УДК 624.131.1, 624.131.7 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-121-136

Анализ результата применения геотехногенного массива в сложных инженерно-геологических условиях города Екатеринбурга

Ольга Николаевна ОВЕЧКИНА*

ООО «Научно-изыскательский центр "СтройГеоСреда"», Екатеринбург, Россия

Аннотация

Актуальность. В связи с освоением новых территорий на окраинах города Екатеринбурга (микрорайонов Академический, Мичуринский, Солнечный и т. д.), а также застройкой в пределах заболоченных и подтопленных территорий, применяются новые технологии устройства фундаментов. Для предотвращения аварийных ситуаций и негативных последствий проявления инженерно-геологических процессов и явлений возведение и эксплуатацию любых зданий и сооружений необходимо вести в строгом соответствии с проектным решением. Поэтому наиболее актуальной проблемой при разработке проектных решений конструкций фундаментов зданий является обеспечение геотехнической и геомеханической безопасности. Выбор метода проектирования монолитной плиты на геотехногенном массиве требует особенно тщательных расчетов всех составляющих проекта. Несмотря на значительное количество уже существующих зданий, опыт изучения инженерно-геологических условий и их влияние на выбор технологии строительства, требуется особый подход при изучении каждой отдельной площадки строительства. Это связано как со сложными инженерно-геологическими условиями г. Екатеринбурга, сформировавшимися в результате длительной и сложной истории геологического развития Урала, так и с повышенной ответственностью проектируемых объектов капитального строительства.

Цель исследования – изучить компоненты природно-технической системы шестнадцатиэтажного аварийного дома, расположенного в г. Екатеринбурге, определить причины неравномерных деформаций грунтов в основании фундаментной плиты на геотехногенном массиве.

Методы исследования – изучение, анализ и обобщение инженерно-геологических, проектных и строительных материалов по аварийному дому; визуальное обследование конструкций здания; фотодокументация; геодезический мониторинг.

Результаты. Определены компоненты взаимодействия геологической среды и аварийного здания, выделены специфические грунты, определяющие неустойчивое состояние технической конструкции; рассмотрены этапы строительства, создания геотехногенного массива, укрепления грунтов и геодезические наблюдения за осадками; установлены причины неравномерных деформаций.

Выводы. Неравномерные осадки шестнадцатиэтажного дома связаны с изначально неудачным и рискованным проектом, который не соответствовал инженерно-геологическим условиям площадки строительства.

***Ключевые слова*:** природно-техническая система, специфические грунты, плитный фундамент, струйная цементация, геотехногенный массив.

Введение

Применение новых технологий проектирования и строительства в начале 2000-х гг. неизбежно столкнулось с проблемой неустойчивого взаимодействия фундаментов зданий и подстилающих грунтов. В сложных инженерно-геологических условиях Екатеринбурга, где региональным фактором являются элювиальные грунты, строители и проектировщики стремятся обеспечить высокую устойчивость и надежность возводимых зданий и сооружений. Большинство элювиальных, в том числе глинистых, грунтов Урала обладают высокой несущей способностью и могут служить надежным основанием сооружений. Но вместе с тем на новых осваиваемых территориях города применяют особые методы устройства фундаментов на слабых (сильносжимаемых) грунтах, что приводит к аварийным ситуациям и не обеспечивает безопасное функционирование этих зданий.

Под геотехногенным массивом понимается природно-техногенное образование, служащее нулевым циклом зданий и сооружений. Создается путем образования в природном массиве и на его поверхности комплекса искусственных элементов (например, инъекцией закрепляющих растворов), которые вместе с самим строением образуют единую пространственную структуру, обладающую необходимой несущей способностью [1].

При строительстве любых сооружений на грунтовом основании формируется некоторая система, которую принято называть природно-технической. *Природно-техническая система* (ПТС) есть целостная упорядоченная

