

А.Л. НЕВЗОРОВ¹

¹ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова»,
г. Архангельск, Россия

ФАКТОР ВРЕМЕНИ В ГЕОТЕХНИЧЕСКОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ BIM-ТЕХНОЛОГИИ

***Аннотация.** Распространение BIM технологии на весь жизненный цикл здания возможно лишь в том случае, если модель учитывает изменение свойств материалов во времени. В отличие от созданных человеком строительных конструкций, обладающих вполне определенными свойствами, грунтам основания присуща неоднородность и изменчивость характеристик. Свойства грунтов, такие как, сжимаемость и сопротивление сдвигу, изменяются под воздействием нагрузок от здания, сезонного промерзания-оттаивания, изменений влажности и других факторов. В основании могут развиваться скрытые, медленно развивающиеся геологические процессы. Более того, некоторые характеристики, необходимые для прогноза, например, длительной осадки, обусловленной консолидацией, растворением или разложением частиц грунта, вибрацией не всегда определяются при стандартных изысканиях. Эти характеристики следует верифицировать по данным наблюдений на объектах строительства.*

Геотехнические модели, использование которых предполагается в течение длительного времени, должны создаваться не для отдельных строительных площадок, а для территорий крупных предприятий, городов или городских районов с однотипными геологическими условиями. Широкому внедрению моделирования должна предшествовать подготовка соответствующих стандартов, программного обеспечения и нормативных документов, определяющих обязанности и права изыскательских и проектных организаций, инвесторов и администрации муниципалитетов, включая право собственности на данные исследований грунтов.

В качестве примера обсуждаются геотехнические проблемы г. Архангельска. Основными факторами, которые следует учитывать при моделировании геологической среды города, являются: наличие многометровых отложений торфа и морских илов, осадка которых в основании сооружений не стабилизируется в течение десятилетий, а также связанные с прокладкой дренажей и кольматацией дренажных фильтров колебания уровня грунтовых вод.

Ключевые слова: информационное моделирование зданий (BIM), геотехническая модель, инженерно-геологические изыскания, осадка грунта.

A.L. NEVZOROV¹

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia

TIME FACTOR AT THE GEOTECHNICAL BIM DESIGN

***Abstract.** The information model spreading throughout all lifetime of a building has to take into consideration the changes in the materials properties over time. Unlike the man-made structures with the well-defined properties, the soils are characterized by heterogeneity and variability of characteristics. The soils properties, such as a compressibility and a shear strength, are changed due to building loads, seasonal freezing-thawing processes, water content variations and other factors. The latent, slowly developing geological processes can take place at the ground. Moreover, some soils properties used for prediction, for example, a long-term settlement caused by a secondary consolidation, dissolution or decomposition of soil particles, vibration are not always determined by ordinary surveys. These properties should be verified in situ observation.*

The geotechnical information models, the use of which is expected for a long time, should be created not for separate building sites, but for the territories of large enterprises, cities, or urban areas

with the same type of geological conditions. This work should be preceded by the development of the technical standards, software and documents defining the responsibilities and rights of survey and design companies, investors, and municipal administrations, including the ownership of soil survey data.

As an example, the geotechnical challenges of the Arkhangelsk city territory are discussed. The main factors that should be accepted in model are following: the presence of multi-meter peat and soft clayey soils deposits, the settlement of which has not stabilized for decades, as well as fluctuations of the groundwater level caused by the setting up of drainages and clogging of their filters.

Keywords: *building information modeling (BIM), geotechnical model, engineering geological survey, soil settlement.*

Введение

Две наиболее характерные проблемы строительной отрасли – превышение сметной стоимости объектов и задержка с их сдачей - связаны обычно с непредвиденными условиями на площадке строительства, ошибками, допущенными при проектировании или организации строительства, нехваткой ресурсов [19]. Считается, что одним из способов хотя бы частичного решения указанных проблем может служить внедрение информационного моделирования (Building Information Modeling - BIM). BIM технологии открывают новые возможности при подготовке проектной документации, планировании и организации строительства, упрощают взаимодействие между всеми участниками процесса и обеспечивают обмен информацией между различными платформами [15].

