

УДК 551.4.03:711.4

DOI: 10.18799/24131830/2024/9/3915

Шифр специальности ВАК: 1.6.7

## Геологические опасности при обосновании регламентов градостроительного развития

Е.Ю. Трацевская✉

Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, Беларусь, г. Гомель

✉ eltrats@mail.ru

**Аннотация. Актуальность.** Территориальное планирование городов обуславливает уменьшение или предупреждение возможных или существующих потерь населения, объектов хозяйства и окружающей природной среды от техноприродных опасностей разного генезиса. Эффективность планирования регламентов градостроительного развития зависит от степени обоснованности идентификации и прогнозов возникновения и эволюции опасных природных и техногенных процессов во времени и пространстве. Это в свою очередь определяется достоверностью наших представлений о закономерностях их формирования и регионального распространения. **Цель:** идентифицировать геологические опасности и предложить основные инженерно-геологические ограничения при градостроительном планировании на примере г. Гомеля. **Объекты:** природно-техногенная система города Гомеля. **Методы:** системный подход при анализе закономерностей формирования опасных природных и техноприродных процессов на территории города; численное моделирование геофильтрационных и геомиграционных процессов на базе геофильтрационной модели «GOMEL». **Результаты.** Установлены наиболее характерные опасные природные и техноприродные процессы на примере г. Гомеля. Выделены приоритетные для введения планировочных ограничений – тектоническая обстановка; техногенное подтопление. Отдельно рассмотрены грунтовые условия, как один из факторов влияния на осадки естественных и искусственных оснований под действием нагрузок от гражданских и промышленных зданий и сооружений. Выявлено наличие дизъюнктивных, а также пликвативных в виде флексур, разновозрастных и разномасштабных дислокаций, формирующих блоковую структуру верхней части земной коры города. Показано, что с точки зрения устойчивости инженерных сооружений опасность представляют абсолютные значения скоростей длиннопериодических однонаправленных смещений блоков при длительной эксплуатации сооружений, расположенных в межблоковых активных зонах. В то же время короткопериодические разнонаправленные движения в активных геодинамических зонах сочленения блоков обуславливают изменение наклона и изгиба оснований сооружений. Приведены инженерно-геологические особенности наиболее распространенных поверхностных отложений: терригенной сероцветной формации палеогена; ледниковой, перигляциальной и внеледниковой формаций антропогена и их фациально-генетических комплексов. Определены потенциальные природные и техноприродные опасности, связанные с отмеченными отложениями. Показаны причины и механизмы формирования техногенного подтопления города, а также природа снижения показателей деформационных свойств моренной супеси при техногенном увеличении влажности. Сделан вывод о том, что при установлении регламентов землепользования для города, как правило, не могут приниматься общие меры, как для всей его территории, так и для определенных стадий строительной деятельности. Приведены соответствующие ограничения пользования недрами.

**Ключевые слова:** регламенты, урбанистическая геология, геологические опасности, структурно-тектонические условия, грунты, осадка, подтопление

**Для цитирования:** Трацевская Е.Ю. Геологические опасности при обосновании регламентов градостроительного развития // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 9. – С. 73–83. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/3915

---

UDC 551.4.03:711.4

DOI: 10.18799/24131830/2024/9/3915

## Geological hazards when justifying the regulations of urban development

E.Yu. Tratsevskaya✉

Francysk Skaryna Gomel State University, Gomel, Belarus

✉eltrats@mail.ru

**Abstract. Relevance.** Territorial planning of cities determines the reduction or prevention of possible or existing losses of the population, economic facilities and the environment from technogenic-natural hazards of different genesis. The effectiveness of planning regulations for urban development depends on the degree of validity of identification and forecasts of the occurrence and evolution of hazardous natural and technogenic processes in time and space. This, in its turn, is determined by the reliability of our ideas about the patterns of their formation and regional distribution. **Aim.** To identify geological hazards and propose the main engineering and geological constraints in urban planning on the example of Gomel. **Objects.** Natural and technical system "geological environment – technogenic impacts – hazardous natural and technoprirodnye processes". **Methods.** Systematic approach to the analysis of patterns of formation of hazardous natural and technoprirodnye processes in the city; numerical modeling of geofiltration and geomigration processes based on the geofiltration model "GOMEL". **Results.** The most characteristic dangerous natural and technogenic-natural processes have been established on the example of the city of Gomel. Priority areas for the introduction of planning restrictions: tectonic situation; man-made flooding, were identified. Soil conditions are considered separately as one of the factors effecting the precipitation of natural and artificial bases under the influence of loads from civil and industrial buildings and structures. The authors have revealed the presence of disjunctive, as well as plicative in the form of flexures, age-varying and multi-scale dislocations forming the block structure of the upper part of the earth's crust of the city. It is shown that from the point of view of the stability of engineering structures, the absolute values of the velocities of long-period unidirectional block displacements are dangerous during long-term operation of structures located in interblock active zones. At the same time, short-period multidirectional movements in the active geodynamic zones of the articulation of blocks cause a change in the slope and bending of the foundations of structures. The paper introduces the engineering-geological features of the most common surface deposits: the terrigenous gray-colored formation of the Paleogene; glacial, periglacial and extraglacial formations of anthropogenic origin and their facies-genetic complexes. The authors identified the potential natural and technological hazards associated with the marked deposits. The paper demonstrates the causes and mechanisms of the formation of technogenic flooding of the city, as well as the genesis of the decrease in the deformation properties of moraine sandy loam with a technogenic increase in humidity. It is concluded that when establishing land use regulations for a city, as a rule, general measures cannot be taken, both for its entire territory and for certain stages of construction activity. The paper introduces the corresponding restrictions on the use of subsoil.

