

# Численное моделирование геомеханических процессов при строительстве перегонных тоннелей Московского метрополитена

Д.Ж. Акматов✉, А.А. Тихонов, Д.З. Каппушев

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация  
✉ dastan.akmatov.1994@mail.ru

**Резюме:** Крупнейший мегаполис и главный деловой центр страны – г. Москва – каждый год активно расширяет свои границы. В связи с этим перед столицей России стоит вопрос развития и расширения транспортной инфраструктуры. Согласно плану строительства Московского метрополитена в 2021 г. общая протяженность линий превысит 450 км, а большая кольцевая линия станет одной из самых протяженных в мире. При строительстве новых станций метро специалисты сталкиваются со сложными инженерно-геологическими и гидрогеологическими условиями. Снижение и предотвращение аварий при подземном строительстве базируется на учете всех уровней горно-строительного производства. В статье представлен комплексный анализ факторов, влияющих на выбор и обоснование технологии строительства подземных сооружений. Приведены цели геомеханического мониторинга и мероприятия по геомеханической безопасности горных работ. Было произведено численное моделирование геомеханических процессов при строительстве перегонных тоннелей в программном продукте Map3D. При выполнении моделирования рассматривался тоннель круглого поперечного сечения, расположенный в неоднородном породном массиве. Диаметр сечения принят равным 6 м, глубина перегонного тоннеля – от 15 до 35 м.

**Ключевые слова:** геомеханика, геомеханические процессы, физико-механические свойства грунтов, подземное пространство, геологические и гидрогеологические условия, деформация

**Для цитирования:** Акматов Д.Ж., Тихонов А.А., Каппушев Д.З. Численное моделирование геомеханических процессов при строительстве перегонных тоннелей Московского метрополитена. *Горная промышленность*. 2022;(1):133–137. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1-133-137>

## Numerical modeling of geomechanical processes in construction of the Moscow Metro running tunnels

D.Zh. Akmatov✉, A.A. Tikhonov, D.Z. Kappushev

National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russian Federation  
✉ dastan.akmatov.1994@mail.ru

**Abstract:** The largest megalopolis and the main business center of the country, the city of Moscow, is actively expanding from year to year. In this context, the Russian capital is faced with the challenge of developing and expanding its transport infrastructure. According to the 2021 construction plan of the Moscow Metro the total length of the lines will exceed 450 km, and the Big Circle Line will become one of the longest in the world. During the construction of new metro stations specialists face difficult engineering, geological and hydrogeological conditions. Reducing the risks and preventing accidents during underground construction is relying on accounting of all the levels of the excavation and construction works. The article presents a comprehensive analysis of the factors that affect the choice and justification of underground construction technologies. The paper presents the objectives of geomechanical monitoring and measures for geomechanical safety of excavations. Numerical modeling of geomechanical processes during the construction of the running tunnels was made using the Map3D Software. The simulation considered a tunnel of circular cross-section passing through a non-uniform rock mass. The diameter of the cross-section was accepted to be 6 m with the depth of the driving tunnel varying from 15 to 35 m.

**Keywords:** geomechanics, geomechanical processes, physical and mechanical properties of soils, underground space, geological and hydrogeological conditions, deformation

**For citation:** Akmatov D.Zh., Tikhonov A.A., Kappushev D.Z. Numerical modeling of geomechanical processes in construction of the Moscow Metro running tunnels. *Russian Mining Industry*. 2022;(1):133–137. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1-133-137>

**Введение**

Крупнейший мегаполис и главный деловой центр России – г. Москва – каждый год активно расширяет свои границы. В связи с этим перед столицей нашей страны стоит вопрос развития и расширения транспортной инфраструктуры. Согласно плану строительства Московского метрополитена в 2021 г. общая протяженность линий превысит 450 км, а большая кольцевая линия станет одной из самых протяженных в мире. При строительстве новых станций метро в условиях масштабной инфраструктуризации специалисты сталкиваются со сложными инженерно-геологическими и гидрогеологическими условиями. Нередко плохая изученность геологических и гидрогеологических условий приводит к инцидентам и авариям на производстве. Для своевременного выявления и недопущения производственных аварий маркшейдерская служба проводит наблюдения за безопасной эксплуатацией недр. Снижение и предотвращение аварий при подземном строительстве базируется на учете всех уровней горно-строительного производства, начиная со стадии получения геологической информации, прогноза, моделирования, составления проекта строительства и заканчивая выбором эффективных мероприятий инженерной защиты окружающей среды при эксплуатации сооружения.

