Геотехнические принципы стратегического планирования подземного пространства мегаполиса: опыт Пекина

Конюхов Дмитрий Сергеевич
доктор технических наук, профессор, АО «Мосинжпроект», gidrotehnik@inbox.ru

Освоение подземного пространства мегаполиса обычно рассматривается как градостроительная задача, однако реализуемость планировочных решений определяется инженерно-геологическими и гидрогеологическими условиями, взаимодействием новых и существующих сооружений и допустимым уровнем геотехнического риска. Цель исследования — выявить геотехнические принципы стратегического планирования подземного пространства на примере официально утверждённого Плана подземного пространства Пекина на 2025–2035 гг. Использованы контент-анализ стратегических и нормативных документов, системный и сравнительный анализ, а также инженерная интерпретация решений по глубинному и территориальному зонированию. Показано, что окончательная редакция Плана связывает четырёхуровневое глубинное зонирование с безопасностью, учётом подземных вод, резервированием глубоких горизонтов и цифровым управлением. Предложен геотехнический контур стратегического планирования, включающий 3D инженерно-геологическую модель, геотехническое районирование, оценку взаимного влияния сооружений, риск-ориентированное резервирование и мониторинг. Установлено, что перенос пекинского опыта в российскую практику требует включения геотехнического обоснования в документы планирования до стадии проектирования отдельных объектов.

Ключевые слова: геотехническое районирование, инженерно-геологическая модель, мегаполис, подземное пространство, подземные сооружения, Пекин, стратегическое планирование, геотехнический риск, мониторинг, цифровой двойник.

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие подземного пространства крупных городов давно вышло за рамки строительства отдельных тоннелей, станций метрополитена, коллекторов или подземных стоянок. При высокой плотности застройки каждое новое сооружение становится элементом общей пространственно-геотехнической системы: оно взаимодействует с грунтовым массивом, подземными водами, существующими фундаментами, транспортными тоннелями, инженерными сетями и соседними объектами. Поэтому стратегическое планирование подземного пространства должно отвечать не только на вопрос о требуемой функции и месте размещения объекта, но и на вопрос о принципиальной геотехнической реализуемости такого размещения.

В научной литературе сформированы подходы к комплексному освоению подземного пространства и к переходу от отдельных объектов к системному планированию [1–5]. Современные исследования дополнительно связывают развитие подземного пространства с устойчивостью мегаполиса, многомерной оценкой ресурса территории и цифровым управлением [6]. При этом подземное пространство не является абстрактным свободным объёмом. Оно представляет собой часть геологической среды с неоднородными механическими и фильтрационными свойствами, сложившимся напряжённо-деформированным состоянием и уже накопленными техногенными воздействиями.

В этой связи интерес представляет опыт Пекина. 24 июля 2026 г. был утверждён «План подземного пространства Пекина (2025–2035)» [7]. Он предусматривает структуру «семь коридоров, два кольца, сеть, четыре слоя, двадцать зон и множество узлов», рассматривает подземную инфраструктуру как элемент городской устойчивости и устанавливает дифференцированные режимы освоения [7, 8]. С геотехнической точки зрения представляют интерес три решения: разделение массива по глубине, выделение территорий по условиям безопасности и учет факторов подземных вод и цифрового информационного обеспечения в механизмах реализации.

Цель статьи – определить, какие положения Плана Пекина могут быть интерпретированы как геотехнические принципы стратегического освоения подземного пространства и каким образом эти принципы могут быть встроены в российскую практику планирования подземного строительства. Научная новизна заключается в представлении стратегического плана не только как градостроительного документа, но как верхнего уровня геотехнической системы управления территорией, а также в разработке геотехнического контура планирования, связывающего инженерно-геологическую модель, глубинное зонирование, взаимодействие сооружений, риск и мониторинг.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основным материалом исследования является План подземного пространства Пекина на 2025–2035 гг. [7] и его официальное разъяснение [8]. Для сопоставления использованы работы по стратегическому освоению подземного пространства, многомерному планированию и оценке его ресурса [2–6, 9–14], а также исследования российского опыта [15]. Нормативный контекст российской практики оценивался с учётом СП 473.1325800.2019, регулирующего градостроительное проектирование подземных зданий, сооружений и комплексов [16].

