

Трехмерная цифровая модель геологической среды как ключевой элемент BIM-технологии и высшая ступень цифровизации строительства



В настоящей работе отражены различные аспекты цифровизации проектно-изыскательских работ. Подчеркивается ключевая роль трехмерной модели геологической среды для различных стадий жизненного цикла строительного объекта, полноценного освоения подземного пространства и для технологии информационного моделирования, демонстрируются перспективы её практического приложения. Рассматриваются существующие трудности при внедрении информационных систем в строительной отрасли, а также конкретные подходы для их преодоления.

Представленная статья может быть рассмотрена в качестве возможного вектора развития профильного программного обеспечения и ориентира для внесения корректив в традиционный подход к инженерно-геологическим изысканиям, проектированию и совместным расчетам оснований и сооружений.

Текст публикуется в продолжение темы, рассмотренной в работе Геннадия Григорьевича Болдырева и Алексея Александровича Дивеева на площадке журнала «ГеоИнфо», о создании цифровой инженерно-геологической модели и использовании информационных систем при изысканиях и проектировании оснований фундаментов зданий и сооружений.

Самосват Виктор Вадимович

Главный специалист Новгородского филиала АО «Институт «Стройпроект» (Комплексное проектирование транспортных сооружений), аспирант Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I

samosvat.victor@gmail.com

Вступление

Сегодня информационные технологии (ИТ) смело можно назвать одним из главных двигателей прогресса во всех сферах экономики и народного хозяйства. Развиваясь опережающими темпами, ИТ зачастую интенсифицируют и развитие науки, предоставляя новые возможности в части сбора, обработки, хранения, анализа, способов представления и распространения информации, а также вариативности применения вычислительной техники.

Отрадно, что и строительная отрасль не является в данном аспекте исключением и изо всех сил стремится в полной мере использовать возможности ИТ. Кажется, только недавно проектные организации как следует освоили инструменты трехмерной визуализации проектных решений, а уже не первый год полным ходом идет следующий этап данного направления – внедрение информационного моделирования в строительстве, или просто BIM (Building Information Modelling).

Технология информационного моделирования задумывалась как инструмент по управлению жизненным циклом зданий и сооружений, а также в качестве платформы для совместной работы специалистов смежных разделов и дисциплин. Идеи и принципы BIM формулировались, развивались и в последующем долгие годы продвигались, как правило, разработчиками графических редакторов, конструкторских программ и систем автоматизированного проектирования (САПР), а потому вопросы инженерных изысканий и геотехнических расчетов продолжительное время обходили технологию стороной.

Неудивительно, что и сегодня, рассматривая информационное моделирование, в качестве основных действующих лиц указываются, как правило, все, кроме изыскателей и расчетчиков/геотехников. Весьма показательной в этом отношении выглядит иллюстрация (см. рис. 1), сопровождающая один из докладов по BIM на «100+ Forum Russia», прошедшем в 2019 году.

Взаимодействие



Рис. 1. Типичная иллюстрация участников информационного моделирования и пользователей BIM-модели [2]

А ведь в контексте базовых целей BIM-технологии (обеспечение управления жизненным циклом зданий и сооружений и создание платформы для совместной работы специалистов смежных разделов и дисциплин) изыскания и геотехника – это не просто важнейшие элементы информационного моделирования зданий и сооружений, а собственно те компоненты, с которых необходимо начинать это самое информационное моделирование (как и любое проектирование). Более того, представляется, что это те компоненты, ради которых вообще стоило создавать и развивать BIM-технологию. Далее приведены некоторые аргументы в пользу данного оценочного тезиса, а также рассмотрены различные аспекты в отношении интеграции инженерных изысканий и совместных расчетов оснований и сооружений в информационные системы строительного комплекса.

В данной статье продолжена тема, поднятая в журнале «ГеоИнфо» Г.Г. Болдыревым и А.А. Дивеевым, [о создании цифровой инженерно-геологической модели и использовании информационных систем при изысканиях и проектировании](#) оснований фундаментов зданий и сооружений [1].

Начнем с малого, постепенно переходя к более глобальным и концептуальным вопросам.

1. О необходимости единого информационного пространства для изыскателей, проектировщиков и геотехников/расчетчиков

В эпоху рыночных отношений и развитости средств индивидуализации практически не осталось организаций, которые не имели бы своих шаблонов оформления, нестандартного программного обеспечения (ПО) или собственных рационализаторских решений в работе с данными. Однако, чем больше информация индивидуализирована и чем больше вспомогательных инструментов к ней применяется, тем больше она оказывается чувствительна к различного рода манипуляциям (масштабирование, конвертирование, передача и др.). Как результат, при традиционном формате взаимодействия между различными участниками проектно-изыскательских работ практически каждый значимый инженерно-геологический разрез площадки строительства формируется минимум трижды:

- 1) на этапе инженерно-геологических изысканий;
- 2) на этапе проектирования: даже если для основных конструкций разрезы наносят изыскатели, то для различных вспомогательных схем проектировщик, как правило, делает это самостоятельно и вынужден производить не всегда лишь элементарные операции;
- 3) на этапе геотехнических и/или совместных расчетов сооружений и оснований: как минимум при генерализации расчетной схемы.