Цель исследования – выполнить численное моделирование геомеханических процессов при строительстве перегонных тоннелей Московского метрополитена. Моделирование было произведено в программном продукте Mar3D. При его выполнении рассматривался тоннель круглого поперечного сечения, расположенный в неоднородном породном массиве, диаметр которого принят равным 6 м, а глубина перегонного тоннеля – от 15 до 35 м. Для выполнения моделирования необходимо провести комплексный анализ факторов, влияющих на выбор и обоснование технологии строительства подземных сооружений, а также определить цели геомеханического мониторинга и мероприятия по геомеханической безопасности горных работ.

**Аварии при подземном строительстве**

Аварии, случившиеся в Москве при подземном строительстве станций и перегонных тоннелей метрополитена, всегда оказывали разрушительное влияние на инженерные сооружения, автотранспортные магистрали и другие объекты инфраструктуры.

Не обошлось без аварийных ситуаций и при строительстве в северо-западной части Москвы – в промышленной зоне произошло обрушение инженерного сооружения (автосервиса). Именно под этим объектом велось строительство камеры для металлоконструкций, что и привело к оседанию земной поверхности и в дальнейшем к обрушению (рис. 1).

Вторая авария произошла в западной части Москвы, был частично разрушен тоннель с последующим затоплением. На земной поверхности в месте обрушения тоннеля можно было наблюдать просадку грунта. Затопленный тоннель получил необратимые деформации, в связи с чем требовалась полная переборка аварийного участка тоннеля со строительством ремонтной камеры (рис. 2).

Третья авария произошла на Южном участке Третьего пересадочного контура. На территории, принадлежащей ПАО «Газпром», расположенной по адресу: ул. Наметкина, д. 16, 29.06.2020 года при проходке левого перегонного тоннеля от ст. «Зюзино» до ст. «Калужская» была обнаружена просадка дневной поверхности, повреждены существующие ограждения и конструкции в районе парковой зоны (рис. 3).



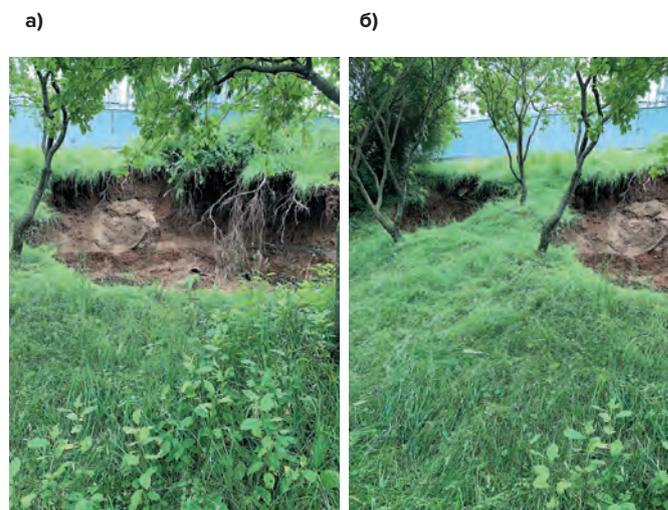
**Рис. 1**  
Участок Шелепиха – Хорошёвская

**Fig. 1**  
The Shelepickha–Khoroshevskaya section



**Рис. 2**  
Участок Шелепиха – Хорошёвская

**Fig. 2**  
The Borovskoye shosse-Sointsevo section



**Рис. 3**  
Участок Зюзино – Калужская

**Fig. 3**  
The Zyuzino-Kaluzhskaya section

Негативным фактором при строительстве подземных сооружений являются деформации земной поверхности. Они происходят из-за изменений напряженного состояния массива. Деформации оказывают негативное влияние на здания и сооружения, расположенные в зоне ее влияния.

