ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья

Геомеханический анализ влияния строительства новых тоннелей в окрестности действующих подземных сооружений метрополитена на состояние грунтового массива

В.В.НАБАТОВ✉, А.С.ВОЗНЕСЕНСКИЙ

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

Как цитировать эту статью: Набатов В.В., Вознесенский А.С. Геомеханический анализ влияния строительства новых тоннелей в окрестности действующих подземных сооружений метрополитена на состояние грунтового массива // Записки Горного института. 2023. Т. 264. С. 926-936. EDN JNNOAW

Аннотация. Рассмотрена специфика поведения грунтового массива вблизи строящегося тоннеля в сложных горнотехнических условиях, выявленная благодаря совместной интерпретации результатов геофизических измерений в тоннеле и компьютерного моделирования. Описаны результаты полевых геофизических исследований, проводившихся для выявления областей разуплотненного грунта за обделкой в двух действующих тоннелях при последовательной проходке под ними двух новых тоннелей. Использовался метод анализа отклика обделки на ударное воздействие, предусматривающий вычисление его энергии. Установлено, что зоны разуплотнения в основном находятся в боковых нижних областях тоннеля. Для обоснования механизма образования полостей проведено компьютерное моделирование методом конечных элементов в системе COMSOL Multiphysics. Конечно-элементная модель построена на критерии Друкера – Прагера в варианте двухмерной постановки задачи. Показано, что при исходном положении двух старых тоннелей области разуплотнения могут развиваться в основном по бокам. При проходке новых двух тоннелей положение зон существенно меняется. Возникают зоны разуплотненных грунтов между тоннелями и наблюдается тенденция распространения областей к верхней точке тоннеля. По геофизическим данным отмечены временные задержки воздействия строящихся тоннелей на действующую линию, а также сокращение размеров областей разуплотненных пород со временем. Отмечается удовлетворительное совпадение положения областей разуплотнения и пустот, полученных геофизическим методом, с результатами численного моделирования.

Ключевые слова: тоннели метро; геофизические обследования; грунты; разуплотнения; конечно-элементное моделирование

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-05-00341).

Поступила: 27.10.2021 ***Принята: 20.06.2023*** ***Онлайн: 13.09.2023*** ***Опубликована: 25.12.2023***

Введение. Одной из наиболее острых проблем подземного строительства является проходка выработок в сложных горно-технологических условиях. В публикациях по этой теме часто идет речь о влиянии проходки на массив пород и его поверхность [1-3], о взаимодействии строящихся тоннелей с застройкой на поверхности [4-6] и с объектами городской инфраструктуры (дороги, коллекторы) [7]. В других исследованиях отражены вопросы взаимодействия новых тоннелей с уже эксплуатирующимися [8, 9] и выбора технологии строительства нескольких тоннелей, воздействующих друг на друга. Здесь рассматривается строительство параллельных тоннелей [10, 11], двух тоннелей на разной глубине [12] и анализ поведения сдвоенных тоннелей [13], вертикально совмещенных сдвоенных тоннелей [14]. Отдельной темой является строительство в сложных геологических условиях [15].

Безопасность строительства в этих случаях реализуется с помощью прогнозных моделей поведения массива. Здесь часто используют аналитические решения [16], полевые исследования [17, 18], различные статистические подходы [19, 20], численное [10, 21, 22] и физическое моделирование [13, 19, 23].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 264. С. 926-936
© В.В.Набатов, А.С.Вознесенский, 2023

Валидация прогнозных моделей чаще выполняется через геодезические поверхностные измерения, позволяющие следить за деформациями дневной поверхности, а также через внутритонельные измерения [24, 25], с помощью которых следят за осадкой колец. Геофизическая валидация и мониторинг используется реже [26]. В то же время геофизика может давать дополнительную информацию о состоянии массива, которую желательно использовать для анализа состояния массива пород.

Если изучение моделей говорит о высоких аварийных рисках, меняют технологию строительства и ее параметры [7, 12] (в частности, скорость проходки, осевую нагрузку, давление пригруза, параметры тампонажного раствора [12, 21, 27]), тщательнее следят за соблюдением параметров проходки [28].

Одна из существенных проблем строительства и эксплуатации тоннелей – возникновение полостей в заобделочном пространстве, которые могут приводить к критическим деформациям обделки и рельсового пути, осадкам дневной поверхности, несимметричному напряженно-деформированному состоянию (НДС) массива вокруг тоннеля, влиять на окружающую застройку [22, 29, 30]. Сочетание сложных горно-технологических условий и наличия полостей может существенно повышать риск развития аварийной ситуации. Поэтому исследования ведутся как в направлении оценки конкретного влияния полости на различные сооружения [31], так и в направлении развития способов выявления полостей за обделкой с целью последующего их тампонажа [32].

Наиболее распространенным подходом для поиска полостей являются геофизические методы, в частности Impact-Echo (IE) и Impulse Response (IR), георадиолокация [33-35]. IR реализуется как анализ отклика обделки на ударное воздействие. Отклик записывается регистрирующей сейсмоаппаратурой, далее на основании вычисляемых по сигналам параметров (например, по амплитуде сигнала, его энергии, затуханию колебаний отклика) принимается решение о наличии полости за обделкой. Если полость присутствует, то не демпфируемая грунтом обделка совершает более свободные колебания. Это приводит к увеличению энергии сигнала и уменьшению затухания колебаний. Метод IE опирается на регистрацию стоячих волн в обделке, так же возбуждаемых ударным способом, но по сравнению с IR меняются параметры удара. Если за обделкой есть полость, коэффициент отражения на границе обделка – грунт увеличивается, что приводит к более выраженным резонансным явлениям.

Высокочастотная георадиолокация подразумевает использование импульсного электромагнитного излучения. Излученный антенной волновой пакет отражается от границ в обделке и массиве и регистрируется принимающей антенной. Присутствие полости меняет параметры регистрируемых сигналов [36]. Общее направление развития описываемых методов (IE, IR, георадиолокации и др.) в последние годы происходит в сфере применения различных методов обработки получаемых сигналов и методов извлечения из них информативных параметров, атрибутов [32, 37-42].

Анализируя материалы публикаций, можно отметить, что анализ происходящего в массиве в процессе строительства тоннелей в сложных горно-геологических условиях часто представляет собой либо работу с прогнозными моделями, корректируемыми полевыми исследованиями деформаций поверхности, либо анализ только геофизических исследований как из тоннеля, так и с поверхности. Статьи по совместной интерпретации моделей и результатов геофизики встречаются относительно редко. Подобное исследование представлено в этой статье.

