

На правах рукописи



ТАРАКАНОВСКИЙ Вячеслав Константинович

**ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГРУНТОВ И
ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОСНОВАНИИ
ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ**

Специальность 25.00.10 – геофизика,
геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Капустян Наталия Константиновна
(Учреждение Российской академии наук
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Манукин Анатолий Борисович
(Учреждение Российской академии наук
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН)

кандидат технических наук
Миндель Исаак Генрихович
(Учреждении Российской академии наук
Институт геоэкологии РАН)

Ведущая организация: ОАО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт «Гидропроект» имени С. Я. Жука»

Защита диссертации состоится «28» апреля 2011 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 002.001.01 в Учреждении Российской академии наук Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН по адресу: 123995, г. Москва, ул. Б. Грузинская, 10, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Автореферат разослан «...» марта 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,

кандидат физико-математических наук



Пилипенко О. В.

Актуальность и практическая ценность. Исследование поведения горных пород при различных воздействиях является одним из главных направлений геофизических исследований, при этом особое место занимает изучение грунтов в основании сооружений. Данное направление традиционно для ИФЗ РАН, но основной упор обычно делается на изучение сейсмических свойств грунтов – это работы С.В. Медведева, Н.В. Шебалина, В.В. Штейнберга., А.В. Николаева, А.С. Алешина, Ф.Ф. Аптикаева и др. Особое значение для целей диссертации имеет анализ воздействия вибраций на грунты - исследования Ю.И. Васильева, А.А. Гвоздева, В.В. Кузнецова, А.С. Алешина и др. При рассмотрении техногенных явлений помимо вибрационных нагрузок существенны наблюдения более медленных процессов в верхней части разреза, в том числе в прибортовых частях водохранилищ (О.И. Силаева, А.И. Савич и др.). В строительной науке также накоплены знания о деформационных свойствах грунтов (И.Г. Миндель, З.Г. Тер-Мартirosян, R. Katzenbach и др.). Особое место занимают разработки, связанные с методикой и техникой наблюдения процессов в грунтах, удачным примером является создание систем деформационного мониторинга грунтов в Москве (В.А. Волков, В.Б. Дубовской и др.). Таким образом, диссертация продолжает важное направление геофизических исследований, но нацелена на вопросы, которые ранее не рассматривались либо изучены недостаточно.

В настоящее время произошли существенные изменения в строительстве – как по воздействиям на грунты, так и по требованиям к безопасности сооружений. Это, в первую очередь, относится к высотным зданиям, т.к. происходит значительное усложнение конструкции, особенно для фундаментов, увеличивается глубина их заложения. Тем самым поле распределения нагрузок становится достаточно сложным для применения стандартных простых методов прогноза воздействий, применяемых в строительстве. Часто в крупных городах строительство высотных домов ведется на участках с неблагоприятными инженерно-геологическими условиями, что делает роль геологических процессов в грунтах еще более значимой для целостности здания.. Все это определяет актуальность и практическую значимость детального изучения грунтов основания высотных зданий и происходящих в них процессов для безопасности как при строительстве, так и их эксплуатации. Исследование грунтов оснований высотных зданий опирается на проведение натуральных наблюдений - создания инструментальных систем мониторинга грунтового массива, включающих и наблюдения за конструкциями.

Помимо практической значимости работы, присутствует важный фундаментальный аспект - появляется возможность детально исследовать явления в грунтах основания высотных зданий «in situ», а не на образцах. Существенно, что проведение наблюдений во время строительства и после его завершения позволяет изучить процессы в грунтовом массиве при изменениях динамики воздействия (с разными скоростями и продолжительностью).

В диссертации на основании данных, полученных с помощью разработанных и реально действующих систем мониторинга на двух высотных зданиях в Москве, представлены результаты экспериментального изучения пространственно-временных вариаций различных параметров, характеризующих грунтовый массив основания (давления на грунт, послойной и суммарной осадки) и взаимодействия грунта со строительными конструкциями, преимущественно в нижней части высотных зданий.

Объект исследования: грунты основания высотных зданий и происходящие в них процессы; средства измерения, в том числе типы датчиков и схемы их расстановки; регламент проведения измерений и приемы сопоставления экспериментальных и расчетных данных.

Цель работы: разработка методики и техники инструментального мониторинга основных геологических процессов, происходящих в грунтах оснований и конструкциях нижней части высотных зданий, их характерных пространственно-временных размеров и вариаций.

Задачи, которые необходимо было решить для достижения поставленной цели:

1. Составление литературных обзоров:
 - опасных геологических процессов и их активизации при строительстве;
 - экспериментальной изученности процессов в основаниях высотных зданий;
 - методов исследования напряженно-деформированного состояния горных пород;
 - современных средств мониторинга грунтов и строительных конструкций;
 - опыта создания систем мониторинга.
2. Детальный анализ результатов инженерно-геологических изысканий для конкретного объекта и разработка способов прогноза воздействия высотного здания на вмещающий грунтовый массив путем доинтерпретации стандартных данных.
3. Выбор инструментов мониторинга (методов измерения и типов датчиков), разработка алгоритма размещения датчиков на основе анализа инженерно-геологической ситуации и конструктивного решения, их установка на объекте.
4. Проведение режимных наблюдений в процессе строительства и выбор оптимального временного интервала измерений, выявление изменений в грунтах в процессе возведения здания.
5. Выполнение продолжительных и детальных по времени наблюдений путем запуска системы мониторинга в автоматическом режиме при завершении строительства, выявление и анализ процессов в грунтах при постоянной нагрузке.
6. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений параметров, а также данных разных типов наблюдений, создание общей картины изменений в грунтах.

Научная новизна:

1. Впервые проведено обобщение и систематизация современных подходов к мониторингу высотных зданий и грунтов их оснований, а также применяемых для этих целей аппаратных средств.
2. Разработан и запатентован способ расстановки датчиков в системе мониторинга на основе статистического анализа расчетных параметров конструкций зданий и грунтового массива основания (патент RU 2365895 C1).
3. Впервые в России на высотных объектах (г. Москва) реализована автоматическая система инструментального мониторинга совместно грунтов и конструкций, объединившая в едином комплексе наблюдения различных физических величин, что определило уникальность полученных результатов.
4. Получены ранее не известные данные об изменении температурного режима грунтов в основании высотного здания при его возведении.
5. Впервые получена реальная пространственно-временная картина изменения параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтов в основании

высотных зданий, выявлены циклические годовые вариации этих параметров и скорости процессов.

6. Впервые определен и обоснован оптимальный временной регламент проведения мониторинга при строительстве зданий.

Обоснованность результатов и выводов обеспечивается применением сертифицированной аппаратуры, подтверждается статистическим анализом значительного объема накопленных данных, согласованностью результатов по данным наблюдений разных типов.

Защищаемые положения:

1. Высотные здания оказывают значительные воздействия на грунты основания, заметно превышающие (до 30% и более) нормативные величины, принятые в настоящее время в строительстве. Углубленная интерпретация материалов инженерных изысканий позволяет уточнить размеры зоны влияния зданий по глубине и по площади, а также оценить направление развития процессов в грунтах до начала строительства.

2. Для получения надежных и достоверных оценок пространственно-временной динамики напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтов, а также выявления тонких особенностей регистрируемых изменений существенно сочетание инструментов и методов разных типов в единой системе. При этом наиболее важными составляющими системы являются измерения: осадки здания (послойные и суммарные) в скважинах, давления на грунт под фундаментной конструкцией, деформаций в конструкциях фундамента, выполняемые специализированными датчиками в сочетании с геодезическим мониторингом осадки здания и окружающей застройки.

3. На примере создания автоматизированных систем мониторинга конструкций и грунтов основания двух высотных зданий в Москве показаны как удачные решения, так и ошибки на этапах проектирования, установки и наладки этих систем. Комплексный анализ данных позволил выявить на фоне интегральных трендовых изменений контролируемых параметров тонкие особенности протекания деформационных процессов, существенные для безопасности здания.

4. Экспериментально установлено, что НДС грунтов основания испытывает отчетливые пространственно-временные изменения не только в процессе, но и при приостановке строительства. Помимо особенностей геологического строения и конструкции фундамента, наиболее значимыми причинами этого являются следующие: локальные изменения гидрологической ситуации, нарушения технологии строительства, изменения величин нагрузок и скоростей их роста при возведении зданий. При постоянной нагрузке (в период приостановки строительства) в пространственной мозаике вариаций НДС в грунте проявляется отчетливая годовая цикличность, при которой со временем, тем не менее, не происходит локальное накопление изменений.

Личный вклад автора: присутствует на всех этапах работы: создания (разработки, установки и наладки) системы мониторинга, проведении измерений в «ручном» и автоматическом режимах, в обработке и анализе полученных результатов. Работа преимущественно экспериментальная, представленные материалы получены автором лично и в соавторстве.

Апробация. Важная часть работы защищена патентом «Способ дистанционного контроля и диагностики состояния конструкций и оснований зданий и сооружений»

(RU 2365895 C1). Результаты доложены на ряде всероссийских и международных конференций в том числе: Международной конференции «Изменяющаяся геологическая среда: пространственно-временные взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов», Казань (2007 г.); Девятой Уральской молодежной научной школе по геофизике «Современные проблемы геофизик», Екатеринбург (2008 г.); X конференции «Сергеевские чтения. Международный год планеты Земля», Москва (2008 г.); Научной конференции молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН, Москва (2009 г.); Конференции «Актуальные вопросы инженерной геологии и экологической геологии», Москва (2010 г.); Первом национальном конгрессе «Комплексная безопасность», Москва (2010 г.), Международном конгрессе «Геотехнические проблемы мегаполисов», Москва (2010 г.)

Публикации: по теме диссертационной работы опубликовано 13 работ, в том числе 2 статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК, получен патент.

Структура и объем работы: диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы и содержит 145 страниц чистого текста, включая 109 рисунков и 15 таблиц. Список литературы содержит 108 библиографических наименований.

