

ТЕХНОГЕННЫЕ ГРУНТЫ НА ТЕРРИТОРИИ г. ВИТЕБСКА И ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИХ ИЗУЧЕНИЯ

И.А. Красовская, А.Н. Галкин

Учреждение образования «Витебский государственный университет им. П.М. Машерова», 210038, Беларусь, г. Витебск, Московский пр-т, 33. E-mail: galkin-alexandr@yandex.ru

На поверхности литосферы при проведении различных строительных и горных работ, в результате производственной деятельности человека образуется достаточно большое количество отложений, представляющих собой либо отходы хозяйственной деятельности человека, либо отложения, специально созданные человеком в строительных и производственных целях. Эти образования получили название техногенных грунтов, иногда именуемых антропогенными [3]. Они получили широкое распространение на селитебных территориях, в местах добычи и переработки полезных ископаемых, вдоль линейных сооружений различного назначения, на сельскохозяйственных землях и др. Процесс их образования и накопления с наибольшей интенсивностью происходит главным образом в районах крупных городов и промышленных объектов. Объем техногенных грунтов значителен и постоянно возрастает. К началу XXI в. мировой объем всех разновидностей техногенных осадков достиг 1500 млрд м³ [5].

Не является исключением в этом процессе и территория Витебска – крупного промышленного города (численность населения около 365 тыс. человек), областного центра, расположенного на северо-востоке Беларуси в долине Западной Двины. Здесь распространены следующие виды техногенных грунтов: 1) природные грунты, измененные в условиях естественного залегания; 2) природные грунты, перемещенные с мест естественного залегания в процессе строительной или иной производственной деятельности; 3) антропогенные образования.

К природным грунтам, измененным в условиях их естественного залегания, относятся горные породы, подвергшиеся преобразованиям состояния и свойств физическими, физико-химическими, химическими и биологическими воздействиями в процессе хозяйственной деятельности человека. Причем эти преобразования носят двойственный характер. В одном случае они направлены на улучшение состояния и свойств грунтов, в другом – ведут к ухудшению их характеристик. В геоэкологическом отношении второй случай представляет наибольший интерес.

Наблюдения показали, что ухудшенные по свойствам грунты в Витебске, в основном, формируются в результате изменений их влажностного режима, вызванного процессами подтопления и заболачивания. К примеру, в городе в 2003 г. в возводимом здании жилого дома по Московскому проспекту после двух лет перерыва в строительстве произошла деформация фундаментных стеновых блоков, выраженная в образовании трещин с шириной раскрытия до 50 мм. Обследование несущих конструкций здания позволило установить, что причиной образования трещин в стеновых блоках послужило расструктурирование грунтов основания, вызванное неравномерным обводнением, а, следовательно, различными физико-механическими свойствами супесей, залегающих в основании фундамента [2].

Ухудшение свойств грунтов в городе нередко может происходить и в результате изменения их состава при засолении либо загрязнении неорганическими (тяжелые металлы, минеральные соли и др.) и органическими (нефтепродукты) компонентами.

Источниками загрязнения грунтов неорганическими веществами в городе служат промышленные предприятия и их стоки, объекты теплоэнергетики (котельные), дорожных и коммунальных служб, автомобильный и железнодорожный транспорт и др. Органические загрязнители попадают в грунты чаще всего при разливах горюче-смазочных материалов на АЗС и стоянках автотранспорта.

Наличие в грунтах различных органических и неорганических веществ предопределяет существенные изменения их свойств. При этом следует заметить, что химические соединения различного состава и их количество оказывают разное, порой диаметрально противоположное влияние на свойства грунтов.

Так, например, часто применяемые дорожными и коммунальными службами города легкорастворимые соли (NaCl и др.) при значительной концентрации оказывают дегидратирующее и коа-

гулирующее влияние на глинистые грунты, снижая значения их гигроскопической влажности, максимальной молекулярной влагоемкости, пределов пластичности, и уменьшая показатели их физико-химических свойств. В то же время, присутствие средне- и труднорастворимых солей в грунтовых массивах оказывает значительно меньшее влияние на свойства грунтов.

