

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/04SATS121.pdf>

DOI: 10.15862/04SATS121 (<https://doi.org/10.15862/04SATS121>)

## Исследование работы железнодорожной насыпи, пересекающей под разными углами разломы с подвижками поднятия

Исаев С.А.

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

Автор, ответственный за переписку: Исаев Семен Александрович, e-mail: [semen.isaev.1995@mail.ru](mailto:semen.isaev.1995@mail.ru)

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы работы насыпей, пересекающих под разными углами разломы с подвижками поднятия. Приведены примеры эксплуатации инженерных сооружений: тоннелей, мостов, земляного полотна, трубопроводов в условиях тектонической активности. Существующие нормативные документы рекомендуют выбирать трассу пути с обходом мест выхода на земную поверхность тектонических разломов. Однако, учитывая существующую разломно-блоковую структуру земной коры, обход зон тектонических нарушений практически невозможен. Существующая сеть железных дорог в большинстве своем была заложена без учета современных требований норм. Поэтому представляется актуальным вопрос исследования работы как эксплуатируемого, так и проектируемого железнодорожного пути в зонах тектонических нарушений с подвижками поднятия. В настоящей статье с использованием программно-вычислительного комплекса Midas GTS, предназначенного для геотехнических расчетов, проведено исследование работы железнодорожной насыпи, пересекающей под разным углом в

горизонтальной плоскости разломы с условными подвижками поднятия блока разлома. Для этого была создана трехмерная конечно-элементная модель. В расчетах использована упругопластическая модель работы грунта Кулона-Мора. В результате проанализированы деформации основной площадки насыпи. Детально рассмотрены компоненты деформаций и их вклад в общее значение. Сделаны выводы об изменении продольного уклона оси и перекоса поперечного профиля основной площадки. Для наиболее деформированных сечений приведены эпюры нормальных и касательных напряжений. Анализ результатов исследования позволил установить ряд характерных закономерностей в изменении напряженно-деформированного состояния насыпей в зависимости от угла между осями пути и разлома. Статья является частью диссертационного исследования автора.

**Ключевые слова:** насыпь; геотектонические воздействия; тектонический разлом; конечно-элементное моделирование; напряженно-деформированное состояние

## Study of the railway embankment operation that crossing faults upland movements at different angles

Semyon A. Isaev

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

**Corresponding author:** Semyon A. Isaev, e-mail: semen.isaev.1995@mail.ru

**Abstract.** The article discusses the issues of the railway embankment operation crossing faults with upland movements at different angles. Examples of the engineering structures operation are given in this article: tunnels, bridges, roadbed, pipelines in conditions of tectonic activity. Existing regulatory documents recommend choosing a route with a bypass of the places where tectonic faults reach the ground's surface. However, taking into account the existing fault-block structure of the ground's crust, it is practically impossible to bypass the tectonic fault zones. The existing network of railways for the most part was laid without taking into account modern requirements norms. Therefore, it seems relevant to study the operation of both the operated and the projected railway track in the tectonic disturbances zones with upland movements. In this article, using the software and computing complex Midas GTS, designed for geotechnical calculations, a study of the railway embankment operation crossing at different angles in the horizontal plane faults with conditional

upland movements of the fault block has been carried out. For this, a three-dimensional finite element model was created. The calculations used the Coulomb-Mohr elastoplastic soil work model. As a result, the deformations of the embankment's main area were analyzed. The deformations components and their contribution to the overall value are considered in detail. Conclusions are made about the change in the longitudinal slope of the axis and the skew of the transverse profile of the main site. For the most deformed sections, normal and tangential stresses diagrams. The research results analysis made it possible to establish a number of characteristic regularities in the change in the embankment's stress-strain state, depending on the angle between the track and the fault axes. The article is part of the author's dissertation research.

**Keywords:** embankment; geodeformational effects; tectonic fault; finite element modeling; stress-strain state

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

Железнодорожный путь – протяженное транспортное сооружение, пересекающее различные геоморфологические структуры: впадины, возвышенности и разломы под различными углами направления на земной поверхности. В зонах активных геоструктур проявляются так называемые геодеформационные воздействия различной направленности в результате криповых перемещений по разломам или сейсмической активности [1; 2]. Характер тектонических движений земной поверхности на современном этапе мало изучен, поэтому, несмотря на нормируемое содержание элементов пути, геодеформационные воздействия отражаются на работе конструкций его верхнего и нижнего строения, в том числе, на деформациях насыпей и выемок.

При проектировании земляного полотна, рассматривают влияние природных-климатической среды на сооружение [3; 4] в виде экзогенных процессов (пучение грунтов, оползневые процессы, абразия, суффозия). Из эндогенных процессов при проектировании учитывается только сейсмика, подвижки в зонах тектонических разломов обычно не рассматриваются.

Примеры взаимодействия инженерных сооружений (трубопроводов, тоннелей, мостов, земляного полотна) с разломными зонами представлены в [5–10]. Так в [5] отмечают повторяемость аварий трубопроводов под действием геодеформаций в зонах разломов. В [6; 7] рассматриваются деформации земляного полотна Байкало-Амурской железной дороги, в районе со сложными сейсмотектоническими условиями. В зарубежной литературе также приводятся данные о повышенной деформативности различных элементов железнодорожного пути: тоннелей, мостов, земляного полотна в зонах с тектонически активными разломами [8–10].

Нормативный документ<sup>1</sup> рекомендует выбирать трассу пути с обходом мест выхода на земную поверхность тектонических разломов. Однако, учитывая существующую разломно-блоковую структуру земной коры, обход зон тектонических нарушений практически невозможен. К тому же, следы тектонических движений быстро затушевывается в результате действия экзогенных процессов [11]. Существующая сеть железных дорог в большинстве своем была заложена без учета современных требований норм. Поэтому представляется актуальным вопрос исследования работы как эксплуатируемого, так и проектируемого железнодорожного пути в зонах тектонических нарушений.

---

<sup>1</sup> СП 268.1325800.2016. Транспортные сооружения в сейсмических районах. Правила проектирования. Введ. 17.06.2017. М.: Стандартинформ, 2017.

В настоящей статье с использованием численного моделирования с применением программно-вычислительного комплекса Midas GTS, предназначенного для геотехнических расчетов, проведено исследование работы железнодорожных насыпей, пересекающих под разными углами в горизонтальной плоскости разломы с условными подвижками поднятия блока разлома.

## Методология получения исходных данных для численного моделирования

### Methodology for obtaining initial data for numerical modeling

Рассматривается среднестатистическая железнодорожная насыпь высотой 6 м с крутизной откосов 1:1,5. Ширина основной площадки – 7,6 метров. Длина участка пути принята 110 м. Характеристики грунтов приведены в таблице 1. В расчетах использована математическая модель работы грунта Кулона-Мора.