Элементы моделирования стали использоваться проектными организациями в начале 70-х годов прошлого века по мере развития компьютерной техники [13,19]. Для обозначения этого процесса применяли различные термины, например, BDS (Building Description System) и BPM (Building Product Modeling) [10, 20]. По мнению С. Eastman даже в повсеместно используемом сейчас акрониме BIM последняя буква может означать не только моделирование, но и "модель", и даже "менеджмент" [13].

J.C. Perez-Sanchez полагает, что процесс подготовки проектной документации прошел три стадии развития: ручную или на бумажных носителях, цифровую и BIM [21]. На второй обычно применяют CAD программы, а на третьей, кроме трехмерного цифрового представления сооружения, формируют всестороннюю базу данных, необходимых для планирования и контроля затрат и графика строительства, обеспечения строящегося объекта материалами, конструкциями и инженерным оборудованием [15, 17]. В то же время вторую стадию цифрового трехмерного или геометрического моделирования часто обозначают 3D/BIM, тогда как моделирование с учетом фактора времени - 4D/BIM, сметных расчетов - 5D/BIM и т. д. [15].

В настоящее время активно обсуждается распространение BIM технологии на весь так называемый жизненный цикл здания, включающий кроме изысканий, проектирования и строительства еще и период эксплуатации, в связи с чем модель должна содержать информацию, достаточную для обеспечения мониторинга состояния конструкций, выполнения ремонтов, реконструкции и даже разборки сооружения [15, 17]. Реализация этой идеи возможна в том случае, если модель учитывает изменение свойств материалов и конструкций во времени.

Принципы и особенности формирования геотехнических моделей

Инженерно-геологические условия это один из наиболее важных факторов, который еще на начальной стадии проектирования во многом определяет стоимость и сроки строительства, и одновременно таит в себе большие риски из-за неоднородности геологической среды [25]. По данным С. Grice и Н. Kessler более 70% случаев превышения заявленной в тендерной документации стоимости и почти 40% случаев задержки сроков сдачи объектов связано именно с грунтовыми проблемами [16]. J.Wu и др. подчеркивают,

что если созданные человеком строительные материалы и конструкции обладают вполне определенными свойствами, то природной геологической среде, используемой в качестве основания, присуща изменчивость характеристик, в том числе и во времени [19, 24]. Грунты в основании сооружений со временем могут как упрочняться, так и ухудшать свои деформационно-прочностные характеристики, например, под воздействием нагрузок от здания, сезонного промерзания-оттаивания, изменений влажности и других факторов.

В связи с тем, что геологическая модель создается на основе дискретной или точечной изыскательской информации, исходя из предположений, а по словам J.Wu с соавторами даже "домыслов", в ней не всегда отражаются различные аномалии – линзы слабых грунтов, фрагменты ранее существовавших сооружений и т.п. [9, 24]. То же самое можно сказать о представляющих опасность для сооружения скрытых медленно развивающиеся геологических процессах, ведь изыскания носят краткосрочный характер и редко сопровождаются мониторингом. Проблему представляет визуализация подземных коммуникаций [11].

В большинстве случаев построение трехмерной геотехнической модели в отличие от модели самого сооружения весьма сложно формализовать, так как для этого следует учитывать не только результаты испытаний образцов, но еще и генезис грунтов, а также исторические данные по использованию территории, опыт прежних изысканий и др. [8,12]. В качестве примера на рисунке 1 приведен геологический разрез строительной площадки одного объектов в Архангельской области. Как видим, из-за резкой изменчивости напластования грунтов при переходе от скважины к скважине даже при построении 2D модели весьма сложно провести границы слоев, и автор отчета просто соединил характерные точки прямыми линиями. Можно себе представить, насколько «точно» будет соответствовать 3D модель реальному массиву, тем более, если число скважин на площадке обычно не более четырех-пяти.