Благодарности. Автор глубоко признателен своему научному руководителю – доктору физ.-мат. наук Капустян Наталии Константиновне за руководство, постоянную поддержку и внимание к работе. Особую благодарность автор выражает Сухину В.В. (генеральному директору) и всем сотрудникам ООО «ГПИКО ЛТД» (Соколову В.В., Храмову И.В., Кокоеву О.В., Прокину А.Ю., Мишанову А.И. и др.) за помощь в создании системы мониторинга и проведении наблюдений. Автор благодарен сотрудникам ИФЗ РАН, ИЭПС и АНЦ УрО РАН, специалистам ОАО «ЦНИИЭП жилища» за советы при выполнении данной работы и искреннее внимание, уделяемое исследованию. За творческое общение и интересные дискуссии автор благодарен чл-корр. РАН Уткину В.И., к.т.н. Антоновской Г.Н., Климову А.Н., Вознюку А.Б., Артемову С.Л., Соколовой Т.Б. и многим другим.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Обоснована актуальность темы, сформулированы основные цели и задачи исследования, защищаемые положения, оценена практическая значимость, представлена структура работы и ее апробация.

В главе 1 рассмотрены особенности геологии г. Москвы: приведены краткие характеристики физико-географических условий, стратиграфии и геологического строения, а также типизация и данные об опасных геологических процессах.

Принятые в работе представления о геологическом строении и развитии опасных геологических процессов основаны на «Геологическом атласе Москвы» (*ГУП "Мосгоргеотрест", НПП "Георесурс", 2010*), который является последним и наиболее полным обобщением знаний в этой области. Атлас предназначен для обеспечения геологической основой строительства и транспорта, поэтому представлено описание стратиграфических подразделений в интервале глубин до 100-150 м, начиная с каменноугольных отложений. Подробно рассмотрены четвертичные (в том числе, техногенные) отложения, которые зачастую являются основными несущими и

вмещающими горизонтами пород при строительстве в Москве, а также показано распространение техногенной нагрузки.

При рассмотрении опасных геологических процессов выделены явления, наиболее характерные для московского региона и потенциально опасные для строительства высотных зданий: подтопление территории, карстово-суффозионные и оползневые процессы. Приведена краткая характеристика изученности, пространственного распространения и механизмов развития каждого типа процессов.

Особое внимание уделено группе процессов, активизация которых связана непосредственно с воздействием строительства высотных зданий на вмещающий грунтовый массив. Эти явления не относятся к «классическим» опасным геологическим процессам, они лишь частично отражены в современных нормативах и поэтому не учитываются при проектировании зданий. Изменения возникают в локальной области грунтового массива непосредственно в основании здания или по площади в зоне влияния сооружения на окружающую застройку. Они существенны для безопасности уже на ранних стадиях возведения, т.к. могут вызывать деформации конструкций строящегося дома (Кабанцев, 2010) и окружающих зданий (МГСН 2.07-01).

К процессам, важным при высотном строительстве, можно отнести:

- изменение свойств грунтов (физико-механических, фильтрационных и др.) вследствие снятия литостатической нагрузки при разработке котлована;

- изменение гидрогеологического режима массива в результате создания ограждающих конструкций или строительного водопонижения и, как следствие, активизация карстово-суффозионных процессов, процессов подтопления и возникновение так называемого «баражного» эффекта;

- изменение НДС значительного объема грунтового массива вследствие увеличения нагрузки на грунты при возведении сооружения; перераспределение напряжений по глубине может происходить и вне расчетной зоны влияния зданий. Стоит отметить, что в связи с неравномерностью скорости проведения строительных работ, изменение нагрузки правильнее рассматривать и как динамический процесс;

- возникновение неравномерных деформаций грунтовой толщи, обусловленное не только наличием разных по физико-механическим свойствам слоев грунта в разрезе, но и неравномерностью проведения строительных работ по площади здания;

- взаимное влияние подземных конструкций здания и вмещающих грунтов, которое можно охарактеризовать как возникновение «контактных взаимодействий», ярко выраженных на подошве фундаментной плиты;

- возникновение передаваемого в грунтовый массив вибрационного воздействия от ветровых колебаний здания, которое изменяется с ростом этажности объекта (Капустян и др., 2003, Юдахин и др., 2003, Вознюк и др., 2007). Это важно, т.к. вибрация может оказывать влияние на физико-механические и фильтрационные свойства грунтов (Николаев 1987, Алешин, Кузнецов, 1987, Васильев и др. 1987).

В качестве примера исследования переработки блоковой средой внешних вибрационных воздействий разных частот рассмотрен натурный эксперимент на валунно-глиняных дамбах Соловков, выполненный при участии автора (Юдахин и др., 2010). Показано, что реакция среды на динамические нагрузки может быть «отложена» по времени, проявляется в местах концентрации напряжений в среде и имеет явно

нелинейную природу (трансформация отклика в сторону высоких или низких частот относительно воздействия).

Как правило, изучение и прогноз развития всех вышеперечисленных процессов не предполагается в рамках стандартных инженерно-геологических изысканий и компьютерного моделирования грунтового массива, являющихся основой при проектировании здания. Тем не менее, дать такую оценку можно, основываясь на доинтерпретации материалов стандартных инженерно-геологических изысканий.

Автором рассмотрен пример составления прогноза изменения геодинамической ситуации под влиянием возведения здания. Для этого были рассчитаны значения литостатического давления на отметках глубин, соответствующих границам основных геологических слоев в ненарушенном состоянии, а для скважин в пределах контура здания – также значения давления с учетом выемки котлована и нагрузки от здания. По этим величинам построены поля распределения естественного литостатического давления и давления на момент окончания строительства. В качестве примера в работе рассмотрено изменение поля литостатического давления для кровли юрских отложений (рис. 1), которые не только выступают локальным водоупором, но и являются горизонтом, на который опирается ограждающая конструкция котлована («стена в грунте»). Так как поле литостатического давления отражает распределение напряжений в грунтовом массиве, то направление градиентов давления указывает потенциальные направления развития процессов, в том числе опасных, таких как суффозия и горизонтальные подвижки грунта, а также помогает оценить возможную неравномерность поля осадок.

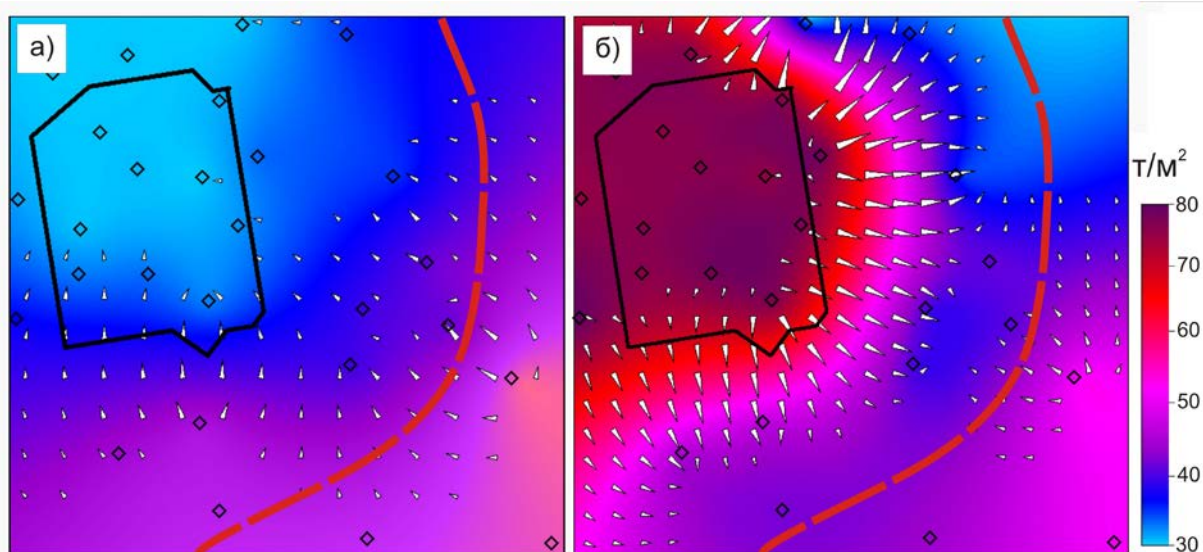


Рис. 1. Прогноз изменения поля литостатического давления на кровле юрских отложений: *а* – в естественном состоянии; *б* – по окончании строительства. Стрелки - величина и направления градиентов литостатического давления, ромбики – скважины, черная линия – контур фундаментной плиты, красная линия – нормируемая зона влияния здания.

На рис. 1 отчетливо видно, что для кровли юрских отложений при окончании строительства направления градиентов литостатического давления изменятся на противоположные. Следствие этого - перераспределение напряжений в массиве и изменение направлений протекания процессов. Можно отметить, что изначальное поле литостатического давления на территории, прилегающей к площадке строительства, существенно неоднородно. После окончания возведения здания общая картина поля

изменится, причем эти изменения затронут территорию, превышающую по площади нормативную зону влияния примерно на 30%, но в контуре фундаментной плиты оно станет более равномерным.

Обзор публикаций по выявлению процессов в грунтах основания, в том числе для высотных зданий, на основе экспериментальных данных показал, что для исследований были опробованы разнообразные подходы и инструменты. Несмотря на это, полученные сведения крайне скудны в связи с недостатком опыта изучения таких явлений и обоснованных методик получения и интерпретации материалов. Среди отечественных и зарубежных разработок систем мониторинга информация о работе грунтов при плитном фундаменте приводится в наших статьях (*Таракановский и др., 2008, 2010*) и в публикациях ООО «Мониторинг-Центр» (*Неугодников, Круглов, 2008*); более детально изучено взаимодействие грунтов основания сооружений и свайного поля (*Katzenbach et al, 2005, Краев, 2008; Шеменков, 2003*). Отдельное направление – выявление роли изменений в грунтах при сейсмометрических комплексных обследованиях памятников архитектуры, которые проводятся ИФЗ РАН, ИЭПС УрО РАН и ОАО «ЦНИИЭП жилища» (*Капустян и др., 2003-2010, Юдахин, Антоновская и др., 2006-10*). Результатом обзоров является выявление круга нерешенных вопросов, частично рассмотренных в диссертации.

