

A027

## Moscow geological environment 3D modeling

**M. Buchkin, \*R. Zhidkov, A. Savitsky,** (*Scientific and Production Enterprise "Georesource"*)

### SUMMARY

Project of Moscow city geological environment 3D modeling was a follow-up upon the completion of geological mapping scale 1:10000 of the city area, which was finished in 2009. The model was based on cartographic materials, primary database consisting of 70,000 boring logs, indexed in accordance with the geochronological legend and critically evaluated in terms of representativeness and reliability. In the course of modeling principals of Moscow geological environment formation were taken into account – at first modeling of paleorelief bearing surfaces which were formed by the end of main periods of sedimentation. The final model includes more than 60 3D bodies, describing spatial distribution of stratigraphic layers as well as 20 groundwater surface levels. On the actual signs, recorded in the borehole logs and main factors combination areas of hazardous geological processes occurrence were identified. A geological environmental conditions assessment methodology for urban design planning was developed on the basis of this model. Methodology includes the following combinations of factors: building type and parameters, physical and mechanical properties of foundation soils, distribution of hazardous geological processes and specific soils, assessment of territory geological conditions favorability for different types of buildings

## Про створення тривимірної моделі геологічного простору м. Москви

**М.М. Бучкин, \*Р.Ю. Жидков, О.Ф. Савицький,** (*НПП "Георесурс"*)

### РЕЗЮМЕ

Проект розробки комп'ютерної тривимірної моделі будови геологічного середовища м. Москви став логічним продовженням робіт зі створення комплекту геологічних карт масштабу 1:10 000 на територію міста, завершених в 2009 р. Фактичною базою для створення моделі став як картографічний матеріал, так і архів паспортів бурових свердловин, що складається з близько 100 000 виробок, переіндексованих відповідно до єдиної геохронологічної легенди, критично оцінених з позицій репрезентативності та занесених до бази даних. При створенні моделі враховувалися закономірності формування геологічного середовища м. Москви – в першу чергу здійснювалася побудова палеорельєфа опорних поверхонь, що сформувалися до закінчення основних періодів перерви у осадконакопиченні з наступним пошаровим накладенням геологічних тіл. Отримана модель включає в себе більше 60 тривимірних тіл, що описують просторове поширення стратиграфічних шарів і 20 рівневих поверхонь водоносних горизонтів. За фактичними ознаками, зафіксованими при описі бурових свердловин і по комбінаціях визначальних чинників були виділені області поширення небезпечних геологічних процесів. На базі моделі була розроблена методика оцінки умов освоєння підземного простору для цілей містобудівного проектування, що враховує параметри споруди, властивості ґрунтів основи, поширення небезпечних геологічних процесів і специфічних ґрунтів і дозволяє оцінити ступінь сприятливості геологічних умов території для споруд різного типу. У

перспективі планується інтеграція моделі з розроблюваними моделями підземних комунікацій і споруд м. Москви.

## О создании трехмерной модели геологического пространства г. Москвы

**М.Н. Бучкин, \*Р.Ю. Жидков, А.Ф. Савицкий, (НПП "Георесурс")**

### РЕЗЮМЕ

Проект разработки компьютерной трехмерной модели строения геологической среды г. Москвы стал логическим продолжением работ по созданию комплекта геологических карт масштаба 1:10 000 на территорию города, завершенных в 2009 г. Фактической базой для создания модели послужил как картографический материал, так и архив паспортов буровых скважин, состоящий из около 100 000 выработок, переиндексированных в соответствии с единой геохронологической легендой, критически оцененных с позиций репрезентативности и занесенных в базу данных. При создании модели учитывались закономерности формирования геологической среды г. Москвы – в первую очередь осуществлялось построение палеорельефов опорных поверхностей, сформировавшихся к окончанию основных периодов перерыва в осадконакоплении с последующим послойным наложением геологических тел.

Полученная модель включает в себя более 60 трехмерных тел, описывающих пространственное распространение стратиграфических слоев и 20 уровневых поверхностей водоносных горизонтов. По фактическим признакам, зафиксированным при описании буровых скважин и по комбинациям определяющих факторов были выделены области распространения опасных геологических процессов.

На базе модели была разработана методика оценки условий освоения подземного пространства для целей градостроительного проектирования, учитывающая параметры сооружения, свойства грунтов основания, распространение опасных геологических процессов и специфических грунтов и позволяющая оценить степень благоприятности геологических условий территории для сооружений разного типа. В перспективе планируется интеграция модели с разрабатываемыми моделями подземных коммуникаций и сооружений г. Москвы.