Большая проблема, которую пытаются решать маркшейдеры – это влияние геомеханических процессов при одновременном строительстве подземных и наземных сооружений. Сложность проблемы заключается в том, что в один и тот же момент времени происходит процесс уплотнения и разуплотнения грунта. Данные процессы при некачественном расчете могут привести к аварии в одном случае и чрезмерно завышенному запасе точности – в другом [1].

Провалы земной поверхности, такие как на рис. 3, являются следствием геомеханических процессов, вызванных деформацией горных выработок. Прочная порода, залегающая у земной поверхности, создает так называемый эффект «порода моста». Под его влиянием геомеханические процессы происходят не сразу, а с большим отставанием во времени. При достижении предельных деформаций происходит внезапное обрушение породы, что и приводит к провалам, представленным ранее [1].

#### Расчет возможных зон проявления провалов

Для расчета возможных зон проявления провалов необходимо проводить геомеханические работы, такие как оценка состояния массива горных пород. Данный расчет производится на основании геологических данных, свойств толщи и тектоники района. Оценка устойчивости пород определяется по формуле [1]:

$$\eta = \frac{\gamma \cdot H}{R_M},$$

где

$\eta$  – безразмерная величина;

$\gamma$  – плотность породы, т/м<sup>3</sup>;

$H$  – глубина горных работ;

$R_M$  – прочность пород на сжатие в массиве, т/м<sup>2</sup>.

Поэтому для предварительной оценки устойчивости пород при проходке горной выработки рекомендуется использовать следующие соотношения: если  $\eta < 1$ , массив находится в устойчивом состоянии; при  $\eta = 1$  он находится в предельном состоянии, а при  $\eta > 1$  – в запредельном, неустойчивом состоянии [1].

Отличным примером решения задачи оседания земной поверхности будет строительство перегонного тоннеля метрополитена на участке Зюзино – Калужская в г. Москве (рис. 3).

Было выполнено численное моделирование тоннеля, расположенного в неоднородной среде, диаметром 6 м и глубиной залегания от 15 до 35 м.

Для проведения данных работ необходимо подобрать подходящее программное обеспечение. Нами было выбрано ПО Mar3D. Оно разработано с использованием метода косвенных граничных элементов и включает одновременное использование фиктивной силы (FF), неоднородности смещения (DD) и специальных патентованных граничных элементов.

Физико-механические свойства грунтов согласно данным инженерно-геологических изысканий представлены в табл. 1. Параметры моделей среды подбирались с учетом этих данных.

Таблица 1  
Параметры модели горной породы

Table 1  
Rock model parameters

Параметры сплошной среды	Величина показателя
Модуль деформации, МПа	1000
Коэффициент поперечной деформации	0.29
Сцепление, МПа	0.05
Угол внутреннего трения, град	20.7
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2000

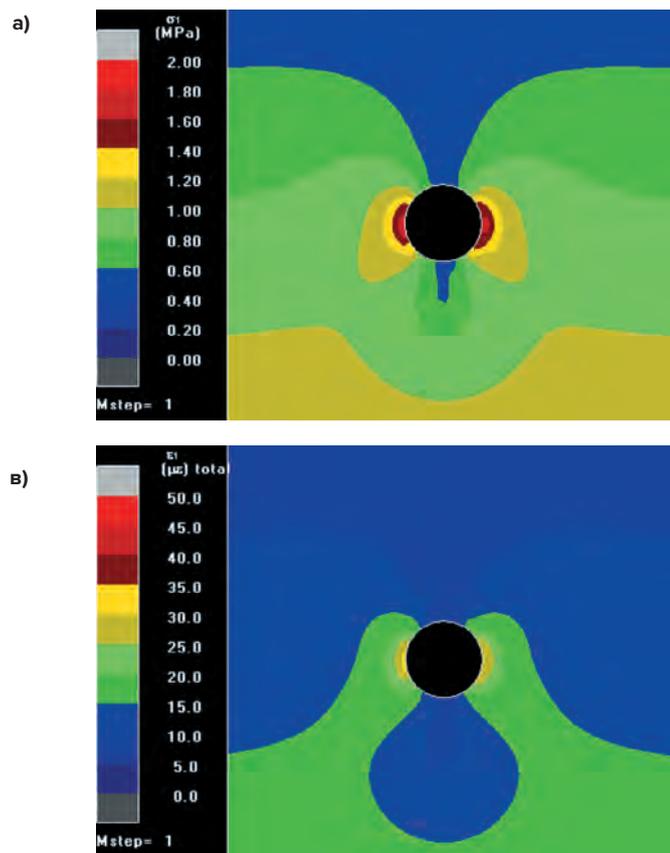
Моделирование позволило получить картины напряженно-деформированного состояния горного массива, представленные на рис. 4. Без детального анализа можно сказать, что максимальные деформации образуются на стенках выработки, рис. 4, б и 4, в. На рис. 4, г в лотковой части деформация ниже по сравнению с деформациями массива в сводной части. В кровле и почве выработки образуются растягивающие напряжения  $\rho_H$  ( $\kappa$  – коэффициент концентрации растягивающих напряжений, рис. 4, а), которые по мере удаления от контура уменьшаются до нуля, а затем переходят в сжимающие и постепенно достигают величины, соответствующей напряжению в нетронутым массиве. Данная картина позволяет сказать, что деформации массива в зонах провалов являются некритичными и соответствуют ожидаемому.