Методика включала четыре последовательных операции. На первом этапе выполнен контент-анализ положений Плана, непосредственно относящихся к глубине освоения, безопасности, подземным водам, резервированию пространства и цифровому управлению. На втором этапе эти положения переведены из градостроительной терминологии в систему геотехнических задач. На третьем этапе проведено сопоставление с подходами, применяемыми в исследованиях подземного пространства других мегаполисов. На четвёртом этапе сформирована модель геотехнического контура стратегического планирования.

Метод исследования – качественный инженерный анализ документов и научных публикаций. Это ограничивает возможность статистических обобщений, но соответствует поставленной задаче – выявлению структуры геотехнических решений и связей между ними.

Критерием отнесения положения Плана к геотехнически значимому принималось наличие влияния хотя бы на один из следующих объектов управления: грунтовый массив; подземные воды; основания существующих зданий; существующие или проектируемые подземные сооружения; допустимые деформации территории; геодинамические и природно-техногенные опасности; программу мониторинга. Такой критерий позволяет отделить собственно инженерное содержание от общефункциональных и экономических положений стратегического документа.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Переход от градостроительной схемы к геотехнической системе

План Пекина формирует общегородскую пространственную структуру, однако с геотехнической точки зрения её необходимо рассматривать как систему ограничений и резервов. «Коридоры», «кольца», транспортная сеть,

двадцать приоритетных зон и узлы задают территориальную концентрацию будущих подземных сооружений. Чем выше такая концентрация, тем менее корректно проектировать каждый объект независимо. На уровне узлов и зон возникает совокупный эффект: деформационные воронки от разных этапов строительства могут накладываться; водопонижение одного объекта может изменять условия работы другого; новые тоннели пересекают зоны влияния существующих фундаментов и коммуникаций.

Следовательно, стратегический документ должен предварять объектное проектирование геотехническим районированием. Для каждого участка мегаполиса требуется определить не только допустимые функции, но и инженерно-геологический тип территории, характерные диапазоны глубин, уровень техногенной освоенности, положение водоносных горизонтов, наличие геологических и геотехнических опасностей, чувствительность окружающей застройки к деформациям. Именно эта информация превращает «пространственный ресурс» в инженерно интерпретируемый ресурс.

В окончательной версии Плана усилен принцип безопасности: предусмотрено выделение запрещённых для строительства, условно допустимых и пригодных территорий [8]. Такая градация близка к геотехнической логике допуска, однако для практического использования должна опираться на измеряемые признаки. В инженерной постановке граница между категориями определяется не административным решением как таковым, а сочетанием свойств грунтов, гидрогеологических условий, опасных процессов, плотности существующей подземной застройки и возможных последствий строительства.

3.2. Глубинное зонирование как инженерный принцип

Одним из важнейших геотехнических элементов Плана является разделение подземного пространства на четыре уровня: 0–10 м, 10–30 м, 30–50 м и более 50 м [7, 8]. Приоритет текущего освоения подземного пространства Пекина сосредоточен в первых двух уровнях, а более глубокие горизонты в первую очередь рассматриваются как ресурс, подлежащий защите и резервированию.

Формальное деление только по глубинам недостаточно для выбора конструктивной схемы сооружения, но оно имеет существенную ценность на стратегическом уровне. С ростом глубины меняются величина природного напряжённого состояния, гидростатические давления, условия разгрузки массива, технологические возможности устройства котлованов и тоннелей, характер взаимодействия с фундаментами и существующими сооружениями. Граница 10 или 30 м не является универсальной геотехнической границей, однако задаёт уровень, внутри которого должны быть установлены типовые инженерные ограничения.

Для поверхностного уровня основными проблемами являются насыщенность коммуникациями, слабые техногенные грунты, близость фундаментов и высокая чувствительность городской поверхности к осадкам. На глубинах 10–30 м возрастают значение взаимодействия с метрополитеном, транспортными тоннелями и подземными водами, а также требования к прогнозу осадок и горизонтальных перемещений. На глубинах 30–50 м и ниже повышается роль напряжённого состояния массива, водонапорных горизонтов, технологических рисков проходки и долгосрочного резервирования трасс.

Таким образом, глубинное зонирование целесообразно дополнять инженерной характеристикой каждого слоя. Пространственная отметка должна связываться с типовыми грунтовыми условиями, водоносными горизонтами, возможными технологиями строительства, ограничениями по деформациям и требованиями к мониторингу. Схема такой интерпретации представлена на рис. 1 и в табл. 1.

