УДК 622.831.31

DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_5

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ МАССИВА ГРУНТА В СМЕШАННОМ ЗАБОЕ ТОННЕЛЯ НА ФОРМУ И РАЗМЕР МУЛЬДЫ ОСАДОК ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

А.Г. Протосеня¹, В.В. Кумов¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: vshuk1@mail.ru

Аннотация: Представлено исследование влияния структуры грунтового массива на форму и размер мульды осадок, вызванных изменением напряженно-деформированного состояния массива при строительстве в нем двухпутного тоннеля метрополитена шитовым проходческим комплексом с грунтовым пригрузом забоя. Результаты получены при помощи пространственного численного конечно-элементного моделирования строящегося тоннеля в слабых грунтах, имеющих широкий диапазон деформационных и прочностных характеристик. Моделирование проводилось при изменяющейся структуре грунтового массива в смешанном забое тоннеля. Изменение формы и размеров мульды осадок оценивалось по трем описывающим ее параметрам: площади мульды осадок, значения осадок над осью тоннеля, расстояния между вертикальной осью поперечного сечения тоннеля и точкой прогиба поперечного профиля мульды. Построены графики зависимости параметров, описывающих форму и размер мульды осадок, от изменяющейся структуры грунтового массива в смешанном забое. Согласно результатам моделирования, наибольшее изменение размеров мульды осадок относительно массива, имеющего однородные структуру и физико-механические характеристики, достигающее 38%, наблюдается при наиболее близком положении ослабляемого или усиливаемого слоя грунта к оси тоннеля. При этом с приближением ослабленного слоя грунта к оси тоннеля происходит переход формы мульды в более пологую, о чем свидетельствуют отличные друг от друга скорости изменения осадок над осью тоннеля и расстояния между вертикальной осью поперечного сечения тоннеля и точкой прогиба поперечного профиля мульды.

Ключевые слова: многослойные грунты, грунтовый пригруз, пригруз забоя, щитовые проходческие комплексы, тоннель, метрополитен, гауссова кривая, мульда осадок.

Для цитирования: Протосеня А. Г., Кумов В. В. Влияние структуры массива грунта в смешанном забое тоннеля на форму и размер мульды осадок земной поверхности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 4. – С. 5–21. DOI: 10.25018/ 0236_1493_2024_4_0_5.

Effect of soil body structure of mixed-type tunnel face on shape and size of subsidence trough on ground surface

A.G. Protosenya¹, V.V. Kumov¹

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: vshuk1@mail.ru *Abstract:* The article describes the studies into the influence exerted by a soil body structure on the shape and size of a subsidence trough on ground surface under varying stresses and strains during construction of a double track subway tunnel by shield TBM tunneling with face pressure. The results were obtained from 3D finite-element modeling of a tunnel being constructed in soft ground featuring widely ranged strength and deformation characteristics. The modeling included the varied structure of the soil body of the mixed-type tunnel face. The change in the shape and size of the subsidence trough was estimated using three parameters: the area of subsidence, the value of subsidence above the tunnel axis, the distance between the vertical axis of the tunnel section and the point of curvature of the cross profile of the subsidence trough. The graphs of the subsidence trough shape and size parameters against the varying structure of the soil body of the mixed-type face are plotted. According to the modeling results, the greatest change in the size of the subsidence trough in case of a soil body having a uniform structure and the uniform physical and mechanical properties reaches 38% and occurs at the shortest spacing between the softened or strengthened soil layer and the tunnel axis. As the tunnel axis approaches the softened soil layer, the shape of the subsidence trough becomes flatter, which is confirmed by the different rates of change in subsidence above the tunnel axis and by the different distances between the vertical axis of the tunnel cross-section and the point of curvature of the cross profile of the subsidence trough.

Key words: multi-layered ground, face pressure, shield TBM, tunnel, subway, Gaussian curve, subsidence trough.

For citation: Protosenya A. G., Kumov V. V. Effect of soil body structure of mixed-type tunnel face on shape and size of subsidence trough on ground surface. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(4):5-21. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_5.

Введение

Цели устойчивого развития общества предполагают содействие экономическому росту и инновациям, а также повышение устойчивости городов, инфраструктуры и сообществ. Для достижения поставленных целей развитие городской инфраструктуры не должно отставать от ускоряющихся темпов строительства самих городов [1, 2].

Повышение безопасности строительства инфраструктуры городов — важная многофакторная задача, необходимая для снижения его влияния на уже построенные здания, сооружения и объекты культурного наследия [3 — 5]. Например, поверхностный слой грунта в зоне влияния проходки характеризуется наличием большого количества разнообразных инженерных сетей, повреждение которых может повлечь серьезные экономические затраты. Однако сегодня существует ряд факторов, не позволяющих увеличить безопасность строительства развивающейся инфраструктуры [6 – 8].

Одна из важнейших составляющих инфраструктуры городов — метрополитен [9, 10]. В одном ряду с остальными актуальными вопросами при строительстве метрополитенов стоит снижение влияния проходческих работ на окружающий их грунтовый массив [11, 12]. Сейчас в этих целях широко применяют тоннелепроходческие механизированные комплексы с пригрузом забоя при строительстве перегонных тоннелей [13, 14]. Несмотря на это, широкий диапазон изменения структуры грунтового массива приводит к трудностям прогноза размеров и формы зоны сдвижения грунтового массива [15 – 17]. Это в свою очередь не дает точно оценить значение давления грунтового пригруза в условиях проходки в многослойных грунтовых массивах с целью приведения забоя и, как следствие, грунтового массива в устойчивое состояние.

На сегодняшний день для решения широкого спектра геомеханических задач, в том числе прогноза размеров и формы мульды осадок земной поверхности, используются метод численного моделирования и эмпирические методы [18]. Сейчас метод численного моделирования имеет широкое применение при несколько идеализированных условиях [19-21]. Эмпирические методы дополняют понимание поведения грунта для неоптимальных условий [22—24]. Один из них, применяемый для описания формы и размеров мульды осадок земной поверхности, основан на форме, разработанной R.B. Peck в 1969 г. Однако он не всегда применим для сыпучих грунтов.