**Keywords:** regulations, urban geology, geological hazards, structural and tectonic conditions, soils, sediment, flooding

**For citation:** Tratsevskaya E.Y. Geological hazards when justifying the regulations of urban development. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 9, pp. 73–83. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/3915

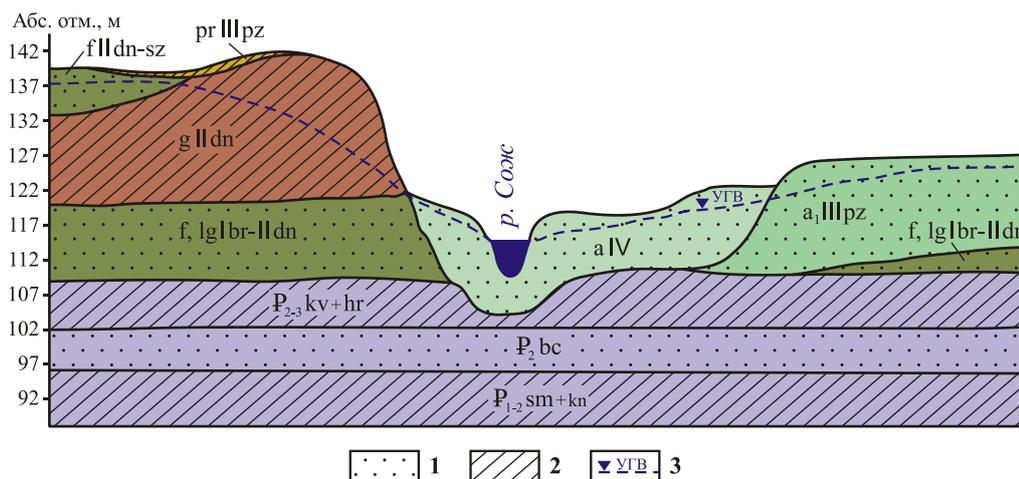
### Введение

Геологическая среда г. Гомеля выбрана в качестве объекта исследования, так как это один из крупнейших городов Беларуси, административный центр Гомельской области. Он расположен в юго-восточной части республики на реке Сож, площадь составляет 139 км<sup>2</sup>, территория вытянута с севера на юг примерно на 17 км. Город является важным промышленным центром с населением 510 тысяч человек.

Климат Гомеля, как и всей республики, умеренно континентальный, природные условия характеризуются значительным количеством атмосферных осадков (годовая сумма – 610 мм). Около 70 % осадков выпадает в теплый период года с апреля по

октябрь. Среднегодовая температура воздуха +6,2 °С. Максимальная мощность деятельного слоя составляет 1,47 м.

Рельеф города и его ближайших окрестностей представлен сильно размытой пологоволнистой водно-ледниковой равниной, двумя надпойменными террасами реки Сож аккумулятивными по левобережью и эрозионно-аккумулятивными на правом борту долины, а также низменной аллювиальной равниной с пойменным микрорельефом левобережья (рис. 1). Общий уклон поверхности – с севера на юг. Самая высокая точка – 144 м, самая низкая – урез Сожа – 115 м над уровнем моря. Относительные превышения в пределах города 10–15 м.



**Рис. 1.** Схематический разрез верхних горизонтов платформенного чехла территории г. Гомеля: 1) водопроницаемые породы, 2) слабопроницаемые породы 3) уровень грунтовых вод

**Fig. 1.** Schematic section of the upper horizons of the platform cover of the territory of Gomel: 1) water-permeable rocks, 2) weakly permeable rocks 3) groundwater level

Поверхностные воды представлены реками, озерами и прудами. Русло р. Сож в пределах городской черты имеет ширину 200–300 м, средняя глубина 1–3 м. Коэффициент меандрирования составляет 1,03–2,22. У восточного края городской черты слева в Сож впадает река Ипуть.

На состояние геологической среды г. Гомеля, как и любого другого города, оказывают влияние десятки видов природных и природно-техногенных процессов. Геологические опасности связаны, в первую очередь, с наличием разломов, проявляющих активность на современной этапе; оврагами, болотами, заболоченными и пойменными участками, в т. ч. погребенными антропогенными отложениями; развиты процессы суффозии, пльвуны; склоны и откосы характеризуются неустойчивым состоянием.

Характер техногенного воздействия на естественную среду во многом определяется функциональным районированием городской территории. Планировочную структуру г. Гомеля формируют четыре основные функциональные зоны: жилая, общественная, производственная и ландшафтно-рекреационная, с присущими им источниками и типами техногенных воздействий. Антропогенное влияние приводит к изменению хода природных процессов, обуславливает возникновение новых инженерно-геологических процессов, которые вызывают закономерные изменения состава, состояния и свойств определенных элементов геологической среды, что, в свою очередь, отражается в градостроительной ценности территории.

### Состояние проблемы

Обострение геоэкологических проблем городов, приходящееся на середину прошлого века, привело

к тому, что урбанистическая геология в 1960-е гг. оформилась как самостоятельная дисциплина [1, 2]. Предметом ее изучения являются взаимосвязи между человеком и геологической средой в пределах урбанизированных территорий и возникающие в результате этих взаимосвязей техноприродные процессы.

Изучением отдельных аспектов инженерной геологии, имеющих непосредственное отношение к проблемам геологии городов, с середины прошлого века занимались многие ученые: И.В. Попов, Г.С. Золотарев, Л.Д. Белый, Г.А. Голодковская и др. В то время были созданы теоретические и методологические основы инженерно-геологического (генетико-морфологического и оценочного) районирования, в том числе и городских территорий. В конце прошлого – начале нынешнего столетия при районировании стали принимать во внимание устойчивость геологической среды и ее емкость. Была разработана методика риск-анализа, базирующаяся на таких понятиях, как уязвимость городской среды, геологические опасности, прогнозируемый ущерб (В.И. Осипов, В.А. Королев, Г.А. Голодковская, А.Л. Рагозина, Е.С. Дзекцер, Т.Я. Емельянова, Л.А. Строкова Л.А. и др.).

Проблема адаптации инженерно-геологического районирования городских территорий к современным требованиям широко обсуждается в научной литературе [2–25]. Как подчеркивается в статье Осипова с соавторами: «В настоящее время за рубежом общепризнано, что наиболее эффективным экономическим инструментом для обеспечения устойчивого развития городов и управления рисками является территориальное планирование, согласованное с картами природных опасностей, где указаны запреты или ограничения к освоению тер-

риторий того или иного назначения. ... Эта проблема на количественном уровне ... не решена еще нигде в мире» [1].

Прикладной аспект изучения геологии городов отражается в установлении регламентов градостроительного развития и использования территории нормативными документами. Так, например, в Беларуси генеральными планами развития городских населенных пунктов предусматривается составление схем планировочных ограничений. К имеющим ограничения относятся территории, неблагоприятные для строительства, в том числе по инженерно-геологическим условиям (состояние грунтов, затопление и подтопление грунтовыми водами, активные овраги, просадки, заторфованность и т. д.).

