

Нехватка офисных площадей определяет на сегодняшний день популярность высотных зданий из стекла и бетона. Для России эта тенденция в последние годы тоже стала очень актуальна, особенно если учесть, что Москва буквально задыхается от недостатка офисов. В столице России на 1000 жителей приходится

450 кв. м офисной недвижимости. В Берлине, для сравнения, этот показатель составляет 4800 кв. м на 1000 человек, а в Брюсселе — 7700 кв. м. Решить проблему нехватки офисной недвижимости призван проект строительства московского международного делового центра «Москва-Сити».

РОМАН ЖИДКОВ

Аспирант кафедры экологии и природопользования, геологоразведочный факультет, РГГРУ им. С.Орджоникидзе

МИХАИЛ БУЧКИН

Заместитель директора НПО «ГЕОРЕСУРС»

ВЛАДИМИР ЭКЗАРЬЯН

Заведующий кафедрой экологии и природопользования, геологоразведочный факультет, РГГРУ им. С.Орджоникидзе

ВИКТОР СЕЛЕЗНЕВ

Главный гидрогеолог НПО «ГЕОРЕСУРС»

МИХАИЛ КАРАБАЕВ

Ведущий инженер НПО «ГЕОРЕСУРС»

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ И СОПРОВОЖДЕНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НЕБОСКРЕБОВ НА ПРИМЕРЕ БАШНИ «РОССИЯ»

Под небоскребом принято понимать высотное сооружение, равномерно разделенное на этажи, предназначенное для жизни или работы людей. Однозначного толкования этого термина, определяющего нижний предел высоты здания, не существует. Как правило, инженерные сооружения причисляются к классу небоскребов в соответствии со сложившимся архитектурным ландшафтом местности и техническими особенностями строительства в регионе. Для Москвы в качестве нижнего предела высотности для отнесения зданий к классу небоскребов целесообразно принять величину порядка 130–150 м. Небоскребы, превышающие в высоту 300 м, в мировой практике принято называть сверхвысокими.

Специфика инженерно-геологических исследований под сооружения такого класса заключается как в повышенных значениях давления на основание фундамента, так и в ряде сложностей, связанных с глубоким его заложением. Как правило, здания повышен-

ной этажности имеют несколько подземных ярусов, часто занимающих значительную площадь. При этом часто возникают проблемы, вызванные освоением подземного пространства.

Следует заметить, что опыт постройки такого рода сооружений в советскую эпоху практически сводился к строительству высотных домов в Москве в период с 1947 по 1956 год, и активное высотное строительство в столице вновь началось лишь в 1990-х годах в условиях стремительного развития и расширения города. В остальных регионах России опыт строительства зданий такой высотности пока практически отсутствует.

«Москва-Сити»

Московский международный деловой центр (ММДЦ) «Москва-Сити» должен стать первым в России и Восточной Европе центром, объединяющим деловую и развлекательную инфраструктуру и апартаменты для проживания. Строительство ведется на Краснопресненской набережной на террито-

рии около 100 га. Первоначальная градостроительная концепция делового центра была разработана к 1992 году коллективом московских архитекторов. Активные строительные работы продолжаются по настоящий момент. Современный проект бизнес-центра предполагает постройку более десяти небоскребов и их комплексов, шесть из которых попадают в категорию сверхвысоких. В соответствии с постановлением Правительства Москвы полный ввод в эксплуатацию объектов ММДЦ планируется в 2012 году, однако в связи с экономическим кризисом вероятен перенос этого срока.

Инженерно-геологические условия

Башня «Россия», строительная площадка которой расположена на участке № 17-18 делового центра, является наиболее сложным объектом ММДЦ. Расчетные нагрузки на основание под фундаментной плитой в высотной части сооружения составляют 1,2–1,4 МПа, а высота сооружения по проекту должна составить 612 м. По этому по-

казателю башня «Россия» из существующих и строящихся зданий на данный момент уступает только дубайской башне («Бурж Дубай»), чья проектная высота превышает 800 м. Также в ОАЭ существует проект башни, превышающей в высоту 1 км.