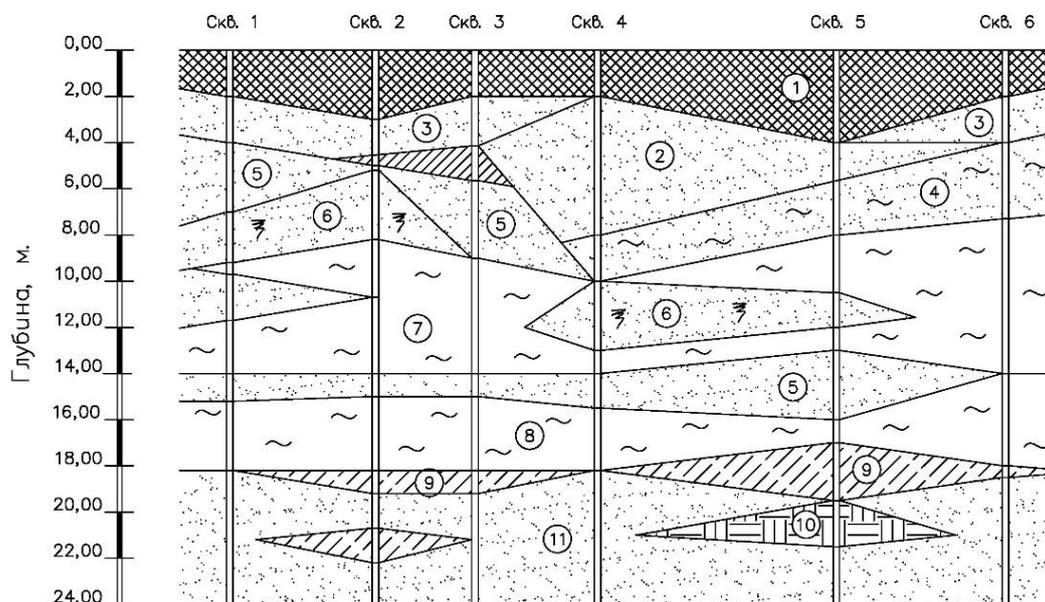


Рисунок 1 - Пример инженерно-геологического разреза:

1 – техногенные отложения, 2-6 и 11 – пески различного состава, 7, 8 – илы, 9 – сунесь, 10 - торф

При использовании BIM технологии геотехническая модель насыщается данными о свойствах грунтов, грунтовых водах, загрязнении грунта и пр. [6, 16, 17, 19, 24]. Дальнейшее развитие моделирования связано с переходом от "насыщения данными" к интеграции и взаимопроникновению BIM и FEM моделей [18, 24]. Использование современного

геотехнического программного обеспечения позволяет прогнозировать реакцию основания на внешние воздействия на различных этапах возведения сооружения. Заметим, что разработкой приборной базы и программного обеспечения, позволяющих объединить в единый поток лабораторные и полевые исследования грунтов, обработку и интерпретацию данных, формирование геотехнической модели и расчеты основания занимается в нашей стране компания "Геотек", г. Пенза [2, 3, 4].

Формирование 4D/BIM геотехнической модели, использование которой предполагается лишь в ходе строительства, не представляет технических трудностей, хотя и требует дополнительных расходов на обучение персонала и приобретение специализированного программного обеспечения [22]. Такие модели уже повсеместно создаются, в частности, при расчете фундаментных плит и ограждений глубоких котлованов с использованием одного из современных программно-вычислительных комплексов. Задачей иного уровня сложности является построение модели, использование которой планируется пусть даже не течение всего срока эксплуатации сооружения, а всего лишь двух-трех десятилетий. Для прогноза, например, длительных осадок, обусловленных консолидацией, нарушением структурных связей, химической суффозией, разложением органического вещества, вибрацией и т.п. нужны характеристики грунтов, которые не всегда определяются при стандартных изысканиях, а, возможно, потребуются и новые расчетные модели грунтов, отличные от употребляемых сейчас. Причем, эти характеристики следует верифицировать по данным наблюдений на объектах строительства. Такую работу для инженерно-геологических условий г. Санкт-Петербурга выполняют в настоящее время специалисты компании «Геореконструкция» [7]. Создание достоверных геотехнических моделей, использование которых предполагается в течение всего жизненного цикла сооружения, невозможно без научного сопровождения.