3.3. Подземные воды и безопасность территории

В [7] фактор подземных вод сформулирован не как частная проблема отдельного объекта, а как общегородское условие развития. При выборе функций и глубины освоения предлагается учитывать положение уровня подземных вод, амплитуду и скорость его изменения; предусматривается развитие сети динамического мониторинга и совершенствование требований к проектированию с учётом изменения уровней [8]. Для геотехнического планирования это один из наиболее значимых элементов документа.



Рис. 1. Инженерная интерпретация четырёхуровневого глубинного зонирования подземного пространства Пекина

Таблица 1

Геотехническая интерпретация глубинного зонирования

Уровень	Основные объекты планирования	Ключевые геотехнические ограничения	Приоритетное инженерное действие
0–10 м	Коммуникации, переходы, общественные пространства, мелкое заложение	Техногенные грунты; фундаменты; густая сеть коммуникаций; деформации поверхности	Детальная инвентаризация; локальная 3D-модель; ограничения по осадкам
10–30 м	Метро, транспортные тоннели, коллекторы, паркинги	Подземные воды; взаимное влияние тоннелей и котлованов; зона влияния существующей застройки	Расчёт совместной работы массива и сооружений; контроль водопонижения
30–50 м	Отдельные инфраструктурные сооружения; резерв	Напряжённое состояние; водонапорные горизонты; технологическая неопределённость	Опережающие изыскания; сохранение коридоров и защитных зон
>50 м	Стратегический резерв; специальные сооружения	Глубинная геология; высокие давления; сложность доступа и аварийного реагирования	Ресурсное резервирование; сценарная оценка долгосрочных вариантов

На объектном уровне гидрогеологический расчёт обычно выполняется после выбора площадки и предварительной схемы сооружения. Стратегический подход меняет последовательность: зоны устойчивого или изменчивого режима подземных вод должны быть известны до закрепления интенсивности освоения подземного пространства. Это позволяет заранее выделить территории, где массовое строительство с водопонижением способно вызвать дополнительную консолидацию грунтов, осадки застройки, изменение питания водоносных горизонтов или рост фильтрационной нагрузки на ограждающие конструкции.

Особенно важен переход от статической гидрогеологической карты к динамической модели. Для мегаполиса необходимо учитывать сезонные и многолетние изменения уровней, техногенное перераспределение потоков, экранирующее действие протяжённых стен и тоннелей, а также возможное восстановление уровней после прекращения водоотбора. На стратегическом уровне результатом должна становиться карта гидрогеологических ограничений для различных типов подземного строительства, а не единичные расчёты по проектам.

3.4. Взаимное влияние подземных сооружений и основания городской застройки

При высокой плотности подземного освоения проектная модель «подземное сооружение – грунтовый массив» должна быть расширена до системы «существующие сооружения – массив – новый объект – последующие объекты». Это особенно актуально для транспортных узлов и многофункциональных зон, где последовательно сооружаются станции, тоннели, подземные торговые пространства, коллекторы и глубокие фундаменты высотных зданий.

Стратегический план не заменяет расчёты напряжённо-деформированного состояния, однако должен определить случаи, когда расчёт совместного влияния является обязательным уже на предпроектной стадии. К таким случаям относятся пересечение зон влияния крупных котлованов и тоннелей; новое строительство вблизи исторической застройки; освоение территории над действующими тоннелями; размещение нескольких объектов с общей системой водопонижения; строительство в пределах ранее нарушенного или закреплённого массива.

Для планирования важна не только оценка максимально возможной осадки конкретного здания. Необходимо учитывать накопленный деформационный ресурс территории. Если участок уже испытал разгрузку от котлована, деформации вследствие тоннелепроходки или изменение гидрогеологического режима, следующий проект начинает реализовываться в иной системе напряжений и свойств массива. Следовательно, цифровая модель города должна хранить не только геометрию существующих объектов, но и сведения о технологиях их сооружения, закреплении грунтов, водопонижении и фактическом мониторинге.

Такой подход позволяет перенести часть управления риском из стадии проектирования в стадию пространственного планирования. Решение о резервировании коридора или ограничении глубины может оказаться эффективнее, чем последующее усложнение конструкций и защитных мероприятий, когда конфликт между объектами уже заложен утверждённой планировкой.