✉oon5316@mail.ru
https://orcid.org/0009-0003-8087-5738

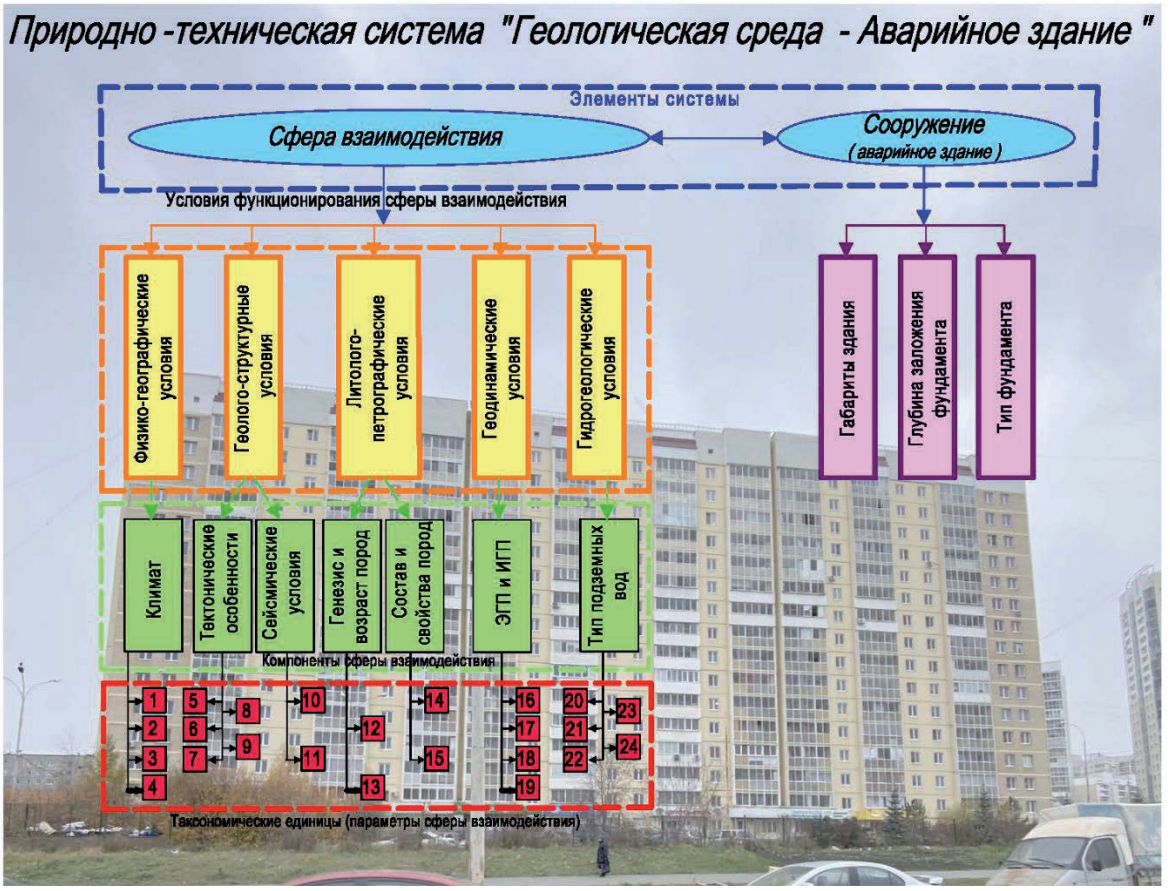


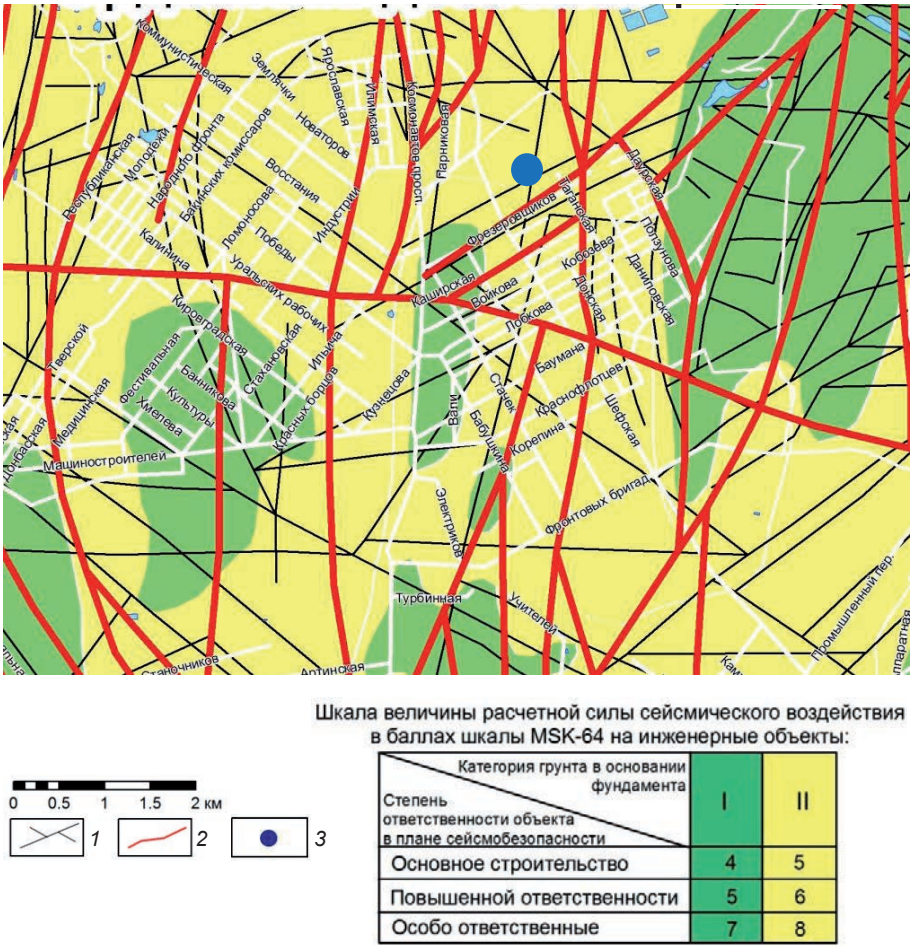
Рисунок 1. Схема природно-технической системы «Геологическая среда–Аварийное здание»; *климат*: *1* – количество атмосферных осадков; *2* – среднегодовая температура воздуха; *3* – сила и направление ветра; *4* – глубина промерзания грунтов; *тектонические особенности*: *5* – тип нарушений (пликативный, дизъюнктивный); *6* – возраст и характер тектонических нарушений; *7* – степень и характер трещиноватости; *8* – наличие зон дробления; *9* – наличие рассланцованности; *сейсмические условия*: *10* – сейсмические свойства горных пород; *11* – уровень подземных вод; *генезис и возраст горных пород*: *12* – генезис горных пород; *13* – возраст горных пород; *состав и свойства пород*: *14* – минеральный и гранулометрический состав горных пород; *15* – физико-механические свойства горных пород; *экзогенные геологические и инженерно-геологические процессы*: *16* – характер и тип геологических и инженерно-геологических процессов; *17* – условия развития геологических и инженерно-геологических процессов; *18* – размеры геологических и инженерно-геологических процессов; *19* – пораженность территории экзогенными геологическими процессами; *тип подземных вод*: *20* – условия залегания; *21* – гидравлические особенности водоносных горизонтов и комплексов; *22* – условия питания, разгрузки водоносных горизонтов и комплексов; *23* – химический состав подземных вод; *24* – режим подземных вод

Figure 1. Scheme of the natural-technical system "Geological environment–Emergency building"; climate: *1* – amount of atmospheric precipitation; *2* – average annual air temperature; *3* – wind strength and direction; *4* – depth of soil freezing; tectonic features: *5* – type of disturbance (plicative, disjunctive); *6* – age and nature of tectonic disturbances; *7* – degree and nature of fracturing; *8* – presence of crushing zones; *9* – presence of schistosity; seismic conditions: *10* – seismic properties of rocks; *11* – groundwater level; genesis and age of rocks: *12* – genesis of rocks; *13* – age of rocks; composition and properties of rocks: *14* – mineral and granulometric composition of rocks; *15* – physical and mechanical properties of rocks; exogenous geological and engineering-geological processes: *16* – nature and type of geological and engineering-geological processes; *17* – conditions for the development of geological and engineering-geological processes; *18* – dimensions of geological and engineering-geological processes; *19* – damage to the territory by exogenous geological processes; type of groundwater: *20* – conditions of occurrence; *21* – hydraulic features of aquifers and complexes; *22* – conditions of nutrition, discharge of aquifers and complexes; *23* – chemical composition of groundwater; *24* – groundwater regime

в пространственно-временном отношении совокупность взаимодействующих естественных и искусственных компонентов, представленных веществом и полями, которая обладает эмерджентными (системообразующими) свойствами [2]. Любую ПТС можно рассматривать на примере ПТС «Геологическая среда–Аварийное здание», а ее структуру можно представить в виде системы из нескольких иерархических уровней, главным элементом которой является сфера взаимодействия здания (рис. 1).

Сфера взаимодействия и все ее составляющие условий функционирования характеризуются набором компонент, которые определяют генетические особенности и тенденции процесса изменения геологической среды. Они взаимосвязаны, взаимообусловлены, имеют свое назначение, вклад (вес) при формировании и развитии тех или иных геологических процессов в пределах ПТС. Для того чтобы представленная модель была достаточной, необходима оценка параметров устойчивости грунтового массива и разработка системы мониторинга.

Нормальное функционирование ПТС должно быть обеспечено при условии работы любого здания в строгом соответствии с проектным режимом. Равновесие ПТС определяется динамичностью природной (сферой взаимодействия) и надежностью технических составляющих (проектом) [3].



Шкала величины расчетной силы сейсмического воздействия в баллах шкалы MSK-64 на инженерные объекты:

Степень ответственности объекта в плане сейсмобезопасности \ Категория грунта в основании фундамента	I	II
Основное строительство	4	5
Повышенной ответственности	5	6
Особо ответственные	7	8

Рисунок 2. Выкопировка со схематической карты сейсморайонирования территории г. Екатеринбурга и его окрестностей: *1* – оси предполагаемых зон нарушения сплошности верхней части земной коры, выявленных в результате морфоструктурного анализа рельефа дневной поверхности; *2* – осевые зоны разломов, показанные на геологической карте г. Екатеринбурга и его окрестностей; масштаб 1 : 10 000; авторы: Р. Д. Калугина, В. Ф. Копанев, Г. А. Ильясова и др., ОАО «Уральская геолого-съемочная экспедиция», 1999; *3* – участок работ

Figure 2. Copy from a schematic map of seismic zoning of the territory of Ekaterinburg and its environs: *1* – axes of the supposed zones of discontinuity of the upper part of the earth's crust, identified as a result of morphostructural analysis of the relief of the day's surface; *2* – axial fault zones shown on the geological map of Ekaterinburg and its environs; scale 1: 10,000; authors: R. D. Kalugina, V. F. Kopanev, G. A. Ilyasova and others, OAO "Ural Geological Survey Expedition", 1999; *3* – work area

Рассмотрим особенности природно-технической системы аварийного 16-этажного жилого дома, расположенного в северной части г. Екатеринбурга.

В геоморфологическом отношении участок относится к левобережной части заболоченной долины реки Калиновки – правого притока р. Пышмы. Вся близлежащая территория ранее была покрыта торфом. Река Калиновка до 1980-х гг. текла открытым водотоком с урезом воды 252,31 м. При выполнении планировки земельного участка было изменено русло реки, расположенного в соответствии с генпланом возле третьего подъезда аварийного дома (1-я секция). В настоящее время река забрана в бетонный лоток, отметка которого вблизи площадки – 249,56 м.

Общий слабый северо-восточный уклон природной поверхности был нарушен при разработках торфа, беспорядочной отсыпке местного грунта и строительного мусора при работах по прокладке коллектора реки, строительстве зданий и сооружений. Абсолютные отметки рельефа находятся в пределах 261,15–259,95 м.

В геолого-тектоническом и неотектоническом отношении изучаемая территория расположена в северо-западном борту крупной (в масштабах Екатеринбурга) Камышинской денудационно-тектонической впадины. Ось впадины протягивается в северо-восточном направлении (по азимуту 55–60°) вдоль ул. Фрезеровщиков, приблизительно в 250 м от юго-восточной границы изучаемой площадки. Она может представлять собой реликтовую палеозойскую зону нарушения сплошности, предположительно имевшую характер зоны относительно субгоризонтального растяжения (рис. 2).

В районе изучаемого участка северо-западный борт впадины может пересекаться с рядом предполагаемых зон нарушения сплошности, которые образуют тектонические узлы.

В 150 м к востоку проходит осевая часть субмеридионального разлома, выявленного по результатам геологической съемки, выполненной подразделениями Уральского геологического управления. Этот разлом относится к системе Восточно-Свердловских разломов [4]. Элементом зоны геодинамического влияния упомянутой структуры является предполагаемая зона нарушения сплошности верхней части земной коры, которая ограничивает уча-