При математическом расчете ожидаемых деформаций, когда значения оказываются больше допустимых, необходимо применять методы управления геомеханическим состоянием массива. Данный метод подразумевает совокупность научных приемов и операций, позволяющих в процессе освоения недр изменять строение и состояние массива горных пород, а также задавать направления процессов развития деформаций, разрушения и фильтрации подземных вод [2].

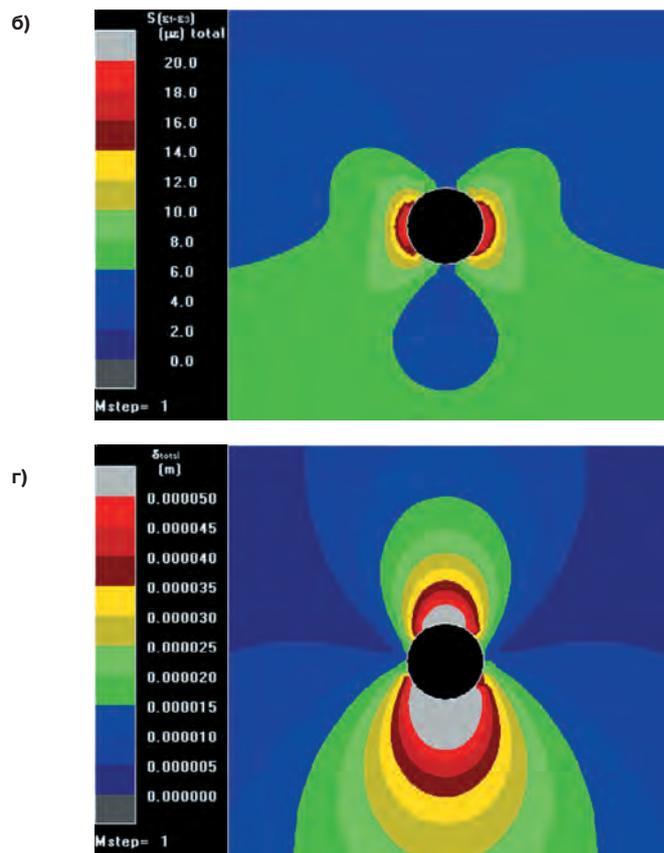
В зависимости от физико-механических свойств пород, их залегания и подземных вод земные движения на поверхности происходят по-разному. Например, при продвижении тоннеля проходческого комплекса динамично развиваются трещины вдоль лобовой части, тем самым создавая фильтрационный поток подземных вод в сторону забоя, изменяя физико-механические свойства горных пород. Все это приводит к поиску решения данной задачи, к новым научным идеям, так как существующие методы (защитные меры), к примеру, водопонижение или замораживание, являются несообразными [3].

Искусственное водопонижение в строительстве подземных сооружений сопровождается деформациями и сдвижением поверхности земли. При водопонижении происходит суффозия, вынос частиц грунта из массива пород и их перераспределение, что приводит к деформационным процессам [3].