При загрязнении дисперсных грунтов нефтью происходит изменение их гранулометрического состава: при добавлении в грунт 2,5% нефти наблюдается агрегация глинистых (<0,005 мм) частиц, а при загрязнении 10% нефти, наоборот, происходит диспергация микроагрегатов; при увеличении загрязнения уменьшается плотность глин, в то время как их пластичность и напряжение сдвига находятся в нелинейной и неоднозначной зависимости [3].

По оценочным данным техногенно-измененные грунты (улучшенные и ухудшенные) занимают около половины всей площади территории Витебска. При этом следует отметить, что площадь застраиваемых земель в городе постоянно увеличивается.

К природным грунтам, перемещенным с мест естественного залегания в процессе строительной или иной производственной деятельности, в пределах города отнесены грунты насыпей и отвалов. Первые образуются при возведении разнообразных земляных сооружений, транспортном строительстве и т.д. Они слагают насыпи, площадки, используются для создания грунтовых подушек. Состав грунтов, как правило, определяется в зависимости от инженерно-строительных задач. Для отсыпки используются крупнообломочные, песчаные и глинистые грунты.

Вторые – формируются на территории города в результате извлечения в ходе земляных работ из горных выработок при новом строительстве, сносе и реконструкции различных зданий и сооружений, прокладке коммуникаций, многочисленных планировочных работах. Это так называемые непланимерно отсыпанные массивы техногенных грунтов или строительные отвалы. Они имеют площадное распространение, связаны, как правило, с развитием городского строительства и занимают различные понижения рельефа (овраги, балки, болота и т.д.). При этом размеры площадей насыпных грунтов и их мощности определяются природным рельефом. Их состав зависит от состава отсыпаемого строительного мусора и литологии местных или привозных грунтов, перемещаемых в отвал.

Так, к примеру, при ликвидации последствий оползня в овраге Дунай по ул. Правды в августе 2006 года, когда за очень короткое время образовалась выемка глубиной 18–20 м и шириной до 50 м, ее засыпка 2,5 тыс. м³ скальной породы (доломита) позволили избежать катастрофической ситуации, связанной с устойчивостью высотного здания [2].

По строению техногенные грунты строительных отвалов неоднородны, сортировка материала в них отсутствует. В результате переотложения меняется дисперсность грунтов. Это может происходить либо из-за привноса более крупного материала, либо из-за относительной потери тонкодисперсного материала. Даже если примесь строительных отходов отсутствует, дисперсность может уменьшиться из-за распыления тонкого и легкого материала при разработке и перевозке местного природного грунта, а также возможных эрозионных и суффозионных процессов в отсыпанном массиве.

Особого внимания заслуживают *антропогенные образования* или *техногенные грунты*, созданные как отходы хозяйственной деятельности человека. Среди них на территории города можно выделить: 1) намывные промышленные отходы (гидроотвалы), 2) насыпные коммунальные отходы (полигоны, свалки), 3) грунты культурного слоя.

Первые представлены *гидрозолоотвалом* Витебской тепловой электростанции, который был заложен еще в 1954 г. на западной окраине города в полукилометре от ТЭЦ и предназначенный для складирования золы и шлака от сжигания твердого топлива, главным образом торфа. На протяжении 25 лет на золоотвале было складировано порядка 2,0 млн т золы. В настоящее время северо-восточная секция золоотвала практически не используется, за исключением крайней юго-восточной ее части, занятой под гаражи и автостоянку. Центральная секция золоотвала большей частью освоена под производственную зону, в пределах которой размещено несколько предприятий. Юго-западная секция гидрозолоотвала частично используется Витебской ТЭЦ в качестве шламоотвала для складирования опасных отходов. Только за период с 1989 по 2010 годы здесь было складировано около 100 т отходов (шлак котельных, отработанный сульфуголь и ионообменная смола, шлам химической водоочистки) [6].