Для практического применения научных разработок в строительстве существенно, чтобы они были отражены в нормативах. Приведена сводка основных отечественных и зарубежных нормативных документов, регламентирующих контроль состояния грунтов основания и строительных конструкций высотных зданий. В этой части современная нормативная база в России не в полной мере отвечает требованиям по обеспечению безопасности высотных зданий, недостаточно отражает потребностей строительства и современные возможности ведения мониторинга. Следствие несовершенства нормативов - в большинстве случаев используются стандартные (зачастую устаревшие) и малоинформативные, но зато более дешевые и не связанные со сложными технологиями методики мониторинга высотных зданий. Зарубежные нормативы существенно отличаются от отечественных степенью ответственности проектировщика за ситуацию на объекте, как при строительстве, так и при эксплуатации здания. Другим существенным рычагом, используемым для внедрения инструментального мониторинга, служит снижение страховых выплат при установке систем мониторинга на ответственных объектах. Все это является стимулом для детального изучения поведения грунтов под высотными зданиями.

Выводы главы 1:

1. Особенности геологического строения г. Москвы и существенное повышение техногенной нагрузки на геологическую среду определяют возможность активизации развития опасных геологических процессов на территории города. Под высотные здания часто отводятся участки с неблагоприятными инженерно-геологическим и геоэкологическими условиями, что усугубляет ситуацию.

2. Дополнительными причинами техногенной активизации локальных опасных геологических и других негативных процессов в грунтах основания высотных зданий могут быть: конструктивные решения подземных частей зданий и большая глубина заложения фундаментов (до 20 м), создание ограждающих конструкций котлована и водопонижение при строительстве, существенное увеличение нагрузок на грунтовый

массив (как статических, так и динамических). Все это требует детального изучения явлений в грунтах, связанных с высотным строительством.

3. Доинтерпретация материалов стандартных инженерно-геологических изысканий позволяет оценить направление развития процессов и площадь зоны воздействия от высотных зданий на грунтовый массив и, тем самым, прогнозировать развитие опасных геологических процессов ещё до начала строительства.

4. Нормативная база, регулирующая наблюдения за состоянием (мониторинг) конструкций и грунтов основания высотных зданий, недостаточно полно отвечает потребностям строительства и современным возможностям проведения мониторинга.

Глава 2 посвящена анализу современных аппаратурных средств и методик проведения мониторинга конструкций и грунтов основания высотных зданий. Приведен обзор методов изучения НДС массивов горных пород применительно к проблеме изучения верхней части разреза. Рассмотрены полевые и лабораторные методы исследования горных пород в условиях естественного залегания и при строительстве инженерных сооружений. Особый интерес представляют инструментальные испытания горных пород в полевых условиях, а также методики измерений контактных взаимодействий строительных конструкций и вмещающего массива. Отдельный блок посвящен методам физического и аналитического моделирования НДС горных пород. Существенно, что каждая из разнообразных методик позволяет выявить свой достаточно интересный факт, но комплексирование методов применяется крайне редко.

Рассмотрен отечественный и зарубежный опыт создания систем инструментального мониторинга высотных зданий. В большинстве этих систем основное внимание нацелено на изучение либо работы конструкций, либо грунтов основания. Наблюдения чаще всего ограничиваются контролем какого-нибудь одного параметра (например, частот колебаний в первом случае и во втором - осадки геодезическими методами). Достоинством подходов является проведение сравнения полученных результатов с расчетной моделью здания.

В отечественной практике интересны следующие реализации систем мониторинга. Система мониторинга высотного комплекса «ГРАДЭКС» (ООО «Мониторинг-Центр» (*Неугодников, Круглов, 2008*)), в которой использованы датчики давления на грунт, тензометрические датчики в конструкциях фундаментной плиты и нижних этажей, а также стандартные геодезические наблюдения, но публикации представляют лишь начальные результаты. Система мониторинга 56-эт. здания ММДЦ Москва-Сити, уч. № 10 (ГУП МНИИТЭП - *Гурьев, Дорофеев, 2008*), основанная на методике динамического зондирования и ранней диагностики деформационного состояния несущих конструкций при помощи анализа изменения передаточных функций, построенных для различных по высоте участков здания; приводится идея без результатов. Сейсмометрическая система мониторинга 44-эт. жилого здания «Эдельвейс» в Москве основана на контроле изменения собственных частот колебаний в качестве интегрального показателя состояния конструкции здания (*Капустян и др. 2003, Николаев и др. 2005, Вознюк и др., 2008*), получена картина изменений за 7 лет. С учетом опыта мониторинга специалистами ОАО «ЦНИИЭП жилища» и ООО «ГРИКО Ltd.» при участии автора разработаны проекты системы мониторинга нескольких высотных зданий в Москве («Континенталь», жилые дома по ул. Дыбенко, ул. Левобережная, ул. Краснобогатырская, ул. Ельнинская, ул. Фонвизина и др.). Эти

системы включают комплекс измерительного оборудования для контроля параметров, как грунтов основания, так и конструкций. В настоящее время при непосредственном участии автора реализованы первые две системы.

Наиболее интересными примерами зарубежного подхода являются системы инструментального мониторинга высотных зданий в Германии (*Катценбах и др., 2005*): 30-эт. Месс-Торхаус, 60-эт. Мессетурм и Коммерцбанка (высота – 300 м). Главной особенностью является создание мощных свайных полей в основании здания, или комбинированных плитно-свайных фундаментов (КПСФ), поэтому основное внимание было направлено на изучение совместной работы свай и грунтового основания. Кроме того, сваи «уводят» нагрузки на горизонты, существенно более глубокие (до 200 м) чем в Москве. Это дорогостоящий, но эффективный путь снижения масштабов проявления приповерхностных опасных геологических процессов.

Существуют отечественные и зарубежные системы, основанные на GPS-мониторинге и других методах спутниковой геодезии (например, система мониторинга главного здания МГУ – спутниковая интерферометрия), а также на таких технически сложных методах, как лазерное сканирование объектов. Но пока по публикациям трудно оценить место этих методик при мониторинге высотных зданий.

Таким образом, в мировой практике существует ряд подходов к созданию систем мониторинга высотных зданий. Эти системы отличаются по используемым методикам и инструментам, режимам проведения измерений, разрешающей способности методик, способам анализа и интерпретации полученных результатов.

Анализ отечественного и зарубежного опыта позволил сформулировать основные требования к комплексной системе мониторинга высотных зданий. Полноценная система инструментального мониторинга должна решать ряд практических задач:

- комплексирование инструментов, позволяющих одновременно контролировать изменение параметров грунтов оснований и конструкций как при строительстве, так и при эксплуатации (по возможности в автоматическом режиме);
- формирование банка данных измеряемых параметров, включающего информацию о темпах строительства и нарушениях технологии.

Помимо этого, должны быть решены следующие методические задачи:

- разработка приемов анализа пространственно-временных вариаций данных мониторинга с применением статистической обработки;
- разработка способов сопоставления измеряемых величин разных типов для получения достоверных оценок и более полной картины состояния объекта;
- разработка алгоритмов выявления ситуаций, для которых экспериментальные значения контролируемых параметров превышают проектные или нормативные величины.

Принципиально важно, что наиболее детальные наблюдения должны быть ориентированы на подземную часть (нижние этажи здания и грунты основания), т.к. именно взаимодействие грунтов, фундаментной плиты и конструкций стилобата, с одной стороны, представляет собой самую сложную и малоизученную проблему, а с другой – определяет состояние здания. Схемы расстановки датчиков должны разрабатываться в соответствии с материалами инженерно-геологических изысканий,

анализом геолого-геофизической ситуации площадки строительства, архитектурным и конструктивным решениями здания.

Система инструментального мониторинга высотного здания должна обеспечивать контроль следующего набора параметров:

- вертикальных и горизонтальных смещений конструкции здания и деформаций грунта в его основании: как послойных (дифференциальных), так и суммарных;
- гидрогеологического режима массива основания: уровня грунтовых вод и режима более глубоких водоносных горизонтов;
- изменения параметров НДС грунтового массива и взаимодействия грунтов основания с подземными конструкциями сооружения;
- изменение НДС основных надземных и подземных несущих конструкций;
- изменение пространственного положения объекта и отдельных его частей – кренов, относительных перемещений и деформаций;
- параметров колебаний здания с оценкой собственных частот и ускорений.

Контроль перечисленных параметров может осуществляться при помощи следующих видов инструментальных наблюдений:

- режимные и автоматизированные геодезические наблюдения за деформациями грунтового массива и конструкций здания: высокоточное нивелирование, лазерное сканирование, системы автоматизированных тахеометров и спутниковой геодезии;
- скважинные инструментальные наблюдения за вертикальными и горизонтальными смещениями грунтовой толщи: скважинные системы контроля осадков, инклинометрические системы, скважинные деформометры;
- режимные и автоматические наблюдения за уровнем грунтовых вод (УГВ) в скважинах, инструментальный контроль порового давления жидкости и режима глубоких водоносных горизонтов: различные модификации измерителей УГВ (резистивные, магнитные, оптические и др.), скважинные пьезометры и датчики порового давления;
- инструментальный контроль давления на грунт в основании сооружения, а также бокового давления грунта на конструкции подземной части здания: датчики и секции давления на грунт, мессдозы, анкерные системы давления;
- инструментальные измерения параметров НДС строительных конструкций: тензометрические датчики относительной деформации, датчики напряжений;
- инструментальные наблюдения за отклонением здания от вертикали и контроль смещений конструктивных элементов относительно друг друга: датчики наклона, лазерные дальнометры и аналогичные оптические системы, датчики линейных перемещений;
- сейсмометрические наблюдения за параметрами колебаний конструкции зданий: акселерометры, велосиметры, датчики крутильных колебаний.

При создании полноценной системы мониторинга высотного здания следует отдавать предпочтение инструментам, работающим в автоматическом режиме, что позволяет получить значительно больший объем информации, собрать данные с заданной детальностью по времени и исключить влияние ошибок оператора.

Для подбора составляющих системы мониторинга приведен обзор существующих инструментов мониторинга конструкций и грунтового массива

основания и дана их классификация. Показано, что основные направления развития средств мониторинга высотных зданий в зависимости от задач, которые они решают, можно разделить на четыре группы:

1. оборудование для контроля параметров напряженно-деформированного состояния строительных конструкций;
2. оборудование для контроля изменения пространственного положения объекта и структурной целостности важнейших элементов и сочленений;
3. оборудование для контроля параметров состояния грунтового массива в основании и зоне влияния здания;
4. оборудование для мониторинга характеристик колебаний конструкции здания.