Также деформационные процессы происходят при замораживании грунтов. При замораживании происходит процесс пучения грунта из-за увеличения объема. Подъем земной поверхности негативно влияет на здания и сооружения, находящиеся в зоне ее влияния, а при оттаивании породы оседают и образуются провалы на земной поверхности, что ведет к нарушению прочностных свойств зданий и сооружений [4].



**Рис. 4**  
 Результаты расчета напряжений и деформации сдвига горных пород:  
 а – наибольшие главные и касательные напряжения;  
 б – максимальная деформация сдвига;  
 в – главные наибольшие деформации;  
 г – суммарное смещение

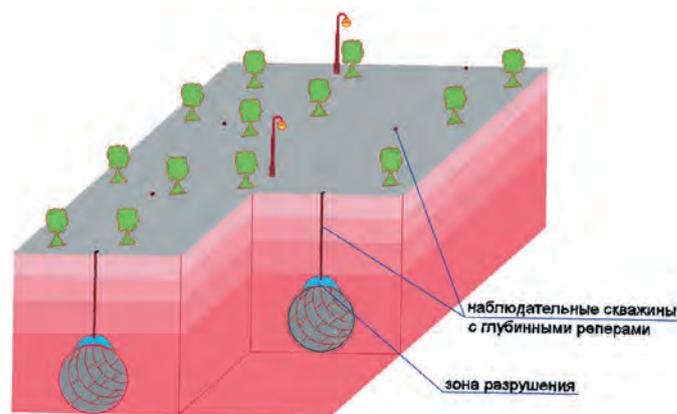


**Fig. 4**  
 Calculation results for rock stresses and shear strains:  
 а – the highest principal and shear stresses;  
 б – the maximum shear strain;  
 в – the main ultimate strains;  
 г – total displacement

С перечисленными выше проблемами постоянно сталкиваются специалисты при работе. Решение таких проблем должно базироваться на знании природы и геомеханических процессов горных пород [5].

Маркшейдерские наблюдения за движением земной поверхности, как правило, фиксируют конечную стадию этих процессов, основное развитие которых происходит в массиве горных пород. А в случае когда ближе к земной поверхности залегают более прочные породы, могут вообще не зафиксировать деформаций земной поверхности. Для своевременного выявления деформирования массива горных пород, т.е. до выхода предельных деформаций на дневную поверхность, наряду с маркшейдерскими измерениями, проводимыми на земной поверхности, необходимо производить инструментальные измерения деформаций массива горных пород в специальных наблюдательных скважинах с закладкой глубинных реперов (рис. 5). Геомеханический мониторинг, организуемый по данной схеме, способен заблаговременно зафиксировать развитие деформационных процессов над горными выработками, до их негативного проявления на земной поверхности, и тем самым обеспечить запас времени для проведения специальных защитных и профилактических мероприятий (например, укрепление грунтов с помощью jet grouting), направленных на недопущение катастрофического развития событий [6].

Пути решения проблемы повышения безопасности освоения подземного пространства городов лежат в установлении закономерностей развития геомеханических процессов и зависимостей их параметров от основных влияющих факторов при техногенном преобразовании недр [7]. Для этого необходимо прежде всего объединить усилия специалистов, занимающихся этой проблемой,



**Рис. 5**  
 Схема наблюдательной станции

**Fig. 5**  
 Схема наблюдательной станции

с таким расчетом, чтобы инструментальные наблюдения за развитием геомеханических процессов выполнялись по единой методике, с одинаковой точностью, периодичностью и соблюдением других требований, открывающих широкие возможности научного обобщения большого объема инструментальных наблюдений, проводимых в различных условиях.

### Заключение

Таким образом, снижение и предотвращение аварий при подземном строительстве базируется на учете всех уровней горно-строительного производства, начиная со стадии получения геологической информации, прогноза, моделирования, составления проекта строительства и заканчивая выбором эффективных мероприятий инженерной защиты окружающей среды при эксплуатации сооружения.

