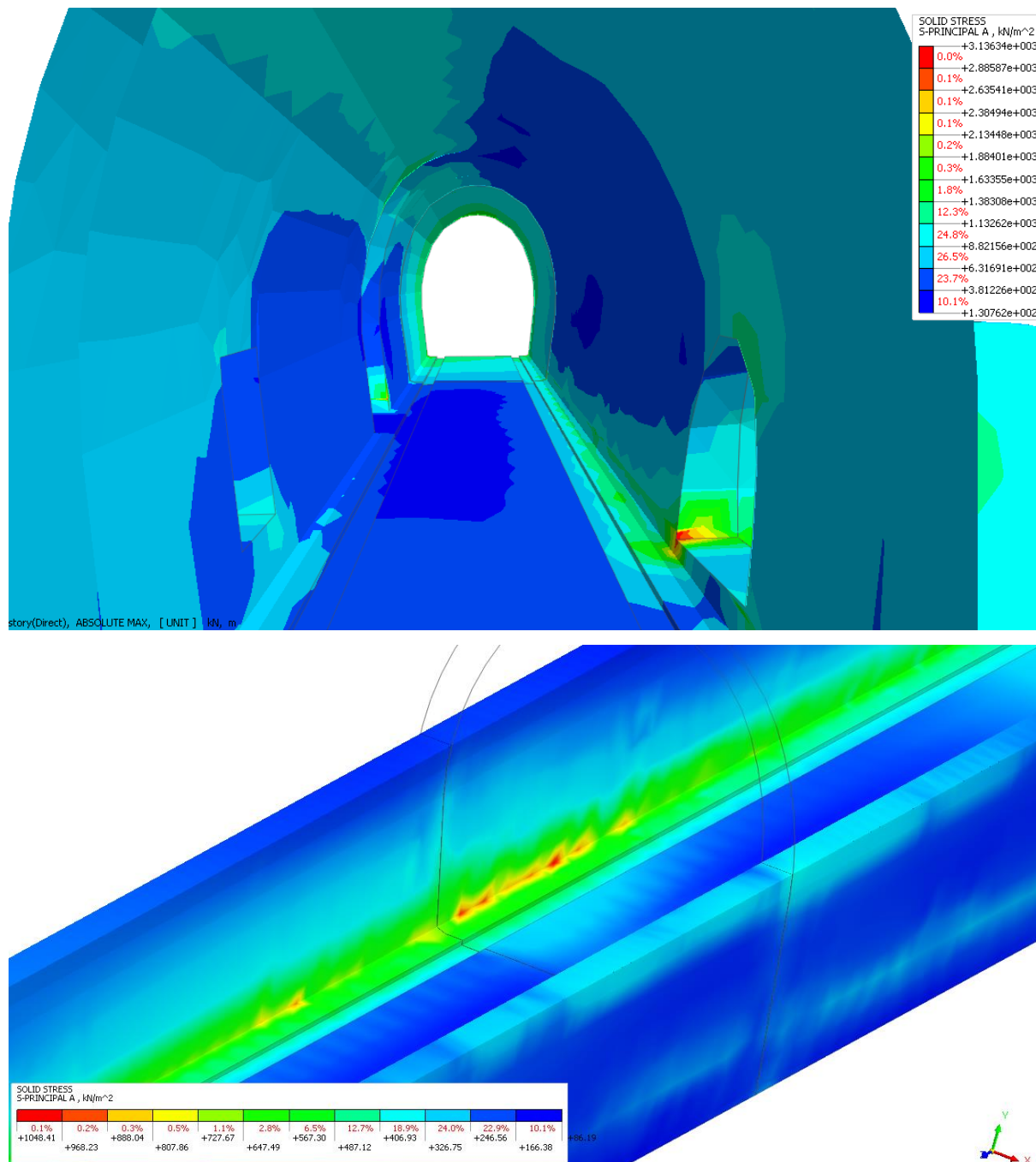
*Рисунок 10. Наклонные трещины в обделке  
тоннеля транспортной зоны (фотография авторов)*

*Figure 10. Diagonal crack in the transport zone tunnel lining (photo made by the authors)*

Дополнительные растягивающие напряжения, появляющиеся при слабых землетрясениях (как в Северомуйске в 2009 году), в наиболее напряженных зонах достигают 0,8 МПа, а в местах концентрации напряжений – до 1,8 МПа (рис. 12).