3.5. Цифровая модель как геотехническая инфраструктура

План Пекина предусматривает создание взаимосвязанной двух- и трёхмерной базы данных подземного пространства и развитие цифрового двойника, прежде всего для центральных районов и городского субцентра [8].

Геотехнический цифровой двойник должен включать пространственное строение грунтового массива, параметры грунтов и их статистическую изменчивость, гидрогеологическую модель, зоны техногенного изменения грунтов, существующие фундаменты и подземные конструкции, результаты мониторинга и сведения о ранее реализованных геотехнических мероприятиях. Только в этом случае цифровизация становится инструментом прогнозирования, а не визуализации.

Российский опыт движется в том же направлении. В Санкт-Петербурге в 2026 г. была представлена трёхмерная модель геологического строения городского подземного пространства, предназначенная в том числе для инже-

нерно-геологического и гидрогеологического районирования и оценки рисков [17]. Это показывает техническую реализуемость перехода от разрозненных архивов изысканий к городской цифровой геологической модели. Следующий этап — увязка такой модели с реестром подземных сооружений и данными геотехнического мониторинга.

3.6. Предлагаемый геотехнический контур стратегического планирования

На основании анализа Плана Пекина предлагается геотехнический контур стратегического планирования подземного пространства (рис. 2, табл. 2). Его назначение состоит в том, чтобы сделать инженерно-геологические ограничения частью планировочного решения до появления конкретного проекта.

Первый элемент контура – единая инженерно-геологическая и гидрогеологическая модель. Она формируется не для отдельной площадки, а для территории планирования и уточняется по мере накопления изысканий.

Второй элемент – геотехническое районирование с выделением участков по сложности условий, чувствительности окружающей застройки и уровню допустимого воздействия.

Третий элемент – пространственное и глубинное размещение функций с учётом имеющихся и резервируемых подземных сооружений.

Четвёртый элемент – оценка взаимодействий и геотехнического риска. Здесь анализируются не только аварийные сценарии, но и эксплуатационные последствия: дополнительные осадки, горизонтальные перемещения, изменение напоров подземных вод, потеря ресурса существующих конструкций, ограничения для будущего строительства.

Пятый элемент – мониторинг, который должен проверять не только безопасность конкретного объекта, но и корректность городской геотехнической модели.

Шестой элемент – обратная связь: результаты наблюдений приводят к корректировке районов, ограничений, резервов и параметров последующих проектов.

Принципиальное отличие предлагаемого контура от традиционной последовательности состоит в цикличности. В классической практике инженерные изыскания и расчёты обслуживают уже принятое решение о строительстве. В геотехническом контуре данные о массиве и фактическое поведение ранее построенных объектов участвуют в выборе следующих планировочных решений. Таким образом, город накапливает не только объекты, но и инженерное знание о собственной подземной среде.



Рис. 2. Геотехнический контур стратегического планирования подземного пространства мегаполиса

Таблица 2
Состав геотехнического обоснования стратегического плана

Блок	Исходные данные	Результат для планирования	Связь с проектированием
Инженерно-геологическая модель	Скважины, лабораторные данные, архив изысканий, геофизика	3D строение массива и неопределённости	Исходная модель для последующих изысканий и расчётов
Гидрогеология	Уровни, напоры, режимные наблюдения, водоотбор	Зоны ограничений и допустимых воздействий на водный режим	Условия расчёта фильтрации и водопонижения
Существующая застройка	Фундаменты, тоннели, котлованы, закрепление, мониторинг	Зоны взаимного влияния и деформационные ограничения	Критерии допустимых воздействий
Риск и резервирование	Опасные процессы, сценарии, последствия, ценность будущих коридоров	Запрет, условный допуск, допустимое освоение; резерв глубин	Требования к защитным мероприятиям и мониторингу
Цифровой контур	2D/3D данные, мониторинг, исполнительные модели	Актуализируемый цифровой двойник подземной среды	Обратная связь по фактическому поведению сооружений

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Пекинский опыт показывает, что геотехническая безопасность может быть встроена в стратегическое управление подземным пространством. Важной составляющей Плана [7] является одновременное использование глубинного зонирования, территориальных категорий безопасности, учёта подземных вод и цифрового управления. В совокупности эти решения создают предпосылки для перехода от реактивной модели, когда инженерные ограничения выявляются после выбора площадки, к упреждающей.