### Список литературы

1. Певзнер М.Е., Иофис М.А., Попов В.Н. *Геомеханика*. 2-е изд. М.: Издательство МГГУ; 2008. 438 с.
2. Казикаев Д.М., Козырев А.А., Каспарьян Э.В., Иофис М.А. *Управление геомеханическими процессами при разработке месторождений полезных ископаемых*. М.: Горная книга; 2016. 490 с.
3. Баклашов И.В., Картозия Б.А., Шашенко А.Н., Борисов В.Н. *Геомеханика*. М.: Горная книга; 2004. Т. 1, 208 с. Т. 2, 249 с.
4. Передельский Л.В., Приходчен О.Е. *Инженерная геология*. М.: Феникс; 2009. 465 с.
5. Thai G. *Predicting Subsidence Resulting from Tunnel Excavation*. 2010. Available at: <http://hdl.handle.net/10012/5631>
6. Yu C., Zhou A., Chen J., Arulrajah A., Horpibulsuk S. Analysis of a tunnel failure caused by leakage of the shield tail seal system. *Underground Space*. 2020;5(2);105–114. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2018.11.003>
7. Акматов Д.Ж., Николайчук В.В., Тихонов А.А., Шевчук Р.В. Радарная интерферометрия как дополнение к классическим методам наблюдений за движением земной поверхности. *Горная промышленность*. 2020;(1):144–147. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-1-144-147>

### References

1. Pevzner M.E., Iofis M.A., Popov V.N. *Geomechanics*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow: Moscow State Mining University; 2008. 438 p. (In Russ.)
2. Kazikaev D.M., Kozurev A.A., Kaspar'yan E.V., Iofis M.A. *Control of geomechanical processes in mining of mineral deposits*. Moscow: Gornaya kniga; 2016. 490 p. (In Russ.)
3. Baklashov I.V., Kartoziya B.A., Shashenko A.N., Borisov V.N. *Geomechanics*. Moscow: Gornaya kniga; 2004. Vol. 1, 208 p. Vol. 2, 249 p. (In Russ.)
4. Peredelsky L.V., Prikhodchen O.E. *Engineering geology*. Moscow: Feniks; 2009. 465 p. (In Russ.)
5. Thai G. *Predicting Subsidence Resulting from Tunnel Excavation*. 2010. Available at: <http://hdl.handle.net/10012/5631>
6. Yu C., Zhou A., Chen J., Arulrajah A., Horpibulsuk S. Analysis of a tunnel failure caused by leakage of the shield tail seal system. *Underground Space*. 2020;5(2);105–114. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2018.11.003>
7. Akmatov D.Zh., Nikolaichuk V.V., Tikhonov A.A., Shevchuk R.V. Radar Interferometry as Supplement to Classical Methods to Observe Earth's Surface Displacement. *Russian Mining Industry*. 2020;(1):144–147. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-1-144-147>

### Информация об авторах

**Акматов Дастан Женешбекович** – аспирант кафедры геологии и маркшейдерского дела (направление: геология, разведка и разработка полезных ископаемых), Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: Dastan.akmatov.1994@mail.ru

**Тихонов Алексей Анатольевич** – аспирант кафедры геологии и маркшейдерского дела (направление: геология, разведка и разработка полезных ископаемых), Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: Tikhonov.alexey95@mail.ru

**Каппушев Динислам Замирович** – аспирант кафедры геотехнологии освоения недр (направление: геология, разведка и разработка полезных ископаемых), Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: dinislamkappushev@mail.ru

### Information about the authors

**Dastan Zh. Akmatov** – postgraduate student of the Department of Geology and Mine Surveying (direction: geology, exploration and development of minerals), National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation; e-mail: Dastan.akmatov.1994@mail.ru

**Alexey A. Tikhonov** – postgraduate student of the Department of Geology and Mine Surveying (direction: geology, exploration and development of minerals), National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation; e-mail: Tikhonov.alexey95@mail.ru

**Dinislam Z. Kappushev** – postgraduate student of the Department of Geotechnology of Subsoil Development (direction: geology, exploration and development of minerals), National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation; e-mail: dinislamkappushev@mail.ru

### Article info

Received: 19.12.2021

Revised: 09.02.2022

Accepted: 11.02.2022

### Информация о статье

Поступила в редакцию: 19.12.2021

Поступила после рецензирования: 09.02.2022

Принята к публикации: 11.02.2022