Не вызывает сомнений, что общее информационное пространство с единообразными требованиями к форме представления данных существенно упростило бы работу сразу для нескольких сторон на различных этапах проектирования, позволив создавать инженерно-геологическую модель с необходимой степенью детализации только на этапе изысканий.

2. О форме представления данных по результатам инженерно-геологических изысканий

Сегодня «на полях» и в кулуарах геотехнических форумов довольно часто обсуждаются различные сложности и низкая эффективность взаимодействия геологов с геотехниками/расчетчиками. Или вовсе констатируется отсутствие конструктивного диалога между ними.

При наличии общего информационного пространства можно полагать, что количество точек соприкосновения существенно возрастет. Но чтобы эти точки индуцировали продуктивное

сотрудничество всех участников, а не конфликт их интересов, создаваемая единая платформа должна базироваться на следующих взаимосвязанных принципах:

- 1) кастомизация – подразумевает, что платформа должна быть адаптирована под запросы конкретного пользователя путем частичного её изменения под конкретные запросы с учетом специфики работы;
- 2) функциональная гибкость – подразумевает, что данные, поступающие и формирующие общее информационное пространство, должны иметь возможность функционально видоизменяться чтобы реализовать принцип кастомизации в рамках единой платформы;
- 3) информационная насыщенность – предполагает, что функциональная гибкость информационного пространства может быть достигнута только при достаточном количестве данных, позволяющем различным образом комбинировать эти данные, тем самым видоизменять форму их представления.

Воплощение перечисленных принципов становится возможным при реализации концепта, изложенного в [1, 3, 4], с переходом на цифровое представление инженерно-геологической информации в виде пространственного (трех- или многомерного) массива свойств грунтового основания.

Важной особенностью такого формата представления должна стать непрерывность данных, обеспечивающая свой набор свойств в каждой точке геологического пространства. В этом случае появляется возможность сделать цифровую модель геологической среды гибкой и в равной степени понятной как для геологов, так и для проектировщиков и расчетчиков/геотехников. С этой целью имеет смысл автоматизировать как минимум следующие функции модели:

- выделение в пространстве модели по имеющемуся массиву свойств грунта стратиграфо-генетических комплексов (СГК) и других удобных для чтения геологами элементов;
- выделение в пространстве модели по ключевым физико-механическим показателям расчетных геологических элементов (РГЭ) и других понятных для геотехников форм;
- для консерваторов – выделение в пространстве модели по заданным показателям инженерно-геологических элементов (ИГЭ);
- пополнение модели новой информацией с возможностью выбора принципа интеграции данных (по принципу наложения, по принципу внедрения или по другим принципам, обеспечивающим гибкую работу модели).

(Примечание автора – Данный список должен быть продолжен, поэтому я в свою очередь призываю коллег делиться своими идеями относительно того, каким именно образом можно сделать работу с моделью геологической среды оптимальной для всех её потенциальных пользователей).