Подобные методы определения формы поперечного профиля мульды осадок не учитывают структуру массива, что вносит неточность в прогноз его деформированного состояния. Неточный геомеханический прогноз, в свою очередь, может повлиять на значения закладываемых в проходческий процесс технологических параметров [25-27]. Основные расчетные технологические параметры, необходимые для обеспечения устойчивости тоннеля, строящегося проходческими щитами с грунтовым пригрузом забоя — давление грунтового пригруза на лоб забоя и давление тампонажного раствора позади него. При подаче недостаточного давления на грунтовый массив в процессе продвижения проходческого щита может произойти потеря устойчивости грунта и его вывал внутрь выработки. В случае подачи избыточного давления грунтового пригруза или давления тампонажного раствора возможен выпор грунта вглубь массива. Подача как избыточного, так и недостаточного давления в дальнейшем может привести к неполному заполнению заобделочного пространства тампонажным раствором и, как следствие, развитию длительных деформаций массива. Оба вышеописанных случая неверного расчета давлений грунтового пригруза и тампонажа заобделочного пространства могут привести к существенным экономическим затратам при повреждении зданий, сооружений, коммуникаций и объектов культурного наследия на поверхности, попадающей в зону влияния строительства [28-30].

Целью исследования авторов является определение влияния структуры массива на форму и размеры мульды осадок в поперечном сечении при строительстве тоннелей щитовыми проходческими комплексами в смешанном забое.

Достижение данной цели позволит разработать более точный метод прогноза осадок, а также перейти к созданию нового метода определения формы и размеров зоны сдвижения грунтового массива. Практическое применение данного метода найдет себя при прогнозе подаваемого на забой давления грунтового пригруза.

Поставленные в исследовании задачи предполагают разработку численной модели, методики обработки ее результатов и определение аналитических зависимостей параметров формы и размеров мульды осадок от структуры смешанного забоя и характеристик грунтового массива.

Построение аналитических зависимостей основано на исследовании изменения основных критериев, описывающих форму и размер мульды осадок, в зависимости от структуры массива и его характеристик.

Методика моделирования

Для моделирования поставленной геомеханической задачи особенно важно выбрать наиболее подходящий к специфике задачи программный комплекс из широкого диапазона представленных на сегодняшний день [31 — 33]. В данном исследовании выбран программный комплекс, обладающий наиболее широкими возможностями в области моделирования грунтового массива различных моделей поведения.

Условия процесса моделирования условно разделены на две основные группы: геологические и технологические.

Геологические условия процесса моделирования включают в себя физикомеханические характеристики грунта и структурные особенности массива.

Массив грунта представлен четвертичным структурным этажом, сложенным песчано-глинистыми отложениями, залегающим почти горизонтально, как и большая часть осадочных отложений венда, кембрия и ордовика. Работы многих ученых часто направлены на исследования в условиях сплошной среды, однако грунты могут сильно отличаться друг от друга по своим физико-механическим свойствам, структуре и гидрогеологическим свойствам.

Для подземного пространства Санкт-Петербурга, принятого для моделирования грунтового массива из-за сложности структуры и свойств массива, характерно наличие четвертичных отложений, представленных песками и илистыми песками, как правило, уплотненными [34]. По большей части грунты, проходимые при строительстве тоннелей метрополитена в Санкт-Петербурге, характеризуются сильно отличающимися друг от друга инженерно-геологическими характеристиками и обладают высокой чувствительностью к нарушениям, связанным с проведением тоннелепроходческих работ. Грунты в зоне забоя различны и неоднородны по составу. Нередко забой целиком находится в слабых грунтах.

Мощность модели принята 37 м. В качестве инженерно-геологических эле-



3 – неизменный слой грунта в основании тоннеля, 4 – участок тоннеля на удалении от забоя,
 5 – участок тоннеля вблизи призабойной зоны тоннеля;

I–IV – стадии вариации структуры грунтового массива



Fig. 1. Spatial model of a two-track tunnel under construction in a mixed face [compiled by the authors]

ментов выбраны 3 слоя слабых грунтов мощностью 23,375 м; 2,125 м; 18,75 м.

Глубина залегания рассматриваемого тоннеля 14 м от земной поверхности до свода выработки.

В качестве технологических условий процесса моделирования для наиболее близких к реальным условиям подобраны следующие параметры щитовой проходки: давление грунтопригруза на забое 90 кH/м² с увеличением нагрузки на 15 кН/м² с каждым метром высоты столба грунтового пригруза; давление тампонажа 100 кН/м² с увеличением нагрузки на 20 кН/м² с каждым метром высоты столба тампонажного раствора, производящееся на 6 кольце крепи от забоя; давление домкратов, равное 640 кН/м², осуществляющееся на переднюю плоскость установленного кольца обделки; внешний диаметр обделки тоннеля 8,5 м при толщине крепи в 0,25 м; ширина колец обделки 1,5 м.

На основе анализа вышеприведенных данных построен ряд конечно-элементных моделей в пространственной постановке симметрично относительно вертикальной плоскости, проходящей через горизонтальную продольную ось тоннеля (рис. 1), со следующими граничными условиями:

 верхняя поверхность свободно перемещается во всех трех направлениях;

 боковые поверхности не перемещаются по направлениям к их нормали;

 нижняя плоскость имеет запрет на перемещение в вертикальном направлении;

 непрерывная передача напряжений и деформаций на контакте между слоями.

Вышеприведенные технологические параметры подобраны для соблюдения моделями условия минимизации образования вертикальных смещений земной поверхности, то есть при их отсутствии или допущении их значения не более 5 мм, что очень важно по причине строительства в условиях плотной городской застройки.