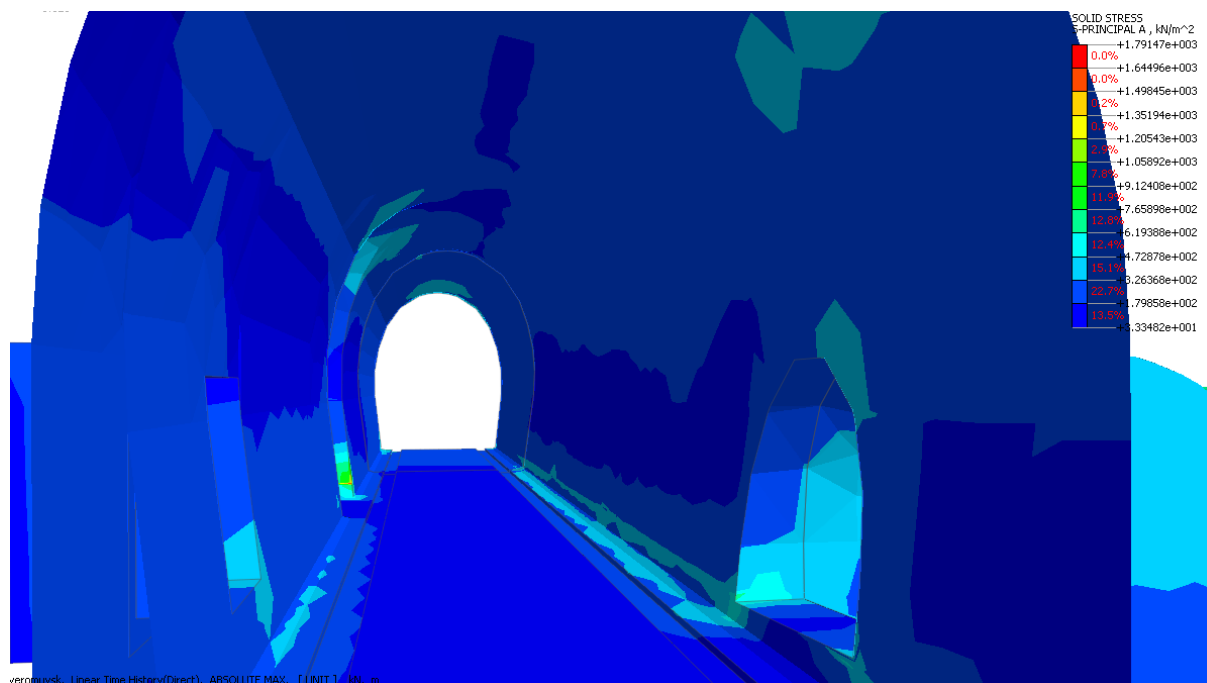
Сейсмическое событие в 7–8 баллов по шкале МСК-64, повторяющиеся 1 раз в 10 лет, вызывает напряжения в обделках тоннеля, находящегося в крепких изотропных горных породах, только приближающиеся к сопротивлению бетона осевому растяжению при расчетах по предельным состояниям второй группы. С учетом уже имеющихся в обделках постоянных напряжений сжатия можно сделать вывод, что в целом, влияние сейсмических воздействий на НДС обделок имеется, но не является определяющим. Растягивающие напряжения в бетоне, способные вызвать трещинообразование, появляются только при землетрясениях большой интенсивности от 9 баллов, соответствующие уровню ПЗ и выше и имеющие период повторения от 1 раза в 50 лет.

Сжимающие дополнительные напряжения в бетоне обделок меньше пределов прочности.