Необходимо отметить, что к началу проведения изысканий для строительства башни «Россия» инженерно-геологические условия территории ММДЦ «Москва-Сити» были досконально изучены в ходе исследований под другие объекты и в результате была выработана единая для делового центра концепция пространственного распределения инженерно-геологических элементов.

Участок № 17-18 ММДЦ «Москва-Сити» расположен на северо-западе территории делового центра. В геоморфологическом отношении это вторая надпойменная терраса левого берега Москвы-реки, однако современный рельеф является полностью техногенным.

Геологический разрез до глубины 100 м представлен отложениями четвертичного, юрского и каменноугольного возрастов. В зоне взаимодействия с сооружением расположены пять водоносных горизонтов, причем два верхних на большей части территории делового центра объединены в аллювиально-перхуровский водоносный комплекс (к юго-западу от участка № 17-18 водоупорные глинистые породы, относящиеся к юрской системе, полностью размыты). Систематизация инженерно-геологических и гидрогеологических условий площадки строительства приведена в сводной инженерно-геологической колонке.

Этапы инженерных изысканий

Инженерно-геологические изыскания проводились в несколько этапов. На первом из них была проведена основная часть полевых работ — бурение инженерно-геологических скважин и проведение натурных (прессиометрия) и лабораторных испытаний физико-механических свойств грунтов в соответствии с действующими нормативными документами. Литологические границы были уточнены по данным стандартного геофизического каротажа. Также была проведена видеосъемка стенок скважины.

Для исследования состояния карбонатного массива под плитой фундамента на предмет проявления карстовых и суффозионных процессов в зоне высотной части здания была выполнена межскважинная сейсмическая томогра-

фия массива. Исследования показали, что массив представлен толщей сохранных известняков со скоростью прохождения продольных волн 3,0–3,8 м/с, в которой выделяются субгоризонтальные прослои с пониженной скоростью 2,4–2,6 м/с. По данным исследований, проведенных ранее на территории Москвы для собственно карстовых полостей, заполненных продуктами карстования, скорости прохождения продольных волн составляют 1,7–2,2 м/с. Интервалы фиксации прослоев со сниженными скоростями продольных волн, интерпретируемые как кавернозные и сильнотрещиноватые породы, хорошо согласуются с результатами визуального изучения стенок скважин по данным видеокаротажа.

При проектировании сооружения стояла задача максимального освоения подземного пространства для организации подземной парковки, поэтому на следующих этапах изысканий проводилось гидрогеологическое и геомеханическое моделирование в целях построения прогнозных схем взаимодействия сооружения с геологической средой при выборе того или иного проектного решения.

При проведении моделирования геофильтрации производилась оценка существующих гидрогеологических условий, прогноз их изменения в результате строительства сооружения, давались рекомендации по реализации мероприятий, минимизирующих изменение гидрогеологической ситуации в районе строительства.

Гидрогеологическая обстановка

Анализ сложившейся на момент проведения работ гидрогеологической обстановки выявил существенное понижение уровней аллювиально-перхуровского водоносного комплекса и ратмировского водоносного горизонта по сравнению с периодом до начала строительства комплекса сооружений ММДЦ «Москва-Сити» (среднее понижение составило 4–5 м). Анализ причин этих изменений был затруднен из-за отсутствия данных мониторинга геологической среды на этапе возведения строений делового центра. В результате многовариантного гидрогеологического моделирования в качестве наиболее точно отражающего причины понижения уровней подземных вод был выбран вариант с изменением уровня режима за счет перетекания воды через нарушенные зоны в водоупорных толщах неверовской и воскресенской подсвит в местах их при-

мыкания к построенным «стенам в грунте».

Чтобы облегчить дальнейший анализ изменений гидрогеологических условий выбранной территории, обусловленных строительством башни «Россия» и других объектов ММДЦ, была разработана программа гидрогеологического мониторинга, включающая в себя устройство кустов наблюдательных гидрогеологических скважин на различных водоносных горизонтах в зоне воздействия строительства и эксплуатации разных сооружений, регулярные замеры уровней, температуры воды, анализ ее химического состава и интерпретацию полученных результатов.