Расчетная схема разработанной численной модели с разрезами в характерных для визуализации нагрузках плоскостях представлена на рис. 2.

Для оценки влияния структуры массива на формирование мульды осадок при условии строительства тоннеля в смешанном забое созданы необходимые условия моделирования, исключающие влияние нескольких переменных на результат задачи. Данная постановка задачи позволит достичь наибольшей точности отображаемых результатов моделирования.

С этой целью в модель введены два основных слоя грунта, воспринимающих давление грунтового пригруза в забое: слой с изменяемыми деформационными и прочностными характеристиками и положением в массиве; слой с неизменными прочностными и деформационными характеристиками.

За перемещаемый принят слой грунта мощностью 0,25 от диаметра тоннеля для его дальнейшего перемещения от почвы к своду тоннеля.

Процесс моделирования разделен на несколько стадий при различных вариантах залегания перемещаемого слоя грунта (см. рис. 2): I — в нижней четверти высоты забоя тоннеля; II — на высоте 0,25 диаметра тоннеля от почвы выработки; III — на высоте 0,5 диаметра тоннеля от почвы выработки; IV - на высоте 0,75 диаметра тоннеля от почвы выработки. При переходе от I стадии моделирования ко II происходит разделение слоя 1 на два тождественных друг другу слоя относительно физико-механических характеристик: 1 — залегает над перемещаемым слоем, и 1' - залегает под перемещаемым слоем. При этом почва слоя 2 залегает в плоскости кровли слоя 1'. Переходы между последующими стадиями сопровождаются



Рис. 2. Расчетная схема модели строительства тоннеля щитовым проходческим комплексом в условиях смешанного забоя: схема расположения тоннеля в грунтовом массиве, I - IV - стадии вариацииструктуры грунтового массива (а); увеличенное изображение тоннеля (б); нагрузки грунтопригруза итампонажа в сечениях A и Б (в) [составлено авторами]

Fig. 2. Calculation diagram of the model for constructing a tunnel using a shield tunneling complex in conditions of a mixed face: diagram of the location of the tunnel in the soil massif, I - IV - stages of variation in the structure of the soil massif (a); enlarged image of the tunnel (b); loads of soil loading and grouting in sections A and B (v) [compiled by the authors]

уменьшением мощности слоя 1 на величину мощности слоя 2, и увеличением мощности слоя 1' на ту же величину.

При неизменной мощности перемещаемого слоя и технологических условиях моделирования вследствие перемещения по вертикали данного слоя деформированное состояние массива грунта под воздействием на него строительных работ изменяется.

В качестве модели поведения грунта выбрана модель упрочняющегося грунта Hardening Soil для более высокой точности расчетов. Данная модель способна учитывать нелинейный характер зависимости деформаций от напряжений, а также упрочнение грунта при объемном сжатии и сдвиге [35]. Помимо этого, модель имеет возможность задавать дилатансию и контракцию, что наиболее актуально при моделировании дискретных сред.

Для исключения влияния на результат моделирования множества отличающихся от вмещающего слоя физико-механических характеристик перемещаемого слоя отобраны основные для их вариации и оценки их влияния на результат: E_{oed} — модуль деформации одометрический; E_{so} — модуль деформа-

ции при 50% прочности; *E*_{ur} — модуль разгрузки/повторного нагружения; *С* — сцепление грунта; φ — угол внутренне-го трения грунта.

Физико-механические характеристики вмещающего слоя приняты из практики строительства тоннелей в условиях Санкт-Петербурга. При этом особенно важно выбрать необходимые диапазоны значений деформационных и прочностных характеристик грунтового массива, отличающихся своим многообразием [8, 36]. Для каждой характеристики перемещаемого слоя грунта выбраны следующие диапазоны значений относительно значений вмещающего слоя грунта: 0,2÷1,8(E_{oed} , E_{50} , E_{ur}) с шагом в 0,4(E_{oed} , E_{50} , E_{ur}); 0,2÷1,8С с шагом в 0,4С; 0,7÷1,3 ϕ с шагом в 0,15 ϕ .

Обсуждение результатов исследования

Для получения наиболее полной картины формирования процесса образования мульды и влияния на него различной структуры и физико-механических характеристик массива к исследованию приняты следующие критерии, описывающие форму мульды осадок: расстояние между вертикальной осью поперечного сечения тоннеля и точкой прогиба поперечного профиля мульды (i), площадь мульды осадок (S), наибольшее значение осадок (U_{max}) (рис. 3).

Наибольших значений осадки достигают по вертикальной оси тоннеля. При удалении по горизонтали в поперечном сечении от вертикальной оси значение снижается по форме гауссовой кривой.

В случае идентичности физико-механических характеристик между рассматриваемыми слоями грунта разница в значениях отслеживаемых показателей отсутствует, что говорит о достоверности процесса моделирования при сравнении результатов друг с другом, при этом иные влияющие на результат задачи параметры отрицаются.

На основе результатов численного моделирования построены графики зависимости основных параметров, описывающих размер и форму поперечного профиля мульды, от различных вариантов структуры грунтового массива, представленных на рис. 1 и 2, при заданных диапазонах значений деформационных и прочностных характеристик грунта (см. рис. 4, 6).

Первый рассматриваемый параметр расстояние между вертикальной осью поперечного сечения тоннеля и точкой прогиба поперечного профиля мульды (i).



Рис. 3. Поперечный профиль мульды осадок и описывающие ее основные критерии [составлено авторами]

Fig. 3. Gaussian curve of subsidence trough and the main criteria describing it [compiled by the authors]



Рис. 4. Графики зависимости расстояния между вертикальной осью поперечного сечения тоннеля и точкой прогиба поперечного профиля мульды от различных вариантов структуры грунтового массива при изменении: $E_{corr} E_{sorr} E_{m}$ (a); C (б); φ (в)[составлено авторами]

Fig. 4. Graphs of the dependence of the distance between the vertical axis of the tunnel cross-section and the deflection point of the transverse profile of the trough on various variants of the structure of the soil mass when changing: $E_{xort} E_{xort} E_{xort}$ (a); C (b); φ (v) [compiled by the authors]

Согласно результатам моделирования (рис. 4), перемещение слоя грунта от почвы выработки к ее своду сопровождается изменением расстояния (*i*).