Территория гидрозолоотвала представляет собой выровненную поверхность с перепадом высот менее 2 м. Мощность зольной толщи составляет 5–8 м. Сверху толща перекрыта насыпными перемешанными песчано-супесчаными грунтами с примесью золы и разнообразных отходов. Их

мощность составляет 0,2–1,7 м. Снизу зольная толща подстилается плотными суглинками и глинами, являющимися водоупором. Зола обводнена. Грунтовые воды устанавливаются на глубине от 0,7 до 2,9 м от поверхности золоотвала, межпластовые воды сожского горизонта залегают на глубинах более 12 м.

Состав золы весьма неоднороден. Он зависит от состава минеральной части топлива, его теплотворной способности, режима сжигания, места отбора из отвалов и др. По данным В.С. Хомича и др. [6], в грунтах гидрозолоотвала содержатся органическое вещество, нефтепродукты, полициклические ароматические углеводороды (антрацен, аценафтен, бензо(а)антрацен, бензо(а)пирен, бензо[*g,h,i*]перилен, бензо(б)флуорантен, дибензо[*a,h*]антрацен, нафталин, пирен, флуорен, фенантрен, флуорантен, хризен), тяжелые металлы и другие вещества.

Так, содержание органического вещества в золе изменяется от 4,3 до 49,0% (при среднем значении 20,9%), нефтепродуктов – от 9,4 до 1871,2 мг/кг (219,7 мг/кг), полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) – от 1,6 до 12,9 мг/кг, при среднем их содержании 2,8 мг/кг. Следует заметить, что в структуре ПАУ преобладают летучие низкомолекулярные соединения, на долю которых в грунтах золоотвала приходится 95%. При этом основной вклад в суммарную долю ПАУ вносит нафталин, содержание которого в золе составляет 30%.

Кроме того, для соединений ПАУ установлена тенденция увеличения содержания вниз по разрезу золоотвала, что связано, по всей вероятности, с радиальными миграционными потоками соединений ПАУ и мелкодисперсным составом золы.

Валовое среднее содержание тяжелых металлов в золе составляет: хрома – 41,6 мг/кг (пределы содержания 23,3–54,6 мг/кг), кадмия – 1,0 (0,6–1,3), свинца – 13,2 (5,1–24,4), меди – 20,7 (9,4–36,2), никеля – 27,0 (14,6–95,3) и цинка – 50,0 (10,8–118,0) мг/кг. По сравнению с местным педогеохимическим фоном зола обогащена хромом в среднем в 1,2 раза, кадмием – 3,0, свинцом – 1,8, медью – 4,6, никелем – 5,7, цинком – в 2,3 раза [6].

Сильная обводненность, высокое содержание различных химических веществ в гидрозолоотвале ставят его в разряд потенциального источника загрязнения подстилающих зольную толщу грунтов, а также поверхностных и подземных вод, находящихся в зоне влияния золоотвала.

Наряду с пестротой состава зольных грунтов наблюдается высокая их неоднородность по физическим и физико-механическим свойствам, в частности, по плотности, коэффициенту пористости, определяющим водоудерживающую способность, деформационно-прочностным свойствам – удельное сцепление, угол внутреннего трения, модуль деформации могут варьировать в широком диапазоне значений (табл. 1–3), в связи с чем использование данных грунтов в инженерно-строительных и других хозяйственных целях весьма ограничено.

Таблица 1.