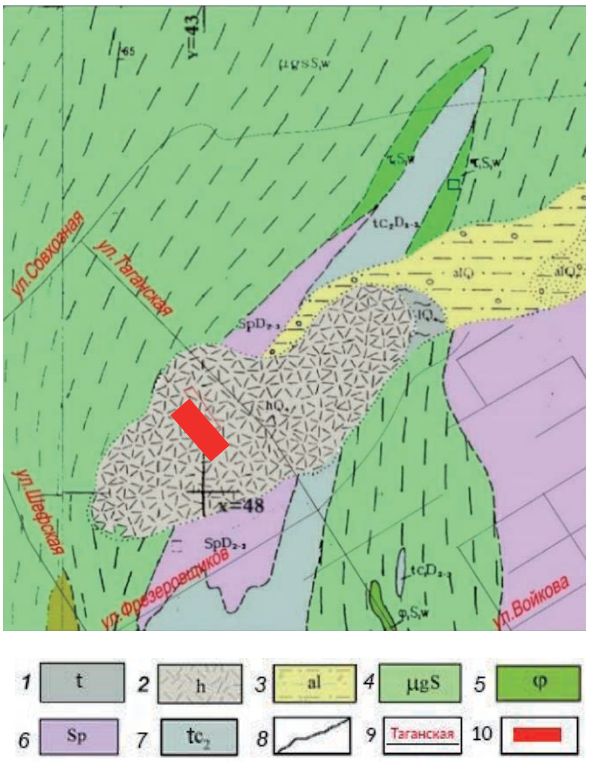


Рисунок 3. Выкопировка с геологической карты г. Свердловска, масштаб 1 : 10 000, под ред. Б. И. Кузнецова, 1964; *четвертичная система*: *1* – техногенные грунты; *2* – торфа; *3* – аллювиальные суглинки с галькой, пески; *нижний отдел силурийской системы, уинлокский ярус, кировградская свита*: *4* – зеленые сланцы (нерасчлененные), реже туфы порфиритов, переслаивающиеся с серицит-кварцевыми, кварц-серицитовыми и кварц-серицит-хлоритовыми сланцами; *5* – туфы пироксеновых порфиритов базальтового и андезито-базальтового состава; *средне-верхнедевонские интрузии* (D_{2-3}): *6* – серпентиниты перекристаллизованные нерасчлененные антигоритовые в различной степени карбонатизированные, реже оталькованные; *7* – тальк-карбонатные породы; *8* – контакты нормальные стратиграфические и интрузивные достоверные; *9* – ось улицы и ее название; *10* – изучаемый участок

Figure 3. Copy from the geological map of Sverdlovsk, scale 1: 10,000, ed. B. I. Kuznetsova, 1964; Quaternary system: *1* – technogenic soils; *2* – peat; *3* – alluvial loams with pebbles, sands; lower section of the Silurian system, Winlock stage, Kirovgrad formation: *4* – green shales (undivided), less often porphyrite tuffs, interbedded with sericite-quartz, quartz-sericite and quartz-sericite-chlorite schists; *5* – tuffs of pyroxene porphyrites of basaltic and andesite-basaltic composition; Middle-Upper Devonian intrusions (D_{2-3}): *6* – recrystallized undivided antigorite serpentinites, carbonated to varying degrees, less often talcized; *7* – talc-carbonate rocks; *8* – normal stratigraphic and reliable intrusive contacts; *9* – street axis and its name; *10* – study area

сток с запада и проходит в 50–75 м. Кроме того, в 50 м к юго-востоку от площадки может проходить в северо-восточном направлении (по азимуту 55–60°) ось предполагаемой флексурно-разрывной зоны.

Описанные структуры, представляющие собой реликтовые палеозойские зоны нарушения сплошности верхней части земной коры, были обновлены и отпрепарированы в мезо-кайнозойское время.

Приблизительно в 50–75 м к юго-востоку может располагаться тектонический узел, образованный взаимным пересечением разлома и флексурно-разрывной зоны северо-восточного направления.

В осевых частях и в зонах геодинамического влияния этих предполагаемых разрывных структур коренные палеозойские породы могут иметь повышенную степень раздробленности и обводненности. По разломам и трещинам в зонах их геодинамического влияния возможны микроподвижки, обусловленные действием на верхней части земной коры экзогенных, эндогенных и техногенных факторов. В качестве эндогенных факторов рассматриваются тектонические и гидрогеологические процессы. В качестве экзогенных факторов рассматриваются вариации атмосферных параметров, лунно-солнечные приливы, магнитные бури, возможные проявления сейсмоэлектрического эффекта при ударах молний в землю вблизи изучаемого объекта. Техногенными факторами могут являться взрывы в карьерах в окрестностях города, вибрации от движения транспорта и работы промышленных установок.

По зонам геодинамического влияния этих структур возможна эффективная передача сейсмической энергии в случае возникновения сейсмического явления на территории города и его окрестностей с некоторым увеличением силы сейсмического воздействия по сравнению с менее нарушенными и ненарушенными участками. Поэтому в таких зонах и, соответственно, в пределах площадки возможны повреждения линий подземных коммуникаций, ускоренный износ дорожного покрытия.

Согласно геологической карте г. Свердловска на топооснове масштаба 1 : 10 000 под ред. Б. И. Кузнецова, 1964 (рис. 3), исследуемая площадь приурочена к полосе метаморфических сланцев серицит-кварцевого, кварц-серицит-хлоритового состава, имеющих нижнесилурийский возраст (S_1). Сланцы залегают в виде пачек субмеридионального простирания с крутым западным падением. К востоку сланцы контактируют с рассланцованными серпентинитами и их производными (талькохлоритовыми, тальк-карбонатными породами), которые цепочкой протягиваются с северо-востока на юг.

Геологический разрез изучаемого участка (рис. 4) сложен следующими грунтами (сверху вниз):

1. *Насыпные грунты* представлены смесью суглинка (60 %), щебня (30 %), строительного мусора и торфа (10 %). Встречены мощностью 2,5–6,5 м, увеличиваясь на участках отвалов до 11 м. Большая часть грунта была образована с начала 1970-х гг. и относится к слежавшимся. В кровле грунты более рыхлые, неуплотненные;

2. *Органические отложения* представлены торфами сильноразложившимися, темно-бурого, черного цветов. Вскрыты мощностью 0,2–2,9 м;

3. *Суглинки аллювиальные мягкопластичные*, тяжелые песчанистые, зеленовато-серые, с прослоями песков мелких, с примесью органических веществ, с гравием и галькой до 10–15 %. Мощность грунта составляет 1,2–2,3 м;

4. *Суглинки аллювиальные полутвердые и тугопластичные*, тяжелые и легкие песчанистые, зеленовато-серые, с частыми прослоями песков мелких, с примесью органических веществ. Грунт залегает мощностью 0,5–6,9 м;

5. *Пески аллювиальные гравелистые*, серого цвета, неоднородные, плотные, с прослоями суглинков полутвердых и тугопластичных. Встречены мощностью 2,0–2,5 м;