При обладании перемещаемым слоем грунта большими значениями (*E*) или (*C*), в сравнении с вмещающим слоем, перемещение слоя грунта от I положения к IV сопровождается уменьшением расстояния (*i*). Характер изменения значения (*i*) при этом становится более нелинейным с увеличением разницы в значениях характеристик между перемещаемым и вмещающим слоями грунта.

Если перемещаемый слой грунта имеет меньшее значение (ф), чем вмещающий, расстояние (*i*) также уменьшается. Однако уменьшение (*i*) происходит лишь при перемещении слоя грунта от I к III положению. С переходом к стадии IV расстояние (*i*) увеличивается до значения, соразмерного с I стадией.

В случае обладания перемещаемым слоем грунта меньшими значениями (E) или (C), в сравнении с вмещающим слоем, перемещение слоя от I к IV положению сопровождается увеличением расстояния (i). При меньшем значении (ϕ) грунта перемещаемого слоя, чем у вмещающего, расстояние (i) увеличивается. Увеличение значения (i) сопровождает лишь перемещение слоя грунта от I к III стадии. Переход из III в IV стадию характеризуется уменьшением (i). Расстояние до точки прогиба поперечного профиля мульды значительно превышает расстояние от данной точки до границы мульды по земной поверхности из-за обладания грунтовым массивом низких прочностных характеристик.

Максимальная разница в значениях расстояния (*i*) от изменения деформационных и прочностных характеристик достигает 9%. Наибольшая разница в значениях (*i*) от изменения структуры смешанного забоя, при переходе между I и II стадией, составила 6%. Данная разница в значениях достигается в ряде моделей при изменении угла внутреннего трения грунта перемещаемого слоя. Прочие характеристики имели меньшее влияние на результат моделирования. Наибольшие значения (*i*) при переходе от I к IV стадии при изменяющихся деформационных и прочностных характеристиках представлена в таблице, где указана разница в значениях представленных критериев относительно случая равенства характеристик перемещающегося и вмещающего слоев.

Характер изменения площади мульды осадок (S) и максимальных осадок (U_{max}) в поперечном сечении мульды при изменении (E), (C) и (ϕ) перемещаемого слоя грунта аналогичен характеру изменения расстояния (i) (см. рис. 4, 6).

Наибольшая разница между значениями площади мульды осадок в поперечном сечении (S) достигает 49% при изменении угла внутреннего трения (ϕ). Разница в значениях (S) от изменения



Рис. 5. Графики зависимости площади мульды осадок в поперечном сечении от различных вариантов структуры грунтового массива при изменении: E_{oed} , E_{50} , E_{ur} (a); C (б); φ (в) [составлено авторами] Fig. 5. Graphs of the dependence of the cross-sectional area of the subsidence trough on various options for the structure of the soil mass when changing: E_{oed} , E_{so} , E_{ur} (a); C (b); φ (v) [compiled by the authors]



Рис. 6. Графики зависимости осадок над осью тоннеля от различных вариантов структуры грунтового массива при изменении: E_{oed} , E_{so} , E_{ur} (a); C (b); φ (в) [составлено авторами]

Fig. 6. Graphs of the dependence of subsidence above the tunnel axis on various options for the structure of the soil mass when changing: E_{oed} , E_{so} , E_{ur} (a); C (b); φ (v) [compiled by the authors]

структуры смешанного забоя между І и IV стадиями составила 38% (см. таблицу).

Согласно графику (рис. 6), наибольшая разница между значениями осадок над осью тоннеля в поперечном сечении (U_{max}) достигает 35% при изменении угла внутреннего трения (ϕ). Разница в значениях (S) от изменения структуры

Разница значений критериев формы и размеров мульды осадок земной поверхности
The difference in the values of the criteria for the shape and size of the subsidence
trough of the Earth's surface

Параметр	Диапазон значений Е, С и ф / шаг	Максимальная разница в значениях S, <i>і</i> и φ на стадиях вариации структуры смешанного забоя (<i>x</i>)		
	изменения	<u>i, %</u>	<u>S, %</u>	<u>U_{max},%</u>
	характеристики	x	x	X
E _{oed} , E ₅₀ , E _{ur}	$\frac{0,2\div1,8(E_{\text{oed}},E_{50},E_{\text{ur}})}{0,4(E_{\text{oed}},E_{50},E_{\text{ur}})}$	<u><5</u> IV	<u>15</u> IV	<u>10</u> IV
С	<u>0,2÷1,8C</u>	<u><5</u>	<u><5</u>	<u><5</u>
	0,4C	IV	IV	IV
φ	<u>0,7÷1,3φ</u>	<u>6</u>	<u>38</u>	<u>22</u>
	0,15φ		III	

смешанного забоя между І и IV стадиями составила 22% (см. таблицу).

Согласно графикам на рис. 4, 6, можно сделать вывод о характере изменения критериев, описывающих форму и размеры мульды осадок земной поверхности.