### **Геологические опасности**

Для введения планировочных ограничений из всех перечисленных выше опасных техноприродных процессов и явлений актуальными представляются тектоническая обстановка; техногенное подтопление, а также грунтовые условия как один из факторов влияния на осадки естественных и искусственных оснований под действием нагрузок от гражданских и промышленных зданий и сооружений.

### **Структурно-тектонические условия**

Современное состояние геологической среды, обусловленное динамическим взаимодействием разновозрастных и разномасштабных тектонических структур, существенно влияет на инженерно-геологические условия урбанизированных территорий. Особую роль при этом играют активные геологические разломы, по которым происходили и происходят в настоящее время горизонтальное и вертикальное перемещения блоков. Эти движения создают неустойчивые зоны в геологической среде, являющиеся неблагоприятными для строительства инженерных сооружений.

Гомель располагается на западной периклинали Воронежской антеклизы Русской плиты. Породы, сформировавшиеся во время киммерийско-альпийского этапа, образуют наклоненную на юг моноклиаль северного крыла Украинской синеклизы. Все установленные на его территории разрывные нарушения были сформированы и развивались до раннего триаса [26]. Возможно, некоторые из дизъюнктивов сохраняли или возобновляли тектоническую активность и в последующие этапы платформенного развития вплоть до современной эпохи. Подвижки пород по сместителям наблюдаются на глубинах более 350 м, поэтому разломы кристаллического фундамента и нижней части платформенного чехла оказывают пассивное влияние на инженерно-геологические условия. Они обуславливают формирование трещинной зоны

платформенного чехла, а также новейших тектонических структур.

В результате выполненных нами исследований в пределах г. Гомеля и его окрестностей выявлено наличие дизъюнктивных и пликвативных в виде флексур разновозрастных и разномасштабных дислокаций (геоактивных зон), формирующих блоковую структуру верхней части земной коры, выделено 10 блоков (рис. 2) [26].

С точки зрения устойчивости инженерных сооружений опасность представляют, во-первых, абсолютные значения скоростей длиннопериодических однонаправленных смещений блоков при длительной эксплуатации сооружений, расположенных в межблоковых активных зонах. Во-вторых, короткопериодические разнонаправленные движения в активных геодинамических зонах сочленения блоков (смыкающие крылья флексур), обуславливающие изменение наклона и изгиба оснований сооружений.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о потенциальной опасности современного динамического состояния геологической среды г. Гомеля относительно целостности инженерных сооружений в период, определённый для срока их эксплуатации.

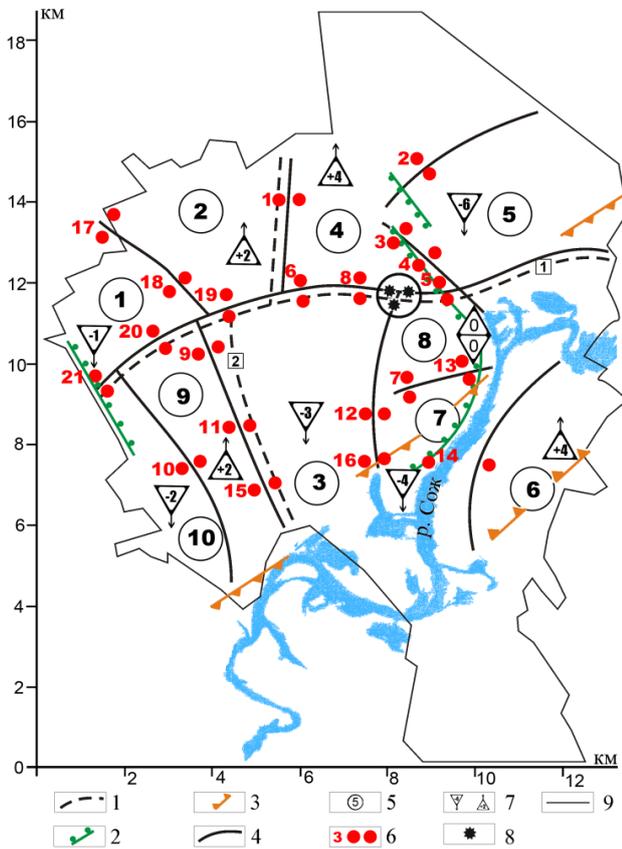
### **Осадки грунтов естественных оснований, формирующиеся за счет нагрузок от гражданских и промышленных зданий и сооружений**

В сферу влияния инженерных сооружений попадают породы самой верхней части киммерийско-альпийского структурного комплекса, принадлежащие терригенной сероцветной формации палеогена и гравийно-песчано-глинистой ледниковой формации антропогена. Отложения неогеновой системы на территории Гомеля не установлены.

В процессе инженерно-геологическом районировании нами выделено 2 области и 9 инженерно-геологических районов. При установлении регламентов в первую очередь обращают на себя внимание районы, занимающие значительные площади и в большей мере определяющие инженерно-геологический облик территории. К ним относятся те из них, в которых с поверхности залегают моренные супеси и суглинки ледникового фациально-генетического комплекса днепровского горизонта (в рельефе – моренная равнина); районы, сложенные с поверхности днепровско-сожскими флювиогляциальными песками (в рельефе – зандровая равнина) и современными аллювиальными отложениями пойм (внеледниковая формация).

*Терригенная сероцветная формация палеогена.* Отложения киевской свиты эоцена (Р<sub>2</sub>kv) представлены алевролитами, песками глинистыми, алевролитами, глинами; иногда песками кварцевыми, в раз-

личной степени глауконитовыми. Отложения эоцен-олигоцена (харьковская свита –  $P_2^3-P_3^1$ hr) преимущественно песчаные. Кровля последних вскрыта отдельными скважинами на глубинах от 2,0 до 25,0 м; максимальная вскрытая мощность – 19,8 м.