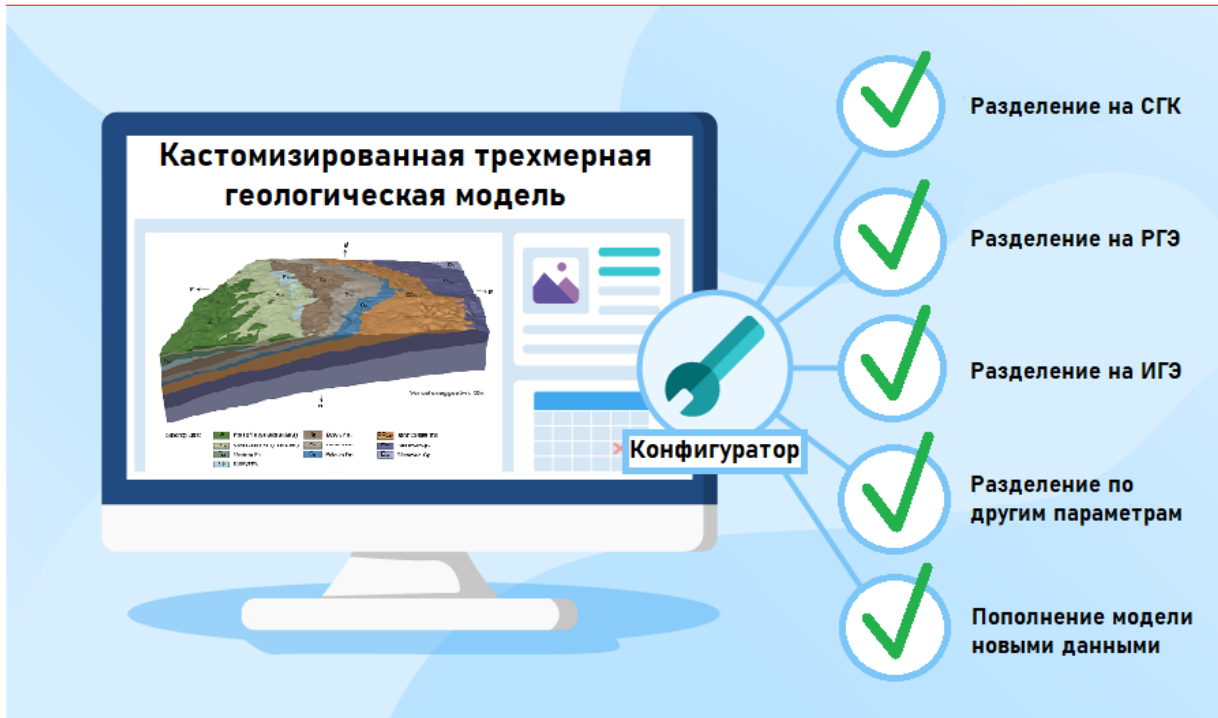


Рис. 2. Возможности кастомизированной трехмерной модели геологической среды

Ввиду широкого применения для геотехнических расчетов метода конечных элементов (МКЭ) и сложных комплексных моделей поведения грунта с множеством участвующих в вычислениях показателей, выделение РГЭ может быть оптимизировано на основе анализа чувствительности (Sensitivity analysis) результатов расчета к изменению тех или иных входных параметров грунтовой модели. Такой анализ целесообразно выполнить для различных принципиально отличающихся по условиям работы типов сооружений. В конечном счете РГЭ должны быть выделены по тем параметрам принятой для расчета модели грунта, которые оказывают наибольшее влияние на результаты расчета соответствующего типа сооружения. В последующем, при наличии положительного опыта, такие параметры следует закрепить в нормативных документах.

Необходимость в оптимизации выделения РГЭ может быть исключена при обеспеченной интероперабельности (определение см. в [3]) конечно-элементных расчетных комплексов и трехмерной цифровой модели геологической среды. Для этого достаточно прописать алгоритм, который даст возможность выделить в геологической модели опорные точки с некоторым шагом, позволяющим заменить каждую из этих точек на соответствующий конечный элемент (со своим набором свойств) и в результате получить сетку конечных элементов (т. е. уход от кластеризации расчетных моделей грунтового основания). По мере роста производительности компьютерной техники и развития решателей, величина шага и размеры конечных элементов могут быть минимизированы.

Таким образом, рассмотренная форма представления результатов инженерно-геологических изысканий позволяет сделать работу всех участников в едином информационном пространстве комфортной и продуктивной.

3. О способах снижения субъективности информации, получаемой при инженерно-геологических изысканиях

На тех же «полях» и в кулуарах геотехнических форумов, а также на страницах профильных журналов довольно часто можно встретить критику существующего подхода инженеров-

геологов, основанного на изображении грунтовой среды в виде напластований фиктивных инженерно-геологических элементов (ИГЭ). Как правило, основные причины критики следующие:

- моральная устарелость подхода на фоне прогресса методов и роста точности инженерных изысканий и инженерных расчетов;
- не всегда оправданные допущения, в частности неоправданное усреднение расчетных значений физико-механических свойств грунтов основания в пределах ИГЭ для удаленных друг от друга участков (особенно актуально для линейных протяженных объектов);
- высокий уровень субъективности:
 - субъективное нанесение границ ИГЭ геологами между выработками (см. рис. 2), в особенности линз и небольших прослоек;
 - субъективный выбор набора показателей для выделения ИГЭ;
 - субъективное нанесение уровней подземных вод;
 - субъективная генерализация расчетной схемы геотехниками/расчетчиками и т. п.



Рис. 3. Пример субъективного отражения границ слоев грунта по данным изысканий на основе информации из горных выработок и возможного несоответствия фактическому напластованию [4]

С переходом из плоского на трехмерное отображение геологической среды наверняка можно ожидать, что объем субъективно и/или некорректно отображаемой информации увеличится, а критика подхода станет ещё более острой.

Но ситуация, как минимум, небезнадёжна.

Вместе с предложением создавать непрерывные трехмерные цифровые массивы данных геологической среды авторами [1, 4, 5] также предложено автоматизировать процедуру определения границ между выработками на основе нелинейной интерполяции данных с возможностью варьирования свободных параметров интерполяционной функции для подбора формы границ. Реализацию данного подхода сегодня можно видеть в некоторых программных комплексах, широко использующихся в горнодобывающей и нефтегазовой промышленности, где пользователю предоставлена возможность не только варьировать

свободные параметры интерполяционных функций, но и, собственно, выбирать алгоритм (функцию) и принцип интерполяции (на основе детерминированных или стохастических методов).

Положительные моменты такого решения очевидны:

- возможность получать пространственную непрерывность данных в трехмерной модели геологической среды без существенных изменений в части традиционных способов получения исходной (опорной) информации посредством точечных выработок или зондирования;
- возможность получать нелинейные границы слоев, линз и других геологических тел, что в большей степени соответствует реальным условиям;
- автоматизация и унификация операций, связанных с дискретизацией (численной геометризацией) геологической среды.

Однако, несмотря на столь внушительные преимущества, указанный подход не может рассматриваться как инструмент, избавляющий от субъективности интерполированных данных. Автоматизируя и унифицируя субъективность, она перерастает в другой вид, но не перестает быть субъективностью. Просто в таком случае выбор границ будет зависеть уже не от конкретного геолога, а от используемого программного обеспечения и группы разработчиков ПО (или даже разработчиков нормативов), определивших, какие именно интерполяционные функции могут быть использованы геологами.

Единственная возможность снизить степень субъективности данных модели геологической среды – это повысить количество вводимой в неё объективной информации. А это, в свою очередь, возможно только при снижении степени межскважинной неопределенности.