Сцепление в представленном диапазоне значений менее всего влияет на фор-



Рис. 7. Картины влияния строительства тоннеля на грунтовый массив при различных отношениях углов внутреннего трения грунта перемещаемого слоя (ϕ) и вмещающего (ϕ_0): распределение горизонтальных деформаций грунтового массива в призабойной зоне тоннеля при $\phi = 0,7\phi_0$ (a); распределение горизонтальных деформаций грунтового массива в призабойной зоне тоннеля при $\phi = 1,3\phi_0$ (b); поперечный профиль мульды осадок земной поверхности при $\phi = 0,7\phi_0$ и $\phi = 1,3\phi_0$ (b) [составлено авторами]

Fig. 7. Patterns of the effect of tunnel construction on the soil mass at different ratios of the angles of internal friction of the soil of the displaced layer (φ) and the host (φ_{ϕ}): distribution of horizontal deformations of the soil mass in the bottomhole zone of the tunnel at $\varphi = 0.7\varphi_{\phi}$ (a); distribution of horizontal deformations of the soil mass in the bottomhole zone of the tunnel at $\varphi = 1.3\varphi_{\phi}$ (b); the transverse profile of the subsidence trough of the earth's surface at $\varphi = 0.7\varphi_{\phi}$ and $\varphi = 1.3\varphi_{\phi}$ (v)[compiled by the authors]

мирование осадок земной поверхности из-за низкой величины сцепления слабых грунтов. Однако характер изменения параметров формы и размеров мульды осадок земной поверхности явно прослеживается. Зависимости изменения (i), (S) и (U_{max}) от (C) схожи с зависимостью параметров мульды от (E), но имеют более пологий характер изменения (см. рис. 4, 6).

Деформационные параметры в значительной степени влияют на характер формирования мульды осадок земной поверхности. Согласно изображенным графикам и выведенным зависимостям, с увеличением разницы в деформационных характеристиках между перемещаемым слоем и вмещаемым увеличивается и нелинейность изменения параметров мульды между стадиями моделирования (см. рис. 4, 6).

Лишь заданный диапазон угла внутреннего трения слабого грунта позволяет комплексно оценить влияние структуры грунтового массива в смешанном забое тоннеля (см. рис. 4, 6).

Для детального исследования данного вопроса рассмотрено влияние грунтопригруза на призабойную зону тоннеля при различной структуре и характеристиках грунтового массива на основе описания областей горизонтальных сдвижений величиной 5 мм (рис. 7).

При обладании перемещаемым слоем грунта меньшим углом внутреннего трения, чем у вмещающего слоя грунта, происходит снижение устойчивости перемещаемого слоя грунта. Это приводит к перераспределению нагрузки от грунтового пригруза к уравновешиванию активного давления слоя. Благодаря этому размер зоны сдвижения в призабойной зоне снижается, как и максимальные значения деформаций грунтового массива в призабойной зоне. В обратном случае возникает большая по размерам зона деформаций грунтового массива в призабойной зоне из-за увеличения устойчивости перемещаемого слоя грунта и более активного перехода нагрузки от грунтового пригруза в деформации вглубь массива. По этой причине впоследствии происходит возникновение большей мульды осадок земной поверхности. Таким образом, увеличение угла внутреннего трения перемещаемого слоя грунта приводит к увеличению размеров мульды осадок земной поверхности (рис. 7).

Заключение

В ходе проведенного исследования определено влияние структуры массива грунта в смешанном забое тоннеля на форму и размер мульды осадок земной поверхности. Данное явление описано и проанализировано при помощи полученных зависимостей параметров, характеризующих мульду осадок земной поверхности, от изменяющейся структуры грунтового массива при различных прочностных и деформационных характеристиках грунта смешанного забоя тоннеля.

По результатам численного моделирования проведен детальный анализ полученных значений. На основе результатов моделирования построены графики зависимости выбранных параметров формы и размеров мульды от различных вариантов структуры грунтового массива при изменении прочностных и деформационных характеристик грунта (см. рис. 4, 6).

Изменение параметров формы и размеров мульды осадок имело схожий характер при изменении структуры смешанного забоя при изменяющихся деформационных характеристиках (E_{oed} , E_{50} , E_{ur}) и сцеплении грунта С. При меньших прочностных и деформационных характеристиках перемещаемого слоя грунта, в сравнении с вмещающим слоем, при его перемещении от почвы к своду выработки размер мульды увеличивался, достигая максимальных значений в IV положении (в своде выработки).

В случае зависимости параметров (*i*), (*S*) и (*U*_{max}) от изменяющейся структуры смешанного забоя при различных углах внутреннего трения грунта перемещаемого слоя наблюдался иной характер изменения формы и размеров мульды. При увеличении угла внутреннего трения грунта перемещаемого слоя происходит увеличение мульды осадок земной поверхности. Переход от I к III положению перемещаемым слоем грунта сопровождается увеличением мульды осадок. Переход от III к IV стадии характеризуется уменьшением мульды осадок до значений, соразмерных I стадии.

Параметры формы и размеров мульды осадок достигли наибольшей разницы в значениях на III стадии вариации структуры смешанного забоя при угле внутреннего трения грунта перемещаемого слоя, равном 0,7 ф.: расстояние между вертикальной осью поперечного сечения тоннеля и точкой прогиба поперечного профиля мульды (*i*) 6%;

площадь мульды осадок (S) 38%;

 значение осадок земной поверхности по оси тоннеля (U_{max}) 22% (см. таблицу).

В данном случае достигается наименьший размер мульды осадок земной поверхности. При этом уменьшение значения осадок земной поверхности по оси тоннеля U_{max} , равного 22%, значительно выше снижения значения расстояния между вертикальной осью поперечного сечения тоннеля и точкой прогиба поперечного профиля мульды (*i*), равного 6%. Благодаря этому можно сделать вывод об уменьшении мульды и переходе ее формы в более пологую при приближении слоя грунта с меньшим углом внутреннего трения к третьей четверти диаметра от почвы тоннеля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волохов Е. М., Мукминова Д. З. Оценка деформаций при строительстве эскалаторных тоннелей метрополитена способом искусственного замораживания грунтов для стадии формирования ледопородного ограждения // Записки Горного института. — 2021. — Т. 252. — С. 826—839. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.5.

2. Clough W., Schmidt B. Design and performance of excavations and tunnels in soft clay // Developments in Geotechnical Engineering. 1981, vol. 20, pp. 567 – 634. DOI: 10.1016/B978-0-444-41784-8.50011-3.