Цель работы – анализ поведения грунтового массива в сложной горнотехнической ситуации, подразумевающий прогнозирование полостей в заобделочном пространстве с помощью совместных геофизических исследований и конечно-элементного моделирования.

Методология. Объект исследования – грунтовый массив вокруг нескольких тоннелей Московского метрополитена. Массив сложен аллювиально-флювиогляциальными отложениями (глины, суглинки, пески мелкие и средней крупности). Ко времени проведения геофизических исследований участок породного массива уже содержал построенную линию метро, состоящую из двух тоннелей (рис.1). Для этих тоннелей будут использоваться обозначения «путь I» и «путь II». Ниже уровня построенной ветки запроектирована новая, тоже состоящая из двух тоннелей (рис.1). Для этих тоннелей использованы обозначения «ЛПТ» и «ППТ» – левый и правый перегонные тоннели, проходившиеся один за другим. В октябре – июне 2017 г. пройден ЛПТ, а в марте – апреле 2018 г. – ППТ. Обозначения тоннелей «путь I», «путь II» для действующих тоннелей

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© В.В.Набатов, А.С.Вознесенский, 2023

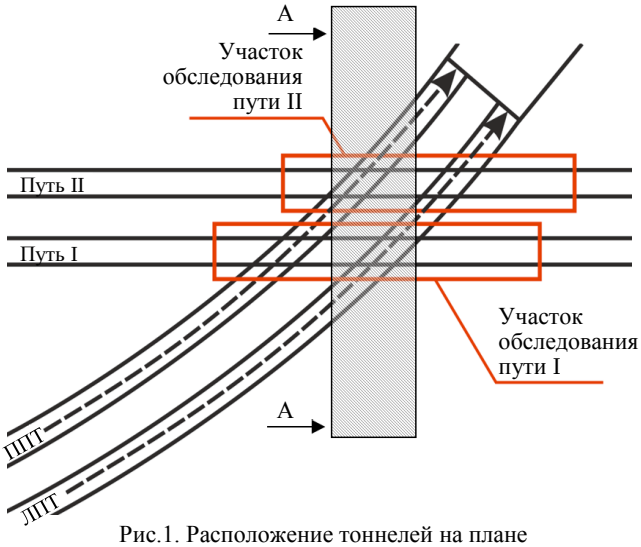


Рис.1. Расположение тоннелей на плане с указанием участков обследования (при проходке ППТ). Сечением А-А показан участок, где в одном пространстве присутствуют все четыре тоннеля

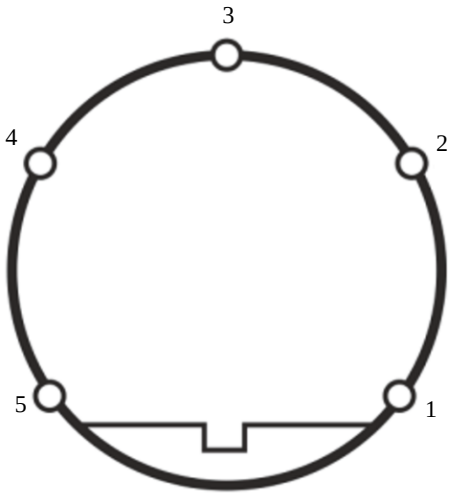


Рис.2. Схема расположения точек с указанием их номеров *n* на одном кольце обделки

и «ЛПТ», «ППТ» для строящихся соответствуют принятой в рабочей документации номенклатуре. Глубина заложения действующих тоннелей составляет 10,5 м, строящихся – 18,3 м (в уровне лотка); диаметры тоннелей – 5,9 м. В месте пересечения веток минимальное расстояние от лотка старых тоннелей до верхних точек новых составило всего 3 м.

Подобная сложная технологическая ситуация, представляющая собой четыре близко расположенных тоннеля (два действующих и два строящихся), потребовала двухразовой приостановки работы действующего метро на несколько дней и ведения мониторинга в процессе проходки. Мониторинг состоял из непрерывных маркшейдерских и периодических геофизических исследований. Геофизические исследования проводились для выявления полостей в заобделочном пространстве. Обследование велось из внутреннего пространства тоннеля по точкам с использованием метода IR. Схема расположения точек тестирования с их номерами *n* на кольце обделки представлена на рис.2. Участок обследовался несколькими подобными сечениями с шагом 5 м. При обследовании к обделке в точке тестирования прикладывался датчик сейсмических колебаний. Рядом с ним на расстоянии 20-30 см наносилась серия из пяти ударов, отклик обделки на ударное воздействие регистрировался цифровой сейсмической станцией и усреднялся. Если за обделкой находилась полость, обделка должна была себя вести как не прижатая грунтом мембрана. Это приводило к тому, что амплитуда отклика возрастала, а затухание колебательного сигнала уменьшалось.

При обработке зарегистрированных сигналов откликов из них извлекался ряд информативных параметров (атрибутов), способных указывать на наличие полости за обделкой. Наиболее часто использовался энергетический параметр

$$E = \sum_{i=0}^{m_{\max}-1} A_i^2 \Delta t,$$

где $m_{\max}$ – количество отсчетов в зарегистрированном сигнале; A_i – i-е амплитудное значение сигнала; Δt – интервал дискретизации по времени.

С помощью энергетического параметра E можно интегрально учитывать и увеличение амплитуды, и удлинение сигнала во времени, связанное с уменьшением затухания [15, 43].

Геофизические измерения проводились отдельными циклами – пять циклов при проходке ЛПТ, четыре – при проходке ППТ. Циклы геофизических измерений описаны в табл.1 и обозначены по принципу: Л1 – первый цикл измерений при проходке ЛПТ; П1 – первый цикл измерений при проходке ППТ. Контрольные циклы Л5к и П4к произведены через длительный отрезок времени после строительства. Эти схемы нужно читать следующим образом: Л1 и Л2 – пути I и II уже находятся в сечении А-А, ротор ТПМК (круг с перекрестием) находится перед сечением. В моменты

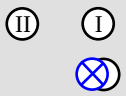
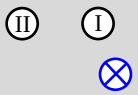
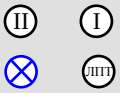
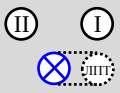
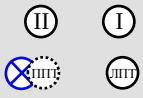
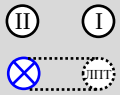
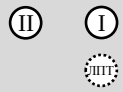
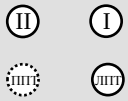
Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 264. С. 926-936
© В.В.Набатов, А.С.Вознесенский, 2023

проведения циклов измерений Л3 и Л4 ротор только что прошел через сечение А-А и продвинулся дальше. Поскольку тоннель к этому моменту уже появился в А-А, он показан пунктирным кругом. При проходке ППТ уже построен ЛПТ, поэтому он сразу показан в схемах. Для П1 ротор аналогично Л1 находится перед сечением А-А; для П2 он подходит к сечению; для П3 и П4 тоннель построен в сечении (пунктирная линия), ротор в этот момент находится за сечением.