Первоначальный проект здания предполагал устройство плитно-свайного фундамента с заложением плиты на глубине 48,5 м, что соответствует абсолютной отметке 84,5 м. По периметру площадки строительства проектировалось строительство «стены в грунте», низ которой должен был располагаться на 4–6 м ниже уровня плиты. Как видно из сводной инженерно-геологической колонки, плита при этом должна была располагаться в толще карбонатных пород нерасчлененных подольской и мячковской свит.

Для осушения котлована при этом потребовалось бы полностью сдренировать три верхних водоносных горизонта и понизить уровень подольско-мячковского горизонта на 22–25 м. В соответствии с результатами геофильтрационного моделирования прогнозные водопритоки из подольско-мячковского водоносного горизонта при этом составили 37 тыс. м³/сут, что соответствует примерно 50% существующего эксплуатационного водоотбора из этого горизонта в г. Москве в пределах МКАД.

Прогноз показал, что необходимое водопонижение на строительной площадке существенно изменит гидрогеологическую ситуацию в подольско-мячковском водоносном горизонте. На расстоянии 4,5–5,0 км от строительной площадки величина прогнозного понижения уровня подземных вод подольско-мячковского водоносного горизонта относительно существующих условий составляет 2–3 м. В радиусе 2,0–2,5 км от участка № 17-18 прогнозируемый уровень подземных вод горизонта понизится ниже его кровли. В зоне влияния строительных мероприятий окажутся месторождения подземных вод г. Москвы: центр, Фили, Дорхимзавод, Хорошевское шоссе. Мероприятия

Сводная инженерно-геологическая колонка участка строительства ММДЦ «Москва-Сити»

Система	Местные стратиграф. подразделения		Геологический индекс	Литологическое описание пород	Литологическая колонка	Мощность слоя, м мин. - макс. (ср.)	Абс. отм. подошвы	Уровень подземных вод (абс. отм.)	Варианты заложения фундаментной плиты (абс. отм / глубина)	
	Свита	Подсвита								
Четвертичная			tH	Насыпью грунты — суглинок тугопластичный, местами песок мелкий, малой и средней степени водонасыщения, с включениями щебня кирпича и бетона до 20-30%, отсыпанный сухим способом, слежавшийся		1,1 - 4,0 (2,4)	127,1 - 132,8	125,5 - 130,5		
			a ² III kl	Отложения второй надпойменной террасы р. Москвы (калининский горизонт). Пески разномерные малой, средней степени водонасыщения и насыщенные водой, суглинки легкие песчаные от мягкопластичной до твердой консистенции, супеси легкие пластичной и твердой консистенции		0 - 9,1 (2,0)	121,5 - 131,2			
Юрская	Великоворская и ермолинская нерасчлененные		J _{2,3} vd-er	Глины тяжелые тугопластичные, реже полутвердые, черные слюдястые, набухающие		0 - 9,0 (6,4)	120,2 - 123,9	117,3 - 120,2		
Каменноугольная	Тетовская	Нижняя (перхуровская) пачка	C ₃ ts ₁	Известняки доломитизированные, прослоями доломиты, средней прочности, прослоями кремненные прочные, на отдельных участках разреза малопрочные, трещиноватые, сильнотрещиноватые, участками кавернозные		5,0 - 8,1 (6,4)	113,5 - 117,6	115,7 - 118,1		
										Хамовническая
	Мергели доломитовые малой и средней прочности, плотные и кавернозные, в подошве с прослоем глины твердой (0,2-0,5 м)		1,2 - 4,6 (2,4)	108,1 - 111,6	109,2 - 112,4					
	Нижняя (ратмировская)	C ₃ hm ₁	Известняки средней прочности, трещиноватые, кавернозные		0,4 - 3,4 (1,5)	104,9 - 109,7	103,2 - 108,1			
			Известняки малопрочные, выщелоченные (рухляк), переходящие в переслаивание с мергелями малопрочными трещиноватыми		1,2 - 4,2 (2,8)	103,7 - 107,8				
	Кревянинская	Верхняя (воскресенская)	C ₃ kr ₂	Глины легкие пылеватые, твердые и полутвердые, набухающие в переслаивании с мергелями низкой прочности, с редкими маломощными прослоями малопрочных органогенных известняков		7,3 - 9,6 (8,2)	95,3 - 99,3		Вариант 3 102,5 / 30,5	
				Нижняя (суворовская)	C ₃ kr ₁	Известняки средней прочности, кавернозные, слаботрещиноватые		0,4 - 3,2 (1,5)	93,3 - 98,1	
	Неравномерное чередование водоносных органогенных малопрочных плитчатых известняков и относительно водоупорных пачек грубого переслаивания мергелей и твердых карбонатных глин		5,6-10,3(7,7)			85,6 - 90,0				
	Великоворская и ермолинская нерасчлененные			C ₂ pd-mc	Переслаивание и чередование пачек известняков средней прочности и прочных доломитизированных глыбовых пелитоморфных кавернозных, слабо трещиноватых и малопрочных органогенно-детритовых тонко- и среднеплитчатых с редкими прослоями твердых глин		вскрытая мощность до 58,8 м			Вариант 1 84,5 / 48,5