3. Komolov V., Belikov A. Assessment of the impact of the construction of semi-buried structures on the surrounding buildings and the road system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 918, no. 1, article 012027. DOI: 10.1088/1757-899X/918/1/012027.

4. Jiankang L., Yujing J. The influence of geological conditions of the rock mass before the tunnel face on the forecasting efficiency of the uniaxial compression strength prediction model // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, vol. 861, no. 4, article 042118. DOI: 10.1088/1755-1315/861/4/042116.

5. *Zhang W., Li H., Wu C., Ly Y.* Soft computing approach for prediction of surface settlement induced by earth pressure balance shield tunneling // Underground Space. 2021, vol. 6, pp. 353 – 363. DOI: 10.1016/j.undsp.2019.12.003.

6. Kang-Hyun L., Hyun-Jun S. Probabilistic estimation of predicting the state of the soil in front of TBM tunnels, combining each method of geophysical forecasting // Journal of the Korean Association of Tunneling and Underground Space. 2016, vol. 18, no. 3, pp. 257 – 272. DOI: 10.9711/KTAJ.2016. 18.3.257.

7. Zhao S., Li S., Wan Z., Wang X. Effects of anti-clay agents on bubble size distribution and stability of aqueous foam under pressure for earth pressure balance shield tunneling // Colloid And Interface Science Communications. 2021, vol. 42, article 100424. DOI: 10.1016/j.colcom.2021.100424.

8. *Liu J., Tan Y., Song X., Fan D., Liu T.* Effects of through-wall leaking during excavation in waterrich sand on lateral wall deflections and surrounding environment//Journal of Zhejiang University (Engineering Science). 2023, vol. 57, no. 3, pp. 530 – 541. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2023.03.011.

9. Дашко Р. Э., Лохматиков Г. А. Верхнекотлинские глины Санкт-Петербургского региона как основание и среда уникальных сооружений: инженерно-геологический и геотехнический анализ // Записки Горного института. — 2022. — Т. 254. — С. 180—190. DOI: 10.31897/PMI.2022.13.

10. 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.

11. Dang T., Meschke G. Influence of muck properties and chamber design on pressure distribution in EPB pressure chambers — Insights from computational flow simulations // Tunnelling And Underground Space Technology. 2020, vol. 99. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103333.

12. Fei P., Ma S. 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, pp. 3957 – 3963. DOI: 10.1016/j.aej.2021.02.034.

13. *Liu X., Xu S., Huang Y.* Optimal control for earth pressure balance of shield machine based on action-dependent heuristic dynamic programming // ISA Transactions. 2019, vol. 94, pp. 28 – 35. DOI: 10.1016/j.isatra.2019.04.007.

14. *Liu X., Xu S., Shao C.* Optimal control of earth pressure balance of shield tunneling machine based on dual-heuristic dynamic programming // Optimal Control Applications and Methods. 2020, vol. 41, pp. 1510–1523. DOI: 10.1002/oca.2612.

15. *Zhou X., Zhai S.* Estimation of the cutterhead torque for earth pressure balance TBM under mixed-face conditions // Tunnelling And Underground Space Technology. 2018, vol. 74, pp. 217 – 229. DOI: 10.1016/j.tust.2018.01.025.

16. Ochmanski M., Spacagna R., Modoni G. 3D numerical simulation of consolidation induced in soft ground by EPB technology and lining defects // Computers And Geotechnics. 2021, vol. 128. DOI: 10.1016/j.compgeo.2020.103830.

17. Wang Y., Zhang F. Effects of pit-bottom-soil reinforcement on the deformation of subway deep foundation pits based on an improved model // Hindawi. Advances in Materials Science and Engineering. 2022, vol. 2022, article 2661311. DOI: 10.1155/2022/2661311.

18. Беликов А. А., Беляков Н. А. Методика прогноза напряженно-деформированного состояния междукамерных целиков, закрепленных податливой тросовой крепью // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 4. — С. 20—34. DOI: 10.25018/0236_1493_ 2023 4 0 20.

19. Карасев М. А., Поспехов Г. Б., Астапенко Т. С., Шишкина В. С. Анализ моделей прогноза напряженно-деформированного состояния техногенных грунтов низкой прочности // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 11. — С. 49 — 70. DOI: 10.25018/0236_ 1493_2023_11_0_49.

20. Dzhemilev E. R., Shammazov I. A., Sidorkin D. I., Mastobaev B. N., Gumerov A. K. Developing technology and device for the main pipelines repair with cutting out their defective sections // Pipeline Transportation of Oil. 2022, vol. 10, pp. 78–82. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-10-78-82.

21. Zhang P., Chen R., Wu H. Real-time analysis and regulation of EPB shield steering using Random Forest // Automation In Construction. 2019, vol. 106. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102860.

22. Shahmoradi J., Salari H., Roghanchi P. Face stability analysis for the earth pressure balance method in nonhomogeneous inclined soil layers: Case study // International Journal of Geomechanics. 2020, vol. 20, no. 10. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001833.

23. *Li Z., Yang X.* Analysis and design charts for 3D active earth pressure in cohesive soils with cracks // Acta Geotechnica. 2021, vol. 16, pp. 3269–3283. DOI: 10.1007/s11440-021-01192-y.

24. Li Z., Yang X., Li Y. Active earth pressure coefficients based on a 3D rotational mechanism // Computers And Geotechnics. 2019, vol. 112, pp. 342 – 349. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.05.005.

25. Деменков П. А., Романова Е. Л., Котиков Д. А. Исследование формирования напряженнодеформированного состояния крепи вертикального ствола и вмещающего массива горных пород в условиях неравномерности его контура // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 11. — С. 33 — 48. DOI: 10.25018/0236 1493 2023 11 0 33.

26. Ковальский Е. Р., Конгар-Сюрюн Ч. Б., Петров Д. Н. Проблемы и перспективы внедрения многостадийной выемки руды при отработке запасов калийных месторождений // Устойчивое развитие горных территорий. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 349—364. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-349-364.