## **Введение**

Работы по геологическому картированию территории г. Москвы, выполненные в 2007-2009 гг. обеспечили появление принципиально нового информационного ресурса общегородского значения, которым город никогда не располагал ранее. Впервые был создан комплект крупномасштабных карт в масштабе 1: 10 000, совмещенных с Единой государственной картографической основой Москвы, отражающих геологическое и гидрогеологическое строение всей территории города. Карты построены в соответствии с общепринятыми геологическими стандартами и совместимы с государственными геологическими картами масштаба 1: 50 000 на прилегающие территории Московского региона. Они сопровождаются геологическими и гидрогеологическими разрезами на всю глубину активного взаимодействия города с геологической средой – 100 м от поверхности земли.

Геологические карты необходимы мегаполису как информационная основа для любых действий, связанных с освоением его подземного пространства, в том числе, для генерального планирования, проектирования, изысканий для строительства, специальных геологических исследований, моделирования фильтрации подземных вод, мониторинга и других видов деятельности. В 2008 г. было принято постановление Правительства г. Москвы, в котором декларировалась необходимость создания единого геоинформационного пространства города. Это означает, что в единую геоинформационную систему должна быть сведена информация о надземной, наземной и подземной частях города, в том числе о его геологическом пространстве. Есть ряд ограничений, не позволяющий рассматривать карты в качестве универсального информационного ресурса при осуществлении градостроительной деятельности.

Прежде всего, комплекту геологических карт как носителю информации не хватает информационной емкости. Он мало приспособлен для решения прикладных текущих задач. Чтение карт требует от пользователя навыков и специальных геологических знаний. Обновление и редактирование карт в случае выявления новых сведений о строении геологической среды – трудоемкий и долгий процесс.

Все эти ограничения снимаются при переходе от классического двухмерного картирования к трехмерному компьютерному моделированию. На протяжении последних десятилетий применение моделей геологической среды при осуществлении градостроительной деятельности вошло в практику во многих крупных европейских городах – Лондоне, Глазго, Турине и др. В этой связи, по завершении геологического картирования городской территории, была начата работа по созданию трехмерной модели геологической среды г. Москвы.

## **Геологическая изученность территории города Москвы**

Территория г. Москвы, как и большинства крупных городов, характеризуется высокой степенью изученности инженерно-геологических условий. Так, на сегодняшний день в городских архивах содержится более 800 тыс. журналов буровых скважин, что в среднем составляет более 7 скважин на 1 Га территории города. Однако не все из этих скважин представительны, большинство из них имеют небольшую глубину (особенно выработки, пройденные в процессе проведения изысканий для строительства линейных объектов). Для построения комплекта геологических карт масштаба 1:10 000 из архивов было отобрано 100 тыс. скважин.

Основная проблема, с которой пришлось столкнуться при создании картографической базы данных – отсутствие единой стратиграфической схемы и крайняя разнородность качества первичных буровых материалов. Городской фонд скважин накоплен за 75 лет и это обстоятельство привело к необходимости тотальной переиндексации геологических колонок в соответствии с принятой в Московском регионе стратиграфической схемой. Эта работа была

критериальным условием для геологической корреляции, что особенно важно при осуществлении объемного моделирования строения подземного пространства.

### **Особенности строения геологической среды г. Москвы**

Геологический разрез территории г. Москвы до глубины 100 м представлен осадочными отложениями относящимся к каменноугольной, юрской, меловой и четвертичной системам. В региональном масштабе исследуемая территория приурочена к юго-западной окраине Московской синеклизы. Породы, слагающие осадочный чехол, характеризуются субгоризонтальным и слабомоноклинальным залеганием. Отложения каменноугольной системы существенно карбонатные, средний ее отдел представлен известняками и доломитами, верхний – переслаивающимися пачками карбонатных и карбонатно-глинистых пород. Среднекаменноугольные отложения служат коллектором для подольско-мячковского водоносного горизонта стратегического значения, применяющегося для целей водоснабжения во многих частях Московского области. Юрские породы представлены преимущественно глинами – в нижней части континентального, в верхней – морского генезиса. Континентальная часть разреза юрских отложений выступает в роли заполнителя древних эрозионных долин, а верхняя толща юрских глин, мощность которых может достигать 35-40 м, играет роль регионального водоупора. Отложения меловой системы представлены преимущественно мелкими и пылеватыми водонасыщенными кварц-глауконитовыми песками с подчиненными прослоями глин и алевроитов. Среди четвертичных отложений наиболее распространенными являются породы аллювиального генезиса, слагающие долины р. Москвы и её притоков, и комплекс ледниковых и водно-ледниковых образований двух последних для этой территории оледенений – донского и московского. Более древние четвертичные отложения (в том числе и фрагментарно сохранившиеся образования сетуньской морены) залегают в основном в понижениях дочетвертичного рельефа и не всегда поддаются расчленению. Спорадическое распространение имеют древние и современные болотные образования, делювиальные отложения, оползневые тела, приуроченные преимущественно к крутым склонам р. Москвы. Всего принятая система стратификации содержит более 60 региональных стратиграфических подразделений. В пределах зоны взаимодействия с инженерными сооружениями выделяются 20 водоносных горизонтов.