Таблица 1

Расположение выработок и ротора щита при проведении измерений

Цикл	Дата (проходка ЛПТ)	Расположение выработок и ротора щита	Цикл	Дата (проходка ППТ)	Расположение выработок и ротора щита
Л1	28.10.2017 Ротор перед сечением А-А		П1	25.03.2018 Ротор перед сечением А-А	
Л2	29.10.2017 Ротор подходит к сечению А-А		П2	27.03.2018 Ротор подходит к сечению А-А	
Л3	30.10.2017 Ротор за сечением А-А		П3	28.03.2018 Ротор за сечением А-А	
Л4	31.10.2017 Ротор за сечением А-А		–	–	–
Л5к	09.11.2017 Контрольный цикл		П4к	17.04.2018 Контрольный цикл	

Примечания: ◯ – тоннели действующего метро; ⊗ – положение ротора щита при проходке новой линии; ◌ – только что построенный участок (в месте пересечения тоннелей).

Результаты исследований. По результатам проведения геофизических исследований и вычисления атрибутов строилась карта свойств контакта. Значения *E* располагались на развертке тоннеля в точках обследования, между точками значения *E* интерполировались. Наиболее часто использовался метод либо Криге, либо Шепарда. На картах по оси *X* отложен номер кольца *N*, по оси *Y* – номер точки *n*. На рис.3 представлены примеры таких карт для циклов П3 и П4к (обе карты сняты на I пути). Пороговые значения атрибута *E*, превышение которых означало, что за обделкой плохой контакт, получены при обследованиях, в которых качество контакта известно заранее.

Для сравнительного анализа карт желательно использовать их численные характеристики. В качестве подобной характеристики выбран процент площади карты, соответствующий плохому контакту *K*. На рис.4 представлены графики изменения *K* от цикла к циклу. Поскольку параметр *K* при обработке результатов подвержен влиянию выбранного интерполятора, было проведено дополнительное исследование. Одна из карт с высоким процентом *K* (цикл П3, карта I пути) рассчитана с шестью различными интерполяторами. Анализируя результаты, можно сделать вывод, что значения *K* изменяются слабо. Коэффициент вариации для этих данных составил 6,8 %.

С целью более глубокого анализа полученных результатов проведено моделирование в среде COMSOL Multiphysics, которое позволило объяснить некоторые из особенностей, наблюдаемых на картах свойств контакта и графиках *K*. Поскольку геофизические исследования проводились в промежутке между движениями поездов метро и не регистрировали колебания грунта и обделки, вызванные их движением, для корректного совместного анализа натурных и модельных результатов задача решалась в статической постановке.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© В.В.Набатов, А.С.Вознесенский, 2023

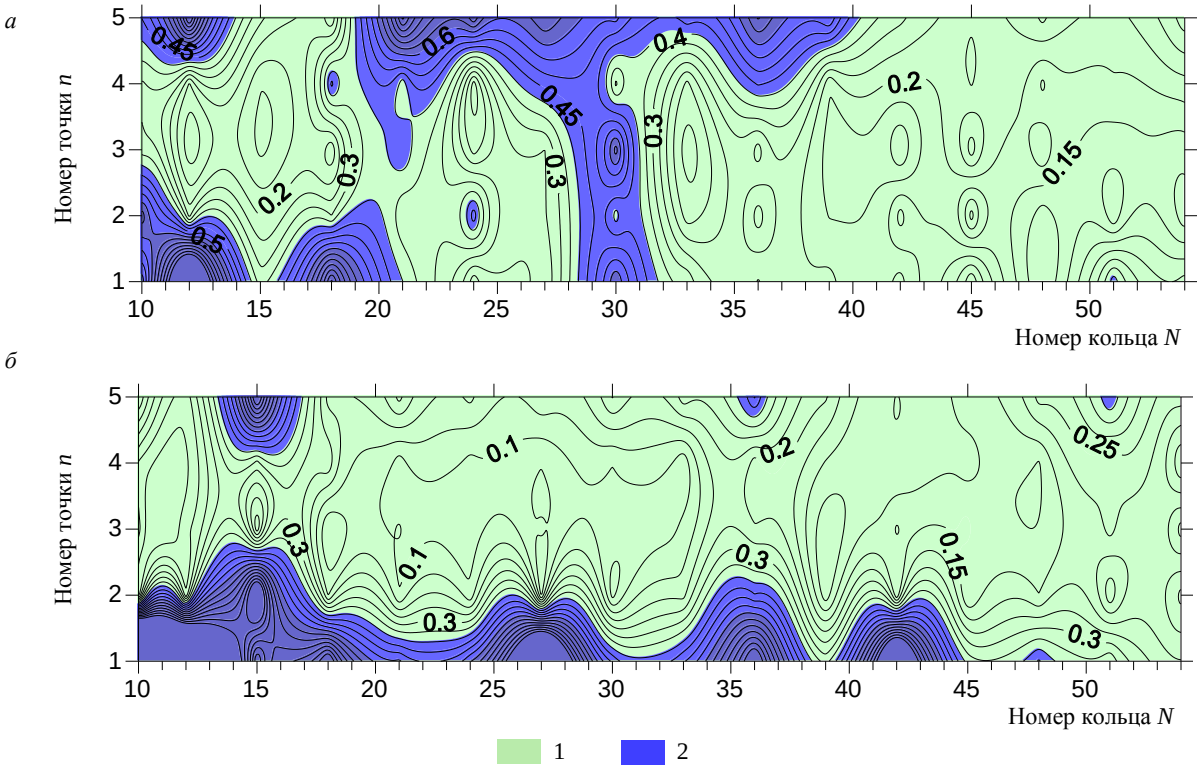


Рис.3. Примеры карт свойств контакта для I пути: циклы П3 (*а*) и П4к (*б*)
1 – нормальный контакт обделка – грунтовый массив; 2 – ослабленный контакт обделка – грунтовый массив