27. *Zhao C., Zhao D.* Application of construction waste in the reinforcement of soft soil foundation in coastal cities // Environmental Technology and Innovation. 2020, vol. 21, article 101195. DOI: 10.1016/j.eti.2020.101195.

28. Hu X., Fu W., Ju J., He C. Face stability conditions in granular soils during the advancing and stopping of earth-pressure-balanced-shield machine // Tunnelling And Underground Space Technology. 2021, vol. 109, no. 12, article 103755. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103755.

29. Yin X., Chen R., Meng F. Influence of seepage and tunnel face opening on face support pressure of EPB shield // Computers And Geotechnics. 2021, vol. 135. DOI: 10.1016/j.compgeo.2021.104198.

30. *Ma S., Li M., Guo Y., Safaei B.* Field test and research on shield cutting pile penetrating cement soil single pile composite foundation // Geomechanics and Engineering. 2020, vol. 23, pp. 513 – 521. DOI: 10.12989/gae.2020.23.6.513.

31. Беляков Н. А., Морозов К. В., Емельянов И. А. Методика обработки данных полевых испытаний по оценке естественного напряженного состояния горного массива методом кольцевой разгрузки // Горный журнал. — 2023. — № 5. — С. 89—96. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.13.

32. Rohola H., Jamal R., Sohrabian B. Prediction of face pressure and required thrust force within tbm tunnelling through alluvial ground / 2nd International Conference on Tunneling Machines in Difficult Soils (TBM DiGs Istanbul). Istanbul, 2016.

33. Lee H., Hoi H., Choi S., Chang S. Numerical Simulation of EPB Shield Tunnelling with TBM Operational Condition Control Using Coupled DEM-FDM // Applied Sciences-Basel. 2021, vol. 11. DOI: 10.3390/app11062551.

34. Дашко Р. Э., Карпенко А. Г. Современное состояние надземных и подземных конструкций Александровской колонны — интегральная основа ее устойчивости // Записки Горного института. — 2023. — Т. 263. — С. 757 — 773.

35. *Мельников Р. В.* Компрессионные испытания грунта как способ определения параметров модели Hardening Soil // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. — 2014. — № 4. — С. 90 — 94.

36. Hu X., He C., Walton G., Fang Y., Dai G. Laboratory model test of EPB shield tunneling in a cobble-rich soil // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2020, vol. 146. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.000235.

REFERENCES

1. Volokhov E. M., Mukminova D. Z. Deformations assessment during subway escalator tunnels construction by the method of artificial freezing of soil for the stage of ice wall formation. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 252, pp. 826–839. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.5.

2. Clough W., Schmidt B. Design and performance of excavations and tunnels in soft clay. *Developments in Geotechnical Engineering*. 1981, vol. 20, pp. 567–634. DOI: 10.1016/B978-0-444-41784-8.50011-3.

3. Komolov V., Belikov A. Assessment of the impact of the construction of semi-buried structures on the surrounding buildings and the road system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 918, no. 1, article 012027. DOI: 10.1088/1757-899X/918/1/012027.

4. Jiankang L., Yujing J. The influence of geological conditions of the rock mass before the tunnel face on the forecasting efficiency of the uniaxial compression strength prediction model. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 861, no. 4, article 042118. DOI: 10.1088/1755-1315/861/4/042116.

5. Zhang W., Li H., Wu C., Ly Y. Soft computing approach for prediction of surface settlement induced by earth pressure balance shield tunneling. *Underground Space*. 2021, vol. 6, pp. 353–363. DOI: 10.1016/j.undsp.2019.12.003.

6. Kang-Hyun L., Hyun-Jun S. Probabilistic estimation of predicting the state of the soil in front of TBM tunnels, combining each method of geophysical forecasting. *Journal of the Korean Association of Tunneling and Underground Space*. 2016, vol. 18, no. 3, pp. 257–272. DOI: 10.9711/KTAJ.2016. 18.3.257.

7. Zhao S., Li S., Wan Z., Wang X. Effects of anti-clay agents on bubble size distribution and stability of aqueous foam under pressure for earth pressure balance shield tunneling. *Colloid And Interface Science Communications*. 2021, vol. 42, article 100424. DOI: 10.1016/j.colcom.2021.100424. 8. Liu J., Tan Y., Song X., Fan D., Liu T. Effects of through-wall leaking during excavation in water-rich sand on lateral wall deflections and surrounding environment. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*. 2023, vol. 57, no. 3, pp. 530 – 541. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2023. 03.011.

9. Dashko R. E., Lokhmatikov G. A. The Upper Kotlin clays of the Saint Petersburg region as a foundation and medium for unique facilities: an engineering-geological and geotechnical analysis. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 254, pp. 180–190. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.13.

10. Nabatov V. V., Voznesenskii A. S. Geomechanical analysis of the impact of the new tunnels construction in the vicinity of existing underground subway structures on the state of the soil massif. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 264, pp. 926 – 936. [In Russ].

11. Dang T., Meschke G. Influence of muck properties and chamber design on pressure distribution in EPB pressure chambers – Insights from computational flow simulations. *Tunnelling And Under*ground Space Technology. 2020, vol. 99. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103333.

12. Fei P., Ma S. 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, pp. 3957 – 3963. DOI: 10.1016/j.aej.2021.02.034.

13. Liu X., Xu S., Huang Y. Optimal control for earth pressure balance of shield machine based on action-dependent heuristic dynamic programming. *ISA Transactions*. 2019, vol. 94, pp. 28–35. DOI: 10.1016/j.isatra.2019.04.007.

14. Liu X., Xu S., Shao C. Optimal control of earth pressure balance of shield tunneling machine based on dual-heuristic dynamic programming. *Optimal Control Applications and Methods*. 2020, vol. 41, pp. 1510–1523. DOI: 10.1002/oca.2612.

