

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

НАУЧНЫЙ СОВЕТ РАН ПО ПРОБЛЕМАМ
ГЕОЭКОЛОГИИ, ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ
И ГИДРОГЕОЛОГИИ

РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

СЕРГЕЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ

***Моделирование при решении
геоэкологических задач***

Выпуск 11

**Материалы годичной сессии
Научного совета РАН по проблемам геоэкологии,
инженерной геологии и гидрогеологии
(23–24 марта 2009 г.)**

Москва
ГЕОС
2009

ББК
С
УДК 624.131.: 551.3.

Сергеевские чтения. Моделирование при решении геоэкологических задач. Выпуск 11. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (23–24 марта 2009 г.) – М.: ГЕОС, 2009. – 448 с.

ISBN

В сборнике опубликованы научные доклады, представленные на одиннадцатую ежегодную конференцию «Сергеевские чтения» памяти академика Е.М. Сергеева (г. Москва, 23–24 марта 2009 г.). Обсуждаются вопросы применения ГИС-технологий и методов цифровой картографии при решении геоэкологических задач; применения трехмерных моделей в инженерной геологии, гидрогеологии и геокриологии; моделирования опасных геологических процессов; моделирования геофильтрационных и геомиграционных процессов при решении геоэкологических задач.

Редакционная коллегия:

В.И. Осипов (ответственный редактор),
О.Н. Ерёмкина (ответственный секретарь), А.С. Викторов, Б.В. Георгиевский,
О.К. Миронов, Г.З. Перльштейн, Г.П. Постоев, В.Г. Румынин.

**Издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований (грант №09-05-06012).**

© Научный совет РАН по проблемам
геоэкологии, инженерной геологии
и гидрогеологии, 2009
© ГЕОС, 2009

ГЕОФИЛЬТРАЦИОННОЕ И ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ БАШНИ «РОССИЯ»

**Р.Ю. Жидков, В.Н. Селезнев, М.И. Карабаев, М.Н. Бучкин,
В.Н. Экзарьян**

РГГРУ им. С.Орджоникидзе; 117485 Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23; тел./факс 433-65-44, доб. 11-53; ecology@msgpra.ru. НПО «НОЭКС»; 117152 Москва, Загородное ш., д. 10 корп. 8; тел./факс 954-15-63; mail@noeks.ru. МИГГ; 119017 Москва, Кадашевская наб., д. 6/1; тел./факс 237-63-49.

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

К моменту начала проведения изысканий для строительства башни «Россия», инженерно-геологические условия территории ММДЦ «Москва-Сити» были досконально изучены в ходе исследований под другие объекты, в результате чего 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 полностью техногенный.

Геологический разрез до глубины 100 м представлен отложениями четвертичного, юрского и каменноугольного возраста. В зоне взаимодействия с сооружением имеются распространение пять водоносных горизонтов, причем два верхних объединены на части территории делового центра в аллювиально-перхуровский водоносный комплекс (к юго-западу от уч. 17-18 водоупорные глинистые породы, относящиеся к юрской системе полностью размыты). Систематизация инженерно-геологических и гидрогеологических условий площадки строительства приводится в сводной инженерно-геологической колонке (рис. 1).

При проектировании сооружения стояла задача максимально возможного освоения подземного пространства, поэтому на всех этапах изысканий проводилось перманентное компьютерное гидрогеологическое и геомеханическое моделирование для 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 проведению мероприятий, минимизирующих изменение гидрогеологической ситуации района строительства.

На этапе анализа сложившейся гидрогеологической обстановки, было выявлено существенное понижение уровней аллювиально-перхуровского водоносного

Система	Региональные стратиграф. подразделения		Геологический индекс	Литологическое описание пород	Литологическая колонка	Мощность слоя, м мин-макс (ср)	Абс. отм. подпошвы	Уровень подземных вод (абс. отм.)	Варианты заложения фундаментной плиты (абс. отм./глубина)
	Слита	Подслита							
Четвертичная			ИН	Насыпные 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 разнородные 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	Великовская и ермолинская нерасчлененные		J ₂₋₃ vd-er	Глины тяжелые тугопластичные, реже полутвердые, черные слюдистые, набухающие.		0-9,0 (6,4)	120,2-123,9	117,3-120,2	
Тестовская		Нижняя (перхуровская) пачка	C ₃ Is ₁	Известняки доломитизированные, прослоями доломиты, средней прочности прослоями окремненные прочные, на отдельных участках разреза малопрочные, трещиноватые, сильнотрещиноватые, участками кавернозные		5,0-8,1 (6,4)	113,5-117,6	115,7-118,1	
Каменноугольная	Хамовинская	Верхняя (неверовская)	C ₃ hm ₂	Глины легкие пылеватые, твердые, набухающие с прослоями мергеля низкой прочности Мергели доломитовые малой и средней прочности, плотные и кавернозные, в подошве с прослоем глины твердой (0,2-0,5 м)		1,2-4,9 (3,3)	109,8-113,9	109,2-112,4	
		Нижняя (ратмировская)	C ₃ hm ₁	Известняки средней прочности, трещиноватые, кавернозные Известняки малопрочные, выщелоченные (рухляк), переходящие в переслаивание с мергелями малопрочными трещиноватыми		0,4-3,4 (1,5)	104,9-109,7	103,2-108,1	
	Кревкинская	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 Неравномерное чередование водоносных органогенных малопрочных плитчатых известняков и относительно водоупорных пачек грубого переслаивания мергелей и твердых карбонатных глин		0,4-3,2 (1,5)	93,3-98,1		вариант 2 96,0/37,0
Подольская и мячковская 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.		5,6-10,3 (7,7)	85,6-90,0		вариант 1 84,5/48,5