Таблица 1 / Table 1

### Характеристики грунтов

#### Soil characteristics

№	Элемент Element	Материал Material	Модуль деформации E, мПа Modulus of deformation E, mPa	Удельное сцепление с, кПа Specific cohesion c, kPa	Угол внутреннего трения φ, град. Internal friction angle φ, deg	Удельный вес грунта γ, кН/м <sup>3</sup> Specific weight of the soil γ, kN/m <sup>3</sup>	Коэффициент Пуассона ν Poisson's ratio ν
1	Балластная призма Body of ballast	Щебень Ballast stone	400	1	35	22	0,2
2	Насыпь Embankment	Суглинок тугопластичный loam low-plasticity	19	28	22	19	0.36
3	Основание Foundation	Суглинок тугопластичный loam low-plasticity	19	28	22	19	0.36

*Разработано автором / Developed by the author*

В качестве нагрузок учитывается собственный вес всех элементов железнодорожного пути. Собственный вес рельсошпальной решетки заменен фиктивным дополнительным весом балластной призмы. Поэтому высота основной площадки увеличена на высоту этого фиктивного слоя и составляет 0,7 м. Такая замена обусловлена тем, что при дискретизации рельсошпальной решетки, которая обладает относительно небольшими размерами, происходит нерациональное увеличение количества конечных элементов. Нагрузка от подвижного состава не рассматривается, так как исследуется реакция насыпи на геодеформационные воздействия.

Предполагается, что разлом проходит на некоторой глубине с выходом в зону поверхностного слоя с шириной 10 метров. Разлом рассекает грунтовый массив основания на два блока – подвижный и неподвижный. Рассматривается реакция насыпи на вертикальные перемещения подвижного блока. Подвижки поднятия  $\Delta$  заданы в диапазоне от 0 м до +0,05 м с шагом 0,01 м.

В период развития инструментальных средств слежения за деформациями земной поверхности, количественные показатели гедеформационных воздействий описаны в литературе [12–14]. Величина максимальных подвижек до 0,05 м обусловлена показателями деформаций в зонах разломов, которые зачастую называют суперинтенсивными движениями земной поверхности. Для них присущи высокоамплитудные (50–70 мм/год) и короткопериодичные (0,1–1 год) перемещения, пространственно локализованные в зонах разломов [13].

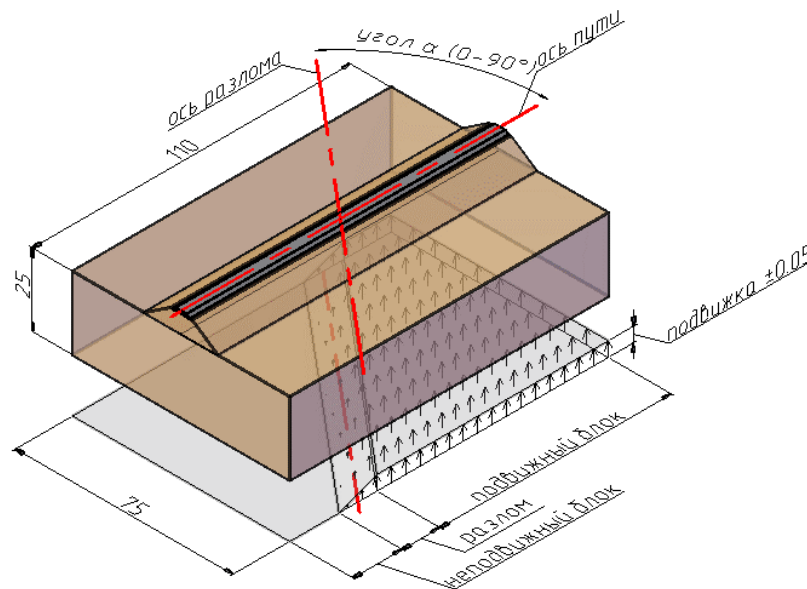
## Особенности моделирования

### Modeling peculiarities

Для протяженных инженерных сооружений, сохраняющих свои поперечные размеры, при расчете, зачастую, используют расчетную схему плоской деформации [15]. Исходя из предположения постоянства продольных нормальных напряжений, так как система сил не меняется по длине сооружения. Если система сил и деформации вдоль сооружения неравномерны, то необходимо использовать пространственную схему работы сооружения. В данной работе протяженная насыпь пересекает под разными углами в горизонтальной плоскости разломы с условными подвижками поднятия блока разлома. Таким образом будет возникать пространственное напряженно-деформированное состояние. И поэтому данная задача решается в пространственной постановке.

Численная трехмерная конечно-элементная модель показана на рисунке 1. Длина модели – 110 м, ширина – 75 м, высота основания – 25 м. В модели приняты тетраэдральные элементы с размерами 5 метров на границах основания. В зоне насыпи сетка сгущается до 0,75 м (рисунок 2).

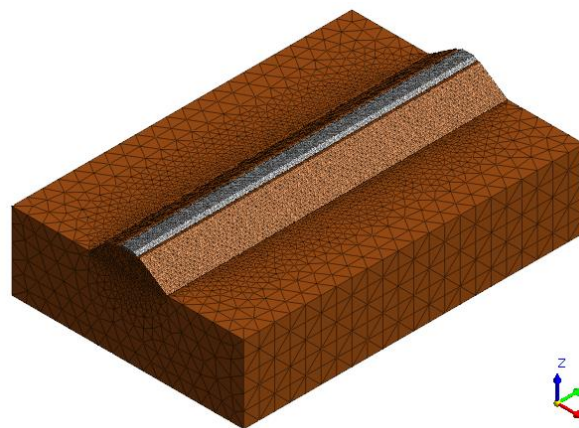
Разлом может пересекать железнодорожный путь в горизонтальной плоскости под различным углом  $\alpha$ . Поэтому расчеты ввелись для различных углов пересечения осей разлома и пути в диапазоне от  $0^{\circ}$  до  $90^{\circ}$ . При угле  $\alpha = 0^{\circ}$  оси разлома и пути параллельны, при  $\alpha = 90^{\circ}$  разлом пересекает железнодорожный путь по нормали. Схема передачи вертикальных подвижек представлена на рисунке 1.



*Рисунок 1. Схема модели (разработано автором)*

*Figure 1. Model diagram (developed by the author)*

Расчет велся поэтапно. Работа насыпи рассматривается после длительного срока эксплуатации. Поэтому на 1 этапе осуществлялось гравитационное загрузку с обнулением деформаций от собственного веса грунта, так как все осадки от консолидации и уплотнения в строительный период уже реализовались. На 2 этапе на основание задана подвижка на основание (рисунок 1).



*Рисунок 2. Конечно-элементная модель (разработано автором)*

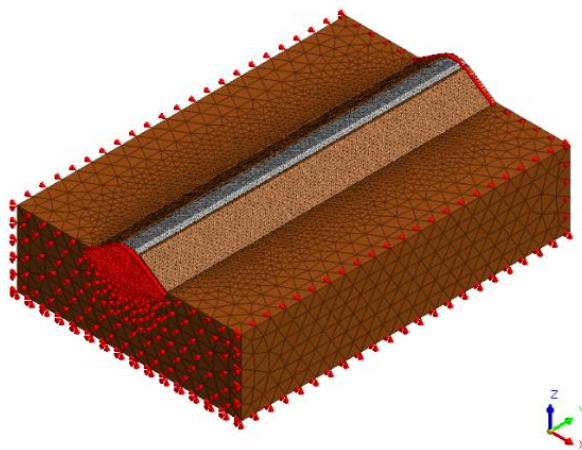
*Figure 2. Finite element model (developed by the author)*

Граничные условия модели на 1 этапе представлены в виде ограничения на боковых поверхностях нормальных перемещений. На нижней поверхности модели ограничены перемещения в любом направлении (рисунок 3).