по водопонижению в подольско-мячковском водоносном горизонте могут снизить надежность системы резервного водоснабжения г. Москвы за счет подземных вод каменноугольных водоносных горизонтов. Таким образом, геофильтрационное моделирование показало принципиальную невозможность заглубления котлована в средне-каменноугольные отложения.

Следующий рассмотренный вариант предполагал заложение плиты на глубине 37 м (абсолютная отметка 96,0 м). Фундаментная плита при этом должна была располагаться в суворовском водоносном горизонте, а низ «стены в грунте» — в подольско-мячковском водоносном горизонте. На этом этапе были проведены дополнительные полевые работы, включающие в себя лабораторные трехосные испытания и полевые прессиометрические исследования толщи глинисто-мергелистых пород суворовской подсытки, а также опытно-фильтрационные работы для оценки их фильтрационных свойств с целью прогнозирования вероятности перетекания из нижележащего подольско-мячковского водоносного горизонта. На территории ММДЦ суворовский и подольско-мячковский водоносные горизонты гидравлически связаны за счет невыдержанности мощности относительно водоупорной глинисто-мергелистой толщи суворовских отложений. На основании результатов геофильтрационного моделирования вновь было принято решение о переносе фундаментной плиты.

Окончательные проектные решения предполагают размещение фундаментной плиты на глубине 30,5 м, что соответствует абсолютной отметке 102,5 м, в толще глинистых пород воскресенской подсытки.

Также в результате моделирования с учетом проектных решений на соседних участках ММДЦ был спрогнозирован подъем уровня надъярского водоносного горизонта в области распространения водоупорных отложений юрской системы, что приведет к подтоплению прилегающих территорий. Для минимизации барражного действия «стены в грунте» были даны рекомендации по проведению дренажных мероприятий.

