

*Жидков Р.Ю., Серов С.Ю. —
НПП «Георесурс», ГУП «Мосгоргеотрест»*

ТРЕХМЕРНАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА КАК ИННОВАЦИОННЫЙ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТ (НА ПРИМЕРЕ Г. МОСКВЫ)

В настоящее время практически все основные направления градостроительного освоения в Москве связаны с освоением подземного пространства. Внедрение строящихся объектов в подземную инфраструктуру осуществляется в сжатые сроки. В этой связи становится особенно актуальным комплексный подход к освоению подземного пространства, с одной стороны, удовлетворяющий функциональным требованиям, с другой, — рассматривающий подземное пространство как ценный исчерпаемый ресурс. Динамика современного градостроительного процесса требует применения принципиально новых инструментов для работы с данными о подземном пространстве, обеспечивающими мгновенную наглядную и достоверную оценку существующих условий как на стадии генерального планирования, так и при проектировании заглубленных и подземных сооружений. Одним из таких инструментов может стать объемная модель подземного пространства.

Ключевые слова: подземное пространство, трехмерное моделирование, генеральное планирование, стратегия освоения подземного пространства, инженерная геология, BIM-технологии.

Введение. Освоение подземного пространства — важное градостроительное направление, актуальность которого особенно хорошо видна на примере Москвы. В «старых границах» города и в части присоединенных территорий, примыкающей к ним, на фоне общего спада в строительстве жилой и общественно-деловой инфраструктуры активно развивается подземный транспорт. За 2016—2019 гг. согласно утвержденной Адресной инвестиционной программе Москвы будут построены более 100 км линий и 50 станций метрополитена. Введено в эксплуатацию Малое кольцо железной дороги, которое через транспортно-пересадочные узлы связывается с существующими и строящимися станциями. Активно осуществляется проект реорганизации промышленных зон, в рамках которого планируется освоение более 4 тыс. га ранее неиспользуемой территории.

При освоении «присоединенных территорий» осуществляется иной процесс. Фактически, на этой территории осуществляется пер-

вичное формирование подземного пространства городской территории. Вероятно, в краткосрочной перспективе оно будет ограничено развитием линий метрополитена и устройством подземных парковок при строительстве жилых кварталов. При строительстве объектов на этой территории особенно важно предусмотреть возможность дальнейшего развития системы подземного транспорта и прочей заглубленной инфраструктуры.

При всех своих преимуществах подземное строительство — наиболее технически сложный, трудо- и времязатратный вид градостроительного освоения. Систематические проблемы при освоении подземного пространства крупных городов можно разделить на две группы, связанные с разными стадиями градостроительного процесса, — стратегические и объектные (локальные).

Стратегические проблемы обусловлены несовершенством подходов к градостроительному проектированию и планированию. Авторами [4] выделяются четыре подхода к формированию программ по освоению подземного пространства:

- ресурсный, в рамках которого подземное пространство рассматривается как исчерпаемый, невозобновляемый ресурс недр;
- градостроительный, рассматривающий подземное пространство как средство для разгрузки и рациональной организации поверхностной части города;
- директивный, в рамках которого строительство подземных объектов определяется не условиями рационального использования территории, а директивными требованиями вне зависимости от инженерно-геологических, градостроительных и других условий;
- комплексный, основанный на всестороннем анализе технологических, инженерно-геологических, экономических и социальных и экономических условий. Именно этот подход обеспечивает решение проблем функционирования и устойчивого развития города, гарантирует экологическую безопасность окружающей среды.

Проще говоря, комплексный подход возникает на стыке градостроительного и ресурсного подходов, обеспечивая сбалансированное решение краткосрочных и стратегических задач. Нужно признать, что в крупнейших городах России сегодня применяется комбинация градостроительного и директивного подходов. На наш взгляд, причина этого кроется не в недостатке знаний или специалистов, способных внедрить в градостроительную практику комплексный подход. Сложность конфигурации подземного пространства

накладывает ограничения на применение существующих аналитических методов, предполагающих площадную, но не трехмерную оценку. С другой стороны, закрытость и разрозненность сведений о существующих подземных сооружениях и коммуникациях затрудняет проведение таких оценок в принципе.