Рис. 1. Сводная инженерно-геологическая колонка

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 отсутствием данных мониторинга геологической среды на этапе возведения строений делового центра. В результате многовариантного гидрогеологического моделирования в качестве наиболее близко 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 примыкания к построенным «стенам в грунте».

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 составят 37 тыс. м³/сут., что составляет около 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 участков №17–18 прогнозный 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 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 невозможность заглубления котлована в среднекаменноугольные 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 проведение лабораторных трехосных и полевых прессиометрических исследований толщи глинисто-мергелистых пород суворовской подсвиты и проведение опытно-фильтрационных работ 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 проектировочные решения предполагают размещение фундаментной плиты на глубине 30,5 м, что соответствует абсолютной отметке 102,5 м, в толще глинистых пород воскресенской подсвиты.

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.

Перманентное геомеханическое моделирование проводилось на всех стадиях разработки проектных решений с целью определению напряженно-деформированного состояния основания плитно-свайного фундамента башни с учетом результатов прогноза изменения гидрогеологической обстановки. Для представительного моделирования всего процесса строительства, была принята следующая последовательность расчетных этапов:

- Моделирование природного НДС грунтового основания,
- Моделирование устройства ограждающей стены в грунте,
- Моделирование разработки котлована,
- Моделирование устройства плитно-свайного фундамента
- Моделирование возведения высотного здания.

Расчеты проводились, согласно методике, для всех этапов последовательно, так как результаты предыдущего этапа являются начальным условием для последующего этапа. В результате проведенных расчетных исследований было смоделировано напряженно-деформированное состояние грунтового основания, 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 различные конфигурации плитно-свайного фундамента, различающиеся как расположением 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 (рис. 2). 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 требованиям Технического задания необходимо проведение дополнительного изучения влияния изменения длины свай на величину максимальной осадки и разности осадок под опорами лифтов и веерных колонн при постоянной толщине плиты и различных вариантах диаметра и величины ее

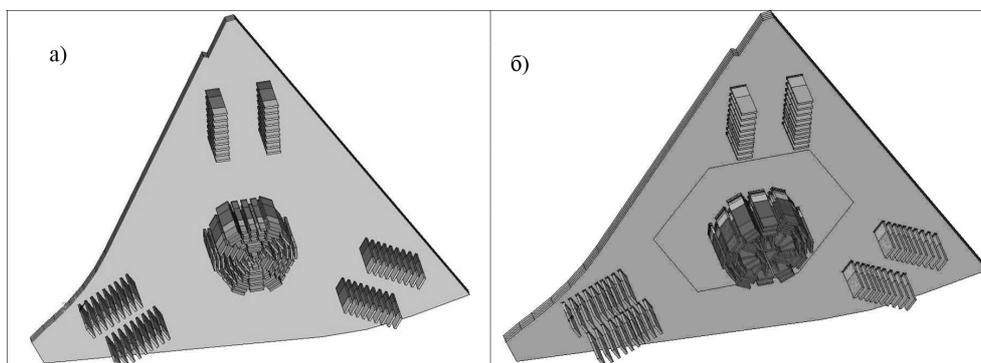


Рис. 2. Варианты расположения свай (вид снизу):
а – тангенциальный, б – комбинированный

утолщения. 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 водоупорной толщи глин воскресенской подсвиты под воздействием напора уровня нижезалегающего 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 водоупорной толщи глин воскресенской подсвиты не нарушается. Это обусловлено значительными величинами удельного сцепления ($C = 20,5 \text{ т/м}^2$) и угла внутреннего трения ($\varphi = 29^\circ$) грунтов воскресенской подсвиты.

В качестве основного вывода хотелось бы обозначить важность сопровождения подобных уникальных объектов повышенной этажности и глубинности заложения перманентным геофильтрационным и геомеханическим моделированием на всех этапах проектирования в комплексе с проведением поэтапных инженерно-геологических изысканий. В обязательном порядке должно быть учтено каждое изменение проектного решения и оценено его влияние на прогноз взаимодействия с геологической средой во всех его аспектах.

Литература

1. Зарецкий Ю.К. Лекции по современной механике грунтов. Изд-во РГУ, 1989.
2. Зеугофер Ю.О., Клюквин А.Н., Пашковский И.С., Рошаль А.А. Постоянно действующие модели гидrolитосферы территорий агломераций. М.: Наука, 1991.