Восприятие геологической среды как статичной системы со стабильными характеристиками ведет к ошибкам в оценке состояния сооружений и безопасности их дальнейшей эксплуатации. Так, например, в г. Архангельске еще 70...80 лет назад повсеместно применяли деревянные сваи. Их погружали ниже зеркала грунтовых вод, а по сваям в зоне аэрации устраивали бутовую кладку, полагая, что такие фундаменты будут выполнять свою функцию в течение многих десятилетий. Однако, спустя всего лишь 30...40 лет массовое строительство, сопровождавшееся прокладкой систематических и контурных дренажей, привело к понижению зеркала грунтовых вод и гниению деревянных элементов фундаментов, деформациям и даже разрушению исторической застройки (фото 1).



Фото 1 - Деформации стен зданий, возведенных на деревянных сваях

Очевидно, что формирование геотехнических моделей, использование которых предполагается в течение длительного времени, требует дополнительных затрат, поэтому их следует создавать не для отдельных строительных площадок, а для территорий крупных предприятий, городов или городских районов с однотипными геологическими условиями. Такой подход позволит не только повысить эксплуатационную надежность сооружений, а ведь именно эту цель и преследует внедрение BIM, но и оптимизировать затраты на изыскания и повысить эффективность проектных решений фундаментов [9]. Кроме того, следует подчеркнуть, что повсеместному внедрению информационного моделирования в геотехнике должна предшествовать подготовка соответствующих стандартов, программного обеспечения и нормативных документов, определяющих обязанности и права изыскательских и проектных организаций, инвесторов и администрации муниципалитетов, включая право собственности на данные исследований грунтов. В противном случае использование всевозможных региональных и ведомственных баз данных будет весьма затруднительно [1,8].

Обсуждение параметров геотехнической модели на примере г. Архангельска

Рассмотрим на примере г. Архангельска, возведенного в весьма сложных инженерно-геологических и климатических условиях, основные факторы, которые следует учитывать при моделировании геологической среды.

Особенностью инженерно-геологических условий города является практически повсеместное распространение многометровых отложений торфа, покрытых техногенными насыпными и намывными грунтами. Торф подстилается озерно-ледниковыми отложениями. В северной островной части города присутствуют еще и многометровые толщи морских илов, под которыми встречается еще один слой торфа мощностью около 1 м.

Основным геологическим процессом, оказывающим длительное негативное воздействие на сооружения, безусловно, является осадка торфа. Наблюдения на опытном полигоне показали, что деформации первичной консолидации слоя торфа мощностью 6–6,5 м, обусловленные удалением поровой влаги из макропор, завершаются через 3–5 лет после отсыпки насыпи (рисунок 2).

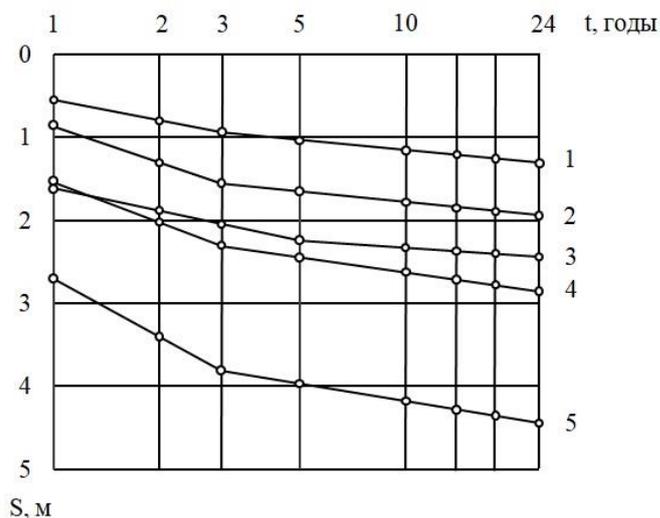


Рисунок 2 - Осадка торфа в основании насыпи высотой:
1 – 0,9 м, 2 – 1,7 м, 3 – 2,2 м, 4 – 2,4 м, 5 – 3,7 м

Причиной не затухающих в течение десятилетий деформаций служит вторичная консолидация, которую связывают обычно с удалением воды из микропор торфа и последующим смятием частиц. Свой вклад может вносить и декомпозиция растительных остатков. Длительная осадка служит причиной повреждения полов по грунту, гидроизоляции подвалов и подземных сооружений, отмосток, покрытия дорог и тротуаров. Особенно ярко

последствия длительных деформаций торфа проявляется у опирающихся на сваи крылец зданий и подземных коммуникаций (фото 2). Зависающий над трубопроводами насыпной грунт создает на них дополнительную нагрузку. На боковой поверхности свай постоянно действует негативное трение.