Вместе с тем План [7] остаётся документом стратегического уровня. Из опубликованных материалов нельзя сделать вывод о наличии единой количественной методики определения границ запрещённых, условно допустимых и пригодных зон или о единых пороговых значениях допустимого геотехнического воздействия. Поэтому прямое перенесение планировочных категорий в проектную практику без дополнительных инженерных критериев было бы некорректным. Необходим следующий уровень документов: методики геотехнического районирования, требования к городским инженерно-геологическим моделям, правила учёта накопленных воздействий и минимальный состав мониторинга.

Для РФ проблема особенно актуальна в крупных городах с развитым метрополитеном и высокой плотностью строительства. СП 473.1325800.2019 формирует нормативную основу градостроительного проектирования подземных зданий и сооружений [16], однако стратегическое управление геотехническим ресурсом территории остаётся фрагментарным. Практика чаще организована вокруг конкретных объектов, тогда как конфликты трасс, глубин, водопонижения и зон влияния возникают ещё до начала проектирования.

Адаптация пекинского подхода не требует буквального копирования его пространственной схемы. Для российских мегаполисов наиболее полезны четыре принципа. Во-первых, резервирование глубоких горизонтов и инфраструктурных коридоров должно рассматриваться как самостоятельная инженерная задача. Во-вторых, документы территориального планирования целесообразно дополнять геотехническим районированием и картами допустимых воздействий. В-третьих, городской цифровой двойник должен объединять геологию, подземные сооружения и мониторинг. В-четвёртых, в зонах высокой концентрации подземных объектов необходимо оценивать совокупное, а не только объектное воздействие на массив и застройку.

Практическая значимость предложенного подхода состоит в возможности его использования при разработке схем комплексного освоения подземного пространства, мастер-планов транспортных узлов, программ развития метрополитена и документов планировки территорий. Геотехнический контур не заменяет инженерные изыскания и проектные расчёты; он определяет, где, в каком объёме и для каких сценариев эти работы должны быть выполнены до закрепления пространственного решения.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Плана подземного пространства Пекина [7] предусматривает четырёхуровневое глубинное зонирование: 0–10 м, 10–30 м, 30–50 м и более 50 м. Глубокий уровень рассматривается преимущественно как долгосрочный ресурс и резерв.

2. Геотехническое содержание Плана определяется выделением территорий различной допустимости освоения, учётом положения и динамики подземных вод и развитием режимного мониторинга. Эти положения позволяют рассматривать безопасность как исходное условие пространственного решения, а не только как результат последующего проектного расчёта.

3. При высокой плотности подземной застройки объектная модель должна быть расширена до оценки совокупного взаимодействия существующих и новых сооружений через грунтовый массив и гидрогеологическую среду. Поэтому стратегический план должен учитывать накопленные деформационные и гидрогеологические воздействия.

4. Двух- и трёхмерная цифровая база, предусмотренная Планом, приобретает геотехническую ценность при включении инженерно-геологического строения, параметров грунтов, гидрогеологии, данных о существующих конструкциях и результатов мониторинга.

5. Предложен геотехнический контур стратегического планирования, объединяющий 3D инженерно-геологическую модель, геотехническое районирование, глубинное размещение, оценку взаимодействий и рисков, мониторинг и обратную корректировку планировочных ограничений.

6. Для российской практики целесообразно включать такое геотехническое обоснование в документы комплексного развития подземного пространства до стадии проектирования отдельных объектов. Это позволяет предотвращать пространственные и геотехнические конфликты на этапе, когда их устранение ещё не требует дорогостоящего изменения конструктивных и технологических решений.

Литература

1. Sterling R., Carmody J.C., Zhou Y., Labbé M., Li X., Cui J. Historical Development and Current Use of Underground Space // Underground Space. Hoboken: Wiley, 2025. DOI: 10.1002/9781394209651.ch05.
2. Конюхов Д.С. Систематизация подходов к освоению подземного пространства городов // Вестник МГСУ. 2010. № 4-4. С. 4–10.
3. Конюхов Д.С. Система комплексного планирования стратегии реализации технологий освоения подземного пространства городов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 2. С. 167–178. EDN: PLLLSJ.