Физические свойства грунтов гидрозолоотвалов Витебской ТЭЦ (по [2])									
Грунт	Статистические показатели	Влажность, %	Плотность, г/см ³			Степень влажности, д.е.	Пористость, %	Коэффициент пористости, д.е.	Коэффициент фильтрации, м/сут
			естест. влажн.	скелета	твердой компон.				
Зола	n	19	8	7	14	7	7	7	4
	min	37	0,86	0,50	2,24	0,5	62	1,66	0,2
	max	137	1,50	1,03	2,76	1,0	81	4,46	0,3
	x	81	1,19	0,72	2,56	0,7	72	2,93	0,25

Насыпные техногенные грунты полигонов твердых коммунальных отходов (ТКО) в пределах Витебска и его окрестностей имеют ограниченное распространение. Наибольший их массив расположен в 1 км от восточной окраины города, размещен он на площади 32 га, высота наслоений массива в отдельных местах превышает 30 м (рис. 1). В среднем за год на полигон свозится более 100 тыс. т отходов.

Таблица 2.							
Основные показатели прочностных свойств зольных грунтов Витебской ТЭЦ (по [2])							
Грунт	Глубина, м	Сдвигающие усилия τ_j , 10^5 Па при нагрузках 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 $\times 10^5$ Па				Удельное сцепление c , 10^5 Па	Угол внутр. трения ϕ , град.
		τ_1	τ_2	τ_3	τ_4		
Зола обводненная (продукт сгорания каменного угля)	1,4	0,71	0,51	1,38	–	0,36	34
	1,4	0,51	0,62	1,17	–	0,18	33
	1,4	0,56	0,71	0,77	–	0,46	12
Зола влажная (продукт сгорания торфа)	1,2	–	1,00	1,43	1,84	0,20	39
	1,2	–	1,12	1,51	1,84	0,40	36

По экспертным оценкам, ведущую роль в их составе играет фракция полимеров (25%). Содержание других фракций, в т.ч. органической, ниже (12%). Заметную роль в составе отходов играет фракция бумаги, картона и гофрокартона (11,5%), а также стекла – 13,3%.

В коммунальных отходах присутствуют различные по составу, классам опасности и свойствам вещества, часто в аномальных концентрациях, претерпевающие в ходе функционирования полигона интенсивные и длительные воздействия физической, химической и биохимической природы.

Со временем состав наслоений в массиве меняется: содержание органической составляющей уменьшается, а количество инертных материалов (стекла, пластика, минеральной части грунтов) возрастает.

Таблица 3.						
Результаты испытаний зольных грунтов Витебской ТЭЦ (по [2])						
Грунт	Глубина, м	Площадь штампа F , $см^2$	Расчетный интервал давления P_0-P_n , МПа	Осадка в расчетном интервале давления S_0-S_n , см	Давление, Мпа Полн. осад. шт., см	Модуль деформации E , МПа
Зола (продукт сгорания каменного угля)	1,2	5000	0,30–0,025	4,221–0,566	0,35 / 4,96	4,5
	3,8	600	0,30–0,10	0,496–0,128	0,50 / 1,05	11
	3,8	600	0,20–0,05	0,146–0,022	0,50 / 1,01	24
Зола (продукт сгорания торфа)	6,0	600	0,125–0,05	0,422–0,089	0,30 / 9,84	4,3
	6,0	600	0,125–0,05	0,804–0,051	0,25 / 7,32	2

В химическом составе техногенных грунтов ТКО преобладают органические вещества и углерод; в небольших количествах (около 1–3,5%) присутствуют азот и кальций; зольность свалочных грунтов составляет 28–41%.

Грунты Витебского полигона ТКО, как и других подобных объектов, отличаются неоднородностью состава, сложения и свойств как по разрезу, так и по простиранию, что обусловлено составом и размерами включений, а также временем их отсыпки. Они характеризуются высокой влажностью (20–60%) и пористостью (60–70%). Плотность их изменяется в пределах от 0,6–0,8 до 1,6 г/см³ [2]. Отмечается увеличение плотности во времени по мере их слеживания, с глубиной она возрастает тем больше, чем больше мощность слоя отсыпанного отхода.

Грунты полигона ТКО отличаются высокой сжимаемостью, медленным протеканием процессов самоуплотнения, значительной изменчивостью и анизотропией свойств.