15. Zhou X., Zhai S. Estimation of the cutterhead torque for earth pressure balance TBM under mixed-face conditions. *Tunnelling And Underground Space Technology*. 2018, vol. 74, pp. 217 – 229. DOI: 10.1016/j.tust.2018.01.025.

16. Ochmanski M., Spacagna R., Modoni G. 3D numerical simulation of consolidation induced in soft ground by EPB technology and lining defects. *Computers And Geotechnics*. 2021, vol. 128. DOI: 10.1016/j.compgeo.2020.103830.

17. Wang Y., Zhang F. Effects of pit-bottom-soil reinforcement on the deformation of subway deep foundation pits based on an improved model. Hindawi. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2022, vol. 2022, article 2661311. DOI: 10.1155/2022/2661311.

18. Belikov A. A., Belyakov N. A. Method of predicting the stress-strain state of interchamber pillars lined with a compliant rope fastener. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 4, pp. 20 – 34. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_20.

19. Karasev M. A., Pospehov G. B., Astapenka T. S., Shishkina V. S. Stress-strain behavior prediction models for weak manmade soil. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 11, pp. 49–70. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_49.

20. Dzhemilev E. R., Shammazov I. A., Sidorkin D. I., Mastobaev B. N., Gumerov A. K. Developing technology and device for the main pipelines repair with cutting out their defective sections. *Pipeline Transportation of Oil.* 2022, vol. 10, pp. 78 – 82. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-10-78-82.

21. Zhang P., Chen R., Wu H. Real-time analysis and regulation of EPB shield steering using Random Forest. *Automation In Construction*. 2019, vol. 106. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102860.

22. Shahmoradi J., Salari H., Roghanchi P. Face stability analysis for the earth pressure balance method in nonhomogeneous inclined soil layers: Case study. *International Journal of Geomechanics*. 2020, vol. 20, no. 10. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001833.

23. Li Z., Yang X. Analysis and design charts for 3D active earth pressure in cohesive soils with cracks. *Acta Geotechnica*. 2021, vol. 16, pp. 3269-3283. DOI: 10.1007/s11440-021-01192-y.

24. Li Z., Yang X., Li Y. Active earth pressure coefficients based on a 3D rotational mechanism. *Computers And Geotechnics*. 2019, vol. 112, pp. 342 – 349. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.05.005.

25. Demenkov P. A., Romanova E. L., Kotikov D. A. Stress-strain analysis of vertical shaft lining and adjacent rock mass under conditions of irregular contour. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 11, pp. 33 – 48. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_33.

26. Kovalski E. R., Kongar-Syuryun Ch. B., Petrov D. N. Challenges and prospects for severalstage stoping in potash mining. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, vol. 15, no. 2, pp. 349–364. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-349-364. 27. Zhao C., Zhao D. Application of construction waste in the reinforcement of soft soil foundation in coastal cities. *Environmental Technology and Innovation*. 2020, vol. 21, article 101195. DOI: 10.1016/j.eti.2020.101195.

28. Hu X., Fu W., Ju J., He C. Face stability conditions in granular soils during the advancing and stopping of earth-pressure-balanced-shield machine. *Tunnelling And Underground Space Technology*. 2021, vol. 109, no. 12, article 103755. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103755.

29. Yin X., Chen R., Meng F. Influence of seepage and tunnel face opening on face support pressure of EPB shield. *Computers And Geotechnics*. 2021, vol. 135. DOI: 10.1016/j.compgeo.2021.104198.

30. Ma S., Li M., Guo Y., Safaei B. Field test and research on shield cutting pile penetrating cement soil single pile composite foundation. *Geomechanics and Engineering*. 2020, vol. 23, pp. 513–521. DOI: 10.12989/gae.2020.23.6.513.

31. Belyakov N. A., Morozov K. V., Emelyanov I. A. Data processing in full-scale in-situ stress testing by overcoring. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 5, pp. 89–96. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.13.

32. Rohola H., Jamal R., Sohrabian B. Prediction of face pressure and required thrust force within tbm tunnelling through alluvial ground. *2nd International Conference on Tunneling Machines in Difficult Soils (TBM DiGs Istanbul)*. Istanbul, 2016.

33. Lee H., Hoi H., Choi S., Chang S. Numerical Simulation of EPB Shield Tunnelling with TBM Operational Condition Control Using Coupled DEM-FDM. *Applied Sciences-Basel.* 2021, vol. 11. DOI: 10.3390/app11062551.

34. Dashko R. E., Karpenko A. G. Current state of above-ground and underground structures of the Alexander Column: an integral basis for its stability. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 263, pp. 757–773. [In Russ].

35. Melnikov R. V. Oedometer test data for finding hardening soil model parameters. *Akademicheskiy vestnik UralNIIproekt RAASN*. 2014, no. 4, pp. 90–94. [In Russ].

36. Hu X., He C., Walton G., Fang Y., Dai G. Laboratory model test of EPB shield tunneling in a cobble-rich soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2020, vol. 146. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.000235.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Протосеня Анатолий Григорьевич¹ — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой, e-mail: Protosenya_AG@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0001-7829-6743, *Кумов Всеволод Васильевич*¹ — аспирант, e-mail: vshuk1@mail.ru, ORCID ID: 0009-0006-2820-2941, ¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II. **Для контактов**: Кумов В.В., e-mail: vshuk1@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.G. Protosenya¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of Chair, e-mail: Protosenya_AG@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7829-6743,
V.V. Kumov¹, Graduate Student,
e-mail: vshuk1@mail.ru,
ORCID ID: 0009-0006-2820-2941,
¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.
Corresponding author: V.V. Kumov, e-mail: vshuk1@mail.ru.

Получена редакцией 11.12.2023; получена после рецензии 25.01.2024; принята к печати 10.03.2024. Received by the editors 11.12.2023; received after the review 25.01.2024; accepted for printing 10.03.2024.