На 2 этапе осуществляется замена граничных условий нижней поверхности модели. В зоне неподвижного блока основания заданы



нулевые перемещения. В зоне подвижного блока прилагается подвижка  $\Delta$  необходимой величины от +0 до +0,05 м. В зоне разлома задана подвижка, которая плавно переходит от нулевых перемещений неподвижного блока к перемещениям подвижного блока.



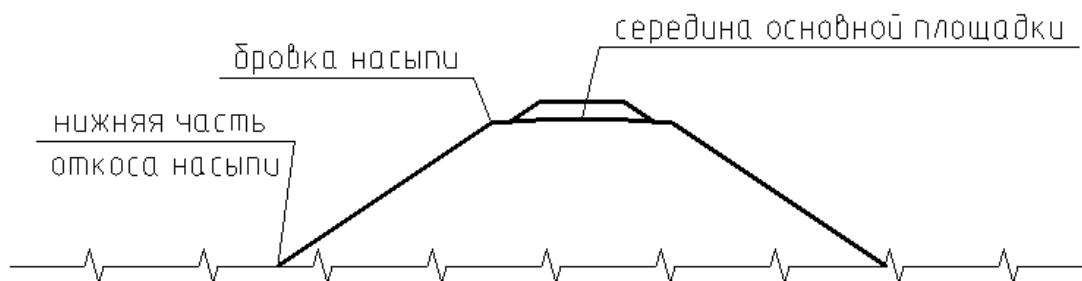
*Рисунок 3. Граничные условия (разработано автором)*

*Figure 3. Boundary data (developed by the author)*

## Результаты исследования на геодформационные воздействия условного поднятия

### Research results on geodeformational impact of conditional upland

В ходе расчетов анализировались деформации в середине основной площадки насыпи, бровке и подошве откоса насыпи (рисунок 4): продольные горизонтальные  $T_y$ , поперечные горизонтальные  $T_x$ , вертикальные  $T_z$ , суммарные  $T_{\Sigma}$ .

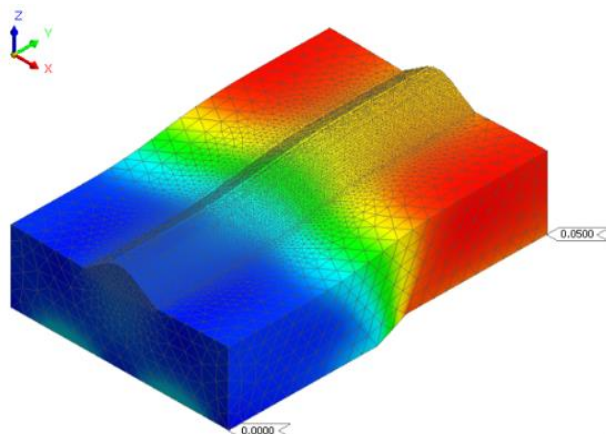


*Рисунок 4. Исследуемые зоны деформаций насыпи (разработано автором)*

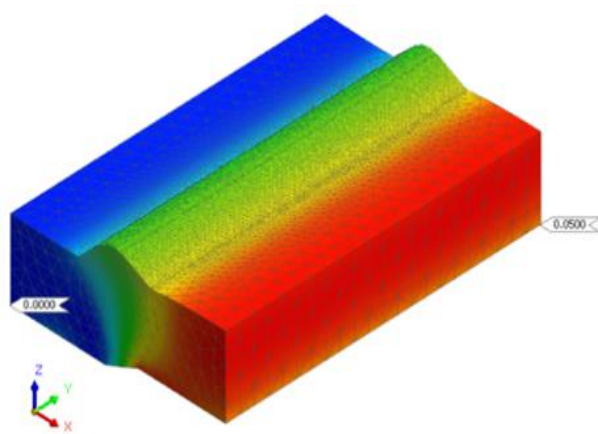
*Figure 4. The investigated deformation zones of the embankment (developed by the author)*

На рисунках 5–13 представлены деформации модели для разных шагов исследования. На рисунках 5–6 приведены суммарные деформации  $T_{\Sigma}$  при подвижке  $\Delta = +0.05$  м для значений угла  $\alpha = 90^{\circ}$  и  $\alpha = 0^{\circ}$ . На рисунках 7–9 отображен характер изменения компонентов деформации оси основной

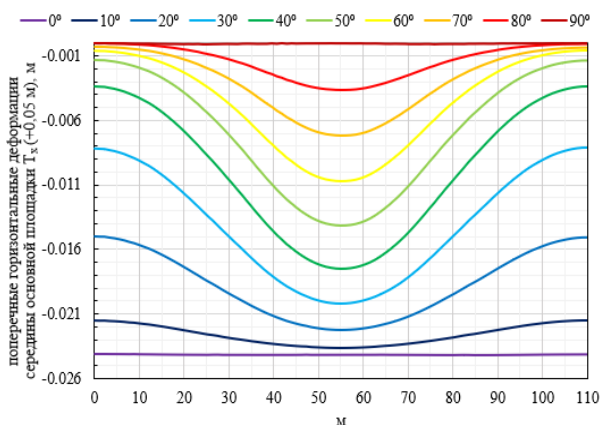
площадки насыпи при различных углах пересечения пути разломами ( $\Delta = +0.05$  м). На рисунках 10–12 оценено изменение компонентов деформаций относительно суммарной величины. На рисунке 13 показано изменение отношения разницы горизонтальных продольных деформаций по правой и левой бровке к ширине основной площадки (поперечный уклон).