Рис. 1. Разросшаяся свалка твердых коммунальных отходов в окрестностях Витебска (по [2]).

Свалочные грунты, как правило, взаимодействуют с воздухом и водой. Протекающие при этом процессы обуславливают выделение тепла и образование новых твердых, жидких и газообразных веществ, часть из которых в виде газообразных соединений и фильтрата выносятся из массива, загрязняя при этом грунты, поверхностные и подземные воды, находящиеся в зоне влияния полигона ТКО. Как показали наши исследования, фильтрат, образующийся в основании свалки содержит высокие концентрации хлоридов, аммонийного азота, натрия, калия, кадмия, никеля, хрома и свинца, в разы превышающие предельно-допустимые концентрации.

Грунты культурного слоя – одни из типичных и распространенных антропогенных образований в Витебске. По составу и свойствам они резко отличаются от нижележащих природных грунтов. В культурном слое города встречаются разнообразные остатки: битый кирпич и камень, остатки древесины, строительный мусор, глиняные черепки, предметы домашнего обихода. Его мощность колеблется в широких пределах (рис. 2): от нескольких десятков сантиметров до 12–15 м, и зависит от времени и продолжительности хозяйственного освоения территории, рельефа местности и др. [2].

Культурный слой Витебска характеризуется своеобразным неоднородным составом, причем резкая неоднородность грунтов культурного слоя прослеживается как по вертикали, так и в горизонтальном направлении. Археологические раскопки древнего Витебска и наблюдения за слоями во время изыскательских и строительных работ, проводимые с 1963 г., позволили расчленить культурный слой исторического центра города на несколько горизонтов (табл. 4), датировка которых основана на анализе встречающейся керамики (так называемого массового археологического материала) [1, 4].

Наиболее древние отложения – *стратиграфический слой 1* – представляют собой спрессованный слой коричневого цвета, образовавшийся в результате разрушения органических остатков (дерево). Мощность его колеблется от 0,1 до 0,4 м. Среди находок древнейшего слоя наряду с обломками тиглей для плавки и каменными формами для отливки цветных металлов отмечены шлаки.

Стратиграфический слой 2 светло-серой окраски с примесью песка мощностью от 0,04–0,1 до 0,2–0,45 м. В слое содержатся обломки тиглей и шлаки.

Стратиграфический слой 3 черной окраски мощностью от 0,4–0,8 до 1,6–1,9 м. Хронологически в нем выделяется два периода. Для раннего времени характерны черные, рыхлые по структуре, напластования, содержащие уголь и золу. От слоя 2 он отделен линзами голубой вязкой глины.