Доступным и широко используемым способом снижения неопределенности данных инженерно-геологических изысканий в настоящее время является применение геофизических методов исследования (сейсморазведка, георадиолокация, электроразведка), способных давать густую сеть инверсионных данных как в плоскости (геоэлектрические разрезы), так и в пространстве (трехмерная электротомография).

(Примечание автора – Уверен, большинство читателей, которые имели опыт проектирования на объектах с выполненными геофизическими исследованиями, согласятся, что данные геофизики придают проектировщику/расчетчику некоторую степень уверенности в принятых решениях и часто удерживают от излишних запасов надежности, связанных с межскважинной неопределенностью).

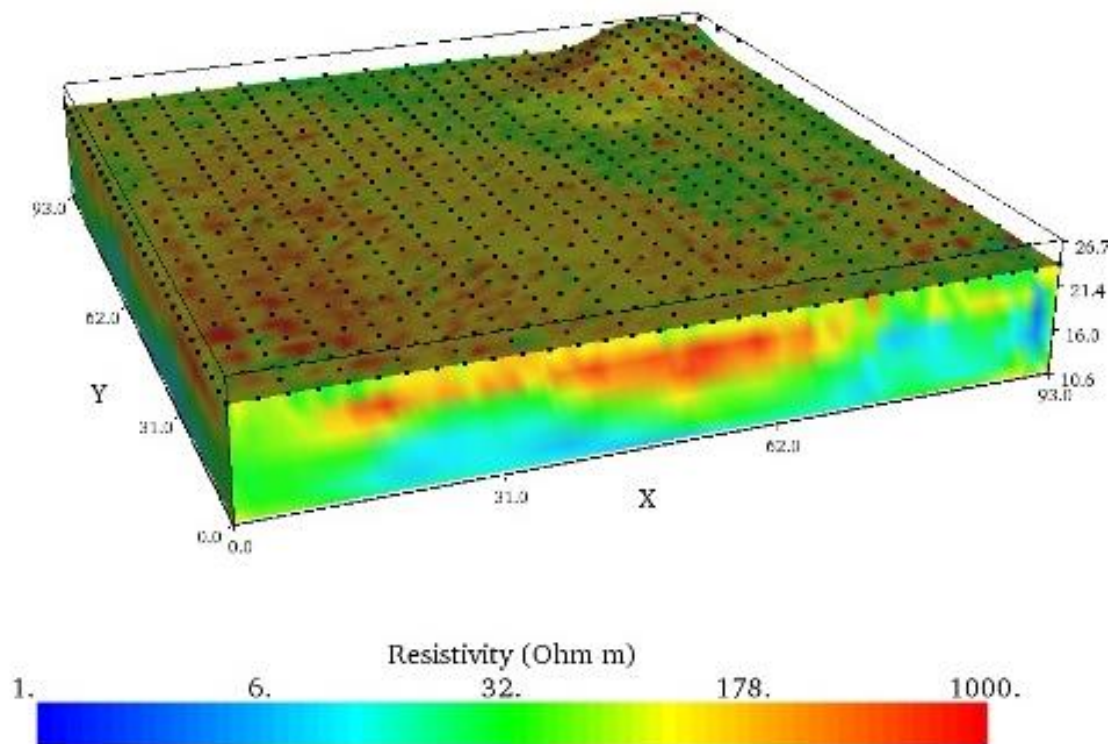


Рис. 4. Пример трехмерной инверсии удельного электрического сопротивления по результатам электротомографии

И если сегодня геофизические исследования в строительстве проводятся в основном для технически и/или геотехнически сложных объектов (для уникальных зданий; при нестандартных проектных решениях; при наличии в основании специфических грунтов; при опасности развития на площадке строительства опасных геологических процессов и т. п.), то видится, что с переходом на трехмерное информационное моделирование геологической среды, практика их использования должна распространиться как минимум на все сооружения повышенного и нормального уровня ответственности, решив тем самым как вопрос снижения субъективности и повышения континуальности данных, так и вопрос автоматизированного распределения характеристик в пространстве исследуемого грунтового массива.

Без контрольно-заверочных работ с измерением прямыми методами в данной ситуации, конечно, не обойтись. Но если геофизические исследования выполнять в обязательном порядке уже на предпроектной стадии, то общее количество точек отбора проб и полевых испытаний (опорных и контрольно-заверочных) может быть оптимизировано на основе данных геофизики. Кроме того, в таком случае появляется возможность оптимизировать и конструктивно-планировочные решения проектируемого сооружения. Данное обстоятельство особенно актуально, если учитывать, что количество осваиваемой территории со специфическими грунтовыми и техногенными условиями и опасными геологическими процессами неуклонно растет.

4. О вариантах практического приложения трехмерной модели геологической среды

Кроме удобной работы в рамках единой платформы для изыскателей, проектировщиков и расчетчиков/геотехников и иных вытекающих из этого преимуществ, создание функционально гибкой трехмерной модели геологической среды также обуславливает дополнительные варианты применения как самой геологической модели (обособленно), так и сводной BIM-модели с геологической средой.

Например, на абсолютно другой уровень может быть выведена база данных результатов инженерных изысканий в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 22.04.2017 №485 [6]. Так, вместо структурированной системы разрозненных папок на дисковом пространстве появляется возможность получить наглядную обобщенную информационную модель результатов изысканий (читай цифровой двойник) для различных территорий, районов и населенных пунктов. Это позволит не просто существенно сократить объем повторных изысканий и тем самым повысить темпы строительного производства, но и исключит большинство сложностей (если не все), возникающих в настоящее время при оцифровке, масштабировании, конвертировании и других манипуляциях с данными, а также даст возможность максимально эффективно использовать имеющуюся информацию за счет более комплексной оценки ситуации (экологической, техногенной т.д.).

Полезность трехмерной геологической модели сложно переоценить для перспективного освоения подземного пространства городов и создания функционального 3D-кадастра. Более того, цифровая модель геологической среды может и должна стать плацдармом для разработки и внедрения формульной оценки целесообразности освоения подземных территорий на ранних стадиях градостроительного планирования. С геологической структурой становится возможным создание функционального 3D-кадастра, без которого невозможно представить полноценное освоение подземного пространства городов.

Таким образом, использование трехмерной геологической модели на начальных этапах принятия решений и планирования позволит городским властям наилучшим образом сбалансировать экономические, социальные и экологические интересы.





Рис. 5. Фрагменты иллюстрации «Город Роттердам в 2035 году – другая половина Роттердама. Мудрое использование недр дает градостроительству новое направление для развития» (Источник: Gemeente Rotterdam (Официальный сайт города Роттердам))

5. О геотехническом мониторинге и геомеханической безопасности сооружений в системе информационного моделирования, а также о других формах использования трехмерной модели геологической среды

Как известно, поведение грунтового основания под нагрузкой имеет определяющее значение для механической безопасности зданий и сооружений. В то же время показатели свойств грунтов не являются константами, а представляют собой динамически изменяющуюся систему, зависящую от множества природных и техногенных условий. Достоверно определить, когда, в каком случае, в каком объеме, какое именно условие может оказать влияние на работу сооружения и учесть это в расчетах удастся далеко не всегда. Хотя и в разной степени, но это справедливо как для технически и геотехнически сложных объектов, так и для относительно простых. При этом опасность негативного воздействия различных факторов сопровождает сооружение на всех этапах его строительства и эксплуатации вплоть до работ по сносу, демонтажу и утилизации.

Своевременно выявить неблагоприятное влияние неучтенных параметров и не допустить переход сооружения в ограниченно работоспособное или аварийное состояние в подавляющем большинстве случаев позволяет геотехнический мониторинг.

До недавнего времени работы по геотехническому мониторингу были сопряжены с большой долей ручного труда, низкой производительностью измерительных инструментов и отсутствием эффективных средств для обработки, хранения, анализа и управления данными многолетних наблюдений. А потому вполне закономерно, что обязательное проведение геотехнического мониторинга действующими нормами предусмотрено только для уникальных сооружений, технически и геотехнически сложных объектов или при нестандартных ситуациях, а период наблюдений ограничен наличием **реальной** угрозы. Попытки предотвратить **потенциальные** угрозы в подобных обстоятельствах оказываются

нерациональными: времени и ресурсов требуется много, а шансы реализации опасности, если всё сделано на совесть, весьма невелики.

Но шансы есть, и иногда угрозы все же переходят из разряда потенциальных в разряд реальных. Вот только своевременно зафиксировать этот переход без мониторинговых работ, как правило, не удастся. А потому практически каждая такая реализация потенциальной опасности влечет либо катастрофические последствия, либо трату огромных ресурсов (иногда сопоставимых или превышающих новое строительство) на исправление ситуации. Однако коренным образом состояние дел могут изменить цифровизация строительства, внедрение информационного моделирования и современные системы автоматизированного мониторинга. Как с появлением волоконно-оптических линий связи стал реальностью интернет в каждом доме, так же на основе волоконно-оптических технологий реальностью может стать мониторинг деформаций грунтов оснований и конструкций зданий и сооружений на протяжении всего жизненного цикла строительного объекта. Уже сегодня датчики и сенсоры, использующие оптическое волокно, позволяют:

- измерять различные физические величины (деформации, температуру, давления, радиацию и др.), работая автономно;
- получать данные об измеренных величинах с достаточной для инженерных целей точностью для большинства случаев (независимо от действия электрических помех);
- получать данные об измеренных величинах в режиме реального времени с автоматизированной обработкой и анализом программными средствами;
- получать непрерывные данные для линейно протяженных объектов, а при перекрестной укладке плотной сетью и для объектов большой площади;
- за счет устойчивости к агрессивным средам обеспечить целостность измерительной системы на долгие годы.

Комплексированием волоконно-оптических систем с высокопроизводительными методами лазерного сканирования и стремительно развивающимися технологиями дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) может быть получен мощный инструмент геотехнического мониторинга, способный создать беспрецедентные условия для управления потенциальными рисками в части геомеханической безопасности зданий и сооружений. Результаты измерений такого мониторинга могут передаваться в дата-центр объекта (сервер, облачное хранилище и т. п.) для обработки и хранения непосредственно во время измерений.

Максимальный же профит от подобного рода данных будет при их совмещении с трехмерной геологической моделью или сводной BIM-моделью сооружения (или даже целого города – цифрового двойника) с геологической средой. Принципиальная техническая возможность передавать прогнозируемые поверхности деформаций в информационную модель проектируемого или эксплуатируемого сооружения, как это показано в [7], позволяет сделать процесс сопоставления контролируемых параметров с прогнозными значениями корректным, наглядным и автоматизируемым.



Рисунок 6.wmv

Рис. 6. Пример отображения 3D-границ ИГЭ и 3D-поверхности скольжения в сводной информационной модели фундамента опоры [7]

Таким образом становится возможным мониторинг строительных объектов в течение всего периода их существования, а значит появляется ресурс для своевременного обнаружения действия опасных инженерно-геологических процессов и предотвращения большинства предаварийных и аварийных ситуаций. Это особенно важно в контексте базовых принципов BIM об управлении жизненным циклом сооружений, а также в условиях роста осваиваемых территорий со сложными грунтовыми условиями.

Немаловажное значение подобный мониторинг играет также для развития механики грунтов и геотехники, поскольку позволяет лучше изучить различные процессы, происходящие в грунтах оснований (в особенности очевидна польза для изучения процессов ползучести), и дает важный источник проверки истинности научных знаний в виде данных фактических измерений.

6. О важности функционального внедрения трехмерной геологической модели и совместных расчетов оснований и сооружений в практику информационного моделирования

Современные геотехнические расчетные комплексы не поддерживают полноценные CAD-элементы конструкций строительного объекта, создаваемые в системах автоматизированного проектирования (САПР), а вместо этого используют упрощенные формы с эквивалентными и приведенными параметрами, которые не могут напрямую применяться для целей проектирования, подсчета объемов работ и/или информационного моделирования. В результате работа над объектом существенно усложняется и содержит множество ручных операций, выполняемых в разных программных продуктах: сначала производится эскизное (концептуальное) проектирование в САПР → далее принятые технические решения повторно отстраиваются в упрощенном виде и проверяются расчетом в геотехническом комплексе → после этого конструкции уточняются или изменяются по результатам расчета (читай перестраиваются) в САПР → затем выполняется подсчет объемов работ и прочие стандартные действия (часто в обособленной программе или офисных приложениях). При внесении изменений в конструктивную часть цепочка действий повторяется практически в полном объеме.

Чтобы сделать процесс проектирования максимально продуктивным и автоматизированным, создаваемая трехмерная модель грунтовой среды должна иметь динамическую связь с CAD-продуктом (САПР) и расчетным ядром, или же все указанные элементы должны быть интегрированы в рамках единого инструмента моделирования. Для этого необходимо свойства CAD-элементов и свойства грунтового основания связать математическими зависимостями интерактивного расчетного алгоритма, т. е. таким образом, чтобы при внесении значимых изменений в конструктивную часть проектируемого объекта или в свойства грунтового основания, переопределение расчетных параметров (деформаций, усилий, давлений/напряжений, объемов работ и т. п.) производилось автоматически.

Другими словами, нужно программными способами научить грунтовое основание взаимодействовать с CAD-элементами, а последние в свою очередь научить взаимодействовать с грунтовым основанием. Результат такого взаимодействия должен выражаться в интерактивном определении расчетных параметров.

В качестве примитива подобной интеграции может быть рассмотрен следующий пример. Линейка CAD-продуктов компании Autodesk позволяет создавать интегрированные пользовательские «надстройки» (приложения) к базовым программам. Одна из таких «надстроек» к базовому ПО для трехмерного проектирования линейных инфраструктурных

сооружений Autodesk Civil 3D позволяет получать трехмерную поверхность осадки грунтового основания под насыпью дорожного полотна для условий северных широт, рассчитанную в соответствии с ВСН 84-89 [8], а также определять объемы земляных работ с учетом осадки. При внесении каких-либо изменений в модель (изменение свойств грунтов основания, параметров насыпи, транспортной нагрузки или др.), пересчет и перестроение поверхности осадки, а также переопределение объемов земляных работ производится автоматически. В общем случае процесс моделирования с применением «надстройки» предполагает следующие операции:

- 1) базовыми инструментами на основе цифровой модели местности (рельефа) создается трехмерная модель дороги;
- 2) задаются климатические параметры района проектирования по месяцам путем заполнения таблицы, вызываемой из панели «надстройки»;
- 3) аналогично табличным способом создается база грунтов основания с указанием расчетных физико-механических и теплофизических характеристик;
- 4) инструментами «надстройки» определяются рассчитываемые сечения дороги, после чего к сечениям привязываются данные о напластовании грунтов основания (привязка может быть выполнена программными средствами, либо вручную);
- 5) далее задаются грунт и параметры насыпи, а также транспортная нагрузка в виде эквивалентного слоя грунта насыпи;
- 6) построением или указанием исходной поверхности земли по подошве насыпи определяется область взаимодействия грунтового основания и сооружения;
- 7) нажатием кнопки на панели «надстройки» автоматизированным способом выполняется расчет и построение трехмерной поверхности осадки (данные между сечениями автоматически интерполируются), а также производится подсчет объемов земляных работ с указанием характерных значений (до осадки – «общий объем насыпи»; после осадки – «объем насыпи над исходной поверхностью» и «объем насыпи ниже исходной поверхности»);
- 8) после этого любые изменения в исходных данных приводят к автоматическому переопределению расчетных параметров и перестроению поверхности осадки.

Важной особенностью такой системы является то, что все её компоненты представлены в готовом виде и могут быть напрямую использованы в проектной документации или экспортированы в сводную BIM-модель без дополнительных преобразований и перестроений.

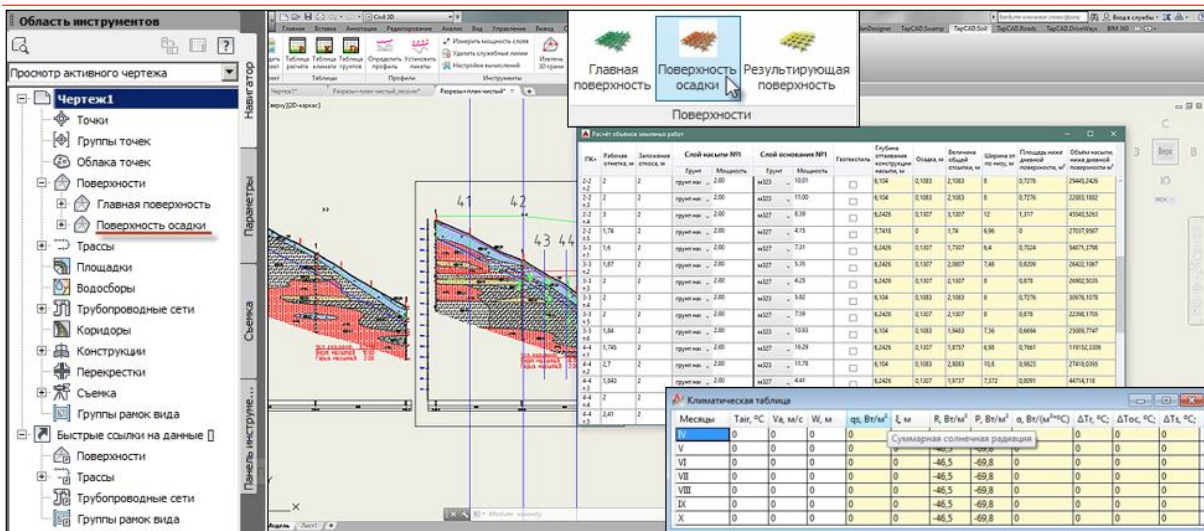


Рис. 7. Рабочее пространство Autodesk Civil 3D с «надстройкой» для определения осадки и построения трехмерной поверхности осадки грунтового основания под насыпью дорожного полотна для условий северных широт

Динамическая связь между геологической моделью, САД-продуктом (САПР) и расчетным ядром, или полная их интеграция в рамках единого инструмента моделирования, важны не только для автоматизации большинства трудоемких процессов проектирования и расчета, но и в качестве базы для создания таких сложных и важных процедур как:

- интерактивное проектирование конструкций зданий и сооружений на основе расчетного обоснования (т.е. результаты расчетной оценки видны непосредственно при работе с элементом САПР, что позволяет объединить этапы концептуального и окончательного проектирования, а также геотехнические и конструктивные расчеты, в одну технологическую цепочку);
- подбор из числа типовых конструкций оптимального варианта для конкретных инженерно-геологических условий (по сути, то же интерактивное проектирование, но с автоматизированным решением оптимизационной задачи);
- интерактивная оценка влияния строительства или реконструкции объекта на окружающую застройку (для расчета достаточно подгрузить в проектную модель САД-элементы прилегающих зданий и сооружений, скопированные из цифрового двойника города, района или отдельной территории);
- оптимизация параметров модели грунтового основания на основе данных геотехнического мониторинга (подбор свойств грунтов основания путем обратных расчетов по графикам фактических деформаций с последующей корректировкой прогноза).

Видится, что именно эти программные опции способны в полной мере раскрыть весь потенциал функциональности и вариативности применения трехмерной модели геологической среды в информационных системах строительного комплекса, а также оказать существенное влияние на рост экономической эффективности и надежности проектных решений, и повышение механической безопасности зданий и сооружений в целом.

Заключение

Сегодня в отечественном инженерно-строительном сообществе существует расхожее мнение относительно того, каким именно образом необходимо рассматривать инженерные

изыскания, а также геотехнические и конструктивные расчеты в рамках BIM-технологии. Варианты предлагаются самые разные.

В качестве самого консервативного – предложение принципиально ничего не менять, а результатам изысканий и инженерных расчетов отвести роль атрибутивных данных BIM-модели или вложенных в модель файлов-отчетов.

Минимум изменений относительно существующего положения дел подразумевает и предложение использовать BIM-модель в качестве исходных данных конструктивной части для совместных расчетов оснований и сооружений, а форму представления данных о результатах расчетов выбирать ситуативно, в зависимости от поставленной задачи и имеющихся возможностей, максимально наладив при этом процедуру обмена данными между программными комплексами.

Ввиду наличия определенных наработок в создании пространственных инженерно-геологических моделей нередко можно встретить предложение адаптировать эти наработки для информационного моделирования и сделать их частью BIM без каких-либо существенных изменений в подходах к проектированию и расчетам.