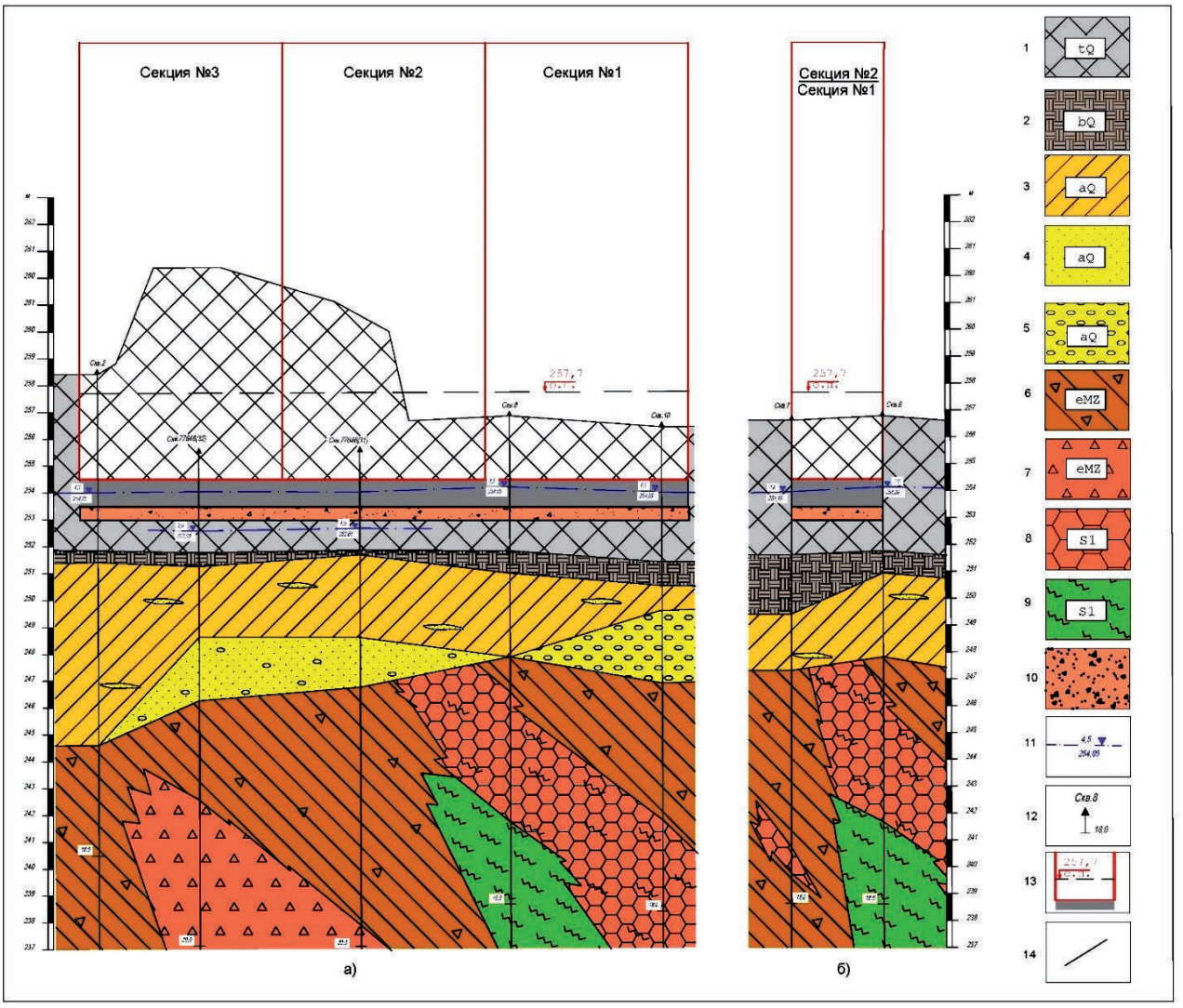


Рисунок 4. Инженерно-геологический разрез: *а* – продольный; *б* – поперечный; *1* – техногенные грунты четвертичного возраста; *2* – торф сильноразложившийся четвертичного возраста; *3* – суглинок аллювиальный четвертичного возраста, мягко- и тугопластичной консистенции; *4* – песок аллювиальный четвертичного возраста; *5* – гравийный грунт четвертичного возраста; *6* – суглинок элювиальный мезозойского возраста, твердый, с включением щебня; *7* – щебенистый грунт мезозойского возраста; *8* – сланцы низкой прочности силурийского возраста; *9* – сланцы малопрочные силурийского возраста; *10* – искусственное основание, представленное щебнем; *11* – абсолютная отметка уреза грунтовых вод (в числителе – глубина, м; в знаменателе – абс. отм., м); *12* – скважина, ее номер/глубина, м; *13* – контур дома и плитного фундамента с абс. отм. пола, м; *14* – литологические границы

Figure 4. Engineering geological section: *a* – longitudinal; *b* – transverse; *1* – technogenic soils of Quaternary age; *2* – highly decomposed peat of Quaternary age; *3* – alluvial loam of Quaternary age, soft and hard-plastic consistency; *4* – alluvial sand of Quaternary age; *5* – gravel soil of Quaternary age; *6* – eluvial loam of Mesozoic age, hard, with inclusions of crushed stone; *7* – crushed stone soil of Mesozoic age; *8* – low-strength shales of Silurian age; *9* – low-strength shales of Silurian age; *10* – artificial foundation, represented by crushed stone; *11* – absolute elevation of the groundwater line (in the numerator – depth, m; in the denominator – absolute elevation, m); *12* – well, its number/depth, m; *13* – outline of the building and slab foundation with absolute floor elevation, m; *14* – lithological boundaries

6. *Гравийные грунты*, неоднородные, с прослоями суглинков, серые. Встречены отдельными скважинами на глубине 7,1 м, мощность составляет 2,5–2,7 м;

7. *Суглинки элювиальные* желтовато-серого и зеленовато-серого цвета, от твердой до тугопластичной консистенции, с сохранившейся структурой коренных пород, участками дресвяные, с линзами рухляка и щебня. Мощность изменяется от 1,2 до 8,5 м;

8. *Обломочные элювиальные грунты*, представленные щебнем, с сильновыветрелыми обломками, с твердым суглинистым заполнителем до 25 %, встречены отдельными скважинами мощностью до 7,0 м;

9. *Скальные грунты*, представлены кварц-серицит-хлоритовыми сланцами различной степени выветрелости, прочности и трещиноватости. Кровля скальных грунтов залегает на глубине от 10,2 до 14,6 м.

Физико-механические свойства грунтов приведены в табл. 1.

На данной территории развиты **специфические грунты** – техногенные, биогенные и элювиальные.

Техногенные грунты представлены в разрезе отходами производств и беспорядочной свалки, вскрытой мощностью 2,5–6,5 м. Нижняя часть слоя относится к слежавшимся, но неоднородным грунтам (степень неодно-

Таблица 1. Физико-механические характеристики грунтов
Table 1. Physical and mechanical characteristics of soils

Номер ИГЭ	Наименование грунта	Природная влажность, доли ед.	Показатель текучести, доли ед.	Коэффициент пористости, доли ед.	Плотность грунта ρ, г/см³	Удельное сцепление *C*, МПа	Угол внутреннего трения φ, град	Модуль деформации *E*, МПа	Предел прочности на одноосное сжатие в водонасыщенном состоянии, МПа
1	Насыпной грунт				Не нормируется				
2	Торф сильноразложившийся	2,492		5,256	1,10	0,020	12	3	–
3	Суглинок аллювиальный мягкопластичный	0,287	0,60	0,789	1,95	0,013	14	5	–
4	Суглинок аллювиальный тугопластичный	0,230	0,07	0,596	2,06	0,031	18	14	–
5	Песок аллювиальный гравелистый			0,500	1,80	0,001	32	25	–
6	Гравийный грунт аллювиальный				2,10	R_0 = 0,5 МПа		30	–
7	Суглинок элювиальный	0,282	< 0–0,11	0,762	2,01	0,022	29	18	–
8	Щебенистый грунт				2,20	R_0 = 0,4 МПа		28	–
9	Сланцы низкой прочности				2,30			–	2,7
10	Сланцы малопрочные				2,56			–	13,0

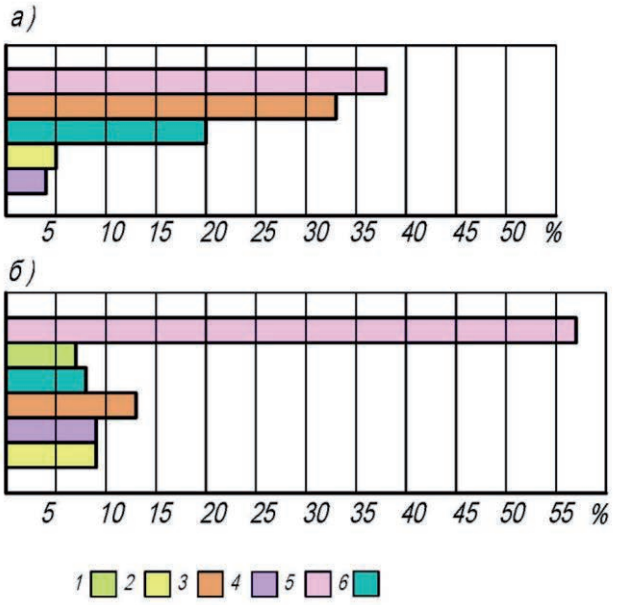


Рисунок 5. Минеральный состав коры выветривания, %: *а* – дисперсный горизонт (глубина 10 м); *б* – рухляковый горизонт (глубина 12,5 м); *1* – монтмориллонит; *2* – вермикулит; *3* – каолинит; *4* – гётит; *5* – кварц; *6* – гидромусковит
Figure 5. Mineral composition of the weathering crust, %: *a* – dispersed horizon (depth 10 m); *b* – crumbling horizon (depth 12.5 m); *1* – montmorillonite; *2* – vermiculite; *3* – kaolinite; *4* – goethite; *5* – quartz; *6* – hydromuscovite

родности (C_u) изменяется от 41,3 до 111,1). Верхняя часть слоя (мощностью до 1,5 м) более рыхлая, неуплотненная, состоит из суглинка (60 %), торфа (20 %), строительного мусора (щебень гранита, обломки бетона, дерево). Природная влажность изменяется от 0,153 до 0,343 доли ед., относительное содержание органических веществ составляет 0,03–0,05.

Биогенные грунты, представленные торфом мощностью 0,2–2,9 м, оцениваются как сильноразложившиеся (D_{dp} = 52,7–65,2 %), по показателю природной влажности (W = 1,11–4,47 доли ед.) от осушенного до маловлажного, обладают высокой пористостью (n = 73,4–87,9 %), малой прочностью и большой сжимаемостью. В соответствии с «Пособием по проектированию оснований зданий и сооружений к СНиП 2.02.01-83» модуль осадки торфа при нагрузке 0,1 МПа составляет 200 мм/м; коэффициент консолидации – 1,0 м²/год.

Техногенные и биогенные грунты характеризуются неоднородным составом и незакономерным изменением показателей физических и механических свойств и, как следствие, неоднородными сжимаемостью и прочностью. Вследствие этого не рекомендуется их применение в качестве основания сооружений (табл. 1).

Элювиальные грунты обладают высокой изменчивостью физико-механических свойств как в плане, так и по глубине. Плотность изменяется от 1,87 до 2,06 г/см³, по числу пластичности – это суглинки и глины (0,072–0,29 доли ед.), твердой и полутвердой консистенции; пористость 39–46 %; удельное сцепление – 0,010–0,040 МПа, угол внутреннего трения 24–33 град, компрессионный модуль деформации 3,7–6,9 МПа. Такие свойства связаны с неравномерным выветриванием и минеральным составам коры выветривания. По классификации Л. А. Ярг профиль коры выветривания изучаемого участка представлен в следующем виде: *1. Обломочная зона (II)*, состоящая из глыбовой и щебнистой подзон. *Глыбовая подзона (IIа)* сложена сланца-

ми различной степени выветрелости и трещиноватости, вскрытой мощностью 3,2–4,6 м; *щебнистая подзона (IIб)* представлена щебенистыми грунтами с твердым суглинистым заполнителем, мощностью 2,5–7,0 м. *2. Дисперсная зона (IV)* представлена суглинками от твердой до тугопластичной консистенции, мощностью 1,2–8,5 м. Общая вскрытая мощность коры выветривания составляет от 4,0 м до 11,0 м. Кровля скальных грунтов имеет неровный характер и залегает на глубине 10,2–14,6 м.

В минеральном составе дисперсного и рухлякового горизонта обращает на себя внимание большое количество кварца, резкое снижение полевого шпата и, соответственно, увеличение количества гидрослюды снизу вверх по разрезу, что выражается в количественном увеличении гидромусковита от 8 % (рухляковый горизонт) до 20 % (дисперсный горизонт), а также в появлении монтмориллонита в рухляковом горизонте (7 %) и каолинита в обоих горизонтах (13–33 %). Породообразующими минералами горизонтов являются гётит – 4–9 %; смешаннослойные (вермикулит) – 5 %; кварц – 38–57 %.

Гидрогеологические условия определяются развитием двух водоносных горизонтов: трещинно-грунтового водоносного горизонта, приуроченного к верхней зоне метаморфизованных пород, и горизонта поровых вод четвертичных отложений. Оба горизонта имеют единую поверхность. Уровень подземных вод встречается на глубине 0,2–4,5 м (абс. отм. 254,05–256,50 м). По химическому составу воды смешанного состава, высокие значения минерализации (980–2234 мг/дм^3) и сульфатов (480–1280 мг/дм^3) свидетельствуют о техногенном загрязнении, обладают агрессивными свойствами, что оказывает большое влияние на процесс коррозии металлов. Коэффициенты фильтрации грунтов основания следующие: насыпные грунты – 5,0 м/сут, суглинки аллювиальные – 0,08 м/сут; песок аллювиальный и гравийный грунт – 0,3–2,2 м/сут; суглинок элювиальный – <0,01 м/сут; щебенистый грунт – 1,0–2,0 м/сут; скальные грунты различной степени трещиноватости – 1,0–1,5 м/сут.

С учетом результатов Общего сейсмического районирования территории РФ ОСР–2015 изучаемый участок располагается в пределах области развития грунтов второй и частично третьей категорий по сейсмическим свойствам по классификации СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах». Актуализированная редакция СНиП II–7–81*. Величина расчетной силы сейсмического воздействия оценивается в 6 баллов по шкале MSK-64.

На изучаемой территории развиты **геологические и инженерно-геологические процессы.** Наиболее значимыми из них являются: выветривание, тектоническая нарушенность, подтопление. Выветривание и тектоническую нарушенность мы связываем с длительной и сложной историей геологического развития Урала. А вот на подтопление территории оказывают влияние приуроченность участка к погребенной долине реки, слабая фильтрационная способность толщи аллювиальных суглинистых отложений, нарушение естественного стока, возможные утечки из водонесущих коммуникаций. В связи с изменением гидродинамического режима, связанного с разработкой глубоких котлованов близлежащей застройки территории и техногенного воздействия на горные породы, могут развиваться процессы суффозии, обрушения.

Рассмотрим техническую составляющую природно-технической системы аварийного дома, построенного в период 2006–2008 гг.

Шестнадцатиэтажный трехсекционный жилой дом выполнен из крупнопанельных конструкций с несущими продольными и поперечными стенами, есть техподполье, техэтаж и чердак, каркас облицован огнеупорным кирпичом. В здании размещено 360 квартир, 9 офисных помещений. Согласно проектным решениям, фундаментом должен был служить монолитный железобетонный ростверк по железобетонным сваям с расположенными по нему блоками ФБС, по блокам выполнен монолитный железобетонный армопояс.

Но в процессе производства строительных работ было принято решение по изменению конструктива фундамента здания на монолитную плиту для каждой секции с геотехническим массивом в основании, созданного с помощью струйной цементации в 30 скважинах. Толщина

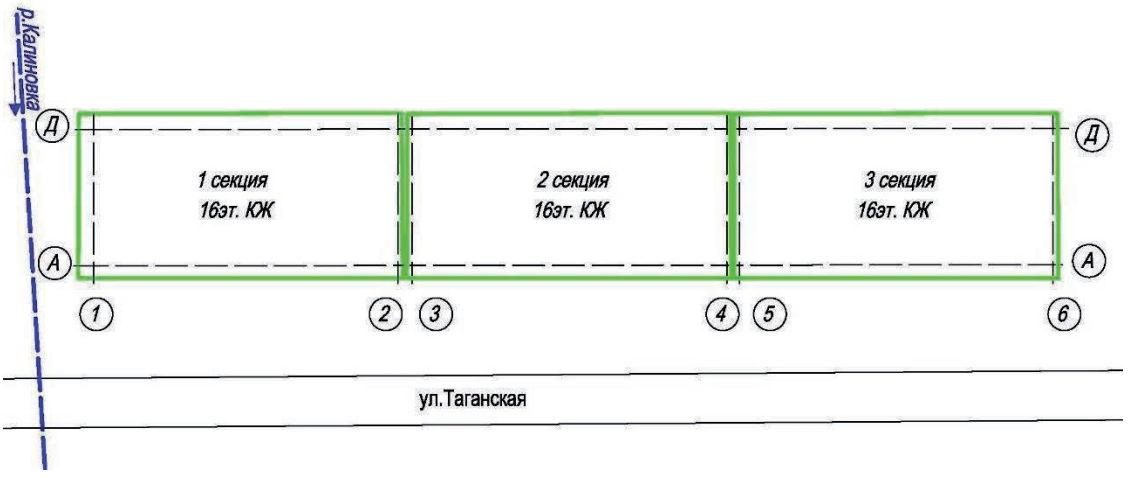


Рисунок 6. Схема расположения секций шестнадцатиэтажного жилого дома. Цифрами и буквами обозначены основные строительные оси

Figure 6. Layout of sections of a sixteen-story residential building. Numbers and letters indicate the main construction axes

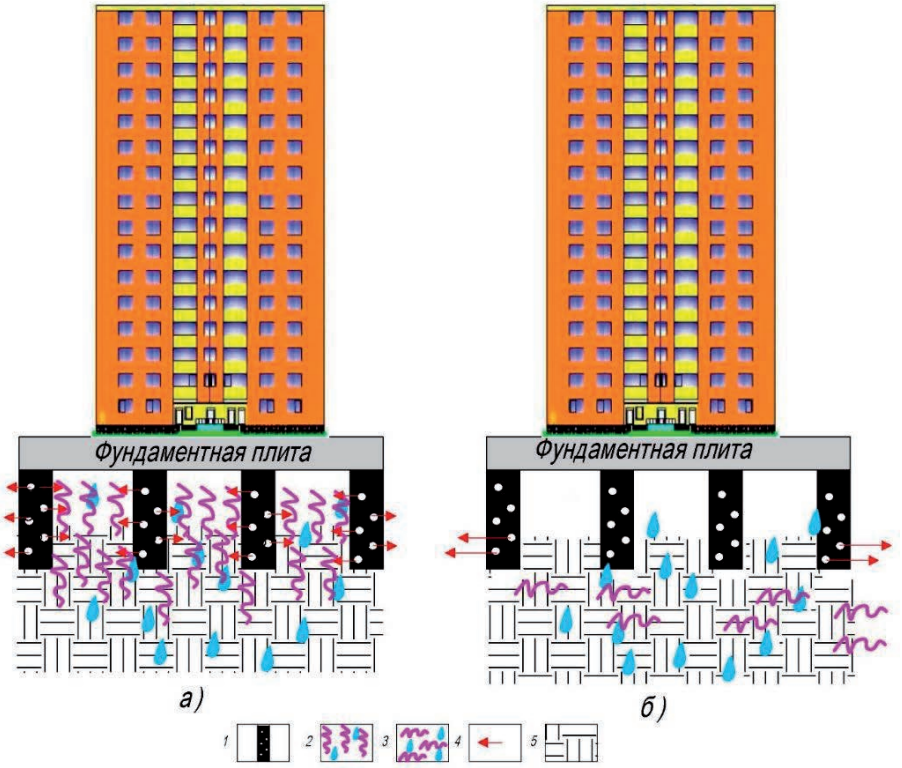


Рисунок 7. Мероприятия по созданию геотехногенного массива (по материалам заключения специалистов ООО НИЦ «ГЕОТЕХСТРУКТУРА», 2001, В. В. Лушникова, Ю. Р. Оржеховского с дополнениями автора): *а* – запланировано (геотехногенный массив создан); *б* – факт (цементно-песчаная смесь растекается в неконтролируемых направлениях, геотехногенный массив не создан); *1* – труба с отверстиями; *2*, *3* – цементно-песчаный раствор для создания геотехногенного массива; *4* – направление движения цементно-песчаного раствора; *5* – торф

Figure 7. Activities to create a geotechnogenic massif (based on the conclusion of specialists from OOO Scientific Research Center "GEO-TECHSTRUCTURE", 2001, V. V. Lushnikov, Yu. R. Orzhekhovsky with additions by the author): *a* – planned (geotechnogenic massif has been created); *b* – fact (the cement-sand mixture spreads in uncontrolled directions, the geotechnogenic massif has not been created); *1* – pipe with holes; *2, 3* – cement-sand mortar for creating a geotechnogenic massif; *4* – direction of movement of the cement-sand mortar; *5* – peat

фундаментной плиты для секций № 1 и 2 составила 800 мм, для секции № 3 – 900 мм (рис. 6).

Метод струйной цементации грунтов был запатентован в 1971 г. в Японии. Первые экспериментальные работы по применению струйной технологии выполнялись японской компанией «Каджима корпорейшен», менее чем за 10 лет данная технология стала популярна и признана эффективной во многих странах мира.

Концепция геомассива активно изучалась и обсуждалась в трудах ряда известных специалистов в области фундаментостроения в конце 1990-х–начале 2000-х гг. Технология струйной цементации много лет исследовалась, опробовалась и адаптировалась на грунтах г. Санкт-Петербурга [5–9], а также применялась на объектах в городах Ивдель, Невьянск Свердловской области, г. Волгодонске [1].

Представленный метод основывается, прежде всего, на инъекционном уплотнении грунтов основания путем нагнетания по специальной технологии цементного раствора при давлении, значительно превышающем нагрузки на грунт от здания. В результате такого нагнетания обычно происходит повышение плотности и улучшение механических свойств слабых грунтов. Это происходит как за счет уплотнения, так и за счет образования жестких включений из застывшего уплотняющего раствора, что превращает массив грунта в природно-техногенный композит с высокими прочностными и деформационными свойствами.

Конструктивные решения геотехнических массивов полностью зависят от технологии их выполнения. На сегодняшний день можно выделить два основных способа устройства геотехнических массивов: высоконапорная инъекционная технология и струйная цементация (технология "jet grouting") [10].

Технологический процесс однокомпонентной струйной цементации включает: лидерное бурение скважин, разрушение грунта острой струей цементного раствора (при необходимости – с химическими добавками) под высоким давлением (30–40 МПа), вытеснение пульпы на поверхность [11].

Этот метод позволяет уплотнять не только дисперсные связанные грунты (глины, суглинки, супеси), но и несвязанные дисперсные грунты (пески, насыпные техногенные грунты). Расширение возможностей применения технологии на широком спектре грунтов, по словам авторов, происходит за счет подбора качественной характеристики раствора, обеспечивающего его высокую проникающую способность. В описании метода указывается, что

наличие грунтовых вод не является противопоказанием к применению методики закрепления основания.

В соответствии с нормативными документами СП 291.1325800.2017 «Конструкции грунтоцементные армированные. Правила проектирования» (утверждены приказом Минстроя России № 785/пр. от 15 мая 2017 г. с Изменением № 1) применение данного метода нецелесообразно на торфяные грунты. В данных грунтах, обладающих низкой сопротивляемостью и очень высокой пористостью, происходит бесконтрольное растекание цементно-песчаного раствора. В случае, когда торф представлен в разрезе ограниченным слоем и соседствует в кровле и подошве с другими разновидностями грунтов, также нуждающимися в усилении, достигнуть значимого положительного эффекта от инъекционного упрочнения практически невозможно. Слабый слой торфа является мощным каналом утечки раствора, куда и пойдет – по пути наименьшего сопротивления – основная масса смеси (рис. 7).

Контроль плотности грунта при создании геотехмассива выполнен проектной организацией в 2006 г. геофизическим корреляционным методом преломленных волн, отдельными сейсмозондированиями, по системе встречных и нагоняющих годографов продольных волн с регистрацией гармоник поверхностных волн Рэлея.

Характерной особенностью записей на сейсмограммах, полученных после формирования геотехногенной плиты, является изменение наклона осей синфазности в сторону увеличения скоростей распространения упругих волн и увеличение частоты регистрационных колебаний на спектрограммах. Преобладающая частота на записях после создания геотехмассива составляла 25–30 Гц, до создания – 15–20 Гц. Устойчивая форма импульсов коррелируемых волн по амплитуде и частоте свидетельствует об однородном характере геотехнической плиты.

Анализ значений скоростей V_p и поперечных волн V_s, измеренных до и после создания геотехмассива, свидетельствует об увеличении скоростей распространения V_p в среднем на 25 %, V_s – на 40 %. Главной причиной увеличения значений V_p является увеличение плотности грунта под давлением внедряющегося раствора. Увеличение значений V_s связано с повышением деформационных и прочностных свойств грунтов E, C, φ за счет жесткости контактов между частицами грунта вследствие уплотнения грунтового массива и цементации пространства вокруг инъектора в радиусе от 15 до 30 см на глубину до 4,0 м. Значения модуля деформации увеличились в среднем на 100 % – от 6–10 МПа до 13–22 МПа. Выполненные геодезические наблюдения за деформациями грунтов основания, особенно в период строительства и устройства геотехмассива, были прекращены в мае 2007 г. В октябре 2007 г. наблюдения снова возобновили в связи с появившимися деформациями в крыльцах здания, однако в этот период основные осадки уже реализовались.

В феврале–марте 2008 г. при освидетельствовании несущих конструкций жилого дома были обнаружены трещины стен, приуроченные в основном к участкам примыкания плит под крыльцами по оси Д к плите дома, и трещины в стенах по оси В и Г в районе лестничных клеток. Образовавшиеся деформации привели к перекосу дверных проемов (входы в квартиры).

Начиная с августа 2008 г. в здании начали фиксироваться деформации (осадки) с наибольшими значениями в осях В–Г/9–10 (1-я секция) и в осях В–Д/1–2 (2-я секция). Проектной организацией, выполняющей наблюдения за осадками, было установлено: «… Трещины, образовавшиеся в конструкциях, продолжают раскрываться». Приращение осадки составило 1–3 мм в месяц. По характеру осадок можно сделать вывод, что вторая секция «тянет за собой» первую секцию.

Дополнительные осадки были выполнены перегрузом фундаментной плиты грунтом слоем около 1 м, что составило 6–8 % от расчетной нагрузки. В проекте эта нагрузка не была предусмотрена. И в апреле 2009 г. было принято решение о необходимости срочного выполнения усиления грунтов основания.

В соответствии с техническими решениями на I этапе планировалось бурение скважин № 1–58 (2-я секция), № 59–107 (1-я секция) – итого 107 скважин. На II этапе планировалось бурение 113 скважин. Нагнетание раство-

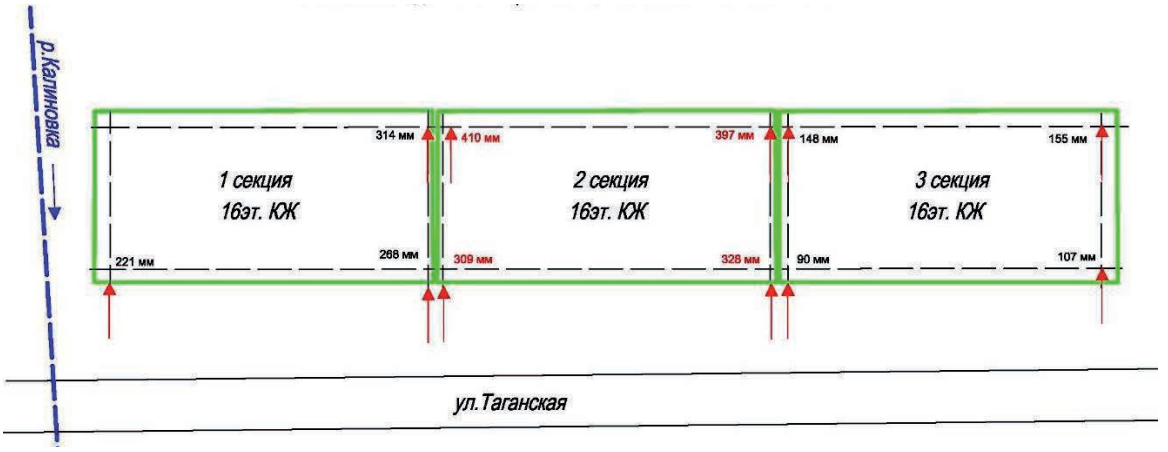


Рисунок 8. Отклонение здания от вертикальной плоскости на 25 января 2021 г. Стрелками показано направление отклонения от вертикали, цифрами – значения отклонений в миллиметрах

Figure 8. Deviation of the building from the vertical plane as of January 25, 2021. Arrows show the direction of deviation from the vertical, numbers show the deviation values in millimeters

Таблица 2. Максимальные отклонения секций дома от вертикальной плоскости, мм
Table 2. Maximum deviations of the building sections from the vertical plane, mm

Секция	Дата замеров			
	25.04.2018	06.12.2018	24.04.2019	25.01.2021
1	282	296	295	314
2	377	389	389	410
3	136	147	146	148

а *б*

Рисунок 9. Дефекты и повреждения на 16-м этаже 1-й секции: *а* – трещины между плитами перекрытия на потолочной поверхности; *б* – трещины над дверными проемами, повторное раскрытие трещин на этажах после ремонта
Figure 9. Defects and damage on the 16th floor of the 1st section: *a* – cracks between the floor slabs on the ceiling surface; *b* – cracks above doorways, repeated opening of cracks on floors after repairs

ра марки 200 с В/Ц 0,55–0,60 с добавкой пластификатора в инъекторы выполнять до отказа при давлении 12 атм.

В феврале 2010 г. был закончен I этап выполнения бурения и инъекцирования цементно-песчаной смеси первых 32 скважин (2-я секции) и 29 скважин (1-я секция) глубиной 5,5 м. После чего была выполнена серия наблюдений за осадками. По мнению проектной компании, выполняющей укрепление грунтов, было решено, что осадки грунтов основания выровнялись. Работы по второму этапа усиления грунтов основания не проводились.

За время эксплуатации дома в первые два года (2008–2009) появились трещины в местах общего пользования, на входных группах, отслоение декоративной плитки на цокольной части и крыльцах. В квартирах появились трещины и деформации проемов. В некоторых квартирах перестали открываться и закрываться входные двери, оконные блоки, появились искривления профиля остекления лоджий.

В соответствии с анализом деформаций секции № 2 за период с 28.09.2006 по 10.10.2011 г. максимальная осадка с 2006 г. до усиления грунтов 2010 г. по графику составила более 20 см, до октября 2011 г. более 25 см от первоначальной. Причем по расчетам проектной компании было установлено, что до выполнения усиления максимальная скорость осадки примерно составляла 4 мм в год, после усиления должна была составить 2 мм в год.

Во время геодезических наблюдений, проведенных компанией, выполняющей обследование конструкций в период с 2018 по 2021 г., отмечены максимальные отклонения плоскости парапета относительно второго этажа (табл. 2).

В целом отмечается прогиб здания. Наблюдается просадка грунтов со стороны двора и выпор со стороны улицы. Значения осадок увеличиваются от торцов здания к середине (рис. 8). Максимальную осадку имеет 2-я секция, минимальную – 3-я секция. Изменение осадок второй сек-

а *б*

Рисунок 10. Дефекты и повреждения по периметру здания со стороны двора: *а* – трещины в асфальте, сквозные трещины над дверными проемами, просадка грунта у входных групп и крылец; *б* – просадка грунта под отмосткой, сквозные вертикальные трещины в кирпичной кладке стен крыльца, сквозные поперечные трещины в пандусе

Figure 10. Defects and damage along the perimeter of the building from the courtyard side: *a* – cracks in the asphalt, through cracks above doorways, soil subsidence at the entrance lobbies and porches; *b* – subsidence of soil under the pavement, through vertical cracks in the brickwork of the porch walls, through transverse cracks in the ramp

а *б*

Рисунок 11. Дефекты и повреждения по периметру здания со стороны двора: *а* – раскрытие шва между подъездами, отслоение облицовочной плитки; *б* – просадка грунта

Figure 11. Defects and damage along the perimeter of the building from the courtyard side: *a* – opening of the seam between the entrances, peeling of the facing tiles; *b* – soil subsidence

а *б*

Рисунок 12. Дефекты и повреждения по периметру здания: *а* – горизонтальные трещины в кладке стен секции 3; *б* – просадка грунта с торца секции 1

Figure 12. Defects and damage along the perimeter of the building: *a* – horizontal cracks in the masonry of the walls of section 3; *b* – soil subsidence from the end of section 1

а *б*

Рисунок 13. Отклонение секций 2 и 3 относительно друг друга: *а* – на крыше; *б* – со стороны улицы

Figure 13. Deviation of sections 2 and 3 relative to each other: *a* – on the roof; *b* – from the street side

ции за 2 года 9 месяцев увеличилось более чем на 30 мм. Вне зависимости от наличия деформационных швов между секциями наблюдается движение секций 1 и 3 вслед за секцией 2, что ведет не только к проседанию, но и развороту секций 1 и 3. По результатам замеров изменения координат марок в плоскости здания установлено наличие смещений секций в уровне технического этажа величиной от 5 до 31 мм. Величины смещения углов здания (в плоскости) каждой отдельной секции свидетельствуют о переходе коробки из прямоугольного параллелепипеда в наклонный.

В соответствии с табл. 6. 1. СП 70.13330.2012. «Несущие ограждающие конструкции» отклонение от вертикали панелей несущих стен на всю высоту здания не должно быть более 50 мм.

В результате визуального обследования конструкций были обнаружены следующие дефекты и повреждения: сквозные вертикальные и горизонтальные трещины в стенах, трещины между плитами перекрытия на потолочной поверхности, наклонные трещины в стеновых панелях, трещины в полу произвольного очертания, сквозные вертикальные трещины в кирпичной кладке стен, сквозные поперечные трещины в армопоясе по стеновым панелям подвала, сквозные трещины над дверными и оконными проемами, повторное раскрытие трещин на этажах после ремонта и замены дверных коробок и полотен входа в квартиры после их повреждения, сквозные горизонтальные трещины в кладке стен, сдвиг стеновых панелей, просадка грунта по периметру здания, просадка покрытия пандуса, отслоение отделочной плитки, отклонение парапетных плит от горизонтальной плоскости над температурным швом, раскрытие шва между подъездами, отклонение по высоте подъездов относительно друг друга, трещины в узлах примыкания стеновых панелей возле шва между подъездами, трещины в материале заполнения шва между подъездами и многое другое (рис. 9–14).

Рисунок 14. Отклонение парапетных плит от горизонтальной плоскости над температурным швом между секциями 2 и 3
Figure 14. Deviation of parapet slabs from the horizontal plane above the expansion joint between sections 2 and 3

Выводы

В соответствии с требованием механической безопасности (ст. 7, п. 3 Федерального закона Российской Федерации от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений») необходимо выполнять строительство так, чтобы нормой было «…отсутствие деформаций недопустимой величины строительных конструкций, основания здания или сооружения и геологических массивов прилегающих территорий». Для этого целесообразно смоделировать сценарии возникновения опасных природных и техногенных геологических процессов, учитывающих особенности взаимодействия элементов строительных конструкций между собой и с основанием, и предусмотреть работы по улучшению свойств грунтов основания.

Бесконечное разнообразие способов приспособления к объективным обстоятельствам в **Природе** заставляет **Человека** искать разумные решения, касающиеся способов устройства оснований и фундаментов в разнообразных природных условиях [1, 12].

Усложнение формы, увеличение этажности зданий и сооружений, повышенной плотности городской застройки ставит перед геотехниками задачу совершенствования методов расчета грунтовых оснований на базе более совершенных (нелинейных) моделей [13–15].

Выбор методов проектирования и устройства искусственно улучшенных оснований в большинстве случаев осуществляется экспериментальным путем на площадке строительства и не всегда полученное решение бывает оптимальным [16, 17].

Основными причинами неравномерных деформаций грунтов в основании фундаментной плиты на геотехногенном массиве и, как следствие, нормального функционирования ПТС аварийного шестнадцатиэтажного здания являются:

1. Сложные инженерно-геологические условия площадки строительства: наличие большой толщи техногенных и биогенных грунтов, обладающих неоднородным составом и незакономерным изменением показателей физических и механических свойств, и, как следствие, неоднородными сжимаемостью и прочностью; подтопление территории; расположение участка в осевых частях и в зонах геодинамического влияния предполагаемых разрывных структур (коренные палеозойские породы имеют повышенную степень раздробленности и обводненность);

2. Неудачный и рискованный проект, который не соответствовал грунтовым условиям площадки строительства, так как торф не был в должной степени уплотнен и

упрочнен. Отсутствие эффективного упрочнения торфа и привело к долгосрочным осадкам, а случайность распределения техногенной бетонной компоненты в массиве сделала их неравномерными;

3. Отсутствие геодезических наблюдений в период строительства (устройства фундаментной плиты на геотехногенном массиве), что не позволило вовремя выполнить дополнительное нагнетание цементно-песчаного раствора в грунтовую толщу для предотвращения неравномерных осадок основания, повлекших за собой деформации конструкций.