**Фото 2 - Деформации тротуаров, вызванные осадкой слоя торфа в основании:
а - перед крыльцом здания, б – над колодцем коммуникаций, в - рядом с каналом теплотрассы**

Если осадки первичной консолидации детально изучены и могут легко прогнозироваться по данным компрессионных испытаний, то деформации вторичной консолидации еще требуют изучения. В частности, обнаружилось, что значения коэффициента вторичной консолидации s_a , полученные по данным длительных наблюдений на опытном полигоне, в несколько раз больше значений, найденных по данным компрессионных испытаний [23]. Более того, на графиках зависимости осадки образцов торфа от логарифма времени появляется еще и участок так называемой третичной консолидации с увеличенным коэффициентом s_a . [5] Это явление обусловлено, скорее всего, не природой компрессионного сжатия, а погрешностями, допускаемыми при выравнивании зависимости осадки от времени в полулогарифмических координатах. Из сказанного следует, что достоверный прогноз осадки торфа на длительный период выполнить пока сложно и цифровая модель должна настраиваться, периодически корректироваться по данным стационарных наблюдений за осадкой поверхности.

Похожую проблему представляют длительные осадки многометровой толщи ила и подстилающих его древних отложений торфа. Опыт эксплуатации грузовых площадок промышленных предприятий, полов в складских помещениях, подкрановых путей и т.п. показывает, что осадка этих грунтов может достигать 30...50 см и собственники сооружений вынуждены периодически проводить ремонтные работы. Опять таки, как и у торфа, характеристики сжимаемости илов, включая коэффициенты первичной и вторичной консолидации, до сих пор изучены мало, так как образцы ненарушенной структуры

отбираются с большой глубины с трудом и требуют существенных затрат времени на лабораторные эксперименты. Обычно в проект закладывают одну характеристику, определяемую по таблицам или данным статического зондирования, - модуль деформации 1...2 МПа.

Модификация толщи илов требует огромных затрат, поэтому при проектировании многоэтажных зданий применяют сваи длиной 20–22 м. Как показал опыт, применение так называемых коротких свай, нижний конец которых остается в слое покрывающего илы аллювиально-морского песка и не достигает кровли илов на 1–3 м чревато развитием недопустимых осадок. В связи с тем, что расчет по стандартной методике, как правило, дает вполне допустимые значения осадки такого фундамента, создание достоверной геотехнической модели, с помощью которой будет выполняться совместный расчет сооружения и основания, является весьма актуальной задачей.

Второй проблемой, связанной с моделированием геологической среды города, после прогноза осадки основания является положение зеркала грунтовых вод. Выше указывалось на его понижение из-за прокладки дренажей 40–50 лет тому назад. Сейчас приходится сталкиваться с обратным явлением – его локальным повышением. Причиной служит кольматация дренажных фильтров мелкими частицами торфа, переносимыми потоком грунтовых вод. Восстановить работу дренажей и предотвратить подтопление подвалов можно лишь путем перекладки дренажных труб. Снижение работоспособности дренажной системы во времени пока исследовано мало и выполнить достоверный прогноз положения зеркала на длительный период не представляется возможным. Согласно [14] при отсутствии обоснования нормального функционирования дренажа в течение всего срока эксплуатации сооружения следует задавать максимально высокое положение уровня грунтовых вод. Следование этому требованию при проектировании гидроизоляции или расчете размеров фундаментов ведет к существенному росту затрат.

Выводы

1. Внедрение информационного моделирования в геотехническом проектировании должно предваряться подготовкой соответствующих стандартов, программного обеспечения и нормативных документов, определяющих обязанности и права изыскательских и проектных организаций, инвесторов и администрации муниципалитетов, включая право собственности на данные исследований грунтов.