Геомеханическое моделирование

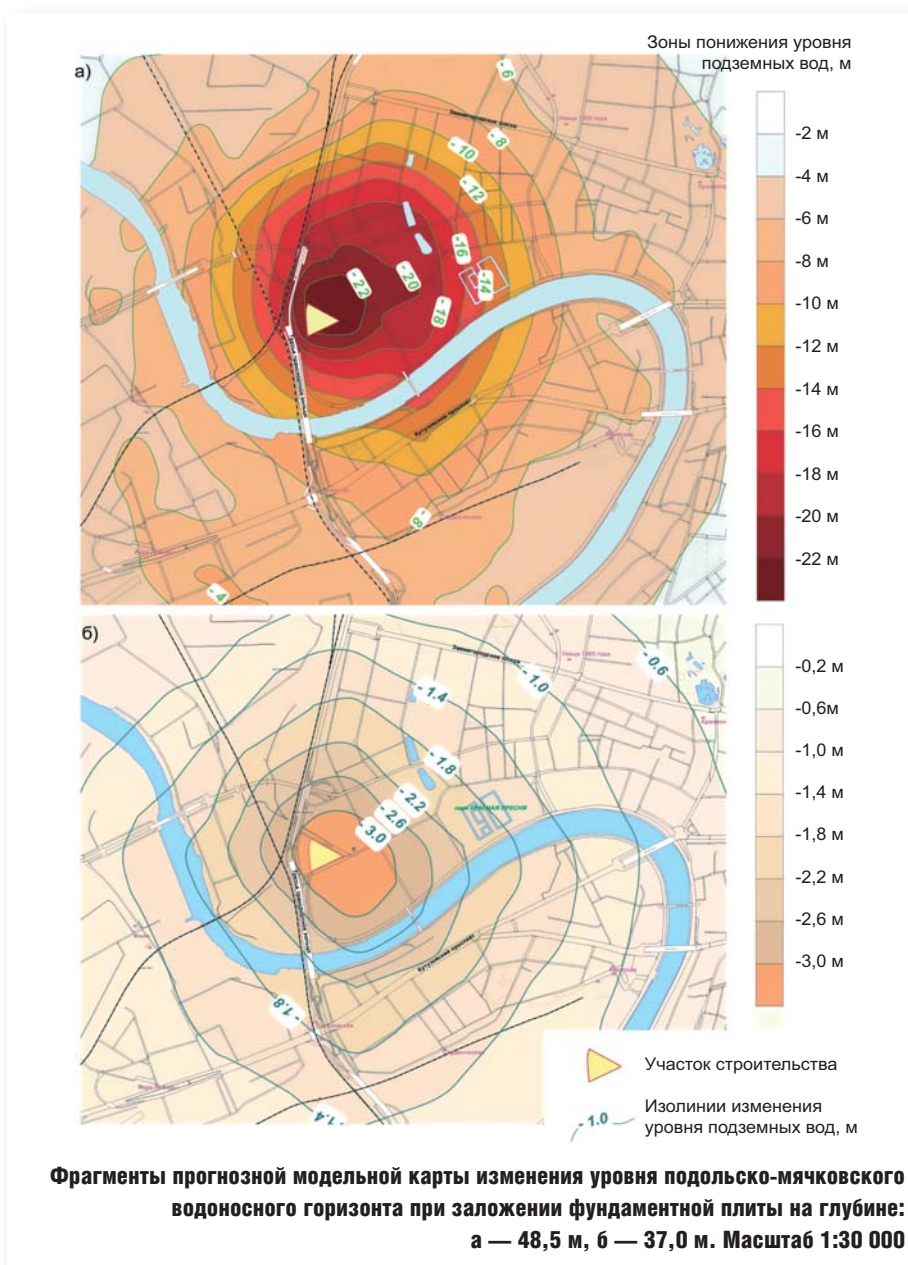
Геомеханическое моделирование проводилось на всех стадиях разработки проектных решений с целью определения напряженно-деформированного состояния основания плитно-свайного фундамента башни с учетом