*Рисунок 11. Главные растягивающие напряжения в бетоне тоннельных обделок при землетрясении El Centro 1940 (рисунки авторов)*

*Figure 11. Main tension stresses in the concrete of tunnel linings during the 1940 El Centro earthquake ((illustrations made by the authors)*



*Рисунок 12. Главные растягивающие напряжения в бетоне тоннельных обделок при землетрясении, зарегистрированном в Северомуйске в 2009 году интенсивностью 7,5 баллов (рисунок авторов)*

*Figure 12. Main tension stresses in the concrete of tunnel lining during an earthquake recorded in Severomuisk in 2009 with an intensity of 7.5 points (drawing by the authors)*

Сопоставление мест максимальных напряжений в обделках от статических и сейсмических нагрузок, полученных расчетным путем (рис. 6, 11) с реальной картиной расположения трещин (рис. 7, 10) показывает, что трещины у ниш появились в местах концентрации напряжений в момент сооружения тоннеля и могли развиваться при многочисленных землетрясениях. Причиной образования наклонных трещин в обделках являются не гравитационное или сейсмические воздействия, а геодеформационные процессы, проявляющиеся в виде смещений по границам горных блоков при землетрясениях. Для решения этой научной проблемы создаются системы мониторинга и проводится системный анализ происходящих в горных породах и конструкциях тоннелей процессов [15].

## Выводы

### Conclusion

1. Сейсмический режим территории Северомуйского тоннеля за период 1994–2020 гг. предполагает появление землетрясений силой 7–8 баллов по шкале MSK-64 в среднем каждые 10 лет. Уровень проектного землетрясения с периодом повторяемости 1 раз за 50 лет соответствует 8,7 балла.

2. Тоннель, находящийся в крепких скальных породах, в целом хорошо сопротивляются разрушительному воздействию сильных землетрясений. При отсутствии значительных разломов, изотропном строении вмещающего горного массива трещинообразование в бетонных обделках возникает только в случае сильного землетрясения, соответствующего уровню проектного землетрясения. Сложная конструктивная геометрия несущих конструкций, такая как наличие различных ниш, сбоек и т. д. ведет к появлению концентраций напряжений в зонах их пересечений и появлению трещин в бетоне при сейсмических воздействиях.

3. Основные закономерности появления деформаций, повреждений в несущих конструкциях горных тоннелей, такие как «существенное увеличение горного давления, обусловливаемое землетрясением, в значительной степени связано с местными нарушениями в массиве грунта» и «большое влияние на работу подземных конструкций при землетрясениях оказывают грунтовые условия», приведенные в [2], подтверждаются расчетными методами и обследованиями обделок Северомуйского тоннеля. Мало изученным остается вопрос влияния «роев» многочисленных землетрясений средней интенсивности (4–6 баллов по шкале МСК-64) на заобделочное пространство в горных тоннелях, расположенных в зонах тектонических нарушений, а также, характер проявления геодинамических процессов в виде смещений по границам горных блоков активных разломов. Несомненную помощь могут оказать в изучении этих вопросов системы мониторинга деформаций.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Назарова Ш.Ш.** Задание пиковых ускорений для многоуровневого проектирования сейсмостойких конструкций / Ш.Ш. Назарова, А.М. Уздин. – DOI <https://doi.org/10.21455/VIS2019.3-8> // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2019. – Т 46, № 3. – С. 123–136. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42545615> (дата обращения: 29.11.2020).
2. **Дорман И.Я.** Об основных принципах обеспечения сейсмостойкости транспортных тоннелей / И.Я. Дорман // Метро и тоннели. – 2015. – № 1. – С. 26–28. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23850654> (дата обращения: 30.11.2020).
3. **Зайнагабдинов Д.А.** Транспортные тоннели и геодинамика горных массивов / Д.А. Зайнагабдинов, Н.М. Быкова // Интернет-журнал «Наукоеведение». – 2014. – № 5. – URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/13KO514.pdf> (дата обращения: 30.11.2020).
4. **Быкова Н.М.** Северо-Муйский тоннель из XX в XXI век / Н.М. Быкова, С.И. Шерман. – Новосибирск: Наука, 2007. – 186 с.
5. Сейсмическое районирование Восточной Сибири и его геолого-геофизические основы: монография / под ред. В.П. Солоненко. – Новосибирск: Наука, 1977. – 304 с.