Среди факторов, осложняющих инженерно-геологические условия можно выделить развитие карстово-суффозионных, оползневых процессов, наличие древних эрозионных врезов, подтопление, присутствие в геологическом разрезе грунтов, характеризующихся специфическими свойствами – значительной сжимаемостью, пучинистостью, плавунностью, подверженностью динамическим воздействиям и т.д.

### **Методика разработки трехмерной модели геологического пространства г. Москвы**

Схема и последовательность действий при моделировании подземного пространства Москвы была основана на положениях классической картографии и логике, которая используется при геологических исследованиях. При построении поверхностей всех стратиграфических тел осуществлялся учет условий и особенностей их формирования. В связи с этим, несмотря на сложность и объем картографических построений компьютерным технологиям на этом этапе была отведена важная, но вспомогательная роль.

Для того чтобы информационное наполнение модели, содержащей пространственно-распределенные данные, удовлетворяло требованиям, необходимым для решения задач геологического сопровождения градостроительной деятельности, были разработаны классификаторы геолого-картографических объектов и соответствующий список свойств, определяющих минимально необходимое содержательное описание объектов. Классификаторы позволили осуществить занесение в базу данных в закодированном виде информации, содержащейся в паспортах геологических выработок, заранее переиндексированных в соответствии с принятой легендой. В перечень заносимых параметров

вошли стратиграфическая и литологическая характеристики отложений, инженерно-геологические их особенности – консистенция для глинистых грунтов, крупность и плотность сложения для песчаных, степень трещиноватости, кавернозности и подверженности карстово-суффозионным процессам для полускальных пород. В толщах карбонатных пород были выделены зоны окремнения, в дисперсных отложениях отмечено наличие крупнообломочных включений. В процессе разработки классификатора литологических разностей был применен принцип соответствия определенных литотипов конкретным стратиграфическим единицам, позволяющий минимизировать вероятность занесения в базу ошибочных данных. Гидрогеологический классификатор позволил разделить весь разрез на относительно водоупорные и потенциально водовмещающие отложения. В сочетании с заносимыми в базу данных частными значениями замеров уровней появления и установления водоносных горизонтов и информацией с гидрогеологических карт эти данные позволяют получить полноценную геофильтрационную модель территории города.

Таким образом, при создании модели используются четыре типа геолого-картографических объектов разного уровня. Первый тип – это стратиграфо-генетический комплекс (СГ-слой), соответствующий отдельному этапу (интервалу) осадконакопления на территории Москвы и характеризующийся относительно однородными геологическими условиями СГ-комплекс соответствует свите, подсвите, толще в принятой легенде и является сложным телом. Следующий уровень геолого-картографических объектов – это литогенетический слой (ЛГ-слой), соответствующий определенным разновидностям горных пород в пределах отдельного СГ-комплекса и сформированный в определенный этап осадконакопления. Инженерно-геологический элемент – часть литогенетического слоя, характеризующаяся однородным набором инженерно-геологических свойств (явлений, процессов). Водоносный горизонт (ВГ-слой) – слой воды, заключенный между двумя водоупорными слоями или «опирающийся» на единственный водоупор.

Комбинация двух первых типов геолого-картографических объектов образует геологическую модель подземного пространства, которая является базовой для инженерно-геологической и гидрогеологической моделей. Такой подход обеспечивает соблюдение согласованности принципа комплементарности моделей, что необходимо при работе в рамках единого геоинформационного пространства. Построение модели – это объемная геологическая геометризация геолого-картографических объектов в трехмерном пространстве включающая в себя две методологические процедуры – деление целого на части по заданному признаку и обособление в топологически связанном пространстве геологических тел считающихся относительно элементарными в выбранном масштабе моделирования.