Объектные или локальные проблемы возникают при реализации строительных объектов на практике и, как правило, находят выражение в нарушении запланированных сроков их ввода в эксплуатацию и существенном превышении бюджетной стоимости. Эта группа проблем может быть связана с недооценкой технологической сложности реализации проекта, рассинхронизацией и несогласованностью действий специалистов разного профиля.

В качестве одного из путей минимизации таких ошибок сегодня предлагается широкое внедрение в процесс проектирования технологий информационного моделирования (BIM). Эти технологии позволяют свести к минимуму ошибки в проекте, упростить взаимодействие проектировщиков разных разделов, дают возможность разработки многовариантных проектов. По результатам исследования, проведенного НИУ МГСУ совместно с ООО «Конкуратор» [6], применение BIM-систем может привести к ускорению общего срока проектирования на величину до 40 % и снижению себестоимости проекта, связанной со снижением затрат на стадии строительства до 30 %. В полной мере разделяя оптимизм авторов исследования, отметим, что с увеличением заглубленности проектируемого сооружения возрастает степень неопределенности исходных данных. Это обусловлено не только перечисленными выше причинами, но и значительным влиянием инженерно-геологических условий на конструктивные и технологические условия строительства подземных и заглубленных сооружений.

В наши дни нередка парадоксальная ситуация, когда при проектировании зданий и сооружений на городских территориях, характеризующихся крайне высокой степенью инженерно-геологической изученности, геологические условия не учитываются вплоть до момента проведения инженерно-геологических изысканий на стадиях, предшествующих разработке рабочей документации. Принятая в советское время система многостадийных инженерно-геологических изысканий с обязательным проведением полевых работ малоприменима с учетом сжатых сроков реализации строительных проектов, зятянутости и трудоемкости процесса регистрации буровых работ и

полевых испытаний. В то же время имеющаяся в архивах информация фрагментарна, разнородна по своей детальности, не всегда представительна и актуальна, а следовательно, в прямом виде не может служить основанием для разработки предварительных проектных решений.

В свете всего вышеизложенного возникает необходимость разработки принципиально новых градостроительных инструментов, позволяющих работать в объеме и обеспечивающих возможности сбора, систематизации сведений о подземном пространстве и выполнении пространственно-аналитических расчетов. В качестве одного из таких инструментов предлагается объемная модель подземного пространства, разработка которой осуществляется на территории Москвы.

Геологическая основа модели. Создание модели было начато с разработки геологического каркаса — среды, в которой располагаются или будут расположены инженерные сооружения. В качестве концептуального прообраза модели выступил Геологический атлас Москвы [5] — комплект крупномасштабных геологических карт, охватывающих территорию старой Москвы, работа над которым была закончена в 2011 г.

Геологический каркас модели построен на унифицированной базе данных, включающей детальное описание более чем 80 000 буровых скважин, переработанных в соответствии со стратиграфической легендой, принятой в атласе. В базу данных интегрирована система самопроверки, анализирующая пространственное распределение выработок и выявляющая ошибки по пространственно-статистическому принципу. При этом с высокой долей вероятности выявляются и отбраковываются некачественные результаты изыскательских работ, неверная привязка геологических скважин, минимизируется влияние человеческого фактора.

Геологическое строение моделируется методом последовательной реконструкции палеорельефов. Этот метод имитирует естественный ход напластования осадочных пород, что обеспечивает «геологичность» информации.

Для работы с информационной начинкой модели был разработан программный комплекс «Геонавигатор», который обеспечивает оперативное обновление данных, визуализацию и доступ к ним в интуитивно понятной форме. Объемная модель включает в себя геологическую, гидрогеологическую и инженерно-геологическую состав-

ляющие. Программный комплекс дает возможность сгенерировать виртуальную колонку скважины в произвольной точке пространства, построить разрез по произвольной линии (рис. 1, 2).