6. **Смекалин О.П.** Палеосейсмология Восточной Сибири / О.П. Смекалин, В.С. Имаев, А.В. Чипизубов. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2011. – 98 с.
7. Геология и сейсмичность зоны БАМ: монография / под ред. С.И. Голенецкого. – Новосибирск: Наука, 1985. – 192 с.
8. **Голенецкий С.И.** Сейсмичность Байкальской рифтовой области / С.И. Голенецкий // Континентальный рифтогенез / М.: Советское радио, 1977. – С. 56–64.
9. **Кочетков В.М.** Ангараканский рой землетрясений в Байкальской рифтовой зоне / В.М. Кочетков, Н.С. Боровик, Л.А. Мишарина и др. – Новосибирск: Наука, 1987. – 81 с.
10. **Мельникова В.И.** Анализ результатов сейсмических наблюдений в районе Северо-Муйского тоннеля трассы БАМ / В.И. Мельникова, Н.А. Гилёва, А.И. Середкина // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы XII Международной сейсмологической школы / Обнинск: ФИЦ Единая геофизическая служба РАН, 2017. – С. 217–219. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30514106> (дата обращения: 30.11.2020).
11. **Быкова Н.М.** Технологические основы программно-аппаратного сопровождения автоматизированного мониторинга деформаций железнодорожных тоннелей / Н.М. Быкова, Д.А. Зайнагабдинов, Т.Ш. Белялов, И.В. Мешков. – DOI <https://doi.org/10.17587/prin.7.126-131> // Программная инженерия. – 2016. – Т 7, № 3. – С. 126–131. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25731115> (дата обращения: 30.11.2020).
12. **Зерцалов М.Г.** Механика скальных грунтов и скальных массивов / М.Г. Зерцалов. – М.: Юриспруденция, 2003. – 184 с.
13. **Хажыылай Ч.В.** Расчет паспорта прочности горных пород, находящихся в естественных условиях массива, с использованием критерия Хука-Брауна и программы ROCDATA / Ч.В. Хажыылай, В.А. Еременко, М.А. Косырева, А.М. Янбеков. – DOI <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-0-92-101> // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № 12. – С. 92–101. – URL: <https://giab-online.ru/catalog/12629> (дата обращения: 30.11.2020).
14. **Udwadia F.E.** Comparison of earthquake and microtremor ground motions in El Centro, California / F.E. Udwadia, M.D. Trifunac // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1973. – Т 63, № 4. – С. 1227–1253. – URL: <https://authors.library.caltech.edu/48925/> (дата обращения: 02.12.2020).
15. **Быкова Н.М.** Критерии контроля параметров электронного деформационного мониторинга в транспортных тоннелях / Н.М. Быкова, Д.А. Зайнагабдинов, Т.Ш. Белялов. – DOI <https://doi.org/10.15862/02TS115> // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». – 2015. – № 1. – URL: <http://t-s.today/PDF/02TS115.pdf> (дата обращения: 02.12.2020).

**Сведения об авторах:**

**Баранов Тимофей Михайлович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство железных дорог, мостов и тоннелей», ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», Иркутск, Россия, e-mail: [Baranov-87@yandex.ru](mailto:Baranov-87@yandex.ru)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3981-6413>  
ПИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=926740](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=926740)

**Зайнагабдинов Дамир Альфридович** – Кандидат технических наук, Доцент кафедры «Строительство железных дорог, мостов и тоннелей», ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», Иркутск, Россия, e-mail: damirmt@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6335-3442>

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=520144](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=520144)

**Быкова Наталья Михайловна** – Кандидат технических наук, доцент, Заведующий кафедрой «Строительство железных дорог, мостов и тоннелей», ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», Иркутск, Россия, e-mail: Bikova\_nm@irgups.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0676-4752>

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=633145](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=633145)