2. Геотехнические модели, использование которых предполагается в течение длительного времени, следует создавать для территорий крупных предприятий, городов или городских районов. В качестве исходных параметров потребуются специфические характеристики грунтов, которые не всегда определяются при рядовых изысканиях. Параметры модели следует верифицировать по данным наблюдений на объектах строительства, что можно сделать лишь при наличии научного сопровождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белостоцкий А.М. Цифровые технологии в строительстве. Из прошлого в будущее. Роль РААСН // Доклады научно-отраслевых отделений РААСН. Строительные науки. 2021. С. 34–38.
2. Болдырев Г.Г., Барвахов В.А., Шейнин В.И., Каширский В.И., Идрисов И.Х., Дивеев А.А. Информационные системы в геотехнике – 3D-геотехника // Геотехника. 2019. Т.11. №2. С. 6-27.
3. Болдырев Г.Г., Идрисов И.Х., Редин А.В., Дивеев А.А. BIM-геотехника и перспективы ее развития в Российской Федерации // Геотехника. 2019. Т.12. №4. С. 6-22.
4. Болдырев Г.Г., Кондратьев А.Ю. Информационные системы в строительстве // Жилищное строительство. 2019. №9. С. 17-23.
5. Ивахнова Г.Ю., Невзоров А.Л. Особенности интерпретации результатов компрессионных испытаний торфа // Строительство и архитектура. 2020. Т.8. №1. С. 26–32.
6. Разводовский Д.Е., Шулятьев С.О., Ставницер Л.Р. Применение BIM в геотехнике // Жилищное строительство. 2018. №11. С. 3-8.

7. Шашкин А.Г., Шашкин К.Г., Богов С.Г., Шашкин В.А., Шашакин М.А. Мониторинг зданий и сооружений при строительстве и эксплуатации. СПб: Изд-во института «Геореконструкция», 2021. 640 с.
8. Beaufils M., Grellet S., Le Hello B., Lorentz J., Beaudouin M., Castro-Moreno J. Geotechnical data standardization and management to support BIM for underground infrastructures and tunnels. World Tunnel Congress, May 2019. Italy, Naples. 2019. 11 p. hal-02056440
9. Brennan E. An examination of the use of Geotechnical BIM to provide value engineering solutions for coastal infrastructure. Capstone project from the MSc in a BIM. Dublin: Technological Univ. 2021. 18 p.
10. Cerovsek T. A review and outlook for a building information model (BIM): A multistandpoint framework for technological development. *Advanced engineering informatics*. 2011. Vol. 25(2), Pp. 224-244.
11. Chapman D., Providakis S., Christopher R. BIM for the underground – An enabler of trenchless construction. *Underground Space*. 2020. Vol. 5. Pp. 354-361. doi.org/10.1016/j.undsp.2019.08.001
12. Cheng J. Construction and visualization of a three-dimensional model of an engineering geological body. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021. Vol. 14. 8 p. doi.org/10.1007/s12517-021-06600-x
13. Eastman C., Fisher D., Lafue D., Lividini J., Stoker D., Yessios C. An outline of the building description system. Pittsburgh: Carnegie-Mellon Univ., 1974. Pp. 1–23.
14. Eurocode 7: Geotechnical design. Part 1: General rules. CEN, 2004. 171 p.
15. Gondar J., Pintoa A., Sampaioa Z. Study of BIM applied to geotechnical project. Lisbon: University of Lisbon – Técnico Lisboa. 2018. 10 p.
16. Grice C., Kessler H. Collaborative geotechnical BIM technologies [Lecture]. British Geological Survey. Natural Environment Research Council. 2015. 19 p.
17. Konietzky H. BIM for geotechnical engineering. Freiberg: TU Bergakademie - Geotechnical Institute. 2020. 30 p.
18. Lau S.E.N., Zakaria R, Aminudin E., Saar C.C. Yusof A., Wahid C.M. A review of application building information modeling (BIM) during pre-construction stage: Retrospective and future directions. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2018. Vol. 143, 012050. 9 p. doi :10.1088/1755-1315/143/1/012050
19. Lee M.L., Lee Y.L., Goh S.L., Koo C.H., Lau S.H., Chong S.Y. Case studies and challenges of implementing geotechnical building information modelling in Malaysia. *Infrastructures*. 2021. Vol. 6. No. 145. https://doi.org/ 10.3390/infrastructures6100145.
20. Papadonikolaki E., Vrijhoef R., Wamelink J. A BIM-based supply chain model for AEC. 1st Conference in Building Information Modelling (BIM) in Design. Construction and Operations. *WIT Transactions on the built environment*. 2015. Pp. 181-193.
21. Perez-Sanchez J.C., Mora-Garcia R.T., Perez-Sanchez V.R., Piedecausa-Garcia B. From CAD to BIM: A new way to understand architecture. *WIT Transactions on the built environment*. 2017. Vol. 169. No 1. Pp. 45-54. doi:10.2495/BIM170051.
22. Tawelian L.R., Mickovski S.B. The implementation of geotechnical data into the BIM process. The 3rd International conf. on transportation geotechnics (ICTG 2016). *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 143. Pp. 734–741. doi:10.1016/j.proeng.2016.06.115.
23. Tyurin D.A., Nevzorov A.L. Numerical simulation of long-term peat settlement under the sand embankment. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 175. Pp. 51-56. doi:10.1016/j.proeng.2017.01.014.
24. Wu J., Chen J., Chen G., Wu Z., Zhong Y., Chen B., Ke W., Huan J. Development of data integration and sharing for geotechnical engineering information modeling based on IFC. *Hindawi advances in civil eng*. 2021. article ID 8884864. 15 p. https://doi.org/10.1155/2021/8884864.
25. Zhang J., Wu C., Wang Y., Ma Y., Wu Y., Mao X. 2018) The BIM-enabled geotechnical information management of a construction project. *Computing*. 2018. Vol.100. No 1. Pp. 47-63. doi: 10.1007/s00607-017-0571-8.