**Рис. 2.** Карта-схема расположения геоактивных зон г. Гомеля: 1) тектонические нарушения, установленные по геологическим данным; 2) выраженная в рельефе кольцевая структура; 3) региональная геоактивная зона; 4) границы блоков; 5) номера блоков; 6) смежные пары деформационных знаков; 7) вертикальные скорости и направления движения блоков; 8) нивелирные знаки локальных исследований; 9) граница города

**Fig. 2.** Map-layout of the geo-active zones of Gomel: 1) tectonic disturbances established by geological data; 2) ring structure expressed in relief; 3) regional geo-active zone; 4) block boundaries; 5) block numbers; 6) adjacent pairs of deformation signs; 7) vertical speeds and directions of movement of blocks; 8) leveling signs of local research; 9) city border

Плотность и состояние морских глинистых пород различны. Суглинки при естественной влажности  $\omega=15\%$  имеют плотность грунта  $\rho=1,52\text{ г/см}^3$ , коэффициент пористости  $e=0,96$ . Они относятся к сильно деформируемым грунтам, модуль общих деформаций  $E=2,5-4,9\text{ МПа}$  (компрессионные ис-

пытания при давлении  $P=0,1-0,2\text{ МПа}$ ). Удельное сцепление  $C=0,14\text{ МПа}$ , угол внутреннего трения  $\varphi=14^\circ$ .

Супеси характеризуются естественной влажностью  $\omega=20-35\%$ , плотностью  $\rho=1,52\text{ г/см}^3$ , коэффициентом пористости  $e=0,96$ . Они относятся к среднесжимаемым грунтам –  $E=12-16\text{ МПа}$  (штамповые испытания при давлении  $P=0,1-0,3\text{ МПа}$ ). Удельное сцепление  $C=0,022-0,038\text{ МПа}$ , угол внутреннего трения  $\varphi=24-27^\circ$ .

С перечисленными отложениями связан целый ряд геологических опасностей. Песчаные породы подвержены механической суффозии; при критических градиентах фильтрации, как правило, формируют ложные плывуны. Из-за повышенного содержания пылеватых частиц (50% и более) эти грунты при механическом воздействии и дополнительном увлажнении способны терять связность (размокать) и оплывать [3].

**Ледниковая формация.** Ледниковый фациально-генетический комплекс представлен моренными глинистыми породами (преимущественно супесями) днепровского подгоризонта (gII<sub>d</sub>) припятского горизонта (gII<sub>pr</sub>) (калужский и горкинский подгоризонты среднерусского горизонта). Мощность отложений от нескольких до 10–15 м.

В общем для моренных грунтов в естественном залегании характерны невысокие значения влажности  $\omega=9,7-10,1\%$ , повышенная плотность  $\rho=2,07-2,25\text{ г/см}^3$ , коэффициент пористости  $e=0,32-0,44$ . Значения модуля общих деформаций  $E$ , установленные штамповыми испытаниями в интервале вертикального давления, например,  $P=0,1-0,3\text{ МПа}$ , изменяются от 10 до 42 МПа в зависимости от консистенции грунта; удельное сцепление  $C$  – от 0,023 до 0,025 МПа, угол внутреннего трения  $\varphi=26-36^\circ$ .

В естественном залегании, как правило, ледниковые отложения являются довольно надежным основанием. Но в современных условиях, когда в геологической среде города имеется тенденция к развитию техногенного подтопления и, как следствие, к увеличению влажности грунтов, необходимо учитывать снижение их несущей способности. Из глинистых грунтов различных геологических комплексов именно ледниковые сильнее всего реагируют на увеличение влажности, причем тем больше, чем меньше их естественная влажность и больше плотность сложения. Следует отметить, что увеличение влажности моренных супесей и суглинков до 10–25% является причиной стремительного увеличения их коррозионной активности. В деятельном слое они предрасположены к морозному пучению. При вскрытии строительными котлованами опасности могут быть обуслов-

лены легкой размываемостью глинистых разностей и их подверженности линейной эрозии.

Флювиогляциальный фациально-генетический комплекс представлен в объеме нерасчлененных березинско-припятских (fIbr-pr) (окско-среднерусских) и днепровско-сожских (fId-sz) (горкинско-московских) образований. Как правило, это пески различного гранулометрического состава, реже – глинистые или грубообломочные грунты. Вскрытая мощность до 21,30 м.

Флювиогляциальные пески по своим свойствам мало отличаются от других песков, образовавшихся в субэраляльных перигляциальных или внеледниковых обстановках рассматриваемой территории. Им характерна только несколько большая плотность. Естественная влажность  $\omega$  колеблется в основном в небольших пределах – 3,4–6,0 %, плотность изменяется от 1,69 до 1,76 г/см<sup>3</sup>; коэффициент пористости  $e=0,60–0,65$ . Модуль общих деформаций  $E=28\div 49$  МПа (штамповые испытания, давление 0,1–0,3 МПа). Значения удельного сцепления  $C$  варьируют в пределах 0,002–0,005 МПа (консолидированно-дренированный плоский срез), углы внутреннего трения  $\varphi$  изменяются от 33 до 38°.

В толще флювиогляциальных песков местами залегают прослои и линзы глинистых грунтов, которые характеризуются несколько худшими показателями деформационных свойств по сравнению с песками, – значения модуля общих деформаций  $E$  принимают значения, например, у супеси от 8,0 до 21 МПа. Также значительно снижены значения угла внутреннего трения до 18–36°. Значения удельного сцепления характеризуются относительно повышенными показателями –  $C$  изменяется в пределах 0,008–0,048 МПа.

Для массивов флювиогляциальных грунтов характерна сингенетическая неоднородность, которая в большей степени определяет потенциальные опасности для строительства и надежной эксплуатации различных инженерных сооружений. При определенных условиях несвязные разности способны формировать псевдоплывуны.

*Перигляциальная* (поозерская – Ппрз), (валдайская) и *внеледниковая* (голоцен IVhl) *формации*. Покровные образования. Верхняя часть отложений днепровской морены и днепровско-сожского флювиогляциала преобразуются под воздействием гипергенных процессов, в результате чего формируется маломощная (до 1,5 м) толща неоднородных песков палево-желтых, пылеватых, супесей и суглинков. В покровных отложениях преобладают супеси легкие, пылеватые, лессовидные. В их гранулометрическом составе на долю глинистых частиц (диаметр меньше 0,005 мм) приходится от 6,0 до 10,8 %, алевритовых – 20–62 %, песчаные частицы составляют от 31,6 до 70,7 %. Сравнительно

большое содержание алевритовых частиц и незначительное глинистых обуславливает водонепроницаемость данных грунтов. Показатели естественной влажности  $\omega$  колеблются в пределах 0,06–0,20; плотности  $\rho$  – от 1,78 до 2,17 г/см<sup>3</sup>; коэффициента пористости  $e$  – от 0,32 до 0,99. Значения модуля общих деформаций  $E$  варьирует в пределах 5,9–25 МПа (штамповые испытания при вертикальном давлении  $P=0,25\div 0,30$  МПа), удельное сцепление  $C$ , определенное методом консолидированно-дренированного плоского среза, достигает значений 0,047 МПа, а угол внутреннего трения  $\varphi$  – 31°.