Статья получена: 11.01.2021. Принята к публикации: 02.03.2021. Опубликовано онлайн: 16.03.2021

## REFERENCES

1. Nazarova Sh.Sh., Uzdin A.M. Setting peak acceleration for performance based designing seismic resistant structures. *Seismic instruments*. 2019; 46(3): 123–136. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.21455/VIS2019.3-8>.
2. Dorman I.Ya. On the basic principles of ensuring the seismic resistance of transport tunnels. *Metro and tunnels*. 2015; (1): 26–28. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23850654> (accessed 30th November 2020). (In Russ.).
3. Zainagabdinov D.A., Bykova N.M. Transport tunnels and mountain massifs geodynamics. *Naukovedenie*. 2014; (5). Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/13KO514.pdf> (accessed 30th November 2020). (In Russ., abstract in Eng.).
4. Bykova N.M., Sherman S.I. [Severo-Muisky tunnel from XX to XXI century]. Novosibirsk: Nauka; 2007. (In Russ.).
5. Solonenko V.P. ed. [Seismic zoning of Eastern Siberia and its geological and geophysical foundations: monograph]. Novosibirsk: Nauka; 1977. (In Russ.).
6. Smekalin O.P., Imayev V.S., Chipizubov A.V. [Paleoseismology of Eastern Siberia]. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust SB RAS; 2011. (In Russ.).
7. Golonetskiy S.I. ed. [Geology and seismicity of the BAM zone: monograph]. Novosibirsk: Nauka; 1985. (In Russ.).
8. Golenetskiy S.I. [Seismicity of the Baikal rift area]. In: [Continental rifting]. Moscow: Sovetskoye radio; 1977. p. 56–64.
9. Kochetkov V.M., Borovik N.S., Misharina L.A. [Angarakan earthquake swarm in the Baikal rift zone]. Novosibirsk: Nauka; 1987. (In Russ.).
10. Mel'nikova V.I., Gileva N.A., Sereckina A.I. [Analysis of the results of seismic observations in the area of the Severo-Muisky tunnel of the BAM route]. In: [Modern methods of processing and interpretation of seismological data: Materials of the XII International Seismological School]. Obninsk: Federal Research Center "Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences"; 2017. p. 217–219. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30514106> (accessed 30th November 2020). (In Russ.).

11. Bykova N.M., Zainagabdinov D.A., Belyalov T.Sh., Meshkov I.V. Technological Bases of Software-Instrumental Accompaniment Electronic Deformation Monitoring of Railway Tunnels. *Programmnyaya Ingeneria*. 2016; 7(3): 126–131. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17587/prin.7.126-131>.
  12. Zertsalov M.G. [Mechanics of rocky soils and rock massifs]. Moscow: Yurisprudentsiya; 2003. (In Russ.).
  13. Khazhyylay Ch.V., Eremenko V.A., Kosyreva M.A., Yanbekov A.M. In-situ rock mass failure envelope plotting using the Hoek-Brown criterion and ROCDATA software toolkit. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2018; (12): 92–101. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-0-92-101>.
  14. Udwardia F.E., Trifunac M.D. Comparison of earthquake and microtremor ground motions in El Centro, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1973; 63(4): 1227–1253. Available at: <https://authors.library.caltech.edu/48925/> (accessed 1st December 2020). (In Eng.).
  15. Bykova N.M., Zainagabdinov D.A., Belyalov T.S. Criteria for controlling parameters of the electronic deformation monitoring in the transport tunnels. *Russian journal of transport engineering*. 2015; 2(1). (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/02TS115>.
- 

**Information about the authors:**

**Timofey M. Baranov** – Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia, e-mail: Baranov-87@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3981-6413>

РИИЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=926740](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=926740)

**Damir A. Zainagabdinov** – Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia, e-mail: damirmt@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6335-3442>

РИИЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=520144](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=520144)

**Natalya M. Bikova** – Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia, e-mail: Bikova\_nm@irgups.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0676-4752>

РИИЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=633145](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=633145)

---

Submitted: 11th January 2021. Revised: 02nd March 2021. Published online: 16th March 2021.