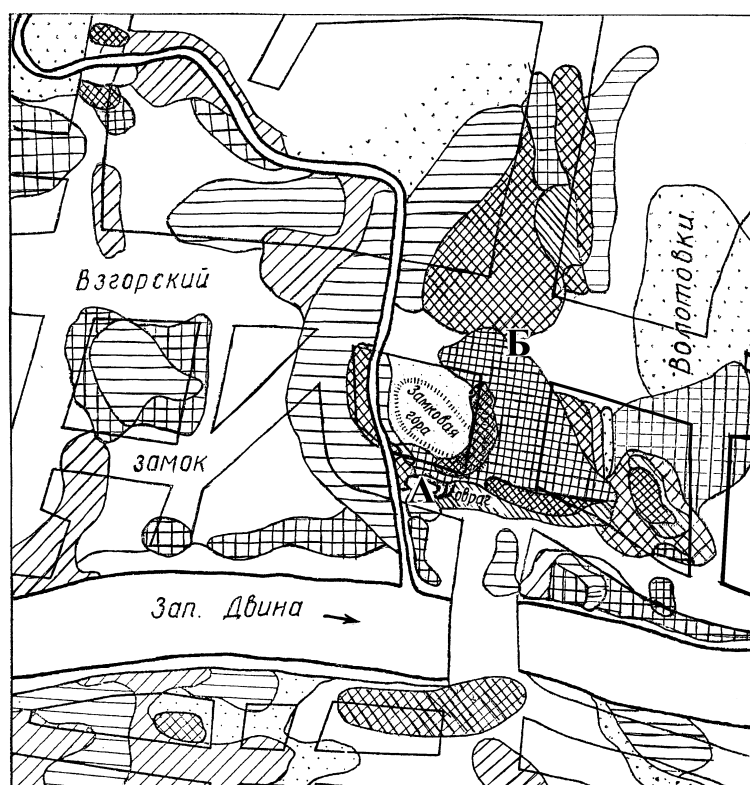


Рис. 2. Распределение мощности культурного слоя в исторической части Витебска (по [4]):
А – Верхний замок, Б – Нижний замок.

Таблица 4.			
Стратиграфия культурного слоя Нижнего замка Двинской возвышенности в историческом центре Витебска (по [1])			
№ слоя	Характеристика слоя	Строительный период	Датировка
1	Коричневый, заторфованный	–	VI–VIII вв.
2	Светло-серый, опесчаненый	–	IX – начало XI вв.
3	Черный: а) нижний период – перемешан с золой;	I	начало X – первая половина XII вв.
	б) верхний период – без примесей, рыхлый	II–III	середина XI – первая половина XIII вв.
4	Темно-серый: а) первый период – спрессованный со щепой и навозом (коричневый);	IV–VII	Середина XIII–XIV вв.
	б) второй период – темно-серый, рыхлый, без примесей;	VIII	XV–XVI вв.
	в) третий период – темно-серый, рыхлый, со щепой	IX–XIV	XVII–XVIII вв.

Такие линзы характерны и для верхней части этого слоя. Толщина слоя в разных местах раскопов составляет от 0,1–0,3 до 0,5–0,7 м. В отдельных местах слой пререзает прослойка коричневой окраски мощностью 0,3–0,6 м, состоящая из спрессованного навоза, щепы и травы. Сверху слой раннего периода перекрыт мелкими пережженными камнями, мощной прослойкой извести, включающей мелкие камни, битую плитку, куски глины.

Слой позднего периода черного цвета, рыхлый по структуре; мощность его изменяется от 0,2–0,4 до 0,9–1,2 м, содержит крайне мало примесей. Последние сконцентрированы в виде отдельных

прослойка, иногда довольно значительных по мощности (0,2–0,4 м). Во многих местах напластования этого слоя пререзает мощная прослойка (до 0,3 м) обугленной древесины – последствия пожара.

Стратиграфический слой 4 отличается от предыдущего несколько более светлой окраской, поэтому он условно обозначен как стратиграфический слой темно-серого цвета. Мощность его колеблется от 1,7–1,8 до 2,2–2,4 м. При этом следует отметить, что цифровые показатели толщины слоя весьма условны, поскольку верхняя его часть сnivelирована в результате строительной деятельности в XIX–XX вв. По всевозможным примесям и, в первую очередь, по содержанию щепы и структуре, внутри напластований темно-серой окраски можно вычленить три больших периода. Такое членение подтверждается датировкой вещевого материала, содержащегося как в слое, так и в строительных периодах. Для четвертого стратиграфического слоя характерно высокое содержание спрессованной щепы, особенно в нижней его части, отчего он получил коричневый оттенок. Вверх по разрезу коричневые напластования сменяются рыхлыми опесчаненными слоями серого цвета, с различным содержанием щепы.

Обобщая приведенные данные по строению толщ культурного слоя, можно констатировать, что в пределах города явно выделяются два типа (органо-минеральный гумусоаккумулятивный и органический «торфообразный») и три подтипа культурного слоя: времени возведения сооружения, периода функционирования (обживания) и времени разрушения. Считается, что их образование предопределено характером формирования культурного слоя, который обуславливает степень однородности его состава, строения и свойств.