В обзоре рассмотрены все группы инструментов мониторинга, приведены технические характеристики датчиков, в том числе точности измерений, отмечены существенные преимущества и недостатки использования того или иного оборудования. Отметим, что подобный обзор составлен впервые и уже востребован.

Одним из самых важных шагов в проектировании систем мониторинга высотных зданий является разработка схемы расстановки измерительного оборудования. В большинстве случаев выбор оптимальной схемы определяется путем так называемой «экспертной оценки» параметров конструкций здания и грунтового массива и основан на личном опыте составителя проекта. Существует несколько запатентованных способов расстановки датчиков, но они исходят из конфигурации объекта, а не из особенностей конструктивного решения (т.е. распределения НДС). Альтернативный способ расстановки оборудования в системе инструментального мониторинга, предложен нами (патент RU 2365895).

Выбор схемы расстановки оборудования в этом способе основывается на статистическом анализе расчетных параметров напряженно-деформированного состояния конструкций и грунтов основания здания $\{\Psi_i\}$, это могут быть: осадки грунта, нагрузки на грунт, напряжения в конструкциях. Датчики размещаются в точках, характеризующихся значениями, равными $\langle \Psi_i \rangle$ и $\langle \Psi_i \rangle \pm \delta \Psi_i$, где $\langle \Psi_i \rangle$ и $\delta \Psi_i$ – соответственно, среднее (либо медианное) значение и стандартное отклонение, полученные при статистическом анализе расчетных полей – величин в узлах сетки модели здания, рассчитанной, например, по методике конечных элементов. Существенно, что способ может легко быть превращен в алгоритм расстановки датчиков и стать блоком строительной программы проектирования. Поясним это, на примере выбора размещения оборудования в проекте системы мониторинга реального высотного здания в Москве (ул. Краснобогатырская).

На рис. 2 приведена гистограмма значений осадок под фундаментной плитой. Статистический анализ дает следующие величины: среднее значение $\langle Z_i \rangle = 139$ мм; стандартное отклонение $\delta Z_i = 5,8$ мм; показаны полосы значения осадок: «малые» - $Z_i \geq 133,2$ мм и «большие» $Z_i \leq 144,8$ мм. Затем из всей совокупности узлов конечно-элементной расчетной схемы были выбраны узлы, в которых получены соответствующие значения Z_i , которые образовали соответствующие зоны (рис. 3). Исходя из конфигурации зон, получаем минимальное количество скважин - по одной в каждой из зон с большими, малыми и средними значениями осадок. Конкретное

местоположение скважин определяется архитектурным решением и требованиями по безопасности оголовков скважин. В данном примере удалось расположить скважины вдоль прямой, тем самым получен своеобразный профиль осадок. Аналогично величине осадки для других расчетных величин, характеризующих НДС грунта и фундаментной плиты: вертикальных (R_z) и горизонтальных (N_x, N_y) нагрузок, строились гистограммы и были получены зоны малых и больших значений. Принцип размещения датчиков - тот же, но количество точек измерений больше (для давления - по 2 на каждый тип зон, для тензометрических датчиков - по 3 точки с парами датчиков, установленными в направлениях X,Y (рис. 4-5).

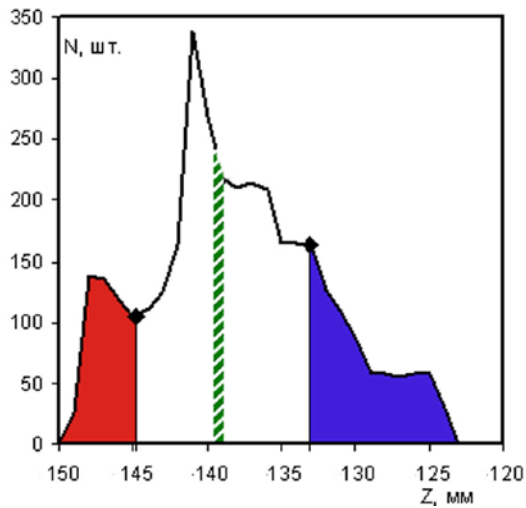


Рис. 2. Распределение (гистограмма) величин осадки (Z) под фундаментной плитой высотного здания, вертикальной линией показано среднее значение, цветом - $\langle Z_i \rangle$ - полосы $\langle Z_i \rangle \pm \delta Z_i$.

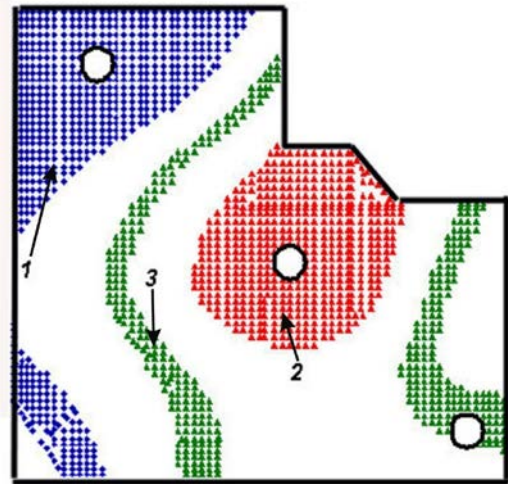


Рис. 3. План фундаментной плиты с положением зон, определяющих расстановку датчиков осадок, штриховкой показаны - зоны: 1- меньших, чем $\langle Z_i \rangle - \delta Z_i$, 2 - больших $\langle Z_i \rangle + \delta Z_i$ и 3 - равных $\langle Z_i \rangle$, кружки - скважины измерения осадок.

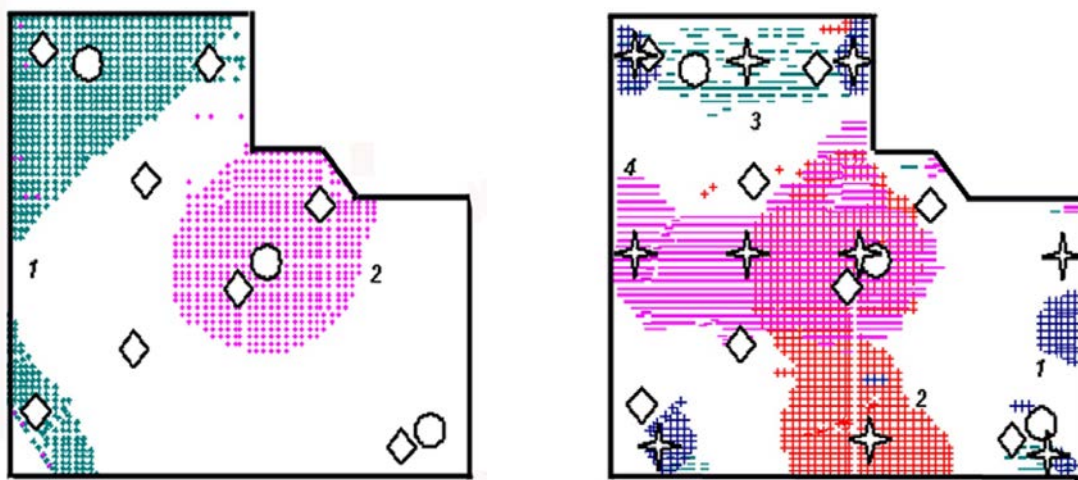


Рис. 4. План фундаментной плиты с положением зон, определяющих расстановку датчиков: слева - давления на грунт, штриховка: 1 - R_{zi} меньше $\langle R_{zi} \rangle - \delta R_{zi}$, 2 - R_{zi} больше $\langle R_{zi} \rangle + \delta R_{zi}$; справа - тензометрических датчиков, штриховка: 1 - зоны N_{xi} меньше $\langle N_{xi} \rangle - \delta N_{xi}$, и 3 - N_{yi} меньше $\langle N_{yi} \rangle - \delta N_{yi}$, 2 - N_{xi} больше $\langle N_{xi} \rangle + \delta N_{xi}$, 4 - N_{yi} больше $\langle N_{yi} \rangle + \delta N_{yi}$; кружки - скважины измерения осадок, ромбы - датчики давления на грунт, кресты - тензодатчики по координатам X, Y .

Используя описанный способ расстановки датчиков, были созданы проекты инструментального мониторинга нескольких высотных зданий в г. Москве, описанные в диссертации.

Выводы главы 2:

1. Высотное здание и геологическая среда в его основании представляют собой сложную и малоизученную динамическую систему, в которой значительные по величине нагрузки передаются как от здания на грунт, так и наоборот. Для обеспечения безопасности здания инструментальные наблюдения должны проводиться одновременно за несколькими параметрами, характеризующими систему.

2. Полноценная система мониторинга должна включать набор инструментов, измеряющих разные физические величины, характеризующие состояние конструкций и грунтов основания. Это позволяет создать достоверную комплексную картину процессов при сопоставлении данных, получаемых разными инструментами и методами.

3. Контроль наиболее важных характеристик должен проводиться параллельно инструментами и методами разных типов для обеспечения достоверности и надежности получаемых данных. Важно, чтобы один из методов был традиционным, например, измерение осадок стандартными геодезическими методами, а другой - новым и более информативным (например, скважинные измерения).

4. Зарубежный и отечественный опыт создания систем мониторинга показывает, что наиболее детальные наблюдения должны проводиться для подземной части здания и грунтов основания, так как именно взаимодействие грунтов, фундаментной плиты и конструкций стилобата являются ключевыми для безопасности здания.

5. Предложен способ выбора схемы расстановки датчиков в системе мониторинга, основанный на алгоритме статистического анализа параметров НДС строительных конструкций и грунтов основания, получаемых в расчетных моделях при проектировании.

В главе 3 описан опыт создания системы инструментального мониторинга корпуса Д-1 высотного комплекса «Континенталь» в Москве. Рассмотрены важные методические аспекты, касающиеся установки измерительного оборудования, обработки полученных результатов и разработки регламента проведения измерений в процессе строительства и эксплуатации объекта. Существенно, что система мониторинга этого здания является первой системой инструментального мониторинга такого уровня не только в России, но и в мире, поэтому представленный опыт (как удачных, так и неудачных конструктивных и методических решений) уникален.