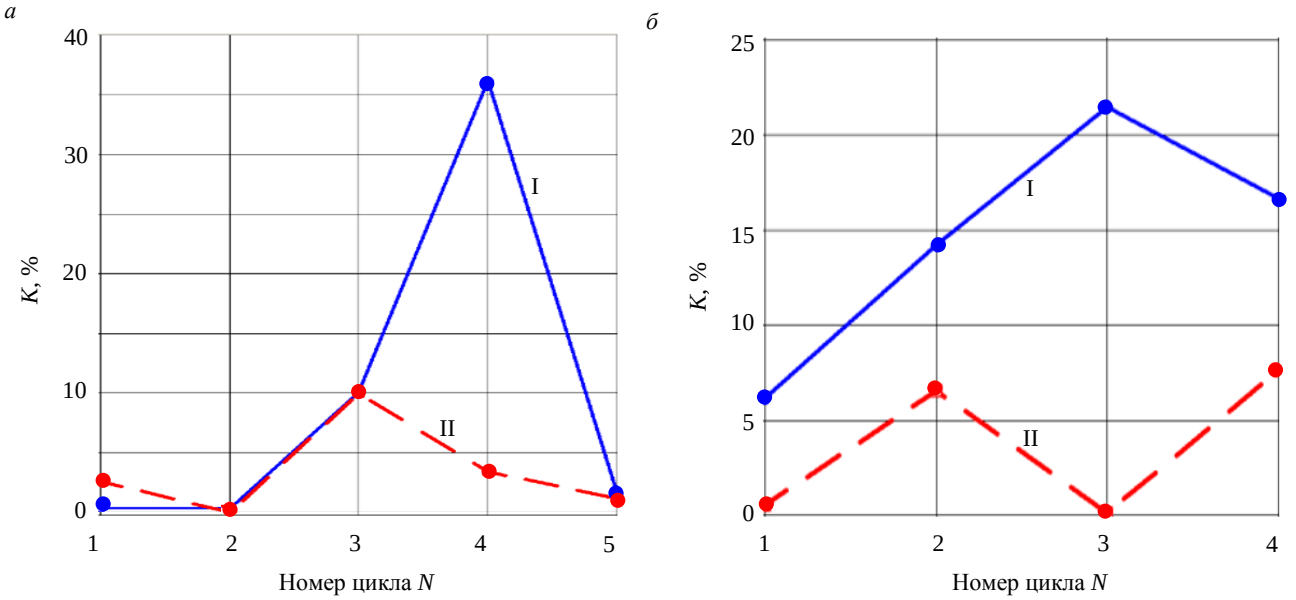


Рис.4. Графики изменения *K* в зависимости от номера цикла: Л1 – Л5к (*а*); П1 – П4к (*б*)
I-II – номер пути

Модель разрабатывалась на основе примера из библиотеки моделей COMSOL Multiphysics (Stresses in the soil surrounding a traffic tunnel). В основу положен критерий прочности Друкера – Прагера. При этом учитывалось, что при расчете в двухмерной постановке задачи моделирование выполняется в трехмерной постановке, соответствующей критерию Друкера – Прагера, но рассматриваются напряжения и деформации только в соответствующем двухмерном сечении. Поверхность текучести в этом случае определяется следующим образом:

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 264. С. 926-936
© В.В.Набатов, А.С.Вознесенский, 2023

$$F = 3\alpha\bar{\sigma} + \sigma_e - K;$$

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3};$$

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}\left(s_{xx}^2 + s_{yy}^2 + s_{zz}^2\right) + s_{xy}^2 + s_{yz}^2 + s_{zx}^2},$$

где $\bar{\sigma}$ – среднее напряжение; σ_e – эквивалентное девиаторное напряжение; α и K – константы материала; σ_i – главные напряжения; s_{ij} – девиаторные компоненты напряжения: $s_{xx} = \sigma_1 - \bar{\sigma}$; $s_{yy} = \sigma_2 - \bar{\sigma}$; $s_{zz} = \sigma_3 - \bar{\sigma}$; $s_{xy} = \tau_{xy}$; $s_{xz} = \tau_{xz}$; $s_{zx} = \tau_{zx}$.

Параметры критерия Друкера – Прагера рассчитываются через параметры критерия Мора – Кулона:

$$\alpha = \frac{\tan\varphi}{\sqrt{9 + 12\tan^2\varphi}};$$

$$K = \frac{3c}{\sqrt{9 + 12\tan^2\varphi}},$$

где c – сцепление, кПа; φ – угол внутреннего трения, град.

Использовалась двухмерная модель массива пород, представляющая собой однородный слой мощностью 65 м (идеализированный грунтовый массив), где располагались тоннели, которые моделировались как ничем не заполненное кольцо бетонной обделки. Свойства массива пород и обделки задавались, опираясь на результаты инженерно-геологических изысканий. Основной набор значения физических свойств модели (массив/обделка): угол внутреннего трения φ = 36°/–; сцепление c = 50/– кПа; удельный вес γ = 22/25 кН/м^3; модуль упругости E = 50/20000 МПа; коэффициент Пуассона ν = 0,3/0,2.

Начальное поле напряжений, задававшееся в модели, учитывало только гравитационную составляющую, поскольку для Московского региона тектоническая составляющая незначительна. Граничные условия – Free на дневной поверхности (возможны любые смещения), Roller на остальных границах (возможны смещения вдоль границы, невозможны перпендикулярно границе). На рис.5 представлена общая схема модели с указанием граничных условий в глобальной системе координат COMSOL Multiphysics.

Результаты моделирования показаны на рис.6. Здесь изолиниями даны значения эквивалентного девиаторного напряжения σ_e. Бинарной цветовой шкалой обозначены эффективные пластические деформации ε_{pl}. В областях, для которых $\varepsilon_{pl} > 0$, присутствуют пластические деформации, а где $\varepsilon_{pl} \leq 0$ – пластические деформации отсутствуют.