Проведенные нами исследования с привлечением фондовых материалов по инженерно-геологическим изысканиям в исторической части Витебска позволили выделить в ее пределах два литологических горизонта культурного слоя [2]. Первый – песчаный, мощностью 4–7 м, сложенный преимущественно мелкими и пылеватыми песками со строительным мусором (битый кирпич, куски арматуры, отдельные валуны и др.), который датируется XIX–XX веками; второй – глинистый, мощностью 2,5–6,5 м, заторфованный, с остатками слабо разложившейся древесины, с песчаными линзами и прослойками, сформированный по археологическим данным на протяжении нескольких веков.

Песчаные грунты культурного слоя слаболигифицированы, естественная влажность их 13–20%, преимущественно рыхлого и среднеплотного сложения (1,77–1,94 г/см³); коэффициент пористости песков в среднем составляет 0,75, коэффициент фильтрации – 0,95 м/сут, угол естественного откоса в сухом состоянии варьирует в пределах 37–43°, под водой – 28–30°.

Глинистые грунты культурного слоя отличаются весьма неоднородными свойствами: естественная влажность их изменяется в пределах от 10 до 117% и выше; плотность – от 0,97 до 1,89 г/см³, коэффициент пористости – от 0,68 до 3,58, число пластичности – от 5 до 24%. Относительное содержание органического вещества в них варьирует от 0,06 до 0,41. Консистенция грунтов изменяется от твердой до текучей; водопроницаемость их благодаря глинистому составу и наличию органики низкая (0,01–0,001 м/сут). Прочностные показатели в среднем составляют: сцепление $0,22 \times 10^5$ Па, угол внутреннего трения 25°, коэффициент внутреннего трения 0,457. По деформационным характеристикам глинистые грунты культурного слоя являются повышенно сжимаемыми и деформируемыми грунтами – по данным компрессионных испытаний в диапазоне нагрузок 0,1–0,2 МПа их коэффициент сжимаемости изменяется от $0,050'10^{-5}$ до $0,324'10^{-5}$ Па⁻¹, а модуль деформации варьирует в интервале значений от 0,30 до 1,00 МПа при среднем значении 0,60 МПа [2].

Следует заметить, что, несмотря на то, что по существующим строительным нормам грунты культурного слоя считаются слежавшимися, процессы уплотнения в них еще не завершились. Учитывая высокую неоднородность состава и строения грунтов культурного слоя, следует предполагать большую изменчивость свойств, что представляет опасность для строительства и реконструкции зданий и сооружений.

В заключение отметим, что распространение, состав и свойства техногенных грунтов на территории Витебска требуют дальнейшего тщательного изучения специалистами разного профиля на основе детальной инженерно-геологической съемки.

Литература

1. Бубенько Т.С. *Средневековый Витебск. Посад–Нижний замок (X–первая половина XIV в.). Витебск, Изд-во ВГУ им. П.М. Машерова, 2004.*

2. Галкин А.Н. *Инженерная геология Беларуси: в 3 ч. Ч.1: Грунты Беларуси*. Витебск, ВГУ имени П.М. Машерова, 2016. URL: <https://rep.vsu.by/handle/123456789/8608> (дата обращения: 15.10.2021).
3. Галкин А.Н., Акулевич А.Ф., Павловский А.И., Галезник О.И. *Техногенные грунты*. Минск, Высшая школа, 2020.
4. Левко О.Н. *Витебск XIV–XVIII вв. (Стратиграфия, хронология, социально-историческая топография и технология производств)*. Минск, Наука и техника, 1984.
5. Передельский Л.В., Приходченко О.Е. *Инженерная геология*. Ростов н/Д, Феникс, 2009.
6. Хомич В.С., Городецкий Д.Ю., Овчарова Е.П., Рыжиков В.С., Савченко С.В., Бокая Г.М., Курман П.В. Золоотвалы ТЭЦ как потенциальные источники загрязнения окружающей среды // *Природопользование*. Вып. 21. 2012, с. 124–135.