Куда более серьезные, в некоторой степени даже революционные, изменения в привычном укладе проектно-изыскательских работ сулит предложение рассматривать цифровую модель геологической среды и совместные расчеты сооружений как некий самостоятельный информационный процесс вне рамок BIM, или как обособленный процесс в рамках BIM.

Лишь рассмотрев комплексно все предложения, можно понять, что указанные варианты не являются конкурирующими, а представляют собой звенья одной эволюционной цепи, которая, по-видимому, должна привести нас к комплексному информационному моделированию, включающему все информационные процессы строительного объекта на различных стадиях его жизненного цикла: от изысканий до эксплуатации и ликвидации.

Ключевым и консолидирующим элементом такой комплексной информационной системы может и должна стать трехмерная цифровая геологическая модель. Лишь при её наличии BIM несет не только удобство и сокращение временных затрат, но и решает вопросы экономической эффективности и надежности технических решений, целесообразности освоения подземного пространства, а также обеспечения геомеханической безопасности объектов капитального строительства. А значит только после того, как пространственная геологическая среда станет неотъемлемой частью BIM-моделей и цифровых двойников, цифровизацию строительства можно будет считать полноценной.

Вопросы к обсуждению

- Нужна ли дискретизация трехмерной модели геологической среды на типологические классы (ИГЭ, РГЭ, геологические тела и т. п.) для удобства её восприятия всеми пользователями, или правильнее работать с цельным массивом данных и опция дискретизации будет лишней?
- Как ещё можно сделать работу с трехмерной моделью геологической среды оптимальной для всех её потенциальных пользователей?
- Может ли геофизика уже сейчас быть базовым методом инженерно-геологических изысканий и служить основой для создания трехмерной модели геологической среды?
- Правильно ли утверждать, что при повышении спроса на геофизические методы исследования и росте общего количества участников на данном рынке (как поставщиков, так и покупателей), можно ожидать стремительное развитие в данной

области и последующее снижение стоимости работ (по аналогии с развитием сотовой связи)?

- Непрерывный геотехнический мониторинг на всех стадиях жизненного цикла объектов нормальной и повышенной ответственности должен быть решением добровольным, или необходимо его закрепить в нормативно-правовых актах в качестве обязательного мероприятия?
- Возможно ли в обозримом будущем создание отечественного ПО, реализующего все, или большинство, рассмотренных в настоящей работе положений, идей и концепций? Или имеет смысл дождаться зарубежного продукта и использовать его (тем более, что с приобретением Keynetix и Plaxis, компания Bentley Systems может быть к этому очень близка)?
- Кто может и/или должен инициировать и курировать разработку подобного ПО в России: государственные структуры, научные и научно-производственные институты, коммерческие строительные организации, инженерные IT-компании или кто-то другой?

Список использованных источников

1. Болдырев Г. Г., Дивеев А. А. К вопросу использования информационных систем при изысканиях и проектировании оснований фундаментов зданий и сооружений [Электронный ресурс] / Независимый электронный журнал «ГеоИнфо». URL: <https://www.geoinfo.ru/product/boldyrev-gennadij-grigorevich/k-voprosu-ispolzovaniya-informacionnyh-sistem-pri-izyskaniyah-i-proektirovanii-osnovanij-fundamentov-zdaniij-i-sooruzhenij-42530.shtml> (дата обращения 24.04.2020).
2. Котельников А. OPEN BIM в действии. Современные технологии информационного моделирования на основе открытого взаимодействия: Презентация к докладу // Международный форум и выставка высотного и уникального строительства «100+ Forum Russia» (29 октября – 01 ноября 2019 г.).
3. СП 331.1325800.2017 Информационное моделирование в строительстве. Правила обмена между информационными моделями объектов и моделями, используемыми в программных комплексах [Электронный ресурс]: Введ. 2018-03-19. – М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации: Минстрой России, 2017. Доступ из справочной системы «Техэксперт».
4. Барвашов В., Болдырев Г., Зиангиров Р., Маляренко А. О компьютеризации диалога между изыскателями и геотехниками // CADmaster. 2010. № 5. – С. 104-107.
5. Болдырев Г. Г., Барвашов В.А., Шейнин В.И., Каширский В.И., Идрисов И.Х., Дивеев А.А., 2019. Информационные системы в геотехнике – 3D-Геотехника // Геотехника, Том XI, № 2, с. 6–27, <https://doi.org/10.25296/2221-5514-2019-11-2-6-27>.
6. Постановление Правительства РФ от 22.04.2017 № 485 «О составе материалов и результатов инженерных изысканий, подлежащих размещению в государственных информационных системах обеспечения градостроительной деятельности, Едином государственном фонде данных о состоянии окружающей среды, ее загрязнении, а также о форме и порядке их представления» [Электронный ресурс]. Доступ из справочной системы «Техэксперт».
7. Куренков А.С. Передача данных из PLAXIS в цифровую модель проекта: Презентационные материалы к докладу // XI ежегодная научно-техническая конференция пользователей программного комплекса PLAXIS (9-10 октября 2018 г.).

8. ВСН 84-89. Изыскания, проектирование и строительство автомобильных дорог в районах распространения вечной мерзлоты [Электронный ресурс]: Введ. 1989-03-30. – М.: Министерство транспортного строительства СССР : Минтрансстрой СССР, 1990. Доступ из справочной системы «Техэксперт».