4. Глозман О.С. Территориальное планирование подземной части городов // Жилищное строительство. 2017. № 7. С. 13–16. EDN: ZEWLMP.
5. Беляев В.Л. Совершенствование модели территориального планирования для целей развития городского подземного пространства // Экология урбанизированных территорий. 2023. № 4. С. 72–79.
6. Hu W., Dong J., Chen Z., Ren R. Linking underground space development with sustainable urban futures: Research trends and knowledge framework // Tunnelling and Underground Space Technology. 2026. Vol. 168. 107227. DOI: 10.1016/j.tust.2025.107227.
7. 北京市地下空间专项规划（2025年—2035年） [План подземного пространства Пекина (2025–2035)]. Утверждён Пекинским комитетом по планированию и природным ресурсам 24.07.2026, 京规自发[2026]203号. URL: https://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefagui/202608/t20260811_4818276.html (дата обращения: 01.09.2026).
8. 发布首个地下空间专项规划 统筹利用地上地下空间 北京2035年建成立体式宜居之城 [Опубликован первый специальный план подземного пространства Пекина] // Официальный портал Правительства Пекина. 05.08.2026. URL: https://www.beijing.gov.cn/ywdt/gzdt/202608/t20260805_4809192.html (дата обращения: 01.09.2026).
9. Chen X.S., Su D., Wu Z.Z. et al. Development paths and strategies for resilience of underground space in Chinese megacities // Bulletin of Chinese Academy of Sciences. 2026. Vol. 41. No. 2. P. 244–259. DOI: 10.3724/j.issn.1000-3045.20251214002.
10. Shi X.D., Wu K.J., Zhao Y.T. Multi-dimensional coupling planning methods and practice for underground space in megacities // Bulletin of Chinese Academy of Sciences. 2026. Vol. 41. No. 2. P. 302–310. DOI: 10.3724/j.issn.1000-3045.20251215005.
11. Zhao Y.T., Wu K.J., Shi X.D., Lin L.Q. Assessment and planning decision-making method for underground space resources in high-density built-up areas from a multi-dimensional value perspective: a case study of the Capital Function Core Area // Tunnel Construction. 2025. Vol. 45. No. 6. P. 1180–1191. DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2025.06.013.
12. Yu H., Chen Z., Hu W. et al. Urban underground space value assessment and regeneration strategies in symbiosis with the urban block: A case study of large residential areas in Beijing // Tunnelling and Underground Space Technology. 2025. Vol. 168. 106728. DOI: 10.1016/j.tust.2025.106728.
13. Vähäaho I. An introduction to the development for urban underground space in Helsinki // Tunnelling and Underground Space Technology. 2016. Vol. 55. P. 324–328. DOI: 10.1016/j.tust.2015.10.001.
14. Delmastro C., Lavagno E., Schranz L. Underground urbanism: Master Plans and Sectorial Plans // Tunnelling and Underground Space Technology. 2016. Vol. 55. P. 103–111. DOI: 10.1016/j.tust.2016.01.001.
15. Konyukhov D.S., Kulikova E.Yu. Russian experience in planning the development of underground space in megacities // Proceedings of the 21st International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. London: Taylor & Francis, 2025. P. 1–8.
16. СП 473.1325800.2019. Здания, сооружения и комплексы подземные. Правила градостроительного проектирования. М.: Минстрой России, 2019.
17. Волкова Д. В Петербурге создали первую в России 3D-модель подземного города // РБК Санкт-Петербург. 20.02.2026. URL: https://www.rbc.ru/spb_sz/20/02/2026/699852959a79473539607bce (дата обращения: 01.09.2026).

Geotechnical principles of strategic planning of megacity underground space: the beijing experience

Konyukhov D.S.
JSC Mosinzhproekt

JEL classification: L61, L74, R53

Underground space development in a megacity is commonly treated as an urban-planning task, while the feasibility of planning decisions is governed by engineering-geological and hydrogeological conditions, interaction between new and existing structures, and an acceptable level of geotechnical risk. The study aims to identify geotechnical principles of strategic underground-space planning using the officially approved Beijing Underground Space Special Plan (2025–2035) as a case study. The methods include content analysis of strategic and regulatory documents, systems and comparative analysis, and engineering interpretation of vertical and territorial zoning decisions. The final Plan is shown to link four-level depth zoning with safety control, groundwater conditions, reservation of deeper horizons, and digital management. A geotechnical planning framework is proposed that combines a 3D engineering-geological model, geotechnical zoning, assessment of structural interaction, risk-based reservation, and monitoring feedback. For Russian megacities, adaptation of the Beijing approach requires geotechnical justification to be incorporated into strategic planning documents before individual underground structures enter the design stage.