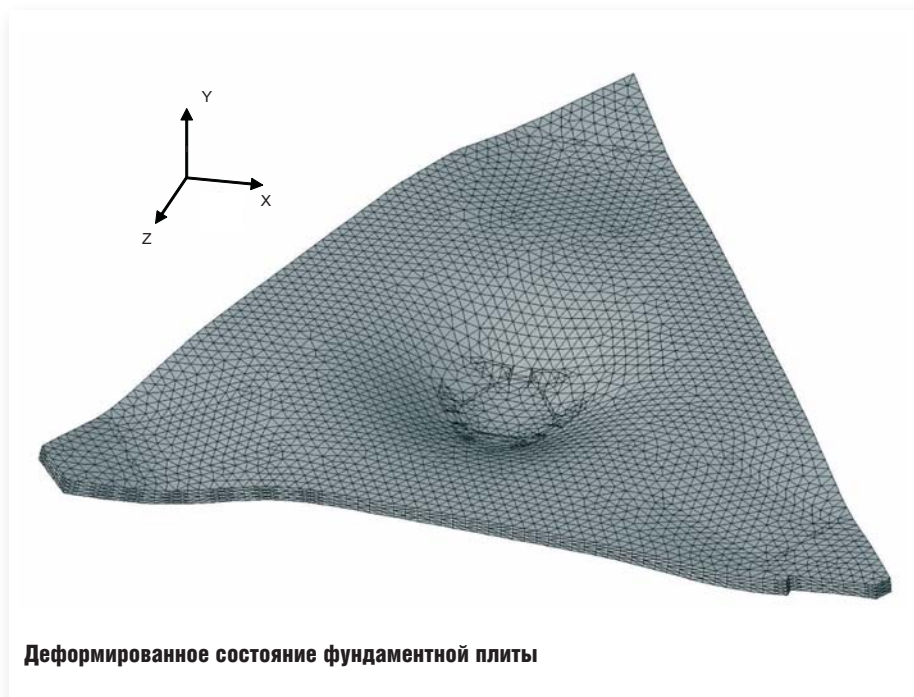
прогнозных результатов изменения гидрогеологической обстановки. Для представительного моделирования всего процесса строительства была принята следующая последовательность расчетных этапов: моделирование природного напряженно-деформированного состояния грунтового основания; моделирование влияния устройства ограждающей «стены в грунте»; моделирование влияния разработки котлована; моделирование влияния устройства плитно-свайного фундамента; моделирование влияния возведения высотного здания.

Расчеты производились для всех этапов последовательно, так как итоги предыдущего этапа являются начальным условием для последующего. В результате расчетных исследований было смоделировано напряженно-деформированное состояние грунтового осно-

вания при взаимодействии с плитно-свайным фундаментом в процессе возведения высотного здания.

Исследования показали, что вариант с расположением плиты на отметке 102,5 м, минимизирующий изменения гидрогеологической обстановки в процессе строительства, является наиболее сложным с точки зрения взаимодействия сооружения с грунтовым основанием. Моделируемые осадки плитно-свайного фундамента при возведении высотного здания развиваются неравномерно. При этом максимальная осадка прогнозируется в центральной части фундаментной плиты, где действующая нагрузка от здания передается на небольшую площадь через опоры лифтовых шахт. Для минимизации осадок сооружения были рассмотрены разные конфигурации плитно-свайного фундамента, различающиеся как расположе-





Деформированное состояние фундаментной плиты

нием и конфигурацией свай, так и параметрами фундаментной плиты.

При определении оптимального варианта расположения свай на конечном этапе выбор делался между вариантом с тангенциальным и комбинированным расположением свай. Также был рассмотрен оптимизированный вариант с комбинированным расположением и утолщением плиты на 2 м в центральной части фундамента. Исследование показало, что несмотря на то, что из всех перечисленных вариантов последний дает наименьшие прогнозируемые осадки, для полного удовлетворения требований технического задания необходимо провести дополнительное изучение влияния изменения длины свай на величину макси-