Проводился расчет нескольких моделей, отличающихся количеством тоннелей. Разрабатывались варианты с 1, 2, 3 и 4 тоннелями, которые располагались в соответствии с реальным положением выработок. По результатам моделирования можно отметить, что правый нижний тоннель распо-

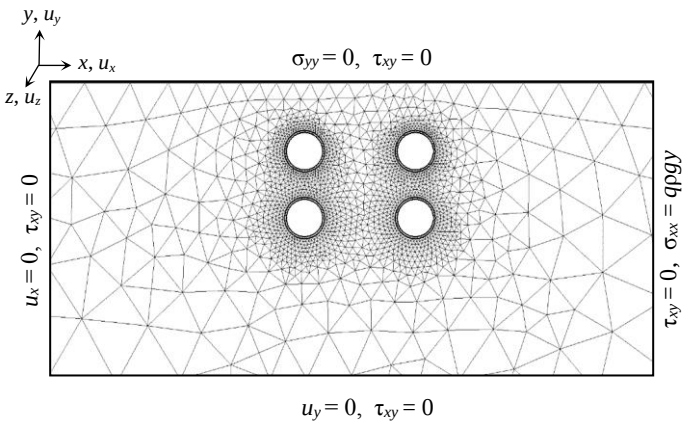


Рис.5. Общая схема модели с четырьмя тоннелями с разбивкой на конечные элементы и указанием граничных условий в глобальной системе координат COMSOL Multiphysics

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

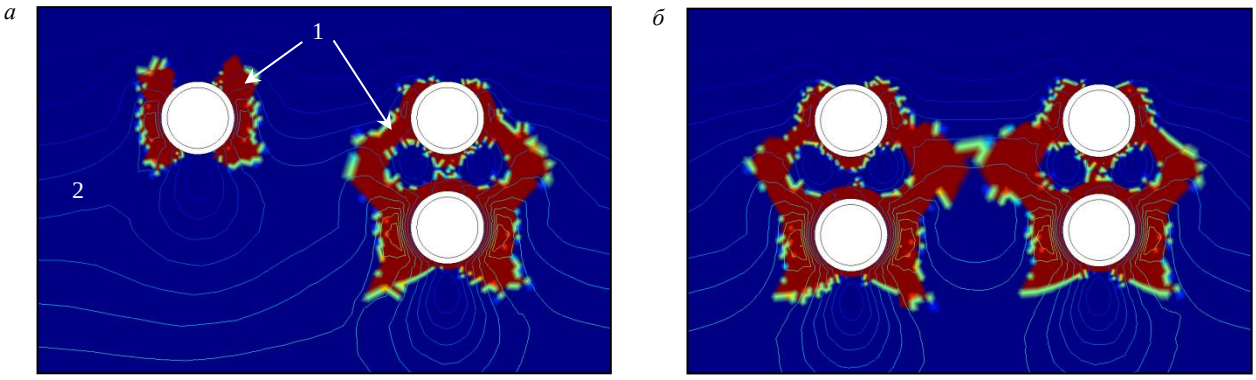


Рис.6. Результаты моделирования в виде значений эквивалентного девиаторного напряжения σ_e (изолинии) и эффективных пластических деформаций ε_{pl} (бинарная шкала): стадия после проходки ЛПТ (*а*) и ППТ (*б*)
1 – наличие ε_{pl}; 2 – отсутствие ε_{pl}; белые стрелки – участки, в которых развиваются области пластической деформации

лагался чуть выше, что соответствует реальному положению дел. На рис.6, *а* можно увидеть, как ведет себя массив грунта вокруг отдельного тоннеля (левого верхнего) и двух тоннелей, располагающихся один под другим (правые тоннели). На рис.6, *б* представлен вариант со всеми четырьмя тоннелями.

С целью оценки того, как сильно могут изменяться размеры и форма областей, проводилось дополнительное исследование с варьированием значений физических параметров модели P_i (где i – номер параметра, приведенный в табл.2). Работа велась на модели с одним тоннелем в массиве по методике однофакторного эксперимента, когда изменялся один фактор, а все остальные факторы были неизменны. Предварительное варьирование параметров обделки показало, что они практически не влияют на размеры и форму областей пластической деформации.

Таблица 2

Коэффициенты чувствительности, оценивающие влияние варьирования параметров грунтов на размеры областей пластических деформаций

i	1	2	3	4	5
P_i	ν	φ	c	E	γ
S_i	–6,3	–2	–1,7	0,12	1,75

Варьирование параметров грунта проводилось на пяти уровнях в рамках возможного максимума и минимума их значений. Использовались следующие диапазоны параметров: ν = 0,29-0,33, φ = 30-46°, c = 35-55 кПа, E = 20-60 МПа, γ = 16-28 кН/м^3.

В процессе проведения исследования стало ясно, что изменение значений P_i в основном влияет на размер областей пластических деформаций. Области могут либо прижиматься к обделке, либо отходить от нее, однако форма и площадь их прилегания к обделке меняются слабо. Также разработана методика оценки чувствительности модели к влиянию изменения значений параметра. В качестве критерия выбран размер области L. Поскольку области сохраняли компактность при всех вариантах значений параметров, в качестве L решено использовать максимальное расстояние от обделки до края области пластической деформации.

Построены графики зависимостей $L(\nu)$, $L(\varphi)$, $L(c)$, $L(E)$, $L(\gamma)$. Чтобы минимизировать влияние абсолютных величин, значения L и параметров ν, φ, c, E, γ были нормированы на их максимумы. Полученные графики в большинстве случаев показывали либо монотонный рост, либо монотонный спад. Поскольку графики обладали в основном слабой нелинейностью, было решено использовать их крайние значения для оценки чувствительности. На основании этих допущений для каждого параметра P_i вычислены коэффициенты чувствительности:

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 264. С. 926-936
© В.В.Набатов, А.С.Вознесенский, 2023

$$S_i = \frac{L\left(P_{\max,i}\right) - L\left(P_{\min,i}\right)}{P_{\max,i} - P_{\min,i}},$$

где i – номер параметра; $L(P_{\max,i})$, $L(P_{\min,i})$ – размеры L области пластических деформаций при максимальном и минимальном значении i-го параметра; $P_{\max,i}$ и $P_{\min,i}$ – максимальное и минимальное значение i-го параметра. Таким образом, S_i оценивает прирост размера области пластической деформации L относительно прироста значения параметра.

Полученные коэффициенты чувствительности представлены в табл.2. Анализируя результаты, можно отметить, что наименьшее воздействие на размер областей оказывает модуль Юнга, а наибольшее – коэффициент Пуассона. Отрицательное значение S_i говорит, что приращение параметра вызывает уменьшение размера области, положительное – ее увеличение. Подобные коэффициенты можно использовать для оценки того, насколько допустимо переносить результаты моделирования на другие площадки строительства, где другие свойства массива могут отличаться.