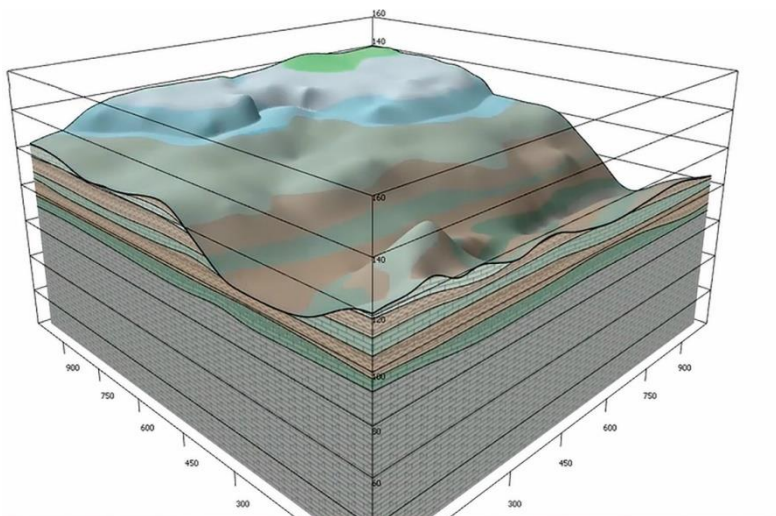


Рис. 1. Фрагмент геологического каркаса модели подземного пространства

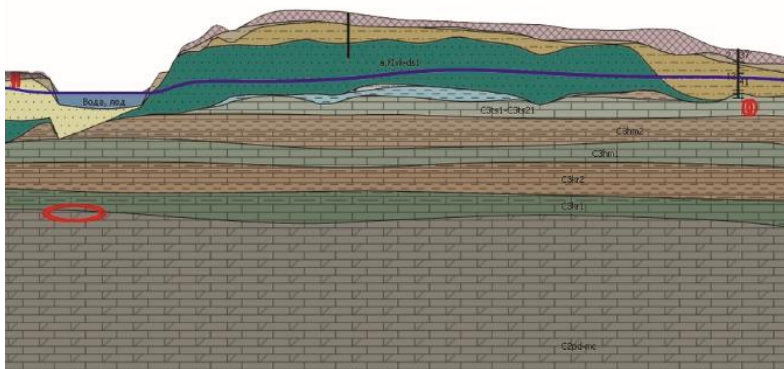


Рис. 2. Виртуальный геологический разрез по произвольной линии

С помощью объемной геологической модели можно произвести предварительную характеристику геологических условий площадки, обосновать программу изысканий или осуществить верификацию их результатов. Однако геологическая составляющая недостаточно информативна с точки зрения обоснования задач градостроительного проектирования.

Модель надземной и подземной инфраструктуры. В программном комплексе предусмотрена возможность интеграции в модель надземной и подземной инфраструктуры, что существенно расширяет его возможности. Это не только позволяет осуществлять трехмерную визуализацию сооружений и коммуникаций в геологической среде, но и дает возможность выполнять аналитические расчеты для обоснования градостроительной стратегии освоения подземного пространства. Возможности модели позволяют оценить степень занятости подземного пространства в объеме, а участки, расположенные вне застроенных зон и участков градостроительных ограничений, охарактеризовать с точки зрения трудности освоения (рис. 3, 4).

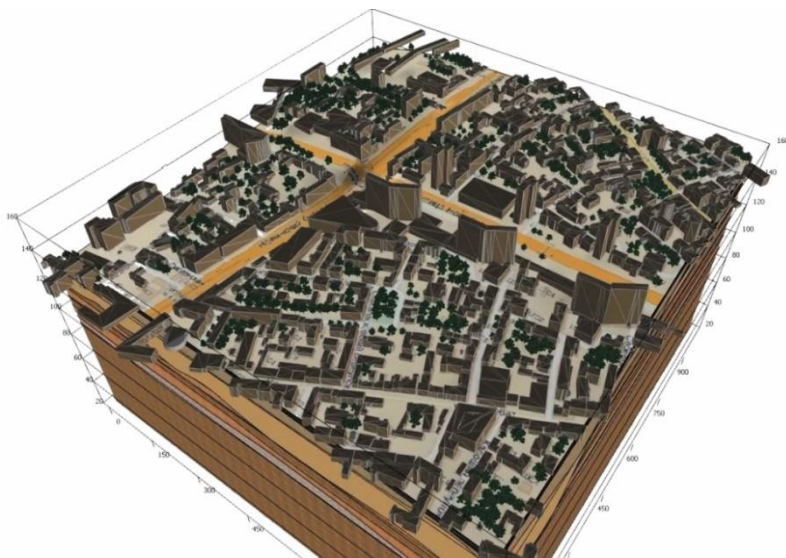


Рис. 3. Фрагмент модели надземных сооружений

Для осуществления такой оценки предлагается понятие градостроительного потенциала подземного пространства. Под этим термином понимается отношение объема подземного пространства, пригодного для освоения, к общему объему оцениваемого участка с поправкой на инженерно-геологические условия:

$$P = (R / W_0) \times 100\% ,$$

где R — объем градостроительного ресурса подземного пространства, м^3 ; W_0 — объем подземного пространства, м^3 .