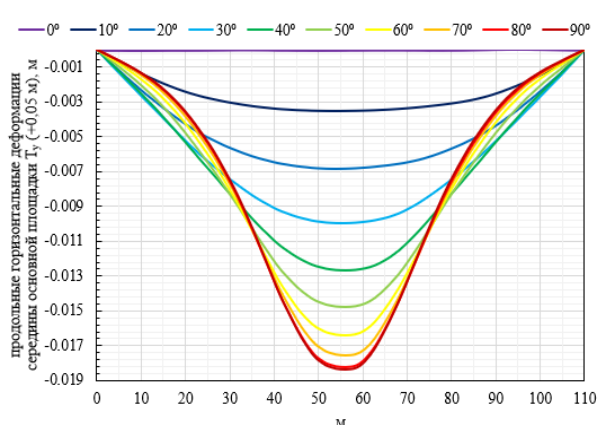
**Рисунок 5.** Деформация модели  $T_z$  при подвижке  $\Delta = +0,05$  м ( $\alpha = 90^\circ$ ) (разработано автором)  
**Figure 5.**  $T_z$  model deformation during displacement  $\Delta = +0,05$  m ( $\alpha = 90^\circ$ ) (developed by the author)



**Рисунок 6.** Деформация модели  $T_z$  при подвижке  $\Delta = +0,05$  м ( $\alpha = 0^\circ$ ) (разработано автором)  
**Figure 6.**  $T_z$  model deformation during displacement  $\Delta = +0,05$  m ( $\alpha = 0^\circ$ ) (developed by the author)

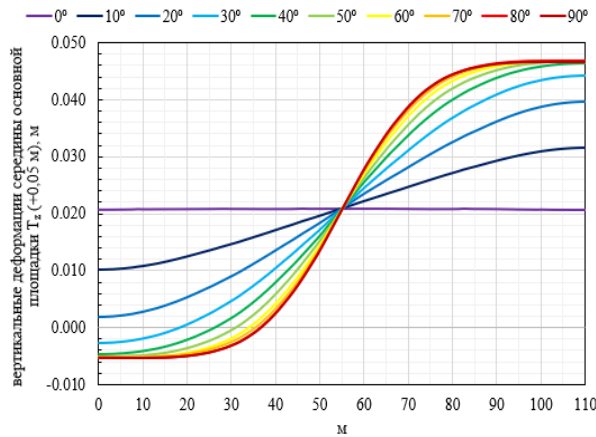


**Рисунок 7.** Поперечные горизонтальные деформации оси основной площадки  $T_x$  при различных углах пересечения пути разломами (разработано автором)  
**Figure 7.** Lateral horizontal deformations  $T_x$  of the main roadbed axis at different path faults intersection angles (developed by the author)

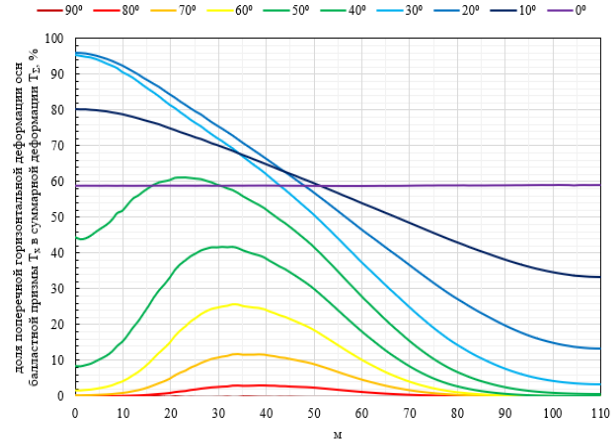


**Рисунок 8.** Продольные горизонтальные деформации оси основной площадки  $T_y$  при различных углах пересечения пути разломами (разработано автором)  
**Figure 8.** Longitudinal horizontal deformations  $T_y$  of the main roadbed axis different path faults intersection angles (developed by the author)

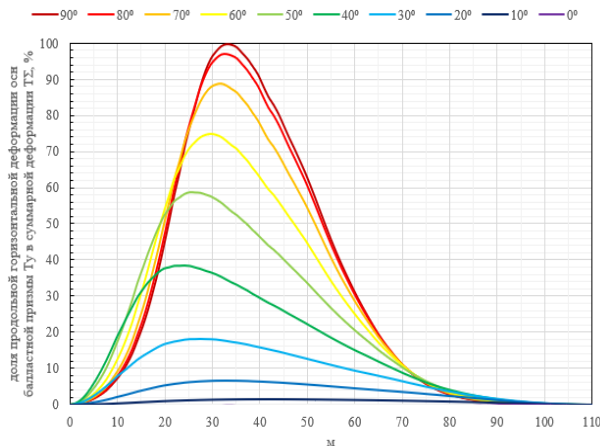




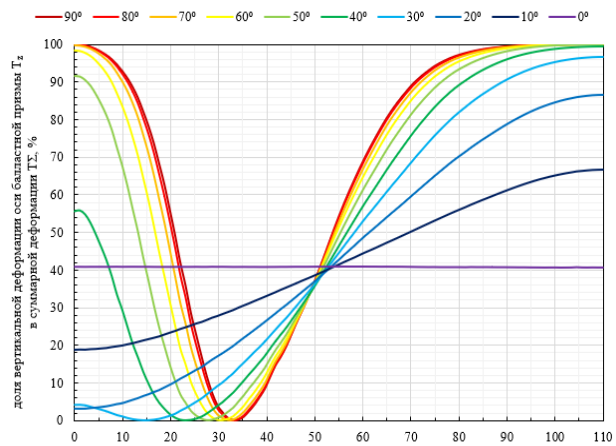
**Рисунок 9.** Вертикальные деформации оси основной площадки  $T_z$  при различных углах пересечения пути разломами (разработано автором)  
**Figure 9.** Vertical deformations  $T_z$  of the main roadbed axis different path faults intersection angles (developed by the author)



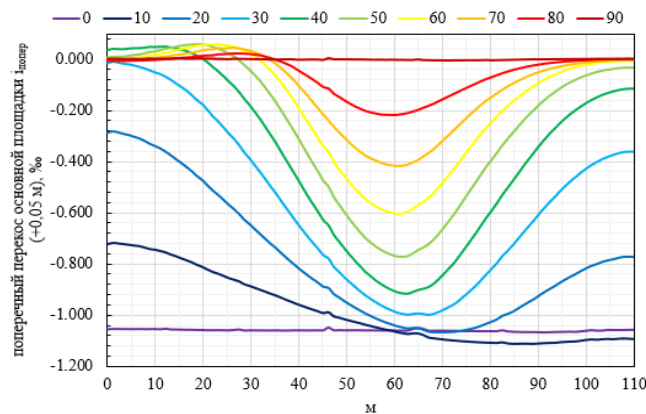
**Рисунок 10.** Доля поперечных горизонтальных деформаций оси основной площадки  $T_x$  в суммарных деформациях  $T_\Sigma$  (разработано автором)  
**Figure 10.** Fraction of lateral horizontal deformations  $T_x$  main roadbed axis in total deformations  $T_\Sigma$  (developed by the author)



**Рисунок 11.** Доля продольных горизонтальных деформаций оси основной площадки  $T_y$  в суммарных деформациях  $T_\Sigma$  (разработано автором)  
**Figure 11.** Longitudinal horizontal deformations  $T_y$  of the main roadbed axis in the total deformations  $T_\Sigma$  (developed by the author)



**Рисунок 12.** Доля вертикальных деформаций оси основной площадки  $T_z$  в суммарных деформациях  $T_\Sigma$  (разработано автором)  
**Figure 12.** The fraction of vertical deformations  $T_z$  of the main roadbed axis in the total deformations  $T_\Sigma$  (developed by the author)



**Рисунок 13.** Поперечный уклон основной площадки  $\Delta i_{\text{попер.}}$ , ‰ (разработано автором)

**Figure 13.** Main roadbed cross level  $\Delta i_{\text{mis}}$ , ‰ (developed by the author)

В таблице 2 приведены максимумы горизонтальных деформаций для различных углов  $\alpha$ . По рисунку 9 определяется изменение продольного профиля  $i_{\text{прод.}}$ , ‰ для различных углов  $\alpha$ . По результатам рисунка 13 определен поперечный уклон основной площадки  $i_{\text{попер. макс.}}$ , ‰ для различных углов  $\alpha$ .