Решение проектной компании о применении плитного фундамента на геотехническом массиве для устройства шестнадцатиэтажного дома не соответствует геологическим условиям площадки и является неадекватным по отношению к типовой коробке здания, не обладающей способностью воспринимать неравномерные осадки. Целесообразнее было бы применение свайного фундамента, который изначально был рассчитан проектом на элювиальные грунты, обладающие более высокой несущей способностью по сравнению с торфом и служащие надежным основанием большинства зданий и сооружений в г. Екатеринбурге.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лушников В. В. Слово о фундаменте, или Фундамент здания как аналог опор творений Природы // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2019. Т. 10. № 2. С. 14–25. https://doi.org/10.15593/2224-9826/2019.2.02
2. Бондарик Г. К. Научные основы и методика организации мониторинга крупных городов / Г. К. Бондарик [и др.]. М.: ПНИИИС, 2009. 259 с.
3. Овечкина О. Н. Оценка и прогноз изменения состояния геологической среды при техногенном воздействии зданий высотной конструкции в пределах города Екатеринбурга: дис. … канд. геол.-минерал. наук. Екатеринбург: УГГУ, 2013. 159 с.
4. Гуляев А. Н., Осипова А. Ю. Районирование центральной части Уральского региона по величине расчетной силы сейсмического воздействия. Екатеринбург: УрО РАН, 2020. 89 с.
5. Богов С. Г. Применение цементных растворов для струйной технологии закрепления грунтов с учетом их реологических свойств // Гидротехника. 2013. № 4. С. 84–86.
6. Богов С. Г. Адаптация струйной технологии для целей освоения подземного пространства в исторической части Санкт-Петербурга в условиях слабых грунтов // Жилищное строительство. 2014. № 3. С. 25–30.
7. Улицкий В. М., Богов С. Г. Опыт эффективного применения струйной цементации в геотехнической практике Санкт-Петербурга при реконструкции и новом строительстве // Геотехника. 2017. № 4. С. 16–25.
8. Ground improvement. Ed. by M. P. Moseley, K. Kirsch. London, 2004. 440 p. https://doi.org/10.1201/9780203489611
9. Karol R. H. Chemical grouting and soil stabilization. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2003. 536 p.
10. Ибрагимов М. Н., Семкин В. В., Шапошников А. В. Цементация грунтов инъекцией растворов в строительстве. М.: Изд-во АСВ, 2017. 266 с.
11. Мониторинг зданий и сооружений при строительстве и эксплуатации (практическое руководство под ред. д-ра геол.-минерал. наук А. Г. Шашкина) / А. Г. Шашкин [и др.]. СПб: Изд-во ин-та «Георeконструкция», 2021. 640 с.
12. Способ строительства и анализа напряженно-деформированного состояния зданий, сооружений и других протяженных по вертикали объектов на неравномерно сжимаемых грунтах: пат. 2476642 Рос. Федерация / В. В. Лушников, Ю. Р. Оржеховский, А. Я. Эпп, М. В. Сметанин; опубл. 27.02.13, Бюл. № 6.
13. Алехин А. Н. Обоснование метода определения параметров нелинейной модели грунта по данным его полевых испытаний // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2015. № 1. С. 57–62.
14. Алехин А. Н., Алехин А. А. Фундамент и его грунтовое основание – неотъемлемая несущая часть здания // Стройкомплекс Среднего Урала. 2021. № 245 (05). С. 32–33.
15. Alekhin A. N., Alekhin A. A., Alekhin V. N. Experience in designing the foundations of a multi-storey building on the eluvial soils of the Urals using a model of non-linear soil deformation // Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures: International Conference. Ekaterinburg, 2019. Vol. 972. Article number 012016. https://doi.org/10.1088/1757-899X/972/1/012016
16. Маковецкий О. А. Расчет и конструирование искусственного основания «структурный геотехнический массив»: дис. …канд. техн. наук. М.: МИИТ, 2021. 363 с.
17. Travush V. I., Fedorov V. S., Makovetskiy O. A. Theoretical substantiation of the mechanism patterns of the manmade base “structural geotechnical solid” // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2020. Vol. 16. No. 4. P. 103–110. https://doi.org/10.22337/2587-9618-2020-16-4-103-110

Статья поступила в редакцию 03 ноября 2023 года

UDC 624.131.1, 624.131.7 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-1-121-136

Analysis of the result of using a geotechnogenic massif in complex engineering and geological conditions of the city of Ekaterinburg

Ol'ga Nikolaevna OVECHKINA*

LLC "Scientific Research Center "StroiGeoSreda", Ekaterinburg, Russia

Abstract

Relevance. In connection with the development of new territories on the outskirts of the city of Ekaterinburg (microdistricts Akademicheskiy, Michurinsky, Solnechny, etc.), as well as development within wetlands and flooded areas, new technologies for constructing foundations are being used. To prevent emergency situations and negative consequences of the manifestation of engineering-geological processes and phenomena, the construction and operation of any buildings and structures must be carried out in strict accordance with the design solution. Therefore, the most pressing problem in developing design solutions for building foundation structures is ensuring geotechnical and geomechanical safety. Choosing a method for designing a monolithic slab on a geo-technogenic massif requires particularly careful calculations of all components of the project. Despite the significant number of existing buildings, experience in studying engineering-geological conditions and their influence on the choice of construction technology, a special approach is required when studying each individual construction site. This is due both to the complex engineering and geological conditions of the city of Ekaterinburg, formed as a result of the long and complex history of the geological development of the Urals, and to the increased responsibility of the designed capital construction projects.

The purpose of the research is to study the components of the natural-technical system of a sixteen-story emergency building located in Ekaterinburg, to determine the causes of uneven soil deformations at the base of the foundation slab on a geotechnogenic massif.

Research methods. Study, analysis and synthesis of geotechnical, design and construction materials on an emergency building; visual inspection of building structures; photo documentation; geodetic monitoring.

Results. The components of the interaction between the geological environment and the emergency building were determined, specific soils were identified that determine the unstable state of the technical structure; the stages of construction, creation of a geotechnogenic massif, soil strengthening and geodetic observations of settlements are considered; The causes of uneven deformations have been established.

Conclusions. The uneven settlements of the sixteen-story building are associated with an initially unsuccessful and risky project that did not meet the engineering and geological conditions of the construction site.

***Keywords*:** natural-technical system, specific soils, slab foundation, jet cementation, geotechnogenic massif.

REFERENCES

1. Lushnikov V. V. 2019, A word about the foundation, or the foundation of a building as an analogue of the supports of nature's creations. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture], vol. 10, no. 2, pp. 14–25. (*In Russ.*) https://doi.org/10.15593/2224-9826/2019.2.02
2. Bondarik G. K. 2009, Scientific foundations and methods of organizing monitoring of large cities. Moscow, 259 p. (*In Russ.*)
3. Ovechkina O. N. 2013, Assessment and forecast of changes in the state of the geological environment under the technogenic impact of high-rise buildings within the city of Ekaterinburg, PhD thesis. Ekaterinburg, 159 p. (*In Russ.*)
4. Gulyaev A. N., Osipova A. Yu. 2020, Zoning of the central part of the Ural region according to the magnitude of the calculated force of seismic impact. Ekaterinburg, 89 p. (*In Russ.*)
5. Bogov S. G. 2013, Application of cement mortars for jet technology of soil consolidation, taking into account their rheological properties. *Gidrotekhnika* [Hydraulic Engineering], no. 4, pp. 84–86. (*In Russ.*)
6. Bogov S. G. 2014, Adaptation of jet technology for the purpose of developing underground space in the historical part of St. Petersburg in soft soil conditions. *Zhilishchnoye stroitel'stvo* [Housing Construction], no. 3, pp. 25–30. (*In Russ.*)
7. Ulitsky V. M., Bogov S. G. 2017, Experience of effective use of jet cementation in geotechnical practice of St. Petersburg during reconstruction and new construction. *Geotehnika* [Geotechnics], no. 4, pp. 16–25. (*In Russ.*)
8. Moseley M. P., Kirsch K. 2004, Ground improvement. London, 440 p. https://doi.org/10.1201/9780203489611
9. Karol R. H. 2003, Chemical grouting and soil stabilization. Reston, Virginia, 536 p.
10. Ibragimov M. N., Semkin V. V., Shaposhnikov A. V. 2017, Cementation of soils by injection of solutions in construction. Moscow, 266 p. (*In Russ.*)
11. Shashkin A. G. 2021, Monitoring of buildings and equipment in construction and operation. St.-Petersburg, 640 p. (*In Russ.*)
12. Lushnikov V. V., Orzhekhovsky Yu. R., Epp A. Ya., Smetanin M. V. 2013, A method for constructing and analyzing the stress-strain state of buildings, structures and other vertically extended objects on unevenly compressible soils, bulletin no. 6. (*In Russ.*)

✉oon5316@mail.ru
https://orcid.org/0009-0003-8087-5738

13. Alekhin A. N. 2015, Justification of the method for determining the parameters of a nonlinear soil model based on data from its field tests. *Akademicheskiy vestnik UralNIIproyekt RAASN* [Academic bulletin UralNIIproekt RAASN], no. 1, pp. 57–62. (*In Russ.*)
14. Alekhin A. N., Alekhin A. A. 2021, The building foundation and its soil foundation are an integral load-bearing part of the building. *Stroykompleks Srednego Urala* [Construction complex of the Middle Urals], no. 245 (05), pp. 32–33. (*In Russ.*)
15. Alekhin A. N., Alekhin A. A., Alekhin V. N. 2019, Experience in designing the foundations of a multi-storey building on the eluvial soils of the Urals using a model of non-linear soil deformation. *Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures: International Conference*. Ekaterinburg, vol. 972, article number 012016. https://doi.org/10.1088/1757-899X/972/1/012016
16. Makovetskiy O. A. 2021, Calculation and design of an artificial foundation "structural geotechnical massif", PhD thesis. Moscow, 363 p. (*In Russ.*)
17. Travush V. I., Fedorov V. S., Makovetskiy O. A. 2020, Theoretical substantiation of the mechanism patterns of the manmade base "structural geotechnical solid". *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, vol. 16, no. 4, pp. 103–110. https://doi.org/10.22337/2587-9618-2020-16-4-103-110

The article was received on November 01, 2023