REFERENCES

1. Belostockij A.M. Cifrovye tekhnologii v stroitel'stve. Iz proshlogo v budushchee. Rol' RAASN// Doklady nauchno-otraslevykh otdelenij RAASN. Stroitel'nye nauki. 2021. S. 34–38.
2. Boldyrev G.G., Barvashov V.A., SHEjnin V.I., Kashirskij V.I., Idrisov I.H., Diveev A.A. Informacionnye sistemy v geotekhnike – 3D-geotekhnika // *Geotekhnika*. 2019. T.11. №2. S. 6-27.
3. Boldyrev G.G., Idrisov I.H., Redin A.V., Diveev A.A. BIM-geotekhnika i perspektivy ee razvitiya v Rossijskoj Federacii // *Geotekhnika*. 2019. T.12. №4. S. 6-22.
4. Boldyrev G.G., Kondrat'ev A.YU. Informacionnye sistemy v stroitel'stve // *ZHilishchnoe stroitel'stvo*. 2019. №9. S.17-23.
5. Ivahnova G. YU., Nevzorov A.L. Osobennosti interpretacii rezul'tatov kompressionnykh ispytaniy torfa// *Stroitel'stvo i arhitektura*. 2020. T.8, №1. S. 26–32.
6. Razvodovskij D.E., SHulyat'ev S.O., Stavnicer L. R. Primenenie BIM v geotekhnike// *ZHilishchnoe stroitel'stvo*. 2018. №11. S.3-8.

7. SHashkin A. G., SHashkin K. G., Bogov S. G., SHashkin V. A., SHashkin M. A. Monitoring zdanij i sooruzhenij pri stroitel'stve i ekspluatácii. SPb: Izd-vo instituta «Georekonstrukciya», 2021. 640 s.
8. Beaufile M., Grellet S., Le Hello B., Lorentz J., Beaudouin M., Castro-Moreno J. Geotechnical data standardization and management to support BIM for underground infrastructures and tunnels. World Tunnel Congress, May 2019. Italy, Naples. 2019. 11 p. hal-02056440
9. Brennan E. An examination of the use of Geotechnical BIM to provide value engineering solutions for coastal infrastructure. Capstone project from the MSc in a BIM. Dublin: Technological Univ. 2021. 18 p.
10. Cerovsek T. A review and outlook for a building information model (BIM): A multistandpoint framework for technological development. *Advanced engineering informatics*. 2011. Vol. 25(2), Pp. 224-244.
11. Chapman D., Providakis S., Christopher R. BIM for the underground – An enabler of trenchless construction. *Underground Space*. 2020. Vol. 5. Pp. 354-361. doi.org/10.1016/j.undsp.2019.08.001
12. Cheng J. Construction and visualization of a three-dimensional model of an engineering geological body. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021. Vol. 14. 8 p. doi.org/10.1007/s12517-021-06600-x
13. Eastman C., Fisher D., Lafue D., Lividini J., Stoker D., Yessios C. An outline of the building description system. Pittsburg: Carnegie-Mellon Univ., 1974. Pp. 1–23.
14. Eurocode 7: Geotechnical design. Part 1: General rules. CEN, 2004. 171 p.
15. Gondar J., Pintoa A., Sampaioa Z. Study of BIM applied to geotechnical project. Lisbon: University of Lisbon – Técnico Lisboa. 2018. 10 p.
16. Grice C., Kessler H. Collaborative geotechnical BIM technologies [Lecture]. British Geological Survey. Natural Environment Research Council. 2015. 19 p.
17. Konietzky H. BIM for geotechnical engineering. Freiberg: TU Bergakademie - Geotechnical Institute. 2020. 30 p.
18. Lau S.E.N., Zakaria R, Aminudin E., Saar C.C. Yusof A., Wahid C.M. A review of application building information modeling (BIM) during pre-construction stage: Retrospective and future directions. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2018. Vol. 143, 012050. 9 p. doi :10.1088/1755-1315/143/1/012050
19. Lee M. L., Lee Y. L., Goh S. L., Koo C. H., Lau S. H., Chong S. Y. Case studies and challenges of implementing geotechnical building information modelling in Malaysia. *Infrastructures*. 2021. Vol. 6, No. 145. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6100145>.
20. Papadonikolaki E., Vrijhoef R., Wamelink J. A BIM-based supply chain model for AEC. 1st Conference in Building Information Modelling (BIM) in Design. Construction and Operations/ *WIT Transactions on the built environment*. 2015. Pp. 181-193.
21. Perez-Sanchez J. C., Mora-Garcia R. T., Perez-Sanchez V. R., Piedecausa-Garcia B. From CAD to BIM: A new way to understand architecture. *WIT Transactions on the built environment*. 2017. Vol. 169, No 1. Pp. 45-54. doi:10.2495/BIM170051.
22. Tawelian L. R., Mickovski S. B. The implementation of geotechnical data into the BIM process. The 3rd International conf. on transportation geotechnics (ICTG 2016). *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 143. Pp. 734–741. doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.115.
23. Tyurin D. A., Nevzorov A. L. Numerical simulation of long-term peat settlement under the sand embankment. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 175. Pp. 51-56. doi:10.1016/j.proeng.2017.01.014.
24. Wu J., Chen J., Chen G., Wu Z., Zhong Y., Chen B., Ke W., Huan J. Development of data integration and sharing for geotechnical engineering information modeling based on IFC. *Hindawi advances in civil eng*. 2021. article ID 8884864. 15 p. <https://doi.org/10.1155/2021/8884864>.
25. Zhang J., Wu C., Wang Y., Ma Y., Wu Y., Mao X. 2018) The BIM-enabled geotechnical information management of a construction project. *Computing*. 2018. Vol.100, No 1. Pp. 47-63. doi:10.1007/s00607-017-0571-8.

Информация об авторе:

Невзорov Александр Леонидович

ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова», г. Архангельск, Россия, доктор технических наук, профессор кафедры инженерной геологии, оснований и фундаментов, советник РААСН.

E-mail: a.l.nevzorov@yandex.ru

Information about authors:

Nevzorov Alexander L.

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia, doctor of technical science, professor of the geotechnical department, advisor of RAACS.

E-mail: a.l.nevzorov@yandex.ru