Анализируя результаты моделирования, отметим, что проходка трех и четырех тоннелей в массиве создает сложное НДС. Расположение зон пластической деформации вокруг отдельной выработки хорошо соответствует типичной наблюдаемой картине, получаемой при геофизическом обследовании. Так, например, в точках $n = 1$ и $n = 5$ полости возникают наиболее часто, $n = 2$ и $n = 4$ – реже, $n = 3$ – очень редко. Отмечая эту особенность, можно подтвердить типичные результаты геофизических исследований и предположить, что высокая энергия отклика на ударное воздействие соответствует зонам пластических деформаций за обделкой и связана с разуплотнением грунта в области контакта обделка – грунт, выявляемым при геофизических исследованиях.

Области пластической деформации могут смыкаться и образовывать единую систему, расположенную между четырьмя тоннелями (рис.6, *б*). Получение подобных результатов позволило объяснить некоторые особенности поведения областей разуплотнения, размеры которых оценены с помощью метода IR.

Обсуждение результатов. Проведенное моделирование при совместной с результатами полевых исследований интерпретацией позволило кроме подтверждения результатов геофизических исследований получить дополнительные выводы.

Наиболее заметные общие особенности, просматривающиеся по полученным графикам коэффициента K, состоят в том, что они содержат выраженные пики (см. рис.4). При развитии ситуации площади плохого контакта грунт – обделка сначала увеличиваются, затем уменьшаются. При этом деформации перераспределяются в массиве, и полости закрываются.

На рис.4, *а* наиболее выраженный пик, выявленный при проходке ЛПТ, находится на четвертом цикле съемки по I пути. То, что пик наблюдался уже после того, как щит прошел под площадкой обследования (на третьем цикле, см. табл.1), легко объяснить временем, которое необходимо, чтобы пластические деформации достигли зон массива, расположенных вблизи от тоннеля «путь I». На рис.6 видно, что происходят подобные процессы, и зоны пластических деформаций не только возникают вблизи от новых тоннелей, но и достигают старых тоннелей, а также изменяют форму зон разуплотнения вблизи действующих тоннелей.

Интересными особенностями обладает график проходки ППТ (см. рис.4, *б*). На графике пути I хорошо выражен пик на третьем цикле (см. рис.3, *а*). Особенность этой карты – области плохого контакта появляются даже в точке $n = 3$, где они бывают очень редко. Область, захватывающая точку $n = 3$, располагается в том месте, где щит проходил под тоннелем пути I ранее при проходке ЛПТ (рис 3, *а* при $N = 30$). Другими словами, проходка соседнего тоннеля (ППТ) повлияла на уже пройденный участок и обострила ситуацию. Результаты моделирования с четырьмя тоннелями показывают, как мог бы происходить подобный процесс. На рис.6, *б* видно, что области пластических деформаций могут возникать в пространстве между четырьмя тоннелями. И таким образом проходка ППТ может ухудшать ситуацию вблизи того места, где ранее велась проходка ЛПТ.

К сожалению, обе геофизические съемки на пути II в значительной степени подвержены влиянию случайных факторов. В обоих случаях на первых циклах графики пути II ведут себя похоже с графиками пути I, однако в местах пиков эти графики показывают провалы (массив консолидируется). Оба случая можно объяснить тем, что момент максимального разуплотнения просто не

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© В.В.Набатов, А.С.Вознесенский, 2023

попал в запланированную систему измерений, ограниченную технологическими особенностями работы метрополитена. Это особенно хорошо видно на циклах 3 и 4 проходки ППТ. Цикл 3 соответствует моменту, когда щит только отошел от точки пересечения с тоннелем «путь II». Скорее всего, пластические деформации не успели достичь массива вблизи этого тоннеля. Четвертый же цикл является контрольным и был выполнен позже третьего.

Стоит отметить еще одну особенность, которую удалось объяснить при совместной интерпретации результатов моделирования и полевых измерений. Тоннель, не испытавший влияние проходки нижележащей выработки, можно увидеть на рис.6, *а* (левый верхний тоннель). Ситуация меняется, когда под ним ведется проходка (рис.6, *б*). В этом случае зоны пластических деформаций на контакте грунт – обделка немного продвигаются вверх, к точке $n = 3$ (рис.6, *б*). На этих участках соотношения между нормальными и тангенциальными напряжениями в соответствии с критерием прочности Мора – Кулона приводят к образованию областей пластических деформаций, которые смещены вверх. Важно отметить, что речь идет не о площади этих областей, а о том, какая часть контакта грунт – обделка захвачена пластическими деформациями.

Анализируя карты свойств контакта, можно отметить, что при проходке под тоннелем в верхней его точке ($n = 3$) чаще начинают наблюдаться области разуплотнения. В качестве примера можно рассмотреть карту свойств контакта рис.6, *а*, полученную сразу после проходки под тоннелем. В отличие от карты рис.6, *б*, здесь сразу несколько верхних точек указывают на плохой контакт грунт – обделка.

Заключение. В процессе проходки двух новых тоннелей под двумя действующими тоннелями проведены исследования, подразумевающие использование геофизической съемки в действующих тоннелях, а также численного моделирования прогноза напряженно-деформированного состояния системы тоннели – грунтовый массив. На основании проведенных исследований и совместной интерпретации результатов удалось выявить следующее:

1. Наблюдается удовлетворительная сходимость между результатами геофизических исследований областей разуплотнения грунтового массива в заобделочном пространстве и численного моделирования зон пластической деформации.

2. Численное моделирование показало, что зоны пластической деформации в основном формируются вдоль боковых поверхностей тоннеля и должны редко наблюдаться в лотковой части и верхней точке тоннеля, что подтверждается результатами геофизических наблюдений. Стало ясно, что в массиве в сложной горнотехнической ситуации, когда рядом находятся четыре тоннеля, возможно развитие системы областей пластической деформации, присутствующих не только рядом с тоннелями, но и между ними.

3. При выполнении инструментальных измерений в обоих действующих тоннелях можно отметить возникновение задержки между моментом проходки нового тоннеля и образованием участков плохого контакта грунт – обделка действующего тоннеля. Через некоторое время процессы образования этих участков могут приобретать обратный характер развития (площади участков ослабленного контакта грунт – обделка сокращаются).