Высотный корпус «Континенталь» - 49-эт. здание высотой 156 м, выполненное по каркасно-стеновой схеме из монолитного железобетона, фундаментная конструкция – плита высотой 5 метров. Высотный корпус объединен с соседними 4-х уровневый подземным стилобатом размером - 110x120 м, ограждение котлована – стена в грунте.

Геологический разрез площадки строительства изучен до глубины 40 м. Верхняя часть разреза (до глубины 20-25м) сложена в основном переслаиванием аллювиальных ($a\Pi^2$ и $a\Pi^1$) и флювиогляциальных ($f\Pi^{0-d}$) средне-позднечетвертичных песков разной плотности, с редкими прослоями и линзами супесей и суглинков. Непосредственно под ними располагается мощный водоупор (около 10 м) из плотных верхнеюрских глин

оксфордского и келовейского ярусов (J_{3ox} , J_{3cl}), верхне-каменноугольные глины (C_{3vs}) и известняки мячковско-подольского горизонта (C_{2mc-pd}).

С момента заложения котлована были начаты работы по созданию двух независимых схем мониторинга: традиционного геодезического и экспериментальной системы инструментального мониторинга, последняя состоит из трех основных блоков:

- геотехнического мониторинга грунтового массива основания, включающий: контроль давления на грунт в основании фундаментной плиты, скважинные измерения осадок грунтов (интегральных и послойных) и порового давления в грунте;
- мониторинга состояния строительных конструкций, который предполагает контроль изменения НДС основных несущих конструкций фундаментной плиты, стилобатной части и первого этажа здания;
- мониторинга собственных частот колебаний здания сейсмометрическими методами для интегральной оценки состояния конструкции здания в целом.

Все три блока объединены в единую систему с центральным пунктом регистрации, сбора и обработки данных. Принципиальная блок-схема системы мониторинга объекта представлена на рис. 5.



Рис. 5. Блок-схема системы инструментального мониторинга 49-эт. корпуса «Континенталь»

Методики установки датчиков в каждом блоке мониторинга, основные трудности и ошибки, возникающие в процессе монтажа системы, подробно описаны в работе. Рассмотрены недостатки и преимущества различных схем установки всех типов датчиков. Наиболее ярким примером влияния условий установки на достоверность

показаний является монтаж датчиков давления на грунт. Сложность состояла в том, что проектировщики отказались от установки датчиков непосредственно в грунтовую подготовку, иначе была бы нарушена целостность гидроизоляции при прокладке кабелей от датчиков к центральному пункту регистрации. Поэтому все датчики были установлены на поверхность тонкой бетонной подготовки в основании фундаментной плиты под нижним слоем арматурного поля.

При такой схеме установки существует опасность попадания бетона под нижнюю опорную поверхность датчика в процессе заливки плиты. Тогда датчик оказывается замурованным в своеобразный «карман» из бетона, и его показания отражают некоторое распределение напряжений в этой точке плиты, но не величину давления на грунт. При установке датчика в приямок в грунтовой подготовке этой проблемы не возникает, так как давление от сооружения передается на чувствительную поверхность датчика тонким слоем песка, и непосредственного контакта с бетоном нет.

Несмотря на недостатки в схеме установки датчиков, был получен ряд методически важных результатов. После статистической обработки набора данных, собранных в процессе возведения здания, стало очевидно, что показания нескольких датчиков даже на качественном уровне не соответствуют ни расчетным, ни возможным реальным значениям давления на грунт. Рассматривая грунтовый массив как упругое тело и основываясь на законе Гука, можно предположить, что деформация грунта пропорциональна нагружению. В ряде лабораторных и натурных исследований экспериментально подтверждено, что при деформации грунтов осадка пропорциональна возрастанию нагрузки (*Краев, 2008, Шеменков, 2003*). Таким образом, для анализа работоспособности датчиков были построены диаграммы разброса (графики соответствия) значений давления на грунт величинам осадки здания. Анализируя полученные графики, были выделены две группы датчиков. Показания датчиков первой группы линейно увеличиваются с ростом осадки - это дает основание предполагать, что, несмотря на «неправильную» схему установки, полученные результаты отражают реальную картину взаимодействия здания с грунтом, но с поправочным коэффициентом, который высчитывается из графика. Показания датчиков второй группы характеризуются произвольным разбросом, т.е. на рассматриваемом этапе возведения они работают неудовлетворительно.

Для проверки влияния условий установки на достоверность показаний датчиков давления на грунт был сделан эксперимент при монтаже системы мониторинга на другом высотном здании (ул. Дыбенко). Была установлена пара датчиков: один (L071015) на поверхность бетонной подготовки, а второй (L071009) «правильно» - в приямок в грунтовой подготовке с последующей засыпкой приямка песком (рис. 6).

Изменение давления в процессе возведения здания (рис. 6) показывает, что датчик, установленный на подбетонку, дает заниженные значения давления, причем по мере роста этажности разница в показаниях меняется. В начале строительства скорость нарастания давления для «правильного» датчика значительно больше, т.е. показания в 3-4 раза выше чем датчика на подбетонке. С приостановкой строительства скорость изменения давления по обоим датчикам выравнивается. Отметим, что рост давления не прекращается. После возобновления возведения отмечается согласованный рост значений по обоим датчикам, но показания датчика, установленного «правильно», выше. Таким образом, продемонстрировано, что условия установки датчиков давления

на грунт сильно влияют на результаты измерений, особенно на начальных стадиях строительства.

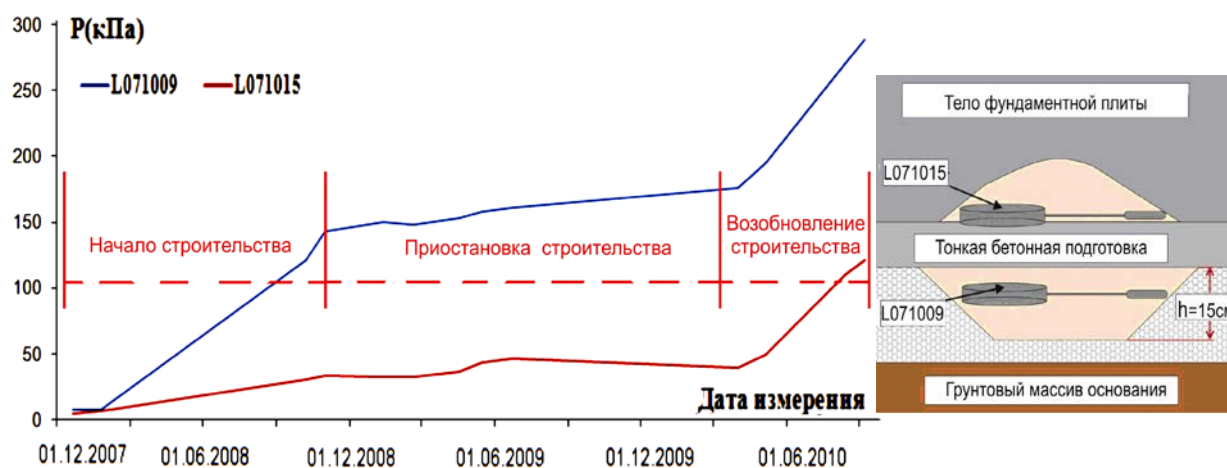


Рис. 6. Графики изменения давления на грунт для разных стадий строительства высотного дома по ул. Дыбенко (слева) и схема установки датчиков (справа)

С увеличением этажности здания (ростом нагрузки) датчик, установленный некорректно, начиная с некоторого порогового значения, «включается» в работу. Важно, что при больших нагрузках (завершение строительства) данные датчиков, установленных по-разному, отличаются постоянным «передаточным коэффициентом». Во-первых, это не влияет на картину временного хода относительных величин флуктуаций (в %), существенных для безопасности здания. Во-вторых, коэффициент можно вычислить исходя из данных по осадкам (как показано выше).

В следующем разделе описаны интересные в методическом плане моменты, в том числе связанные с выбором «нулевых» значений и отличающиеся для разных датчиков, формулы пересчета показаний датчиков в реальные физические величины.

Важным вопросом, являющимся предметом многочисленных дискуссий, является выбор регламента проведения наблюдений. В нормативных документах нет согласованного подхода к временной схеме измерений. Существенно, что процессы в реальных средах – горных породах и строительных материалах – зависят как от величины нагружения, так и от его скорости (*Садовский и др., 1981*), поэтому мониторинг при строительстве и при эксплуатации здания должен иметь разные интервалы в зависимости от стадии. Основываясь на опыте проведения измерений для разных этапов строительства комплекса «Континенталь», нами был разработан оптимальный регламент для наблюдений. Приведем пример выбора шага наблюдений для контролируемого параметра - давления на грунт.

При возведении высотного корпуса шаг измерений позволил получить картину вариаций давления для разницы по высоте здания в 2 эт. и временного интервала в 1,5 месяца. Для того чтобы характеризовать изменения давления, были выбраны коэффициенты корреляции (K) между наборами значений, получаемых со всех датчиков, для любых двух циклах измерений. Перебор пар наблюдений – не только соседних по времени, но и с интервалами через один, два и более циклов, позволяет увеличить статистику. Существенно, что оценка K реагирует не на общее увеличение давления, а на изменение мозаики полей давления. Например, при возникновении

аномальной зоны K будет уменьшаться, причем значение будет зависеть от контрастности флуктуации.

На рис. 7 показаны значения K в зависимости от разности в этажности и от временного интервала при возведении высотного корпуса. При частом сборе данных (менее 5 эт. или 2 месяцев) значение K близко к 1, поэтому, исходя из физики процессов, в этом интервале не следует ожидать заметной динамики грунтового массива на значительных участках под плитой. При существенно большем шаге (более 10 этажей или полгода) возможны и работа массива как единого целого, так и флуктуации, связанные с перераспределением давления по площади фундаментной плиты. Анализ рис. 7 показывает, что для того, чтобы заметить существенные изменения состояния объекта, интервалы между актами мониторинга должны быть не более 2-3 месяцев или 5-6 этажей при возведении высотного здания.