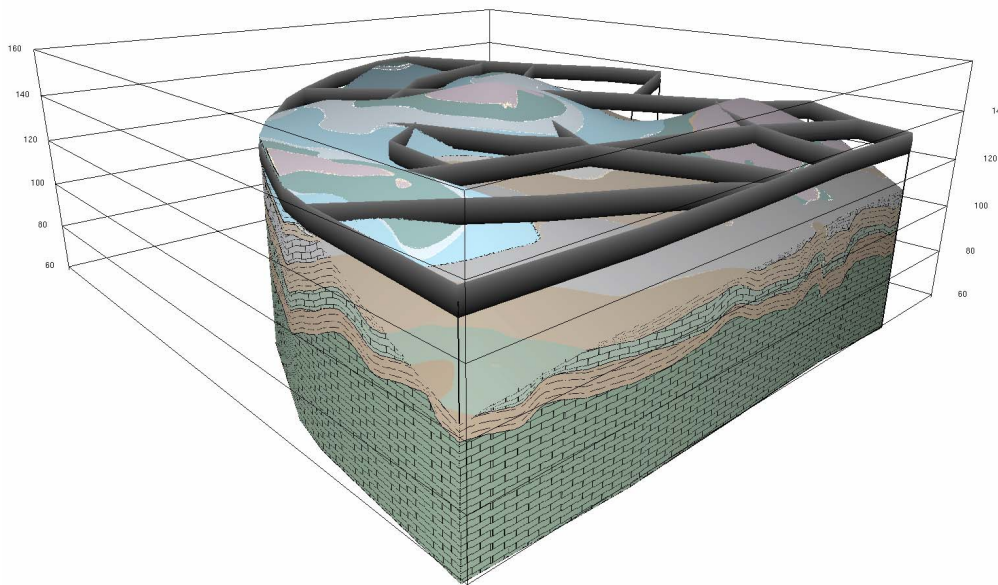
Построение объемной геологической модели Москвы осуществлялось методом «накопления рельефа» имитирующим последовательное изменение палеорельефа территории города по мере завершения отдельных этапов седиментогенеза. Критериальным условием здесь является хронологическая последовательность осадконакопления, которая должна соблюдаться в любой точке моделируемого пространства. На «базовой» палеоповерхности в пределах области распространения отложений конкретного возраста, заранее оконтуренной специалистами-геологами, последовательно строятся изопахиты первого слоя, которые впоследствии складываются с абсолютными отметками исходной поверхности и образуют палеорельеф соответствующего возраста. Полученная поверхность является «базовой» для построения следующего слоя и процедура повторяется вплоть до получения отметки дневной поверхности.

Таким образом, множество цифровых палеорельефов, расположенных в хронологическом порядке и покрывающих всю область моделирования задают первый уровень детализации объемной модели. Следующий этап построения модели ориентирован на детализацию геологического строения подземного пространства по литологическому признаку. При этом, объектом расчленения является не подземное пространство в целом, а каждое из объемных геологических тел (СГ-комплексов), оконтуренных на предыдущем этапе. Построение палеофациальных рельефов имеет свою специфику, но в целом сохраняется методика,



используемая на первом этапе построения модели. Во всех случаях отложение цифровых моделей палеорельефов осуществляется по схеме «up & down», подразумевающей параллельное построение «снизу вверх» и «сверху вниз», что позволяет уменьшить «невязку», образующуюся за счет машинной интерпретации.

Комбинирование параметров, занесенных в первичную базу данных, и пространственного положения стратиграфических и литологических границ и уровней водоносных горизонтов позволяет осуществлять применение модели для широкого спектра прикладных задач. Так, например, в настоящий момент осуществляется разработка методики оценки условий освоения подземного пространства для целей градостроительного проектирования, учитывающей особенности различных толщ грунтов, при использовании их в качестве основания или среды для подземных сооружений в комбинациях с пространственным распределением зон развития неблагоприятных геологических процессов и явлений и гидрогеологических особенностей. При этом осуществляется «погружение» трехмерного тела сооружения в моделируемый массив горных пород и вычисляется интегральный показатель, позволяющий оценить степень благоприятности принятия тех или иных проектных решений в конкретных геологических условиях. Применение многовариантного подхода в этом случае позволяет осуществить принятие управляющих решений, минимизирующих экономические и временные затраты, направленные на усиление фундаментных сооружений при их устройстве в сложных инженерно-геологических условиях и меры по инженерной защите территорий.



**Рисунок 1.** Погружение подземного сети тоннелей в модель геологического пространства

## Заключение

К настоящему моменту работы по объемному моделированию подземного пространства г. Москвы далеки от завершения. Построенная геологическая модель пока покрывает только центральную часть города (150 км<sup>2</sup> при общей площади моделируемой территории 1100 км<sup>2</sup>).

Методика, принятая при разработке трехмерной модели геологического пространства г. Москвы, основана на комбинировании ручного и автоматизированного способов построения стратиграфических поверхностей, что позволило в процессе моделирования учесть особенности осадконакопления в регионе. Еще раз подчеркнем, что критериальным условием, обеспечивающим возможность разработки трехмерной модели геологической среды городской территории является унификация исходных данных, основанная на применении выверенной системы стратиграфической схематизации. В перспективе планируется интеграция модели с разрабатываемыми базами подземных коммуникаций и сооружений г. Москвы.