4. При строительстве в сложных горно-технологических условиях, подразумевающих проходку двух тоннелей под уже существующими двумя тоннелями, может наблюдаться сложное НДС, при котором может сложиться ситуация, когда зоны пластических деформаций развиваются не в точке, где строящийся тоннель проходит под действующим, а где проходка велась несколько месяцев назад. При этом за счет эффекта задержки в точке пересечения действующего тоннеля и строящегося в момент проходки области разуплотнения еще не наблюдаются.

5. При подобных условиях проходки может возникать ситуация, наблюдаемая как по геофизическим, так и по модельным исследованиям, когда участки плохого контакта будут развиваться не в стороны от точки пересечения действующих и строящихся тоннелей, а к верхней точке действующего тоннеля, формируя кольцо разуплотненных грунтов вокруг него.

Авторы выражают благодарность П.В.Николенко и Р.М.Гайсину за помощь в проведении полевых измерений.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

ЛИТЕРАТУРА

1. *Протосеня А.Г., Иовлев Г.А.* Прогноз пространственного напряженно-деформированного состояния физически нелинейного грунтового массива в призабойной зоне тоннеля // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 5. С. 128-139. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-128-139

2. *Карасев М.А.* Прогноз оседания земной поверхности при строительстве подземных сооружений глубокого заложения в условиях Санкт-Петербурга // Записки Горного института. 2013. Т. 204. С. 248-254.

3. *Karasev M.A., Belyakov N.A.* Estimation of Surface Settlements Troughs Due to Subway Station Construction in Claystone // Biosciences biotechnology research Asia. 2015. Vol. 12. № 3. P. 2505-2516. DOI: 10.13005/bbra/1930

4. *Bilotta E., Paolillo A., Russo G., Aversa S.* Displacements induced by tunnelling under a historical building // Tunnelling and Underground Space Technology. 2017. Vol. 61. P. 221-232. DOI: 10.1016/j.tust.2016.10.007

5. *Fei Peng, Shiju Ma.* Analysis of experimental data on the effect of double-line parallel shield tunneling on the deformation of adjacent buildings // Alexandria Engineering Journal. 2021. Vol. 60. Iss. 4. P. 3957-3963. DOI: 10.1016/j.aej.2021.02.034

6. *Jianwen Liu, Chenghua Shi, Mingfeng Lei et al.* A study on damage mechanism modelling of shield tunnel under unloading based on damage-plasticity model of concrete // Engineering Failure Analysis. 2021. Vol. 123. № 105261. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105261

7. *Chengyong Cao, Chenghua Shi, Mingfeng Lei et al.* Deformation Characteristics and Countermeasures of shallow and Large-span Tunnel Under-crossing the Existing Highway in Soft Soil: a Case Study // KSCE Journal of Civil Engineering. 2018. Vol. 22. Iss. 8. P. 3170-3181. DOI: 10.1007/s12205-017-1586-6

8. *Junlong Yang, Chen Liu, Qiushi Chen, Xiongyao Xie.* Performance of overlapped shield tunneling through an integrated physical model tests, numerical simulations and real-time field monitoring // Underground Space. 2017. Vol. 2. Iss. 1. P. 45-59. DOI: 10.1016/j.undsp.2017.04.002

9. *Qian Fang, Dingli Zhang, QianQian Li, Louis Ngai Yuen Wong.* Effects of twin tunnels construction beneath existing shield-driven twin tunnels // Tunnelling and Underground Space Technology. 2015. Vol. 45. P. 128-137. DOI: 10.1016/j.tust.2014.10.001

10. *Do N.A., Dias D., Oreste P., Djeran-Maigre I.* Three-dimensional numerical simulation of a mechanized twin tunnels in soft ground // Tunnelling and Underground Space Technology. 2014. Vol. 42. P. 40-51. DOI: 10.1016/j.tust.2014.02.001

11. *Chen R.P., Zhu J., Liu W., Tang X.W.* Ground movement induced by parallel EPB tunnels in silty soils // Tunnelling and Underground Space Technology. 2011. Vol. 26. Iss. 1. P. 163-171. DOI: 10.1016/j.tust.2010.09.004

12. *Minglun Yin, Hua Jiang, Yusheng Jiang et al.* Effect of the excavation clearance of an under-crossing shield tunnel on existing shield tunnels // Tunnelling and Underground Space Technology. 2018. Vol. 78. P. 245-258. DOI: 10.1016/j.tust.2018.04.034

13. *Xu Zhang, Chengping Zhang, Bo Min, Youjun Xu.* Experimental study on the mechanical response and failure behavior of double-arch tunnels with cavities behind the liner // Geomechanics and Engineering. 2020. Vol. 20. № 5. P. 399-410. DOI: 10.12989/gae.2020.20.5.399

14. *Li X.G., Yuan D.J.* Response of a double-decked metro tunnel to shield driving of twin closely under-crossing tunnels // Tunnelling and Underground Space Technology. 2012. Vol. 28. P. 18-30. DOI: 10.1016/j.tust.2011.08.005

15. *Esen Sze Y.S., Jim Yee T.C., Henry Kim I. et al.* Tunnelling undercrossing existing live MRT tunnels // Tunnelling and Underground Space Technology. 2016. Vol. 57. P. 241-256. DOI: 10.1016/j.tust.2016.02.013

16. *Rongzhu Liang, Tangdai Xia, Yi Hong, Feng Yu.* Effects of above-crossing tunnelling on the existing shield tunnels // Tunnelling and Underground Space Technology. 2016. Vol. 58. P. 159-176. DOI: 10.1016/j.tust.2016.05.002

17. *Hua Jiang, Jinguo Cheng, Jinxun Zhang et al.* Principle and application of in-situ monitoring system for ground displacement induced by shield tunnelling // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021. Vol. 112. № 103905. DOI: 10.1016/j.tust.2021.103905

18. *Kannangara K.K.P.M., Zhi Ding, Wan-Huan Zhou.* Surface settlements induced by twin tunneling in silty sand // Underground Space. Vol. 7. Iss. 1. P. 58-75. DOI: 10.1016/j.undsp.2021.05.002

19. *Zhang W.G., Li H.R., Wu C.Z. et al.* Soft computing approach for prediction of surface settlement induced by earth pressure balance shield tunneling // Underground Space. 2021. Vol. 6. Iss. 4. P. 353-363. DOI: 10.1016/j.undsp.2019.12.003

20. *Sen Zhang, Wanyin Wu, Zhao Yang et al.* MLLBC: A Machine Learning Toolbox for Modeling the Loss Rate of the Lining Bearing Capacity // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 50256-50267. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2979833