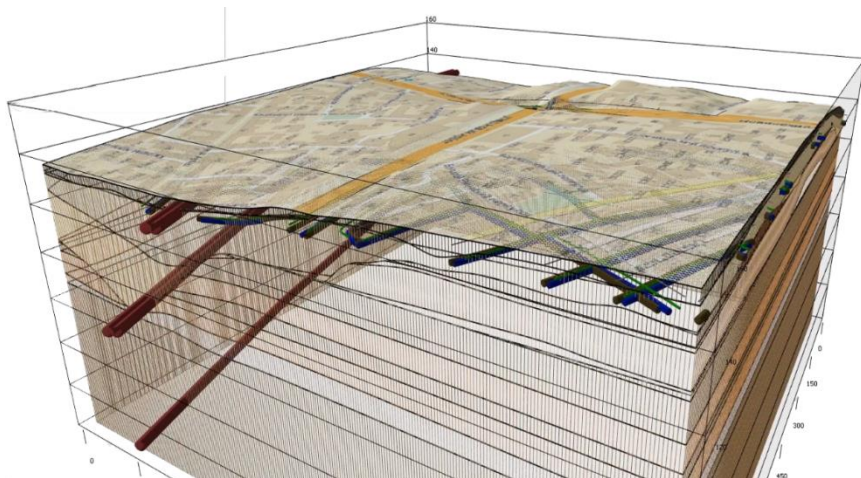


Рис. 4. Фрагмент модели подземных сооружений и коммуникаций (сетчатый вариант отображения геологического каркаса)

Величина градостроительного ресурса, т.е. объем грунтовой толщи, расположенный вне действия градостроительных ограничений и характеризующийся благоприятными геологическими условиями строительного освоения.

$$R = (W_0 - W_{lim}^{urban}) \times K_{geo},$$

где W_{lim}^{urban} — объем подземного пространства в границах действия городских ограничений на строительство. Эти ограничения обусловлены либо наличием в пространстве существующих инженерных сооружений и/или их буферных зон, либо административными предписаниями, принудительно исключающими освоение участка территории или части подземного пространства;

K_{geo} — коэффициент благоприятности геологических условий освоения подземного пространства, ед. Это ограничительные факторы, которые связаны либо с наличием в подземном пространстве существующих инженерных сооружений и/или их буферных зон, либо с административными предписаниями, принудительно исключающими освоение участка территории или части подземного пространства.

Для Москвы в качестве таких ограничений была рассмотрена подверженность территории подтоплению грунтовыми водами, заболачиванию, карстово-суффозионным процессам, оползнеобразованию, наличие переуглублений рельефа, заполненных техногенными образованиями.

Градостроительный потенциал подземного пространства — величина сравнительная и обладающая пространственной изменчивостью: для одной и той же территории он будет различаться в зависимости от выбранной глубины освоения подземного пространства и вида освоения (например, тоннельное строительство или строительство зданий с заглубленной подземной частью).

В 2014 г. на основе модели была выполнена оценка градостроительного потенциала территории Москвы для целей приповерхностного строительства (глубина заложения фундаментов подземных и заглубленных сооружений до 10 м). Территория города была разделена на расчетные районы, для каждого из которых была вычислена величина градостроительного потенциала (рис. 5).