Keywords: Beijing, digital twin, engineering-geological model, geotechnical risk, geotechnical zoning, megacity, monitoring, strategic planning, underground space, underground structures.

References

1. Sterling R., Carmody J.C., Zhou Y., Labbé M., Li X., Cui J. Historical Development and Current Use of Underground Space. In: Underground Space. Hoboken: Wiley; 2025. DOI: 10.1002/9781394209651.ch05.
2. Konyukhov D.S. Systematization of approaches to urban underground space development. Vestnik MGSU. 2010;(4-4):4–10. (In Russian).
3. Konyukhov D.S. System of integrated planning of a strategy for implementation of urban underground space development technologies. Mining Information and Analytical Bulletin. 2023;(2):167–178. (In Russian). EDN: PLLLSJ.
4. Glozman O.S. Territorial planning of the underground part of cities. Housing Construction. 2017;(7):13–16. (In Russian).
5. Belyaev V.L. Improving the territorial planning model for the development of urban underground space. Ecology of Urbanized Territories. 2023;(4):72–79. (In Russian).
6. Hu W., Dong J., Chen Z., Ren R. Linking underground space development with sustainable urban futures: Research trends and knowledge framework. Tunnelling and Underground Space Technology. 2026;168:107227. DOI: 10.1016/j.tust.2025.107227.
7. Beijing Underground Space Special Plan (2025–2035). Beijing Municipal Commission of Planning and Natural Resources; approved 24 July 2026, document Jing Gui Zi Fa [2026] No. 203. (In Chinese). Available at: https://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefagui/202608/t20260811_4818276.html (accessed 01.09.2026).
8. Beijing releases its first special underground space plan and coordinates above- and below-ground space use. Official Portal of the Beijing Municipal Government. 5 August 2026. (In Chinese). Available at: https://www.beijing.gov.cn/ywdt/gzdt/202608/t20260805_4809192.html (accessed 01.09.2026).
9. Chen X.S., Su D., Wu Z.Z. et al. Development paths and strategies for resilience of underground space in Chinese megacities. Bulletin of Chinese Academy of Sciences. 2026;41(2):244–259. DOI: 10.3724/j.issn.1000-3045.20251214002.
10. Shi X.D., Wu K.J., Zhao Y.T. Multi-dimensional coupling planning methods and practice for underground space in megacities. Bulletin of Chinese Academy of Sciences. 2026;41(2):302–310. DOI: 10.3724/j.issn.1000-3045.20251215005.
11. Zhao Y.T., Wu K.J., Shi X.D., Lin L.Q. Assessment and planning decision-making method for underground space resources in high-density built-up areas from a multi-dimensional value perspective: a case study of the Capital Function Core Area. Tunnel Construction. 2025;45(6):1180–1191. DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2025.06.013.
12. Yu H., Chen Z., Hu W. et al. Urban underground space value assessment and regeneration strategies in symbiosis with the urban block: A case study of large residential areas in Beijing. Tunnelling and Underground Space Technology. 2025;168:106728. DOI: 10.1016/j.tust.2025.106728.
13. Vähäaho I. An introduction to the development for urban underground space in Helsinki. Tunnelling and Underground Space Technology. 2016;55:324–328. DOI: 10.1016/j.tust.2015.10.001.
14. Delmastro C., Lavagno E., Schranz L. Underground urbanism: Master Plans and Sectorial Plans. Tunnelling and Underground Space Technology. 2016;55:103–111. DOI: 10.1016/j.tust.2016.01.001.
15. Konyukhov D.S., Kulikova E.Yu. Russian experience in planning the development of underground space in megacities. In: Proceedings of the 21st International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. London: Taylor & Francis; 2025. P. 1–8.
16. SP 473.1325800.2019. Underground Buildings, Structures and Complexes. Rules for Urban Planning Design. Moscow: Ministry of Construction of Russia; 2019. (In Russian).
17. Volkova D. Russia's first 3D model of an underground city created in St Petersburg. RBC St Petersburg. 20 February 2026. (In Russian). Available at: https://www.rbc.ru/spb_sz/20/02/2026/699852959a79473539607bce (accessed 01.09.2026).