21. *Zuliang Zhong, Chao Li, Xinrong Liu et al.* Analysis of ground surface settlement induced by the construction of mechanized twin tunnels in soil-rock mass mixed ground // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021. Vol. 110. № 103746. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103746

22. *Ochmański M., Spacagna R.L., Modoni G.* 3D numerical simulation of consolidation induced in soft ground by EPB technology and lining defects // Computers and Geotechnics. 2020. Vol. 128. № 103830. DOI: 10.1016/j.compgeo.2020.103830

23. *Meschke G.* From advance exploration to real time steering of TBMs: A review on pertinent research in the Collaborative Research Center «Interaction Modeling in Mechanized Tunneling» // Underground Space. 2018. Vol. 3. Iss. 1. P. 1-20. DOI: 10.1016/j.undsp.2018.01.002

24. *Baogang Mu, Xiaokun Xie, Xing Li et al.* Monitoring, modelling and prediction of segmental lining deformation and ground settlement of an EPB tunnel in different soils // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021. Vol. 113. № 103870. DOI: 10.1016/j.tust.2021.103870

25. *Gang Zheng, Xinyu Yang, Haizuo Zhou et al.* A simplified prediction method for evaluating tunnel displacement induced by laterally adjacent excavations // Computers and Geotechnics. 2018. Vol. 95. P. 119-128. DOI: 10.1016/j.compgeo.2017.10.006

26. *Baghban Golpasand M.R., Do N.A., Dias D.* Impact of pre-existent Qanats on ground settlements due to mechanized tunneling // Transportation Geotechnics. 2019. Vol. 21. № 100262. DOI: 10.1016/j.trgeo.2019.100262

27. *Chakeri H., Ozcelik Y., Unver B.* Effects of important factors on surface settlement prediction for metro tunnel excavated by EPB // Tunnelling and Underground Space Technology. 2013. Vol. 36. P. 14-23. DOI: 10.1016/j.tust.2013.02.002

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

28. *Асторе Д., Каррьери Д., Кириотти Е. и др.* Механизированная проходка тоннелей в городских условиях: методология проектирования и управления строительством. СПб: Изд-во Политехнического университета, 2013. 582 с.

29. *Jifei Wang, Hongwei Huang, Xiongyao Xie, Bobet A.* Void-induced liner deformation and stress redistribution // Tunnelling and Underground Space Technology. 2014. Vol. 40. P. 263-276. DOI: 10.1016/j.tust.2013.10.008

30. *Leung C., Meguid M.A.* An experimental study of the effect of local contact loss on the earth pressure distribution on existing tunnel linings // Tunnelling and Underground Space Technology. 2011. Vol. 26. Iss. 1. P. 139-145. DOI: 10.1016/j.tust.2010.08.003

31. *Huai-Na Wu, Shui-Long Shen, Ren-Peng Chen, Annan Zhou.* Three-dimensional numerical modelling on localised leakage in segmental lining of shield tunnels // Computers and Geotechnics. 2020. Vol. 122. № 103549. DOI: 10.1016/j.compgeo.2020.103549

32. *Hai-xiang Tang, Shi-guo Long, Ting Li.* Quantitative evaluation of tunnel lining voids by acoustic spectrum analysis // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 228. № 116762. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116762

33. *Azari H., Nazarian S., Yuan D.* Assessing sensitivity of impact echo and ultrasonic surface waves methods for nondestructive evaluation of concrete structures // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 71. P. 384-391. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.056

34. *Davis A.G., Lim M.K., Petersen C.G.* Rapid and economical evaluation of concrete tunnel linings with impulse response and impulse radar non-destructive methods // NDT & E International. 2005. Vol. 38. Iss. 3. P. 181-186. DOI: 10.1016/j.ndteint.2004.03.011

35. *Kravitz B., Mooney M., Karlovsek J. et al.* Void detection in two-component annulus grout behind a pre-cast segmental tunnel liner using Ground Penetrating Radar // Tunnelling and Underground Space Technology. 2019. Vol. 83. P. 381-392. DOI: 10.1016/j.tust.2018.09.032

36. *Набатов В.В., Вознесенский А.С.* Георадиолокационное обнаружение полостей в заобделочном пространстве тоннелей метрополитенов // Горный журнал. 2015. № 2. С. 15-20. DOI: 10.17580/gzh.2015.02.03

37. *Ki-Il Song, Gye-Chun Cho.* Bonding state evaluation of tunnel shotcrete applied onto hard rocks using the impact-echo method // NDT & E International. 2009. Vol. 42. Iss. 6. P. 487-500. DOI: 10.1016/j.ndteint.2009.02.007

38. *Chaudhary M.T.A.* Effectiveness of Impact Echo testing in detecting flaws in prestressed concrete slabs // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 47. P. 753-759. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.021

39. *Guoze Lu, Wenke Zhao, Forte E. et al.* Multi-frequency and multi-attribute GPR data fusion based on 2-D wavelet transform // Measurement. 2020. Vol. 166. № 108243. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108243

40. *Николенко П.В., Набатов В.В.* Об обеспечении помехозащищенности геоакустического контроля критических напряжений в породном массиве // Горный журнал. 2015. № 9. С. 33-35. DOI: 10.17580/gzh.2015.09.06

41. *Шкуратник В.Л., Николенко П.В., Кормнов А.А.* Обоснование метода ультразвукового корреляционного каротажа для структурной диагностики кровли горных выработок // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. № 3. С. 41-47.

42. *Fedorova L.L., Sokolov K.O., Savvin D.V., Kulyandin G.A.* Analysis of variance amplitudes of signals for detecting structural permafrost heterogeneities by ground penetrating radar // Proceedings of the 15th International Conference on Ground Penetrating Radar, 30 June – 4 July 2014, Brussels, Belgium. IEEE, 2014. P. 301-305. DOI: 10.1109/ICGPR.2014.6970433

43. *Набатов В.В.* Оценка состояния заобделочного пространства тоннелей метрополитенов по спектральным атрибутам добротности колебаний системы «обделка – грунт» // Горный журнал. 2019. № 7. С. 67-70. DOI: 10.17580/gzh.2019.07.03

***Авторы*: В.В.Набатов,** *канд. техн. наук, доцент, nv4@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0047-0462* (*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия*), **А.С.Вознесенский,** *д-р техн. наук, профессор, https://orcid.org/0000-0003-0926-1808* (*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0