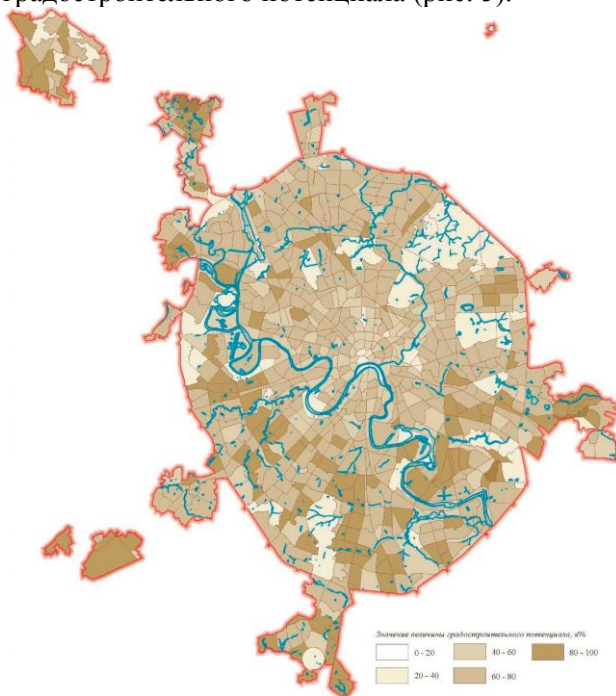


Рис. 5. Общий вид карты градостроительного потенциала Москвы в старых границах

Заключение. Имеющиеся и потенциальные возможности объемной модели подземного пространства позволяют

- разработку градостроительной стратегии, выявление участков подземного пространства, перспективных для освоения;
- предварительное размещение подземных сооружений, их взаимное расположение;
- верификацию результатов инженерных изысканий, поступающих в городские фонды;
- оценку инженерно-геологических условий на предпроектной стадии, разработку обоснованных программ инженерно-геологических и геотехнических исследований;
- предварительное решение о типе фундаментных конструкций и применении мероприятий по обеспечению инженерной защиты, минимизирующих негативное влияние инженерно-геологических процессов;
- экспертизу проектировочных и изыскательских работ;
- разработку основы для гидрогеологического и геомеханического моделирования, организацию сетей мониторинга.

Изученность геологического пространства крупных городов позволяет переходить от пассивного сбора и хранения фондовых данных к стратегии их активного использования с помощью современных информационных ресурсов. Градостроительному комплексу нужен новый подход к принятию решений — одновременно взвешиваемый и оперативный, а следовательно, и новые, более универсальные и функциональные инструменты.

Объемная модель Москвы — экспериментальный проект, не имеющий прямых аналогов. Мы считаем, что только взаимодействие специалистов, вовлеченных в градостроительный процесс на разных стадиях, поможет создать действительно функциональный инструмент, а потому приглашаем всех заинтересованных лиц к диалогу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антипов А.В., Майоров С.Г., Бударин В.Ю., Потапов Б.В., Бучкин М.Н., Вилькович Р.В., Жидков Р.Ю. Система инженерно-геологического обоснования градостроительного проектирования при освоении подземного пространства города Москвы на основе применения ГИС-технологий. Инженерные изыскания для строительства : практика и опыт Мосгоргеотреста // Гл. ред. Антипов А.В., Осипов В.И. М. : Проспект», 2012.

2. *Богданов А.С., Ломакин Е.А.* Программа реформирования отрасли инженерных изысканий. М. : Геопрофи, 2012.

3. *Козлов И.М.* Оценка экономической эффективности внедрения информационного моделирования зданий. *Architecture and modern information technologies*, 2010, 1(10).

4. *Теличенко В.И., Зерцалов М.Г., Конюхов Д.С., Королевский К.Ю., Король Е.А.* Современные технологии комплексного освоения подземного пространства мегаполисов // Научное издание. — М. : АСВ, 2010.

5. Геологический атлас Москвы (в 10 томах с пояснительной запиской). Масштаб 1:10 000. М. : ГУП «Мосгоргеотрест», 2010.

6. Оценка применения BIM-технологий в строительстве. Результаты исследования эффективности применения BIM-технологий в инвестиционно-строительных проектах российских компаний : отчет // Электронный ресурс «Информационный портал Национального объединения изыскателей и проектировщиков» (дата обращения 10.12.2016) [http://nopriz.ru/upload/iblock/2cc/4.7_bim_rf_otchet.pdf].