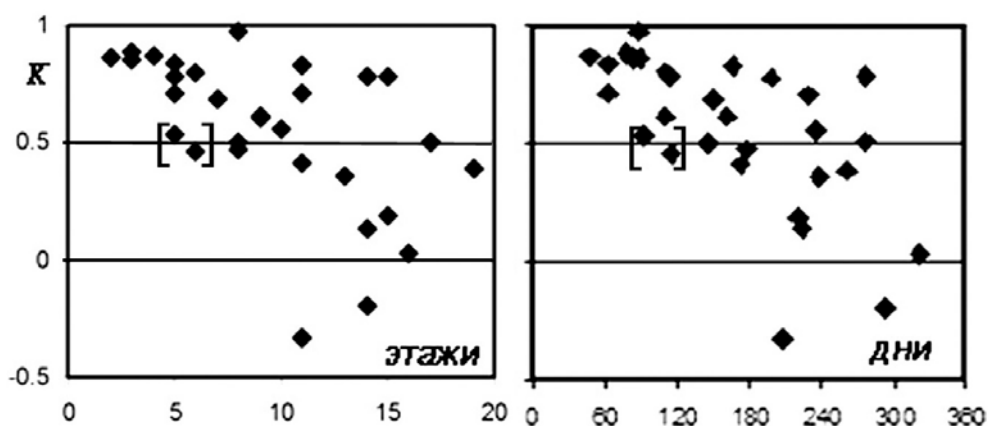


Рис. 7. Коэффициенты корреляции полей давлений на грунт в зависимости от разности, выраженной в возведенных этажах, и от временного интервала между измерениями

Опыт проведения измерений в «ручном» режиме и статистический анализ результатов показали, что временной интервал между циклами мониторинга в 1 месяц не является обременительным, соответственно на начальных этапах строительства и до запуска работы автоматической системы мониторинга необходимо придерживаться временной схемы с интервалами 1-2 месяца. При приостановке строительства ожидать активной динамики развития процессов сложно, поэтому тут временные интервалы можно без существенного ущерба информативности увеличить до 3 месяцев.

При наладке автоматической системы мониторинга были опробованы различные варианты работы системы - с временными интервалами от 1 мин до 10 час. Анализ характерных временных вариаций измеряемых величин показал, что оптимальным является шаг опроса датчиков в 6 часов, который позволяет оценить вариации параметров состояния конструкций и грунтов вплоть до влияния лунно-солнечных приливов, суточного хода, но не приводит к образованию избыточного объема данных.

Выводы главы 3:

1. Впервые создана автоматическая система мониторинга высотного здания, включающая комплекс датчиков и методик, которые позволяют следить за состоянием конструкций и грунтов основания, а также их взаимодействием. В настоящее время эта система является уникальной как в России, так и в мире.

2. Детально рассмотрен опыт установки датчиков разных типов, выявлены основные ошибки и пути их устранения. Для датчиков давления на грунт представлены результаты подробного изучения влияния условий установки на получаемые данные.

3. На основании статистического анализа результатов наблюдений в процессе строительства проведена оценка оптимальных временных интервалов режимных наблюдений при возведении высотного здания. Предложен регламент проведения измерений при работе системы в автоматическом режиме для периода эксплуатации.

В главе 4 рассмотрены результаты инструментального мониторинга высотного корпуса «Континенталь». Проведен анализ полученных данных, сопоставление их для различных видов наблюдений и сравнение экспериментальных результатов с расчетными параметрами конструкций сооружения и грунтов основания. При изучении взаимодействия здания с грунтом основания и возможности развития опасных процессов в конструкциях и грунтах, основное внимание уделено трем направлениям:

- геологическим процессам в грунтах основания, выявляемым при анализе независимых видов измерений: вертикальных деформаций (осадки) грунта и давления на грунт, и сопоставлении результатов;
- вариациям НДС несущих конструкций, отображаемых тензometрами и изменением собственных частот колебаний;
- связи геологических процессов в грунтах и НДС конструкций, проявляющихся при сопоставлении временного хода параметров.

На рис. 8 показана связь осадки (по геодезии) и давления на грунт в процессе строительства для трех датчиков, расположенных по диагонали фундаментной плиты, причем №2 – под высотной частью.

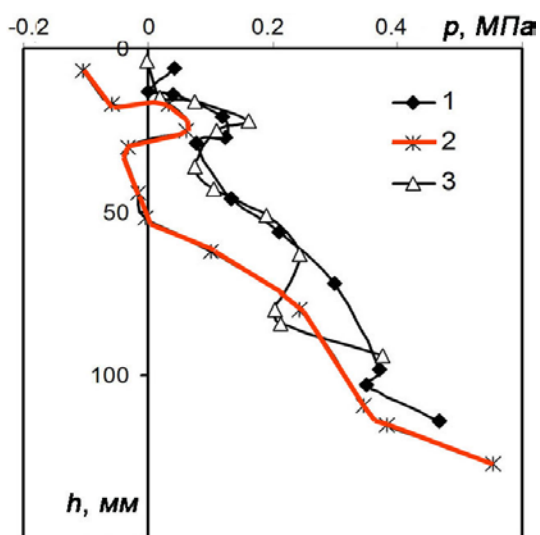


Рис. 8. Сопоставление величин давления на грунт и осадки для точек (1-3) по диагонали фундаментной плиты высотного корпуса «Континенталь» в процессе строительства

Видно, что нарастание величин не плавное, а наблюдаются своеобразные «бухты» - осадка растет без изменения давления или наоборот. Рассмотрены возможные механизмы этого явления, исходя из пространственной картины проявления «бухт», обзора возможных опасных процессов в основаниях зданий (гл.1) и журнала производства работ на объекте. Выявлена наиболее вероятная причина – частичное размыкание «стены в грунте», проникновение грунтовых вод и последующая суффозия. Существенно, что после ликвидации причины, отмечается относительное «восстановление» среды. Графики показывают, что для понимания природы происходящих в грунтах изменений, целесообразно разделить вариации давления во времени на трендовую и флуктуационную составляющие.

Наиболее информативным параметром, отражающим совместную работу высотного здания и грунтового массива, а также геологические процессы в грунтах являются пространственно-временные вариации давления на грунт. Для анализа

изменения этого параметра были построены два типа полей давления: значений тренда и флуктуаций для циклов измерений на этапах строительства от -4 (котлован) до 48 эт.

Анализ этих полей показывает, что трендовые значения нарастают по мере возведения здания, но происходит медленное перераспределение давления на грунт по площади фундаментной плиты. Существенно, что на стадии строительства подземной части и первых надземных этажей (от -4 до 6 эт.) выделяется зона, где нагрузка практически отсутствует. Более того, показания некоторых датчиков имеют отрицательные значения (относительно «нуля» при установке), т.е. наблюдается «отпор» грунтового массива (явление разгрузки), связанный со снятием литостатического давления при разработке котлована. С ростом этажности поле давления выравнивается, но после завершения возведения конструкций высотной части приобретает несколько асимметричный вид, что хорошо согласуется как с экспериментальными полями осадок, так и с нашим прогнозом изменения литостатического давления (гл. 1). Анализ полей флуктуаций давления позволяет оконтурить зону активизации суффозии и следить за ее «залечиванием».

После завершения монтажа основных монолитных конструкций и запуска автоматической системы регистрации, строительство было приостановлено более чем на год – с января 2009 г. по март 2010 г. Результаты мониторинга за этот период времени позволили увидеть, что даже при прекращении роста внешней нагрузки происходят существенные изменения в грунтах под фундаментной плитой. Вариации давления на грунт по площади плиты распределены крайне неравномерно. Размах временных вариаций давления на грунт в отдельных точках фундаментной плиты в течение года может составлять от 5-10 до 30-40% от значений, достигнутых на момент остановки строительства. Это является уникальным результатом, полученным впервые. Кроме того, величина и знак временных вариаций не соответствуют существующим представлениям о совместной работе конструкций и грунтов.

Сопоставление временного хода полей давления и НДС в плите и конструкциях стилобата показывает, что на контакте здания с грунтом происходит согласование процессов в грунтовом основании и конструкциях, протекающих с разной скоростью и разнонаправленных. Изменение давления на грунт может объясняться как сезонными изменениями гидрогеологического режима и перераспределением НДС в грунтовом массиве, так и изменениями НДС самой плиты, связанными с сезонными температурными вариациями и продолжением процесса перераспределения плитой нагрузки от конструкций высотной части.

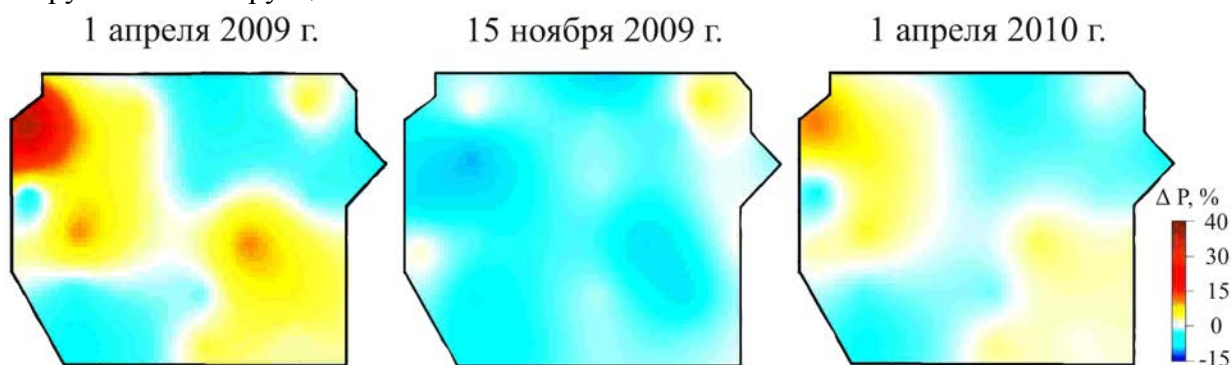


Рис.9. Поля флуктуаций давления на грунт под фундаментной плитой в период приостановки строительства высотного комплекса «Континенталь»

Существенно, что основные изменения давления для всех датчиков происходят с годовой периодичностью (рис. 9). Видно, что ситуация в целом стабилизируется и возвращается с незначительными изменениями в некоторое «устойчивое состояние», характерное для конкретного времени года. Это свидетельствует о том, что «изолированный» грунтовый массив - отрезанный стеной в грунте и не испытывающий влияние роста вертикальной нагрузки, способен перерабатывать воздействие внешних факторов. Существенно, что этот же результат подтвержден данными, полученными и на другом высотном объекте (ул. Дыбенко).