С покровными отложениями на территории Гомеля связано развитие целого спектра экзогенных геологических и инженерно-геологических процессов и явлений – эрозионных, суффозионно-эрозионных, оползневых и т. д. При оттаивании покровные отложения нередко разжижаются и теряют несущую способность. Такие особенности необходимо учитывать при проектировании различных сооружений, имеющих небольшой объем подземной части, в первую очередь – инженерных коммуникаций, местных автомобильных дорог и т. п.

Из всего комплекса нерасчлененных аллювиальных, озерных, озерно-аллювиальных, болотных, эоловых, пролювиальных, делювиальных отложений с точки зрения формирования геологических опасностей обращают на себя внимания породы пойменной и старичной фаций аллювия. Свойства пойменных и старичных отложений формируются в обстановках позднего диагенеза прогрессивного литогенеза, т. е. их уплотнение продолжается, состояние равновесия и консолидация еще не достигнуты, что является причиной неустойчивости. В отложениях преобладают супеси и суглинки, местами заторфованные, пески от пылеватых до крупных часто заиленные, сапропели и торфы. Органическое вещество представлено растительным детритом различной величины и степени разложения, тонко рассеянным коллоидным веществом, гумусом. Вскрытая мощность пород до 17 м.

Формирование геологических опасностей обусловлено чрезвычайно сильной незакономерной неоднородностью отложений, выраженной на очень небольших расстояниях, как по простиранию, так и по глубине, а также невыдержанностью литологических границ. Грунты характеризуются сравнительно высокими показателями влажности ( $\omega=17,0–24,2$  %), влагоемкости (влажность верхнего предела текучести  $W_L=22,7–25,3$  %), пористости ( $e=0,57–0,76$ ) и пониженной плотностью; неустойчивой скрыто-мягкопластичной или даже скрыто-текучей консистенцией связных грунтов; а также анизотропией свойств, обусловленной слоистостью. Они имеют малое сопротивление сдвигу ( $C=0,01$  МПа,  $\varphi=30^\circ$ ), отдельные разности сильно

неравномерно и длительно сжимаемы. Значения модуля общих деформаций  $E$  составляют 12–14 МПа. При динамических воздействиях могут проявляться тиксотропные явления, формироваться пльвуны. Наличие органики обуславливает агрессивные свойства грунтовых вод.

#### **Техногенное подтопление**

Одним из наиболее опасных процессов, развивающихся в г. Гомеле, представляется техногенное подтопление, причиной которого является разбалансировка составляющих элементов гидросферы.

Механизм формирования подтопления в границах города можно рассмотреть на примере основных типичных схем увлажнения пород зоны аэрации при различных условиях движения фронта (границы) промачивания.

*Первая схема* – образование водных куполов. Толща слабопроницаемых пород мощностью до 27 м с определенной упругой емкостью подстилается водонасыщенными породами. Уровень грунтовых вод (УГВ) залегает в слабопроницаемых породах на значительных глубинах – более 5, иногда более 12–15 м. Фронт промачивания перемещается сверху вниз, влагоперенос обуславливает увеличение влажности грунтов. Увлажнение в плане носит неравномерный характер и определяется расположением источников инфильтрации (водонесущие коммуникации, дающие систематические утечки). Под источниками инфильтрации на УГВ формируются поднимающиеся купола грунтовых вод, которые приводят к неравномерному в плане обводнению пород, но уже снизу вверх. По результатам проведенного моделирования [27], максимальная высота купола относительно первоначального положения УГВ составляет 3,0 м и достигается за 10-летний срок, после чего стабилизируется. Радиус растекания за это время достигнет 550 м. Растекание происходит медленно, поэтому даже через 30 лет купола остаются хорошо выраженными. При близком расположении источников инфильтрации в течение года купола начинают смыкаться. Наиболее интенсивно подъем происходит в первые 5 лет и затем затухает, приближаясь к стационарному режиму.

Для моренных супесей характерны коагуляционные и переходные межчастичные контакты. Важной особенностью переходных контактов является их неустойчивость по отношению к воде, т. е. способность гидратироваться и переходить в коагуляционные контакты при снятии внешнего давления и увлажнения системы. Моренные отложения испытали большую ледниковую нагрузку (8–9 МПа), что привело к утоньшению и последующему прорыву гидратной оболочки глинистых частиц с образованием специфических контактов переходного типа за счет ионно-электростатических взаимодействий

между частицами. При снятии внешнего давления и (или) увлажнении системы, вызванных таянием ледника или другими, в том числе техногенными, причинами, контакты переходят в менее прочные коагуляционные (регрессивный литогенез). В связи с этим при подтоплении деформируемость грунтов увеличивается по некоторым данным в 1,5–2,0 и даже до 5 раз, удельное сцепление  $C$  может уменьшиться в 2–2,5 раза. По нашим данным, для моренных супесей при увеличении влажности до полного водонасыщения значения модуля  $E$  могут уменьшиться в 2,87 раза. Неравномерный характер обводнения в плане приводит к неравномерной деформации пород, что представляет собой опасность для строящихся или уже построенных инженерных объектов из-за возможности возникновения неравномерности осадок их различных частей. Такой механизм развития процесса подтопления в основном имеет место в центральной и северной частях города в пределах среднечетвертичной моренной равнины.

*Вторая схема* – фронтальное движение грунтовых вод. Толща проницаемых пород мощностью до 12 м, характеризующаяся гравитационной емкостью, подстилается слабопроницаемыми породами. Грунтовые воды находятся на глубине 2–3 м от поверхности земли. Фронт просачивания перемещается сверху вниз. Как и в первом случае, под источниками инфильтрации формируются поднимающиеся купола грунтовых вод. Но они, в отличие от первой схемы, имеют небольшую высоту – 0,1–0,2 м, гораздо быстрее достигают стационарного положения по высоте (за 1 год). Максимальный радиус растекания составляет 110 м и стабилизируется через 5–10 лет. Фронт обводнения перемещается снизу вверх, но относительно равномерно, и деформации пород в этом случае являются более равномерными и поэтому менее опасными. Таким образом происходит подтопление в границах залегания дисперсных, главным образом несвязных грунтов потоково-водной (флювиальной) парагенетической группы средне-, верхнечетвертичных и современных отложений, распространенных в западной, восточной и южной частях города.

Глубина залегания уровня грунтовых вод здесь сопоставима с глубиной заложения фундаментов и/или активной зоной инженерных сооружений, поэтому подтопление может спровоцировать затопление заглубленных помещений, в результате которого появляется сырость и грибковые образования на стенах; исключается хранение в подвалах имущества и пищевых продуктов; создается благоприятная среда для развития комаров, заболевания людей; резко осложняются условия содержания и ремонта систем водо-, электро- и газоснабжения, ускоряется их износ.

Появление и развитие процесса подтопления, как известно, обусловлено целым рядом причин.

Во-первых, это дополнительное инфильтрационное питание грунтовых вод из-за систематических и аварийных утечек воды из водонесущих коммуникаций. Самыми важными мероприятиями в этом случае является исключение утечек и хорошо организованный отвод дождевых вод, что решается организацией мониторинга за сохранностью подземных коммуникаций (внешних, внутренних, а также в местах их ввода) (СТО 36551 501-008-2007) или расчетом нормируемых потерь.

Во-вторых, нарушение условий дренирования территории и подземного стока. В этом случае регламенты должны определяться как для водосборных площадей естественных дренирующих систем, так и для зон влияния инженерных сооружений.

### **Регламенты недропользования при градостроительном развитии**

Градостроительные регламенты являются нормативной сферой управления процессом городского развития, застройкой и использованием территорий. Они направлены на обоснование безопасного развития городских территорий в социальных, экономических, экологических аспектах и в конечном итоге на повышение их инвестиционной привлекательности. Регламенты недропользования городских территорий в разной степени имеют свое отражение в карте планировочных ограничений генерального плана города, оценочном зонировании при составлении кадастровой карты, схемы инженерно-геологического районирования для строительства, градостроительном паспорте земельного участка и т. п.

Основой для выработки регламентов использования городских недр является предрасположенность геологической среды до определенной глубины к активизации геологических и инженерно-геологических процессов и загрязнению подземных вод в результате хозяйственной деятельности человека. Как было показано выше, опасные природные и техноприродные процессы определяются комплексом взаимосвязанных причин. Поэтому регламенты недропользования должны носить системный характер, т. е. должна быть разработана система правил использования городской территории на каждом этапе строительной деятельности, определенном, например, в СН 1.02.01-2019. Причем на стадии инженерно-геологической рекогносцировки (разработка предпроектной документации) и съемки (разработка архитектурного проекта) приоритетными являются природные условия, а на стадии разработки строительного проекта и на всех последующих стадиях в период строительства и эксплуатации объекта техногенные факторы начинают контролировать природные.

При разработке документации любого этапа строительных работ важно учитывать, что регламенты землепользования необходимо предусматривать для каждого выделенного инженерно-геологического района. Если какая-либо рассматриваемая из намеченных площадок строительства располагается в нескольких инженерно-геологических районах, то и регламенты землепользования для этих районов могут быть различными. То есть при установлении регламентов землепользования для города, как правило, не могут приниматься общие меры, как для всей его территории, так и для определенных стадий производства строительных работ.

На стадии разработки предпроектной документации и архитектурного проекта при принятии планировочных решений необходимо учитывать влияние геоактивных зон с точки зрения рационального размещения инженерных сооружений, устойчивости их оснований.

Профилактические и защитные мероприятия от техногенного подтопления подробно и всесторонне рассмотрены в научной и нормативной литературе. Следует подчеркнуть, что важным условием эффективности их применения является учет инженерно-геологической обстановки формирования подтопления, а также понимание того, что является объектом защиты.

При разработке строительного проекта необходимо учитывать возможное присутствие в моренных глинистых грунтах внутриморенных водоносных песчаных прослоев, содержащих напорные воды, и линз слабых мягких глин и суглинков с относительно более низкими прочностными и деформационными свойствами, а также склонность отложений к морозному пучению.

При размещении строительной площадки на современных аллювиальных отложениях пойм нужно иметь в виду, что грунты характеризуются чрезвычайно сильной незакономерной неоднородностью, выраженной на очень небольших расстояниях, как по простирацию, так и по глубине, а также невыдержанностью литологических границ. Кроме того, отдельные разности сильно неравномерно и длительно сжимаемы, при динамических воздействиях могут проявляться тиксотропные явления и формироваться пльвуны, а наличие органики обуславливает агрессивные свойства грунтовых вод.

Во время строительства при вскрытии котлованами песчаных грунтов палеогена и внутриморенных водоносных песчаных прослоев при высоких гидравлических градиентах могут формироваться суффозия и ложные пльвуны, песчано-глинистые грунты палеогена могут размокать и оплывать.

При планировании застройки на покровных отложениях не следует допускать перерывов в

устройстве оснований и возведении фундаментов, т. к. грунты склонны к снижению прочности и переходу в пльвинное состояние в процессе их преобразования в открытых котлованах.

В период эксплуатации объекта нужно иметь в виду, что при техногенном подтоплении глинистых моренных грунтов ухудшаются показатели их механических свойств. В случае точечных утечек из внутренних сетей здания уменьшение модуля деформации в отдельных локальных участках основания может привести к интенсивному развитию осадок, увеличению их неравномерности в контурах здания и, следовательно, к развитию поврежденных в несущих конструкциях.

Регулирование русел рек, расчистка и углубление водоемов, оврагов, мелких рек и ручьев зандровой равнины позволяют увеличить их дренажную способность и таким образом понизить уровни грунтовых вод и, соответственно, опасность подтопления.

## Заключение

Правила землепользования городов должны носить системный характер и, как правило, не могут предусматривать общие меры, как для всей территории, так и для определенных стадий производства строительных работ. При принятии планировочных решений на стадиях предпроектной документации и архитектурного проекта приоритетными являются природные условия, а на стадиях разработки строительного проекта, в период строительства и эксплуатации объекта первостепенное значение приобретают техногенные факторы.

Комплексный подход к идентификации геологических опасностей (тектонической обстановки, техногенного подтопления, грунтовых условий) и соотношение их с видами инженерно-геологических исследований позволили определить регламенты недропользования при градостроительном развитии на примере г. Гомеля.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осипов В.И., Еремина О.Н., Козлякова И.В. Оценка экзогенных опасностей и геологического риска на урбанизированных территориях (обзор зарубежного опыта) // Геозкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2017. – № 3. – С. 3–15.
2. Culshaw M.G., Price S.J. The 2010 Hans Cloos Lecture. The contribution of urban geology to the development, regeneration and conservation of cities // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2010. – Vol. 70. – № 3. – P. 333–376.
3. Бурова В.Н. Основные принципы оценки риска урбанизированных территорий // Геозкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2020. – № 5. – С. 78–88.
4. Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its relation with urban development / H.Z. Abidin, H. Andreas, I. Gumilar, Y. Fukuda, Y.E. Pohan, T. Deguchi // *Natural Hazards*. – 2011. – Vol. 59 (3). – P. 1–19. DOI: 10.1007/s11069-011-9869-9
5. De Mulder E.F.J., Pereira J.J. Earth Science for the city // *Engineering geology for tomorrow's cities*. Geological Society / Eds. M.G. Culshaw, H.J. Reeves, I. Jefferson, T.W. Spink. London, Engineering Geology Special Publications. – 2009. – Vol. 22. – P. 25–31. DOI: 10.1144/EGSP22.2
6. Lewis S.L., Maslin M.A. Geological evidence for the Anthropocene // *Science*. – 2015. – Vol. 349. – Iss. 6245. – P. 246–247. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.349.6245.246-b>
7. Marker B.R. Urban planning: the geoscience input // *Developments in Engineering Geology* Geological Society / Eds. M.J. Eggers, J.S. Griffiths et al. – London: Engineering Geology Special Publication. – 2016. – Vol. 27. – P. 35–43. DOI: <https://doi.org/10.1144/EGSP27.3>
8. Mucella Ates. The role of smart urban solutions on the way to smart territories: smart solutions to the problems of urbanization // *Information Technology and Communication Authority*. – Turkey, 2020. – P. 18. DOI: 10.4018/978-1-7998-2097-0.ch001
9. Urban futures: the sustainable management of the ground beneath cities / S.J. Price, J.R. Ford, S.D.G. Campbell, I. Jefferson // *Developments in Engineering Geology*. Geological Society / Eds. M.J. Eggers, J.S. Griffiths et al. – London: Engineering Geology Special Publication, 2016. – Vol. 27. – P. 19–33. DOI: 10.1144/EGSP27.2
10. Waltham T. Sinking cities – Feature // *Geology Today*. – 2002. – Vol. 18 (3). – P. 95–100. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2451.2002.00341>
11. Голодковская Г.А., Елисеев Ю.Б. Геологическая среда промышленных регионов. – М.: Недра, 1989. – 219 с.
12. Емельянова Т.Я., Строкова Л.А. О принципах и методике районирования территории по устойчивости геологической среды к техногенному воздействию (на примере Томского Приобья) // Геозкология. – 1999. – № 2. – С. 164–171.
13. Заиканов В.Г., Минакова Т.Б., Булдакова Е.В. Геозкологические процессы в городе и оценка их опасности // Геозкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2022. – № 3. – С. 82–96.
14. Геозкологические исследования и оценка урбанизированных территорий / В.Г. Заиканов, Т.Б. Минакова, Н.С. Просунцова, Е.Б. Смирнова, Т.Н. Жигарева и др. // Геозкология. – 2000. – № 5. – С. 410–421.
15. Кофф Г.Л., Минакова Т.Б., Котлов В.Ф. Методические основы оценки техногенных изменений геологической среды городов. – М.: Наука, 1990. – 197 с.
16. Starovoitov E.I., Tratsevskaya E.Yu., Kuznetsova E.L. Of dynamic characteristics three-phase soils and three-layer beams // *Journal of the Balkan Tribological Association*. – 2021. – Vol. 27. – № 5. – P. 929–946.
17. Трацевская Е.Ю. Закономерности формирования геологических опасностей Беларуси: монография. – Гомель: 2008. – 121 с.
18. Трацевская Е.Ю. Идентификация и прогнозирование геологических опасностей при городском строительстве, и районирование территории г. Гомеля по условиям их формирования // *Вестник Брестского университета*. – 2009. – № 1 (32). – С. 165–177.

19. Трацевская Е.Ю. К вопросу о геологическом обосновании инженерной защиты городов (на примере г. Гомеля) // Промышленное и гражданское строительство. – 2005. – № 3. – С. 46–47.
20. Фуникова В.В., Дудлер И.В. Проблема нарастающей опасности техногенных изменений геологической среды и пути ее решения // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2022. – № 1. – С. 3–12.
21. Фуникова В.В., Дудлер И.В., Бутаев Р.Т. Техногенные изменения режима подземных вод на застроенных территориях (геоэкологические, инженерно-геологические и гидрогеологические аспекты) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2022. – № 2. – С. 21–32.
22. Zhuravkov M.A., Lyu Yongtao, Starovoitov E.I. Mechanics of Solid Deformable Body. – Singapore: Springer, 2023. – 317 p.
23. Vakhneev S., Starovoitov E. Damping of circular composite viscoelastic plate vibration under neutron irradiation // Journal of Applied Engineering Science. – 2020. – Vol. 18 (4). – P. 699–704
24. Pronina P.F., Tushavina O.V., Starovoitov E.I. Study of the radiation situation in Moscow by investigating elastoplastic bodies in a neutron flux taking into account thermal effects // Periódico Tchê Química. – 2020. – Vol. 17. – № 35. – P. 753–764.
25. Трацевская Е.Ю. Оценка геологических рисков на территории г. Гомель // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2006. – № 2. – С. 124–134.
26. Трацевская Е.Ю., Абрамович О.К. Современное динамическое состояние геологической среды г. Гомеля и его влияние на инженерно-геологические условия // Литосфера. – 2008. – № 2 (29). – С. 129–137.
27. Трацевская Е.Ю., Жогло В.Г. Оценка физической уязвимости территории и дифференцированного экономического риска от процесса техногенного подтопления (на примере г. Гомеля) // Сергеевские чтения. – М.: ГЕОС, 2007. – Вып. 9. – С. 251–255.

### Информация об авторах

**Трацевская Елена Юрьевна**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии и географии, Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, Беларусь, 246028, г. Гомель, ул. Советская, 104; eltrats@mail.ru

Поступила в редакцию: 03.11.2023

Поступила после рецензирования: 06.11.2023

Принята к публикации: 03.09.2024

### REFERENCES

1. Osipov V.I., Eremina O.N., Kozlyakova I.V. Assessment of exogenous hazards and geological risk in urbanized territories (review of foreign experience). *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, 2017, no. 3, pp. 3–15. (In Russ.)
2. Culshaw M.G., Price S.J. The 2010 Hans Cloos Lecture. The contribution of urban geology to the development, regeneration and conservation of cities. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2010, vol. 70, no. 3, pp. 333–376.
3. Burova V.N. Basic principles of risk assessment of urbanized territories. *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology Geocryology*, 2020, no. 5. pp. 78–88. (In Russ.)
4. Abidin H.Z., Andreas H., Gumilar I., Fukuda Y., Pohan Y.E., Deguchi T. Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its relation with urban development. *Natural Hazards*, 2011, vol. 59 (3), pp. 1–19. DOI: 10.1007/s11069-011-9869-9
5. De Mulder E.F.J., Pereira J.J. Earth Science for the city. *Engineering geology for tomorrow's cities. Geological Society*. Eds. Culshaw M.G., Reeves H.J., Jefferson I., Spink T.W. London, Engineering Geology Special Publications, 2009. Vol. 22, pp. 25–31. DOI: 10.1144/EGSP22.2
6. Lewis S.L., Maslin M.A. Geological evidence for the Anthropocene. *Science*, 2015, vol. 349, Iss. 6245, pp. 246–247. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.349.6245.246-b>
7. Marker B.R. Urban planning: the geoscience input. *Developments in Engineering Geology. Geological Society*. Eds. M.J. Eggers, J.S. Griffiths. London, Engineering Geology Special Publication, 2016. Vol. 27. pp. 35–43. DOI: <https://doi.org/10.1144/EGSP27.3>
8. Mucella Ates. The role of smart urban solutions on the way to smart territories: smart solutions to the problems of urbanization. *Information Technology and Communication Authority*, Turkey, 2020. pp. 1–18. DOI: 10.4018/978-1-7998-2097-0.ch001
9. Price S.J., Ford J.R., Campbell S.D.G., Jefferson I. Urban futures: the sustainable management of the ground beneath cities. *Developments in Engineering Geology. Geological Society*. Eds. M.J. Eggers, J.S. Griffiths. London, Engineering Geology Special Publication, 2016. Vol. 27. pp. 19–33. DOI: 10.1144/EGSP27.2
10. Waltham T. Sinking cities – Feature. *Geology Today*, 2002, vol. 18 (3). pp. 95–100. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2451.2002.00341>
11. Golodkovskaia G.A., Eliseev Yu.B. *Geological environment of industrial regions*. Moscow, Nedra publ., 1989. 219 p. (In Russ.)
12. Emelianova T.I., Strokova L.A. On the principles and methodology of zoning of the territory on the stability of the geological environment to tekhnogennykh impact (on the example of the Tomsk region). *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, 1999, no. 2. pp. 164–171. (In Russ.)
13. Zaikanov V.G., Minakova T.B., Byldakova E.V. Geoeological processes in the city and assessment of their danger. *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, 2022, no. 3. pp. 82–96. (In Russ.)
14. Zaikanov V.G., Minakova T.B., Prosunthova N.S., Smirnova E.B., Zhigareva T.H. Geoeological research and assessment of urbanized territories. *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, 2000, no. 5. pp. 410–421. (In Russ.)
15. Koff G.K., Minakova T.B., Kotlov V.F. *Methodological bases of assessment of technogenic changes in the geological environment of cities*. Moscow, Nauka Publ., 1990. 197 p. (In Russ.)

16. Starovoitov E.I., Tratsevskaya E.Yu., Kuznetsova E.L. Of dynamic characteristics three-phase soils and three-layer beams. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 2021, vol. 27, no. 5, pp. 929–946.
17. Tratsevskaya E.Yu. *Patterns of formation of geological hazards of Belarus. Monograph*. Gomel, 2008. 121 p. (In Russ.)
18. Tratsevskaya E.Yu. Identification and forecasting of geological hazards in urban construction, and zoning of the territory of Gomel according to the conditions of their formation. *Bulletin of the Brest University*, 2009, no. 1 (32), pp. 165–177. (In Russ.)
19. Tratsevskaya E.Yu. On the issue of geological justification of engineering protection of cities (on the example of Gomel). *Industrial and civil construction*, 2005, no. 3. pp. 46–47. (In Russ.)
20. Funikova V.V., Dudler I.V. Problem of the increasing danger of technogenic changes in the geological environment and ways to solve it. *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, 2022, no. 1, pp. 3–12. (In Russ.)
21. Funikova V.V., Dudler I.V., Butaev R.T. Technogenic changes in the groundwater regime in built-up areas (geoecological, engineering-geological and hydrogeological aspects). *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, 2022, no. 2, pp. 21–32. (In Russ.)
22. Zhuravkov M.A., Lyu Yongtao, Starovoitov E.I. *Mechanics of solid deformable body*. Singapore, Springer, 2023. 317 p.
23. Vakhneev S., Starovoitov E. Damping of circular composite viscoelastic plate vibration under neutron irradiation. *Journal of Applied Engineering Science*, 2020, vol. 18 (4), pp. 699–704.
24. Pronina P.F., Tushavina O.V., Starovoitov E.I. Study of the radiation situation in Moscow by investigating elastoplastic bodies in a neutron flux taking into account thermal effects. *Periódico Tchê Química*, 2020, vol. 17, no. 35, pp. 753–764.
25. Tratsevskaya E.Yu. Assessment of geological risks on the territory of Gomel. *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, 2006, no. 2, pp. 124–134.
26. Tratsevskaya E.Yu., Abramovich O.K. Current dynamic state of the geological environment of Gomel and its influence on engineering and geological conditions. *Lithosphere*, 2008, no. 2 (29), pp. 129–137. (In Russ.)
27. Tratsevskaya E.Yu., Zhoglo V.G. Assessment of the physical vulnerability of the territory and differentiated economic risk from the process of man-made flooding (using the example of the city of Gomel). *Sergeevsky readings*. Moscow, GEOS Publ., 2007. pp. 251–255. (In Russ.)

#### Information about the authors

**Elena Yu. Tratsevskaya**, Cand. Sc., Associate Professor, Francysk Skaryna Gomel State University, 104, Sovetskaya street, Gomel, 246028, Belarus; eltrats@mail.ru

Received: 03.11.2023

Revised: 06.11.2023

Accepted: 03.09.2024