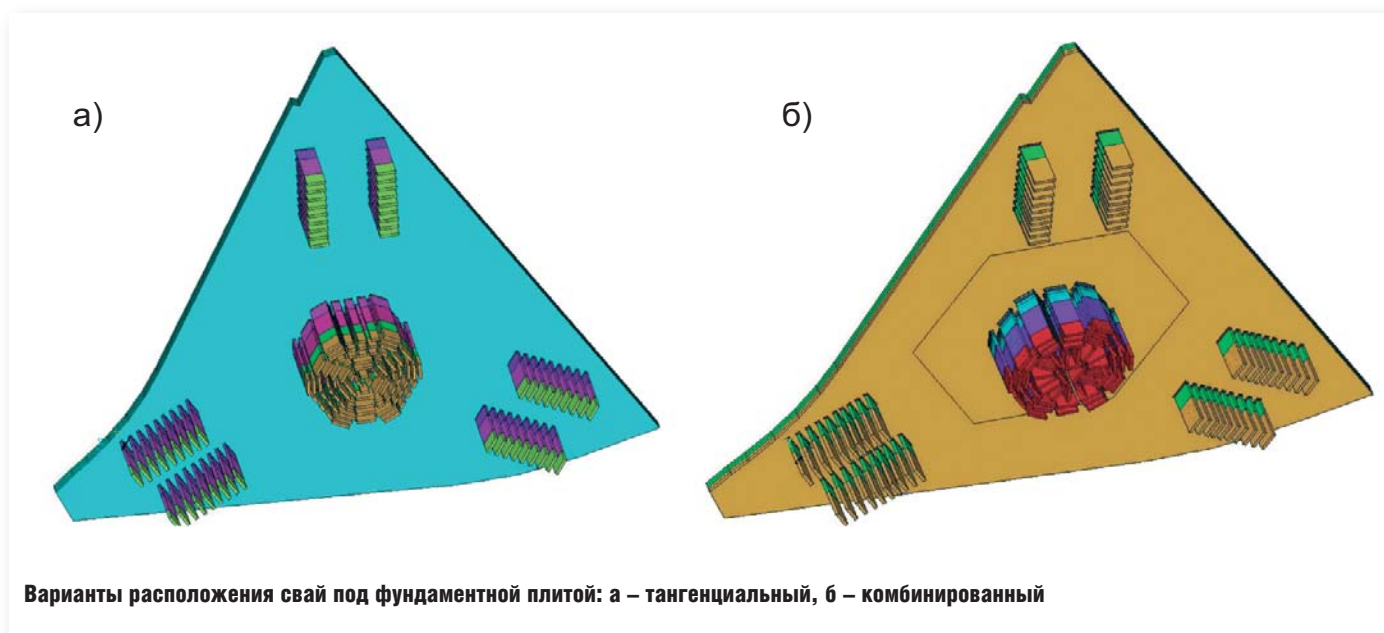
мальной осадки и разности осадок под опорами лифтов и веерных колонн при постоянной толщине плиты и различных вариантах их изменения. Были рассмотрены варианты с утолщением плиты в пределах различных ее осей в комбинации с выбором той или иной глубины заложения центральных свай, в результате чего было принято окончательное проектное решение.

Параллельно с выбором конфигурации плитно-свайного фундамента производился расчет устойчивости водонепроницаемой толщи глин воскресенской подсытки под воздействием напора уровня суворовского водоносного горизонта. Моделирование показало наличие подъема дна котлована и оседания окружающего грунтового массива,

однако в допустимых пределах (максимальная величина подъема — 16 мм, максимальная величина осадки грунтового массива на расстоянии 57 м от ограждающей «стены в грунте» без учета сопротивления грунтов вне расчетной области — 8 мм). При этом устойчивость водонепроницаемой толщи глин воскресенской подсытки не нарушается. Это обусловлено значительными величинами удельного сцепления ($C = 20,5 \text{ т/м}^2$) и угла внутреннего трения ($\phi = 29^\circ$) грунтов воскресенской подсытки.

Выводы

В заключение следует отметить, что инженерно-геологические исследования для строительства башни «Россия» не укладываются в классическую схему проведения изысканий. Те или иные проектные решения принимались в процессе диалога между проектирующей и изыскательской организациями, с учетом результатов геофильтрационного и геомеханического моделирования и дополнительных инженерно-геологических изысканий, направленных на решение конкретных задач. В результате выбирался вариант, минимизирующий воздействие на геологическую среду, окружающую застройку, и в то же время наиболее целесообразный с экономической точки зрения. Опыт проведения исследований для строительства башни «Россия» и других объектов делового центра может стать хорошей базой для разработки методических указаний по проведению инженерно-геологических исследований для зданий повышенной высотности и глубинности на территории г. Москвы. ↻



Варианты расположения свай под фундаментной плитой: а – тангенциальный, б – комбинированный