Благодаря тому, что датчики давления имеют встроенные датчики температуры (для возможности введения температурной поправки в значения давления) были получены интересные данные по изменению температурного режима на контакте грунта и плиты (рис. 10) при строительстве (возведении и приостановке). Ход кривых показывает наличие годовых вариаций температуры, но новым является тот факт, что присутствует тренд снижения температуры в основании фундаментной плиты, величина изменения - около $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$.

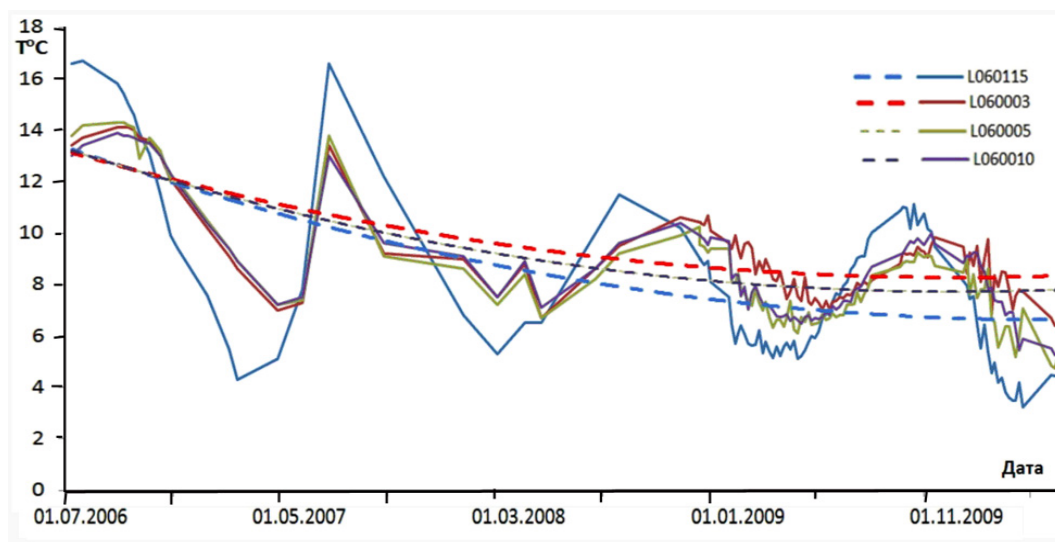


Рис. 10. Изменение температуры в грунтах под фундаментной плитой в процессе и после завершения строительства; сплошные линии - данные разных датчиков, пунктир - полиномиальное сглаживание

Для описания развития деформации грунтового массива были построены поля осадки грунта для разных этапов строительства по данным геодезических измерений. Анализируя изменение этих полей, можно отметить, что происходит постепенное нарастание осадки в процессе возведения здания. Поле распределения осадки грунта по площади существенно более равномерное, чем поля давления на грунт.

Интересные выводы позволил сделать совместный анализ результатов геодезических наблюдений и скважинных измерений послойных осадок. Геодезический мониторинг дает интегральное значение, отвечающее за осадку суммарно всей колонны грунта до горизонта забивки репера и не только в самой точке установки марки, но и в некоторой ее окрестности. Скважинные данные, особенно дифференциальных осадок, – локальные и отражают деформацию конкретного интервала разреза.

Построив профили осадок по диагональному сечению фундаментной плиты для четырех циклов измерений, было получено, что геодезический мониторинг демонстрирует постепенное опускание плиты, причем отчетливо проявляется высотная

часть по большим значениям осадки. Суммарные послойные осадки дают более интересную и динамичную картину, отражающую «тонкие» эффекты, которые не выявляются по результатам геодезических наблюдений: отпор грунтов на начальной стадии строительства, опускание в массив деформированной зоны, сильное уплотнение по краям плиты с выпором посередине для промежуточной стадии строительства. На момент завершения строительства осадка по скважинным данным достаточно хорошо согласуется с геодезическими наблюдениями, но характеризуется большими значениями, что может указывать на незавершенность процесса осадки здания.

Анализ результатов мониторинга напряжений в конструкциях также показывает наличие временного хода вариаций НДС, причем подобного для всех простых конструкций (пилонов) 1 эт. здания. После приостановки строительства отчетливо выделяется годовой цикл с относительной разгрузкой зимой и дополнительным сжатием летом. Существенно, что, как и в случае с давлением на грунт, ситуация приходит к исходному состоянию спустя год. Основная причина этих вариаций – сезонные температурные эффекты. Размах временных изменений НДС в пилонах составляет ~15% от значений для начала этапа. Отметим, что подобные данные приводятся впервые. Для НДС в конструкциях временные вариации по существу сопоставимы с запасом, заданным при расчетах.

Для оценки совместной работы конструкций нижней части системы здание-грунт, рассмотрено диагональное сечение, включающее следующие элементы: грунт, конструкции первого и всех подземных этажей до поверхности фундаментной плиты. Как мера взаимосвязи использовалось сопоставление временного хода параметров, характеризующих соответствующие элементы. Для ключевых узлов рассмотрено сопоставление с расчетными моделями при разной высоте здания.

Полученные результаты показывают, что нагрузка от верхних этажей, передаваемая пилонами первого этажа в конструкции стилобата, распределяется неравномерно по вертикали и может «уходить» от вертикальной оси, причем если пилоны испытывают значительные деформации сжатия, то стены, расположенные по обе стороны от пилон, могут испытывать деформации разных знаков. Таким образом, картина распределения напряжений в нижней части здания очень сложна и с трудом поддается интерпретации (и тем более прогнозу) – нет отчетливой связи при передаче нагрузки от одних конструкций к другим, а закономерности, полученные в расчетной модели, могут не соблюдаться.

Сопоставление результатов мониторинга давления на грунт, напряжений в фундаментной плите и стеновых конструкциях стилобата, показывает, что формирование НДС конструкций на этих уровнях определяется не только перераспределением нагрузки от вышележащих конструкций, но и динамикой грунтов основания. Получается, что фундаментная плита и стеновая система подземных этажей служит своеобразным демпфером, перерабатывающим нагрузку сверху от конструкций высотной части здания и снизу - изменения в НДС грунтовой толщи.

Отдельным блоком анализа полученных результатов является сравнение экспериментальных данных с расчетными значениями контролируемых параметров, полученных в компьютерной модели. Сравнение расчетных и экспериментальных значений давления на грунт (построение диаграмм разброса и поле отношений значений) показывает, что для стадии строительства от 15 до 22 эт. наблюдается

хорошее согласование экспериментальных данных с расчетными, и даже имеется своеобразный «запас прочности». На стадиях возведения при этажности меньшей 8 и большей 22 эт. расчет плохо соответствует реальности. На начальном этапе строительства отличие объясняется тем, что в расчетной модели не учтен эффект разгрузки («отпора» грунта), возникающий в массиве из-за снятия литостатического давления при разработке котлована. При завершении основных конструкций на полях отношений экспериментальных и расчетных значений давления на грунт выделяется зона, в которой реальные величины значительно превышают расчетные. Существенно, что расположение этой зоны согласуется с зоной пониженных значений давления на ранних этапах строительства (см. выше). В этой зоне была нарушена технология производства работ. Таким образом, несмотря на то, что в дальнейшем произошло «залечивание» этой зоны, она все равно осталась ослабленной. Отличие расчетов от реальной ситуации, по-видимому, объясняется тем, что при моделировании обычно не учитываются изменения свойств грунтов в процессе строительства, проявляющиеся особенно ярко при нарастании нагрузки. Это подтверждается и сравнением реальных и экспериментальных значений осадок, которое показывает, что для этапа возведения 11 эт. имеется «запас» расчета относительно эксперимента, для 22 эт. - значения практически совпадают, а для 48 эт. здания реальная осадка в отдельных точках превосходит расчетную на ~20%, но все же меньше максимальной проектной.

Экспериментальные значения НДС в конструкциях здания достаточно хорошо согласуются с расчетными на качественном уровне для всех стадий строительства. В то же время, расчетные значения систематически больше, чем реальные, что связано с коэффициентами запаса, вводимыми в модель при проектировании. Суммарный запас составляет примерно 10% от нагрузок, достигнутых при возведении основных несущих конструкций.

Как уже отмечалось, развитие процессов в грунтах зависит не только от величины нагружения, но и от скорости нарастания нагрузки, поэтому важно учитывать не только абсолютные значения измеряемых величин, но и скорости их изменения. Для этого использовался анализ полученных результатов мониторинга с помощью автоструктурной функции, главным преимуществом применения которой является возможность выявить наличие трендов и оценить скорости достижения устойчивых значений параметров (Невский и др. 1977, Аргучинцева, 2007).

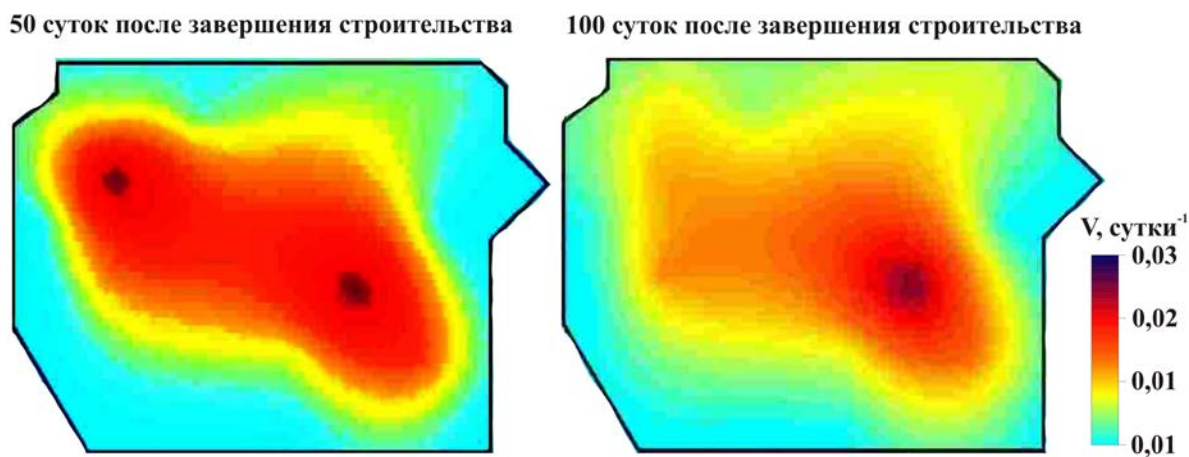


Рис. 11. Поля распределения скоростей «достижения стабильности» давления на грунт после завершения строительства

Для временного хода давления на грунт в течение года после завершения строительства практически для всех датчиков отмечена стабилизация показаний, но она достигается с разной скоростью. Поля скоростей «достижения стабильности» давления на грунт (рис. 11) показывают, что эти скорости распределены по площади крайне неравномерно. В отдельных точках даже при отсутствии роста внешней нагрузки наблюдаются значительные скорости нарастания давления. Существенно, что большие скорости наблюдаются не только под высотной частью здания. Наибольшими скоростями изменения давления характеризуется все та же диагональная зона, где произошли наибольшие изменения в процессе строительства. Немаловажно, что со временем скорости изменения давления в пределах стены в грунте выравниваются, что также согласуется с полученными выше данными.