**Таблица 2 / Table 2**

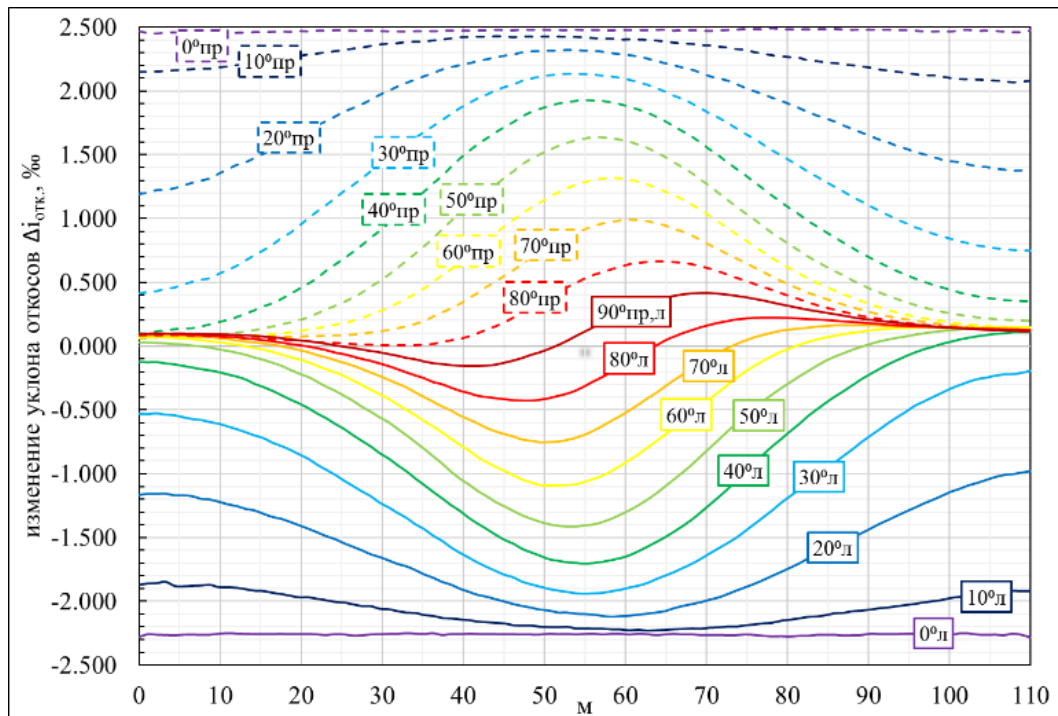
**Максимальные деформации и изменение уклонов основной площадки**

**Peak strain and changes in the main roadbed**

Угол $\alpha$ , град Angle $\alpha$ , deg	Максимум поперечных деформаций $T_x$ , мм Maximum lateral deformations $T_x$ , mm	Максимум продольных деформаций $T_y$ , мм Maximum longitudinal deformations $T_y$ , mm	Изменение продольного профиля $\Delta i_{\text{прод.}}$ , ‰ Profile elevation change $\Delta i_{\text{long.}}$ , ‰	Максимальный перекоз основной площадки $\Delta i_{\text{попер. макс.}}$ , ‰ Maximum oblique setting of the main roadbed $\Delta i_{\text{mis. max.}}$ , ‰
0	-24.18	-0.01	0.00	-1.07
10	-23.66	-3.49	0.25	-1.11
20	-22.28	-6.85	0.49	-1.07
30	-20.16	-9.93	0.71	-1.00
40	-17.46	-12.65	0.89	-0.92
50	-14.14	-14.78	1.05	-0.77
60	-10.69	-16.37	1.17	-0.60
70	-7.18	-17.54	1.26	-0.42
80	-3.66	-18.20	1.31	-0.22
90	-0.06	-18.36	1.32	-0.01

*Разработано автором / Developed by the author*

На рисунке 14 показано изменение уклонов правого и левого откосов насыпи при различных углах пересечения осей разлома и пути. При нормальном пересечении осей разлома и пути ( $\alpha = 90^\circ$ ) наблюдается наименьшее значение изменения уклонов откосов. С уположением угла пересечения значение изменения уклонов откосов возрастает, достигая максимума при  $\alpha = 0^\circ$ .



**Рисунок 14.** Изменение уклонов правого и левого откосов  $\Delta i_{отк.}, \%$  при различных углах пересечения осей разлома и пути (разработано автором)

**Figure 14.** Right and left slopes regrading  $\Delta i_{отк.}, \%$  at different path intersection faults angles (developed by the author)

При нормальном пересечении осей разлома и пути ( $\alpha = 90^\circ$ ) происходит одинаковое изменение уклонов левого и правого откосов насыпи. В зоне подвижного блока при поднятии происходит уположение откосов, достигая максимума  $0,42 \%$  в 15 метрах от оси разлома. В зоне неподвижного блока откосы становятся более крутыми, достигая максимума изменения  $0,15 \%$  в 15 метрах от оси разлома. При пологом пересечении осей пути и разлома ( $\alpha = 0^\circ$ ) происходит неравномерное изменение уклонов правого и левого откосов. Так при подвижке поднятия откос, находящийся в зоне неподвижного блока, становится более крутым со значением изменения  $2,27 \%$ . Откос в зоне подвижного блока становится более пологим, достигая значение изменения  $2,47 \%$ .

Обращает на себя внимание зона высокого градиента изменений уклонов откосов в диапазоне углов  $\alpha = 30^\circ - 70^\circ$ , включающая ширину разлома и 30 м в стороны от разлома.

Анализируя распределение поперечных горизонтальных деформации оси основной площадки  $T_x$  (рисунок 7) и продольных горизонтальных деформации оси основной площадки  $T_y$  (рисунок 8) при различных углах пересечения пути разломами, видно, что при нормальном пересечении ( $\alpha = 90^\circ$ ) наблюдаются наибольшие продольные деформации и наименьшие поперечные деформации оси. Поперечные деформации является наиболее опасными для откосов. Именно поэтому при нормальном пересечении осей

пути и разлома ( $\alpha = 90^0$ ) наблюдается минимальное значение изменения уклонов откосов, так как поперечные деформации минимальны.

При относительно небольших подвижках (до 0,05 м) для различных углов пересечения осей разлома и пути наблюдается различие в деформировании откосов (рисунок 14). При наличии более опасной сейсмической нагрузки это различие еще больше усилится. Учитывая, что именно поперечные деформации приводят к условиям потери устойчивости откосов, наилучшим вариантом при трассировании железнодорожного пути является вариант пересечения пути с разломными зонами по нормали ( $\alpha = 90^0$ ).

Исследования механики работы 6-метровой железнодорожной насыпи, пересекающей под разными углами в горизонтальной плоскости зону разлома шириной 10 м, показали, что в условиях вертикальных поднятий одного крыла разлома относительно другого, напряженно-деформированное состояние насыпи на уровне основной площадки изменяется следующим образом:

1. поперечные горизонтальные деформации увеличиваются в сторону неподвижного блока от зоны разлома по мере уположения его простираения относительно продольной оси насыпи (рисунок 10), принимая максимальные значения при значениях угла  $\alpha$  близкими к  $0^0$  (рисунок 7);
2. продольные горизонтальные деформации увеличиваются в сторону неподвижного блока от зоны разлома по мере приближения его простираения к нормали относительно продольной оси насыпи (рисунок 11), принимая максимальные значения при значениях угла  $\alpha$  близкими к  $90^0$  (рисунок 8);
3. для вертикальных деформаций при расположении разлома  $\alpha = 30^0-90^0$  характерно резкое снижение их вклада в пределах 20–30 м неподвижного блока за зоной разлома (рисунок 12);
4. максимальный уклон продольного профиля 1,32 ‰ фиксируется для случая  $\alpha = 90^0$  (табл. 2, рисунок 9);
5. максимальный перекося поперечного профиля по основной площадке фиксируется для случаев углов, близких к  $0^0$  (рисунок 13).

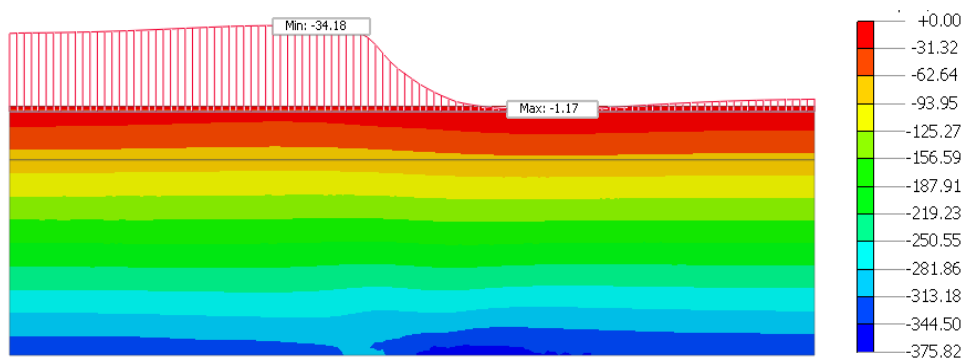
Обращает на себя внимание зона высокого градиента развития деформаций в диапазоне углов  $\alpha = 30^0-70^0$ , включающая ширину разлома и 30 м в стороны от разлома.

В связи с установленными закономерностями расположения более опасных мест показаны нормальные и касательные напряжения. При  $\alpha = 90^0$

на рисунке 15 приведены продольные напряжения  $\sigma_{yy}$  по оси основной площадки. Видно, что подвижки поднятия создают дополнительные усилия, уменьшая бытовые напряжения в зоне подвижного блока и разлома. В зоне неподвижного блока, наоборот, горизонтальные напряжения увеличиваются, достигая максимума в 20 метрах от разлома.

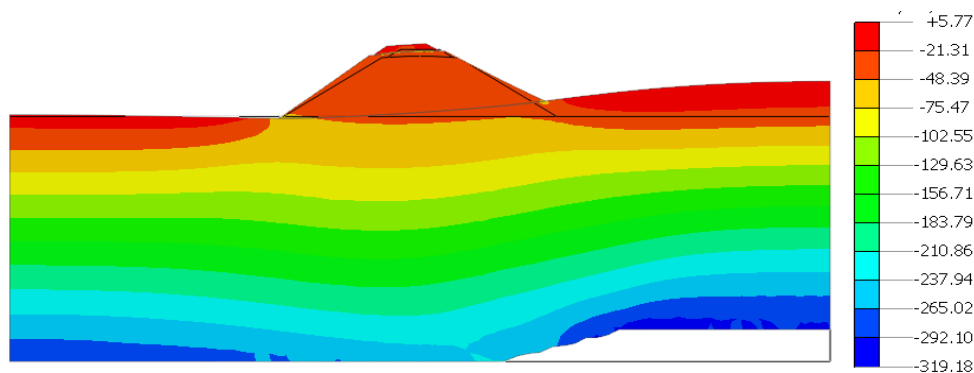
На рисунке 16 показаны горизонтальные напряжения  $\sigma_{xx}$  в поперечном сечении насыпи на неподвижном блоке на расстоянии 20 м от разлома для угла  $\alpha = 30^\circ$ .

На рисунках 17–18 в поперечном сечении неподвижного блока в 20 метрах от разлома при  $\alpha = 50^\circ$  приведены поперечные горизонтальные деформации  $T_x$  и касательные напряжения  $\tau_{zx}$ . Видно, что происходит изменение напряженного состояния, по сравнению с бытовым (рисунок 19). Так наблюдается увеличение касательных напряжений с 24,68 кПа до 36,06 кПа в приразломной зоне. Что предопределяет зону возможного сплыва.



**Рисунок 15.** Продольные напряжения  $\sigma_{yy}$ , кПа по оси основной площадки в результате подвижки +0.05 м (разработано автором)

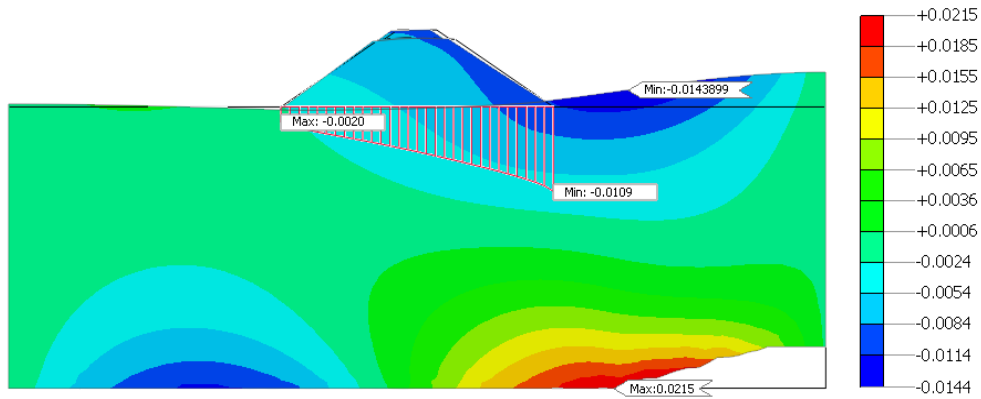
**Figure 15.** Longitudinal stresses  $\sigma_{yy}$ , kPa along the main roadbed axis as a result of movement +0.05 m (developed by the author)



**Рисунок 16.** Горизонтальные напряжения  $\sigma_{xx}$ , кПа в поперечном сечении насыпи на неподвижном блоке расстоянии 20 м от разлома для угла  $\alpha = 30^\circ$  (разработано автором)

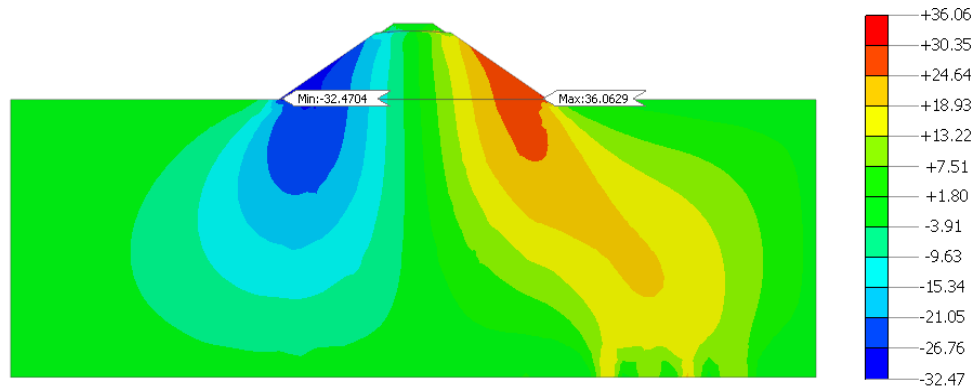
**Figure 16.** Horizontal stresses  $\sigma_{xx}$ , kPa in the embankment's cross-section on a fixed distance block of 20 m from the fault for an  $\alpha = 30^\circ$  angle (developed by the author)





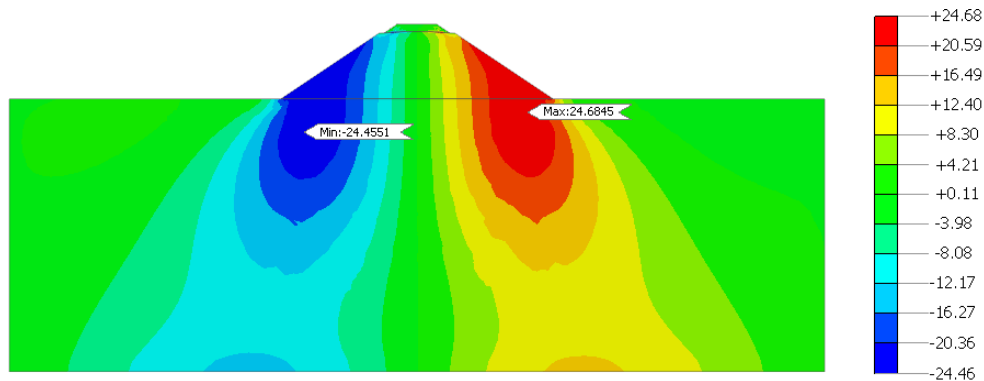
**Рисунок 17.** Поперечные деформации  $T_x$ , м в поперечном сечении неподвижного блока 20 метров перед разломом для  $\alpha = 50^\circ$  (разработано автором)

**Figure 17.** Lateral deformation  $T_x$ , m in the cross-section of a stationary block 20 meters before the fault for  $\alpha = 50^\circ$  (developed by the author)



**Рисунок 18** Касательные напряжения  $\tau_{zx}$ , кПа в поперечном сечении неподвижного блока 20 метров перед разломом для  $\alpha = 50^\circ$  (разработано автором)

**Figure 18** Shear stresses  $\tau_{zx}$ , kPa in the stationary block cross-section 20 meters before the fault for  $\alpha = 50^\circ$  (developed by the author)



**Рисунок 19** Касательные напряжения  $\tau_{zx}$ , кПа в поперечном сечении неподвижного блока 20 метров перед разломом для  $\alpha = 50^\circ$  до подвижки (разработано автором)

**Figure 19.** Shear stresses  $\tau_{zx}$ , kPa in the stationary block cross-section 20 meters ahead of the fault for  $\alpha = 50^\circ$  before displacement (developed by the author)

## Заключение

### Conclusion

1. С целью оценки влияния на работу железнодорожного пути геодеоформационных подвижек исследовалось напряженно-деформированное состояние железнодорожной насыпи высотой 6 м, пересекающей под разными углами разломы заданной шириной 10 м с подвижками поднятия до +0,05 м.

2. Анализ результатов исследования позволил установить ряд характерных закономерностей в изменении напряженно-деформированного состояния насыпей:

- при более пологом расположении простирания разломов относительно продольной оси насыпи возрастает вклад поперечных горизонтальных деформаций, перекося поперечного профиля основной площадки;
- при более нормальном положении простирания разлома относительно оси пути увеличивается вклад продольных горизонтальных деформаций, уклон продольного профиля;
- при расположении разлома  $\alpha = 30^{\circ} - 90^{\circ}$  характерно резкое снижение доли вертикальных деформаций в пределах 20–30 м неподвижного блока за зоной разлома;
- характерна зона высокого градиента развития деформаций в диапазоне углов  $\alpha = 30^{\circ} - 70^{\circ}$ , включающая ширину разлома и 30 м в стороны от разлома.

3. Установленные закономерности изменения напряженно-деформированного состояния железнодорожной насыпи позволяют для разных случаев простирания разломов прогнозировать в случае развития геодеоформационных воздействий в виде поднятия характерные повреждения пути в виде появления дополнительных усилий, формирования сплывов откоса насыпей и применения профилактических методов защиты.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Быкова Н.М.** Протяженные транспортные сооружения на активных геоструктурах. Технология системного подхода / Н.М. Быкова. – Новосибирск: Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр РАН "Издательство "Наука", 2008. – 212 с.
2. **Быкова Н.М.** Исследование влияния геодеформационных воздействий на работу железнодорожных насыпей / Н.М. Быкова, В.В. Четвертнова, А.К. Мозалевская // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2011. – Т 1. – С. 359–364. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21263207> (дата обращения: 09.01.2021).
3. **Ашпиз Е.С.** Паспортизация участков пути / Е.С. Ашпиз, А.Н. Савин // Мир транспорта. – 2012. – Т 10, № 5. – С. 20–23. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18060081> (дата обращения: 09.01.2021).
4. **Горшков Н.И.** Геомеханическое обеспечение проектирования транспортных сооружений: расчеты устойчивости и несущей способности / Н.И. Горшков, М.А. Краснов. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. – 169 с.
5. **Войтенко С.П.** Основы кинематической геодезии / С.П. Войтенко, Б.Б. Капочкин, И.Л. Учитель, В. Н. Ярошенко. – Одесса: Астропринт, 2007. – 264 с.
6. **Лебедева М.А.** Деформации земной поверхности вблизи трассы Байкало-Амурской железнодорожной магистрали по данным дифференциальной РСА интерферометрии / М.А. Лебедева, В.А. Саньков, А.И. Захаров, Л.Н. Захарова. – DOI <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-2-0209> // Геодинамика и тектонофизика. – 2016. – Т 7, № 2. – С. 315–328. – URL: <https://www.gt-crust.ru/jour/article/view/260/221> (дата обращения: 17.01.2021).
7. **Богданов А.И.** Сейсмические режимные наблюдения за деградацией многолетнемерзлых грунтов в основании земляного полотна станции Казанкан Восточно-Сибирской железной дороги / А.И. Богданов // Проектирование развития региональной сети железных дорог. – 2015. – № 3. – С. 52–58. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25080395> (дата обращения: 20.01.2021).
8. **Wu Z.** Hazards posed by active major faults along the Golmud-Lhasa railway route, Tibetan Plateau, China / Z. Wu, P.J. Barosh, D. Hu, Z. Wu, X. Zhao, P. Ye, W. Jiang. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.02.004> // Engineering Geology. – 2004. – Т 74, № 3–4. – С. 163–182. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013795204000754> (дата обращения: 17.01.2021).
9. **Huang Rq.** Engineering geological assessment for route selection of railway line in geologically active area: A case study in China / Rq. Huang, Yr. Li, K. Qu. – DOI <https://doi.org/10.1007/s11629-013-2660-2> // Journal of Mountain Science volume. – 2013. – Т 10, № 4. – С. 495–508. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11629-013-2660-2> (дата обращения: 17.01.2021).
10. **Rondoyanni T.** Active Faults Affecting Linear Engineering Projects: Examples From Greece / T. Rondoyanni, E. Lykoudi, A. Triantafyllou, M. Papadimitriou, I. Foteinos. – DOI <https://doi.org/10.1007/s10706-013-9641-7> // Geotechnical and Geological Engineering. – 2013. – Т 31, № 4. – С. 1151–1170. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10706-013-9641-7> (дата обращения: 18.01.2021).

11. **Семинский К.Ж.** Внутренняя структура континентальных разломных зон: прикладной аспект / К.Ж. Семинский и др. – отв. ред. С.И. Шерман. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, Филиал «Гео», 2005. – 292 с.
12. **Кузьмин Ю.О.** Современная геодинамика разломных зон: разломообразование в реальном масштабе времени / Ю.О. Кузьмин. – DOI <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0135> // Геодинамика и тектонофизика. – 2014. – Т 5, № 2. – С. 401–443. – URL: <https://www.gt-crust.ru/jour/article/view/47> (дата обращения: 22.01.2021).
13. **Кузьмин Ю.О.** Современные аномальные деформации земной поверхности в зонах разломов: сдвиг или раздвиг? / Ю.О. Кузьмин. – DOI <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0379> // Геодинамика и тектонофизика. – 2018. – Т 9, № 3. – С. 967–987. – URL: <https://www.gt-crust.ru/jour/article/view/633> (дата обращения: 27.01.2021).
14. **Колмогоров В.Г.** Современные кинематические параметры Восточной Сибири / В.Г. Колмогоров, В.А. Калюжин, Н.В. Одинцова // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2015. – Т 3, № 4. – С. 178–187. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23402108> (дата обращения: 20.01.2021).
15. **Шапиро Д.М.** Теория и расчетные модели оснований и объектов геотехники / Д.М. Шапиро. – Воронеж: Научная книга, 2012. – 163 с.

---

**Сведения об авторах:**

**Исаев Семен Александрович** – аспирант кафедры «Строительство железных дорог, мостов и тоннелей», ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», Иркутск, Россия, e-mail: [semen.isaev.1995@mail.ru](mailto:semen.isaev.1995@mail.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9232-347X>

---

Статья получена: 27.02.2021. Принята к публикации: 28.04.2021. Опубликовано онлайн: 12.05.2021.

## REFERENCES

1. Bykova N.M. [Extended transport facilities on active geostructures. Systems approach technology]. Novosibirsk: Academic Scientific Publishing, Production, Printing and Book Distribution Center of the Russian Academy of Sciences "Nauka" Publishing House; 2008. (In Russ.).
2. Bykova N.M. [Study of the influence of geodeformational effects on the operation of railway embankments]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona = Transport infrastructure of the Siberian region*. 2011; 1: 359–364. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21263207> (accessed 9th January 2021). (In Russ.).
3. Ashpiz E.S., Savin A.N. Certification of railway sections. *World of Transport and Transportation*. 2012; 10(5): 20–23. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18060081> (accessed 9th January 2021). (In Russ., abstract in Eng.).
4. Gorshkov N.I., Krasnov M.A. [Geomechanical support for the design of transport structures: calculations of stability and bearing capacity]. Khabarovsk: Publishers PNU; 2015. (In Russ.).
5. Voytenko S.P., Kapochkin B.B., Uchitel' I.L., Yaroshenko V.N. [Fundamentals of kinematic geodesy]. Odessa: Astroprint; 2007. (In Russ.).

6. Lebedeva M.A., Sankov V.A., Zakharov A.I., Zakharova L.N. Surface deformations near the Baikal-Amur railway from differential SAR interferometry data. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2016; 7(2): 315–328. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-2-0209>.
7. Bogdanov A.I. Seismic performance monitoring degradation of permafrost soils in the base of the subgrade station Kazankan Istsibrw. *Proyektirovaniye razvitiya regional'noy seti zheleznikh dorog = Designing the development of a regional railway network*. 2015; (3): 52–58. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25080395> (accessed 20th January 2021). (In Russ., abstract in Eng.).
8. Wu Z., Barosh P.J., Hu D., Wu Z., Zhao X., Ye P., Jianga W. Hazards posed by active major faults along the Golmud-Lhasa railway route, Tibetan Plateau, China. *Engineering Geology*. 2004; 74(3–4): 163–182. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.02.004>.
9. Huang Rq., Li Yr., Qu K. Engineering geological assessment for route selection of railway line in geologically active area: A case study in China. *Journal of Mountain Science volume*. 2013; 10(4): 495–508. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11629-013-2660-2>.
10. Rondoyanni T., Lykoudi E., Triantafyllou A., Papadimitriou M., Foteinos I. Active Faults Affecting Linear Engineering Projects: Examples from Greece. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2013; 31(4): 1151–1170. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s10706-013-9641-7>.
11. Seminskiy K.Zh. Internal structure of continental fault zones: applied aspect. Novosibirsk: Publishing House SB RAS; 2005. (In Russ.).
12. Kuzmin Yu.O. Recent geodynamics of fault zones: faulting in real time scale. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2014; 5(2): 401–443. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0135>.
13. Kuzmin Yu.O. Recent anomalous deformation of the ground surface in fault zones: shear or tensile faulting? *Geodynamics & Tectonophysics*. 2018; 9(3): 967–987. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0379>.
14. Kolmogorov V.G., Kalyuzhin V.A., Odintsova N.V. Current kinematic parameters of East Siberia. *Inter-ekspo Geo-Sibir' = Interexpo Geo-Siberia*. 2015; 3(4): 178–187. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23402108> (accessed 20th January 2021). (In Russ., abstract in Eng.).
15. Shapiro D.M. [Theory and design models of foundations and geotechnical objects]. Voronezh: Publishing house "Scientific book"; 2012. (In Russ.).

---

**Information about the authors:**

**Semyon A. Isaev** – Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia, e-mail: [semen.isaev.1995@mail.ru](mailto:semen.isaev.1995@mail.ru)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9232-347X>

---

Submitted: 27th January 2021. Revised: 28th April 2021. Published online: 12th May 2021.