R.Yu. Zhidkov, A.Yu. Serov

THREE-DIMENSIONAL COMPUTER MODEL OF THE UNDERGROUND SPACE AS AN INNOVATIVE URBAN PLANNING TOOL (ON EXAMPLE OF MOSCOW)

The dynamics of today's urban development process requires the use of a fundamentally new tool for working with data about the subsurface, which provides immediate visible and credible assessment of the existing conditions. Such a tool can become the three-dimensional model of the subsurface.

Computer three-dimensional model of the underground space of Moscow is based on the integration of a network of underground structures and communications in the geological skeleton. The geological basis of the model is a cellular layered structure containing information about lithological and stratigraphic composition, mechanical characteristics, the level of groundwater, the distribution of adverse engineering-geological processes and phenomena. Together, these data characterize the quality of underground space — i.e. the degree of its suitability for development.

The tools model involves three-dimensional visualization, automated construction of maps, profiles and plans at specified depths and absolute elevations. Possibility of an estimation of the distribution of the urban potential values characterizing the urban attractiveness of the territory from the point of view of development of underground space.

Three-dimensional model of the underground space can be embedded into urban planning practices for tasks such as:

- development of strategy identification of areas of underground space, promising for the development;
- preliminary location of the underground structures, their relative positioning;
 - verification of results of engineering surveys;
 - assessment of engineering-geological conditions at the preliminary stage, the development of the programs of engineering-geological and geotechnical researches;
 - preliminary decision about the type of Foundation structures and measures for providing protection, minimizes the negative influence of engineering-geological processes;
 - examination of design and survey works;
 - interpretation of the monitoring data on the state of the underground space.

State of knowledge of geological environment of big cities allows us to move from passive collecting and storing the stock data to the strategy of their active use for creation of modern information resources. Urban complex needs a new approach to decisions foundation — at the same time thoughtful and prompt, which can be reached only through the new tools investigation and integration.

Key words: underground space, underground resources, three-dimensional modeling, construction, Master Planning.

References

1. Antipov A.V., Mayorov S.G., Budarin V.Yu., Potapov B.V., Buchkin M.N., Vil'kovich R.V., Zhidkov R.Yu. Sistema inzhenerno-geologicheskogo obosnovaniya gradostroitel'nogo proektirova-niya pri osvoenii podzemnogo prostranstva goroda Moskvy na osnove primeneniya GIS-tehnologiy [System of the engineering-geological foundation of urban design in the development of underground space of the city of Moscow based on use of GIS-technologies]. *Inzhenernye izyskaniya dlya stroitel'stva: praktika i opyt Mosgorgeotresta [Engineering surveys for construction: practice and experience of Mosgorgeotrest]*, Moscow, 2012 (In Russian).
2. Bogdanov A.S., Lomakin E.A. Programma reformirovaniya otrasli inzhenernykh izyskaniy [The reform program of engineering surveying], *Geoprofi*, 2012, 5. (In Russian).
3. Kozlov I.M. Otsenka ekonomicheskoy effektivnosti vnedreniya informatsionnogo modelirovaniya zdaniy [Evaluation of economic efficiency of im-

plementation of building information modeling]. *Architecture and modern information technologies*, 2010, 1(10). (In Russian).

4. Telichenko V.I., Zertsalov M.G., Konyukhov D.S., Korolevskiy K.Yu., Korol' E.A. *Sovremennye tekhnologii kompleksnogo osvoeniya podzemnogo prostranstva megapolisov* [Modern technologies of complex development of underground space of megacities]. Moscow, 2010

5. *Geologicheskiy atlas Moskvy (v 10 tomakh s poyasnitel'noy zapiskoy)*. Masshtab 1:10 000. [Geological Atlas of Moscow (in 10 volumes with an explanatory note)]. Scale 1:10 000. Mosgorgeotrest, 2010

6. *Otchet «Otsenka primeneniya BIM-tekhnologiy v stroitel'stve Rezul'taty is-sledovaniya effektivnosti primeneniya BIM-tekhnologiy v investitsionno-stroitel'nykh proektakh rossiyskikh kompaniy»* [The report "Assessment of the use of BIM technologies in the construction of the Results of a study of the effectiveness of BIM technologies in the construction and investment projects of Russian companies"]. available at http://nopriz.ru/upload/iblock/2cc/4.7_bim_rf_otchet.pdf on 10.12.2016