Выводы главы 4:

1. Грунтовый массив в основании высотных зданий представляет собой сложную динамичную систему, в которой даже при постоянной нагрузке и отсутствии возможности бокового расширения (из-за ограждающих конструкций «стены в грунте») могут развиваться различные типы геологических процессов, характеризующиеся разным временным ходом и анизотропией по площади. При отсутствии роста нагрузки наблюдаются годовые (сезонные) вариации параметров грунтов и простых конструкций нижних этажей здания. Скорости протекания процессов в разных частях грунтового массива под фундаментной плитой значительно отличаются.

2. Нарушения в технологии проведения строительных работ (например, устройства ограждающих конструкций и грунтоподготовки) вызывают яркие изменения параметров грунтов в основании зданий. Несмотря на это, грунтовая толща имеет свойство «залечивать» возникающие аномальные зоны и перераспределять растущую нагрузку от здания.

3. Принятая в строительной практике теория работы плиты в качестве «жесткого штампа» не подтверждается результатами инструментальных наблюдений. По полученным данным отдельные части конструкции фундаментной плиты испытывают значительные деформации различных знаков.

4. Формирование НДС подземной части здания определяется перераспределением нагрузки от вышележащих конструкций высотной части и процессами в грунтах основания. Фундаментная плита и стеновая система подземных этажей являются основной зоной взаимной переработки этих воздействий, поэтому здесь очень сложно предсказать места концентрации наибольших вариаций напряжений.

5. Изменение температуры в основании фундаментной плиты помимо сезонных вариаций имеет устойчивый многолетний тренд к понижению со скоростью приблизительно 0,5 °С/год.

6. Результаты наблюдений показывают, что для ряда параметров: давления на грунт, осадки и напряжений в конструкциях, для высотных зданий экспериментальные значения могут заметно превышать расчетные значения, полученные по данным компьютерного моделирования.

Заключение. Экспериментальные исследования параметров грунтового массива основания высотных зданий, а также происходящих в нем геологических процессов и

сравнение с расчетными моделями позволяют сделать ряд существенных выводов, отраженных в сформулированных защищаемых положениях. Эти положения основаны на следующих результатах, полученных в работе.

1. Грунтовый массив в основании высотного здания представляет собой сложную динамическую систему дифференцированного строения и испытывает значительные воздействия статического и динамического характера. Существует целый ряд процессов, активизация которых непосредственно связана с влиянием строительства на вмещающий грунтовый массив. Эти процессы не относятся к «классическим» опасным геологическим процессам, не учитываются современными нормативными документами и, вследствие этого, не принимаются в расчет при проектировании.

2. При помощи достаточно простых вычислений можно до начала строительства составить прогноз последующего изменения геодинамической ситуации на стройплощадке, используя в качестве исходных данных материалы стандартных инженерно-геологических изысканий.

3. Комплексная система мониторинга высотного здания должна включать набор измерительных средств, позволяющих контролировать различные параметры грунтов и строительных конструкций (по возможности в автоматическом режиме). Совместный анализ данных различных типов наблюдений позволяет увидеть тонкие особенности протекания процессов на фоне интегральных трендовых изменений контролируемых параметров.

4. Наиболее детальные наблюдения должны проводиться для подземной части: нижних этажей здания и грунтов основания, т.к. именно взаимодействие грунтов, фундаментной плиты и конструкций стилобата представляет собой самую сложную и малоизученную проблему, и тем самым, существенную для безопасности здания.

5. Выбор схемы расстановки и типов датчиков, используемых в системе мониторинга, должен определяться исходя из конструктивных особенностей здания, инженерно-геологических условий площадки строительства и анализа результатов расчета модели здания совместно с вмещающим грунтовым массивом. Предложен авторский способ расстановки оборудования в системе инструментального мониторинга, основанный на статистическом анализе параметров расчетных моделей.

6. Опыт создания реальной системы инструментального мониторинга высотного здания позволил выявить ряд существенных аспектов методики установки датчиков и влияния условий установки на достоверность получаемых результатов. Впервые был обоснован оптимальный регламент времени проведения измерений при мониторинге высотных зданий.

7. Установлено, что НДС грунтов основания испытывает яркие пространственно-временные изменения, как в процессе строительства, так и при его завершении или приостановке. При постоянной нагрузке флуктуации процессов в грунте имеют выраженную годовую цикличность, причем не происходит накопление этих флуктуаций во времени. Изменение температуры в основании фундаментной плиты имеет устойчивый тренд к понижению со скоростью $\sim 0,5$ °С/год.

8. Формирование НДС подземной части здания определяется перераспределением нагрузки от вышележащих конструкций высотной части и процессами в грунтах основания. Фундаментная плита и стеновая система подземных этажей являются

основной зоной взаимной переработки этих воздействий, поэтому здесь очень сложно предсказать места концентрации наибольших вариаций напряжений.

9. По целому ряду параметров: давлению на грунт, осадке и напряжениям в конструкциях, экспериментальные значения могут существенно превышать расчетные, полученные при компьютерном моделировании.

10. Современная отечественная нормативная база, регламентирующая проведение контроля грунтов основания и конструкций высотных зданий, недостаточно отражает потребности строительства и современные возможности проведения мониторинга.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. *Таракановский В.К., Капустян Н.К., Климов А.Н.* Инструменты и возможности мониторинга процессов в грунтах основания высотных зданий в Москве // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология.* №6. 2010 . С. 551-562.
2. *Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Таракановский В.К.* Исследование на натурных моделях процессов переработки блоковой средой внешних воздействий// *ДАН, т.431. №4.* 2010. С.542-546.
3. *Острецов А. В., Вознюк А.Б., Капустян Н.К., Сухин В.В., Таракановский В.К., Янович А.А., Соколов В.В.* Способ дистанционного контроля и диагностики состояния конструкций и оснований преимущественно инженерных сооружений // *Патент RU 2365895 С1 приоритет 11.03.2008.*
4. *Капустян Н.К., Сухин В.В., Таракановский В.К.* Опыт геотехнического мониторинга подземной части высотных зданий // *Материалы Международной конференции: Изменяющаяся геологическая среда: пространственно-временные взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов. Том 2, Изд-во Казанск. гос. ун-та, 2007. С. 51-54.*
5. *Вознюк А.Б., Капустян Н.К., Таракановский В.К.* Разработка алгоритмов размещения датчиков в высотных зданиях // *Будівництво в сейсмічних районах України. Будівельні конструкції. Вып.69, Киев, ДП НДИБК, 2008. С. 581-588.*
6. *Таракановский В.К.* Инструментальное оснащение геотехнического мониторинга высотных зданий // *Современные проблемы геофизики. Девятая Уральская молодежная научная школа по геофизике. Сборник материалов. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. С. 193-196.*
7. *Таракановский В.К., Вознюк А.Б., Сухин В.В.* Инструменты геотехнического мониторинга и опыт их применения для высотных зданий в Москве // *X Сергеевские чтения. Международный год планеты Земля: задачи геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Вып. 10. М.: ГЕОС, 2008. С. 488-492.*
8. *Вознюк А.Б., Капустян Н.К., Таракановский В.К., Климов А.Н.* Мониторинг в процессе строительства напряженно-деформированного состояния несущих конструкций и грунтов основания высотных зданий в Москве // *Будівельні конструкції. Вып. 73, Киев, ДП НДИБК, 2010. С. 461-467.*

9. Вознюк А.Б., Капустян Н.К., Таракановский В.К., Климов А.Н. Опыт инструментального мониторинга напряженно-деформированного состояния несущих конструкций и грунтов основания высотных зданий в Москве // Проблемы сейсмологии в Узбекистане. Том II, Ташкент, ИС АНРУз №7, 2010. С. 104-108
10. Капустян Н.К., В.К.Таракановский, А.Б.Вознюк, А.Н.Климов, А.В.Беспалова Опыт проведения геотехнического мониторинга высотного здания в Москве // Геотехнические проблемы мегаполисов. Том 4, М.:ПИ «Геореконструкция», 2010. С. 1252-1259.
11. Капустян Н.К. Таракановский В.К., Климов А.Н. Инструментальные исследования динамики процессов в грунтах оснований высотных зданий // Актуальные вопросы инженерной геологии и экологической геологии. М.: Изд. МГУ, 2010. С. 101-102.
12. Капустян Н.К. Таракановский В.К., Вознюк А.Б., Климов А.Н. Действующая система мониторинга высотного жилого здания в Москве // Предотвращение аварий зданий и сооружений: Сборник научных трудов. Вып. 9, Москва, 2010. С. 192-206.
13. Таракановский В.К. Обзор современных средств мониторинга состояния конструкций и грунтов оснований высотных зданий // Предотвращение аварий зданий и сооружений: Сборник научных трудов. Вып. 9, Москва, 2010. С. 243-262.

Таракановский Вячеслав Константинович
Инструментальное исследование грунтов и геологических
процессов в основании высотных зданий.
Автореферат дисс. на соискание ученой
степени кандидата технических наук
Подписано в печать .03.2011 Заказ №__
Формат
Отпечатано в Учреждении Российской академии наук
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН