

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Н. Абакумова

Абакумова Наталия Викторовна

**Инженерно-геологические особенности насыпных грунтов
территории города Москвы**

Специальность 1.6.7. — Инженерная геология, мерзлотоведение и
грунтоведение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2024

Диссертация подготовлена на кафедре инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

- Научный руководитель** – **Самарин Евгений Николаевич**,
доктор геолого-минералогических наук, доцент
- Официальные оппоненты** – **Экзарьян Владимир Нишанович**,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Российский государственный
геологоразведочный университет имени
Серго Орджоникидзе», экологический факультет,
заведующий кафедрой экологии и природопользования
- Лаврусевич Андрей Александрович**,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский
институт по проблемам гражданской обороны и
чрезвычайных ситуаций МЧС России» (федеральный
центр науки и высоких технологий), главный научный
сотрудник научно-исследовательского центра
- Карпенко Федор Сергеевич**,
кандидат геолого-минералогических наук,
ФГБУН «Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева
Российской академии наук», ведущий научный
сотрудник, заведующий лабораторией изучения состава
и свойств грунтов

Защита диссертации состоится 11 октября 2024 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.1 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, Москва, Ленинские горы, д. 1, Главное здание МГУ, корпус «А», геологический факультет, аудитория 415.

E-mail: mgu.04.01@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27), а также на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3041>

Автореферат разослан 5 сентября 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук, доцент

Н.А. Харитоновна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Техногенные грунты являются наиболее молодыми и наименее изученными геологическими образованиями и в соответствии с СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения» относятся к специфическим грунтам. На городских территориях широко распространены насыпные техногенные грунты, перемещение и укладка которых осуществляются с использованием транспортных средств. В г. Москве массивы насыпных грунтов встречаются практически повсеместно в виде земляных сооружений, засыпанных оврагов и русел рек, несанкционированных свалок, отвалов промышленных отходов и т.п., имеют мощность до 25 м и более. В пределах г. Москвы также располагаются крупные полигоны твердых коммунальных отходов (ТКО) и полигоны приема отходов строительства, высота которых достигает 45 м. При этом стремительными темпами продолжается накопление новых объемов насыпных грунтов.

При расширении селитебного пространства и уплотнении застройки происходит вовлечение массивов техногенных отложений в строительную деятельность, что вызывает необходимость решения вопросов, связанных с безопасным размещением зданий и сооружений на мощных толщах насыпных грунтов, рекультивации существующих отвалов, разработки проектов рационального использования строительных и промышленных отходов. На сегодняшний день детальное изучение насыпных грунтов, составление их типизации и разработка теоретических аспектов освоения занятых ими территорий актуальны не только на фундаментальном научном уровне, но и при разработке генеральных планов развивающихся городов и решении других практических задач.

Степень разработанности темы исследования. Результаты исследований, касающиеся вопросов образования, классифицирования и инженерно-геологических особенностей техногенных, в т.ч. насыпных грунтов, представлены в работах Ф.В. Котлова, М.И. Хазанова, Н.Н. Лушихина, Ю.М. Абелева, В.И. Крутова, А.П. Афолина, И.В. Дудлера, Р.С. Зиангирова, Ю.М. Лычко, О.А. Савинова, Е.М. Сергеева, А.М. Худайбергенова, Е.Н. Огородниковой, С.К. Николаевой, Д.В. Спиридонова, Д.С. Дроздова, В.Д. Ломтадзе, Ф.П. Саваренского, В.Т. Трофимова, В.А. Королева, Е.А. Вознесенского, М.А. Викторовой, А.Г. Кошелева, Н.В. Осинцевой, Н.С. Евсеевой, Е.П. Труфмановой, Е.М. Пашкина, Д.Ю. Здобина, А.А. Каздыма, Э.А. Лихачевой, А.Н. Галкина, Д.Ю. Чунюка, И.В. Аверина, О.В. Коптевой, В.Н. Широкова, М.Б. Куринова, В.Г. Шлыкова, И.А. Бражника, М. Edgeworth, D.deB. Richter, P. Haff, C. Neal, J.R. Ford, S.J. Price, A. Cooper, C. Waters, A. Peloggia, H. Kessler, A. Humpage, M. Rosenbaum, A. McMillan, J. Powell, M. Culshaw, K. Northmore и др.

Исследованием инженерно-геологических характеристик оптимальных грунтовых смесей занимались Е.Г. Борисова, А.Ю. Мирный, А.З. Тер-Мартirosян. Вопросы вторичного

использования отходов инженерно-хозяйственной деятельности человека рассмотрены в работах Т.А. Барабошкиной, С.Н. Владимирова, Н.Ю. Кирюшиной, Н.А. Ларионовой, Ю.М. Лычко, В.А. Мырина, Е.Н. Огородниковой, И.А. Паршакова, С.А. Сазоновой и др. Влияние массивов техногенных грунтов на компоненты окружающей среды отражены в работах В.Н. Аверьянова, А.М. Гальперина, А.С. Жерихина, В.А. Королева, Н.А. Ларионовой, В. Ферстера, Х.-Ю. Шефа и др.

Методы математического моделирования с целью определения степени техногенного изменения рельефа и построения пространственных инженерно-геологических моделей применялись J. Xiang, Sh. Li, K. Xiao, Ch. Jianping, G. Sofia, T. Paolo. Картирование техногенных отложений в пределах городских территорий, в т.ч. г. Москвы, проводилось Н.В. Аникиной, Е.А. Карфидовой, И.М. Кравченко, Э.А. Лихачевой, Л.С. Курбатовой, Е.И. Махориной, L. Sung ho, H. Dong soo, L. Pando, G. Flor-Blanco, S. Llana-Fúnez.

Цель и задачи исследования. Постоянно усложняющиеся технологии и методы подготовки территорий к строительству приводят к увеличению разнообразия типов насыпных грунтов, что вызывает необходимость обновления существующих классификаций. Стремительно увеличивающиеся объемы насыпных грунтов обуславливают необходимость их количественной оценки и картирования. **В связи с этим целью работы является инженерно-геологическая типизация насыпных грунтов территории г. Москвы, выявление общих закономерностей формирования их состава, строения и свойств, а также разработка эффективной методики картирования массивов техногенных отложений.**

Достижение цели работы сводилось к решению следующих *задач*.

1. На основе анализа опубликованных и фондовых данных составить характеристику инженерно-геологических условий территории г. Москвы и выявить основные источники техногенно переотложенных и техногенно образованных насыпных грунтов, определяющие их состав, строение и свойства.

2. Охарактеризовать общие тенденции изменения состава, строения и свойств природных грунтов при техногенном перемещении.

3. Разработать и обосновать типизацию массивов насыпных грунтов территории г. Москвы; изучить состав, строение и свойства выделенных типов насыпных грунтов, а также строение сложенных ими массивов по данным полевых и лабораторных исследований, фондовым и литературным данным.

4. Разработать и апробировать методику картирования массивов насыпных грунтов с использованием архивных данных буровых работ и топографических планов разных лет.

Объектами исследования являются техногенные крупнообломочные, песчаные и глинистые насыпные грунты г. Москвы различного генезиса, возраста и состава.

Фактический материал получен в ходе лабораторных исследований образцов насыпных грунтов, отобранных автором с площадок инженерно-геологических изысканий в 2017-2022 гг. Также в работе использованы материалы инженерно-геологических изысканий, предоставленные компаниями АО «МОСТДОРГЕОТРЕСТ», ООО «Инженерная Геология», ГК «Петромоделинг», ООО «НПЦ Основа», ООО «ГеоЭкоАльянс» и др.

Научная новизна результатов исследований

1. На основе представительного объема данных инженерно-геологических изысканий и проведенных автором полевых и лабораторных исследований определены характерные мощности и длительность существования массивов насыпных грунтов, а также диапазоны показателей инженерно-геологических свойств грунтов каждого из выделенных типов.

2. Выявлены закономерности изменения состава, строения и свойств грунтов различного генезиса и литологического состава (песчаных, глинистых и скальных) при техногенном перемещении.

3. Разработана типизация насыпных техногенных грунтов территории г. Москвы, учитывающая их генетические и инженерно-геологические особенности.

4. Описан новый тип «грунты полигонов приема строительных отходов». Впервые выделены группа «грунты смешанного генезиса» и два типа в её составе: «грунты строительных насыпей с примесью зол и золошлаков» и «грунты отвалов строительных, бытовых и промышленных отходов».

5. Разработана и апробирована методика комплексного ретроспективного анализа территорий с целью определения мощностей и конфигурации массивов насыпных грунтов с использованием архивных скважин и топографических планов. Разработаны методические рекомендации для проведения инженерных изысканий на освоенных территориях.

Теоретическая и практическая значимость

1. Выявлены закономерности изменения состава, строения и свойств грунтов при техногенном перемещении, которые могут быть использованы при прогнозировании поведения и свойств грунтов в насыпных массивах.

2. Выполненная инженерно-геологическая характеристика насыпных техногенных грунтов может быть использована на предварительных стадиях проектирования объектов в пределах г. Москвы на территориях, занятых массивами насыпных грунтов, и для совершенствования нормативно-методической базы инженерно-геологических изысканий на урбанизированных территориях.

3. По разработанной методике комплексного ретроспективного анализа территории построена карта техногенных отложений участка в районе Черёмушки, что позволяет внести уточнения в Карту техногенных отложений Геологического атласа Москвы.

4. Предложены рекомендации по комплексу исследований на территориях распространения техногенных (насыпных) грунтов, включающему применение комплексного ретроспективного анализа использования исследуемой территории, а также построение карты распространения и мощности техногенной толщи с помощью цифровой модели восстановленного рельефа.

Основные методы исследований. В диссертационном исследовании использован стандартный комплекс методов изучения состава, строения и свойств грунтов с привлечением оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития МГУ имени М.В. Ломоносова. Минеральный состав грунтов был изучен рентгенодифракционным фазовым анализом с помощью рентгеновского дифрактометра Ultima-IV фирмы Rigaku (Япония). Оценка микростроения грунтов выполнена с помощью рентгеновского компьютерного микротомографа Yamato TDM-1000H-II и растрового электронного микроскопа LEO 1450VP. Изучение особенностей строения песчаных фракций проводилось с помощью оптического микроскопа (Levenhuk DTX 500 LCD). Анализ прочностных и деформационных свойств грунтов проведен с помощью автоматизированного комплекса АСИС «Геотек» и одометра ЦНИИ МПС. Для построения трехмерной геологической модели и карты-схемы характера изменения рельефа применено современное программное обеспечение (QGis, AutoCad, ArcMap, Google Earth Pro, Easy Trace). Обработка фактического материала произведена с помощью компьютерных программ Microsoft Excel, Statistica.

Защищаемые положения

1. Характер изменения состава, строения и свойств насыпных грунтов при техногенном перемещении определяется как генетико-морфологическими особенностями грунтов в естественном залегании, так и технологией и давностью отсыпки. В наибольшей степени изменениям подвергаются грунты дочетвертичного возраста, обладающие прочными структурными связями: скальные грунты переходят в класс дисперсных с коренным изменением свойств. В песчаных грунтах происходит уменьшение дисперсности за счет вымывания тонких фракций; свойства переотложенных песков широко варьируют в зависимости от степени плотности в насыпном массиве и мало меняются во времени; глинистые грунты четвертичного возраста в насыпях меняют состав и свойства под влиянием условий и истории формирования массива, физико-химических факторов окружающей среды и времени.

2. Типизация насыпных техногенных грунтов территории города Москвы должна быть построена на следующих классификационных признаках (степенях): генетических – направление хозяйственной деятельности (*группы*), способ образования (*подгруппы*), результат хозяйственной деятельности (*типы* – основная таксономическая единица); инженерно-

геологических – литологический состав (*виды*) и особенности химического состава, физических, физико-химических и физико-механических свойств грунтов (*разновидности*).

3. Построение цифровой модели восстановленного рельефа местности должно выполняться с применением комплексного ретроспективного анализа, включающего: 1) сравнение древнего и современного рельефов; 2) учет архивных материалов по инженерно-геологическим выработкам; 3) обязательную верификацию модели, что позволяет повысить точность построения карт мощностей техногенных отложений на предварительных стадиях инженерно-геологических изысканий.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на заседании секции инженерной геологии Московского общества испытателей природы (Москва, 2024). Отдельные разделы работы были представлены автором на научных конференциях: Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (МГУ, Москва, 2019, 2020, 2022 гг.); IV Общероссийская научно-практическая конференция «Инженерные изыскания в строительстве» (ИГИИС, Москва, 2022); Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы экологии и природопользования» (РУДН, Москва, 2019, 2020, 2022 гг.); Ломоносовские чтения, секция «Геология» (МГУ, Москва, 2021 г.); Сергеевские чтения. Фундаментальные и прикладные вопросы современного грунтоведения (ИГЭ РАН, Санкт-Петербург, 2022 г.); Геоинфо & Ехро 2023. Конференция «Инженерные изыскания. Геотехническое проектирование. Инженерная защита территории» (Москва, 2023 г.).

Публикации автора по теме диссертации

Результаты проведенных исследований, основные положения и вопросы, рассматриваемые в диссертации, изложены в 4 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.6.7: «Инженерные изыскания» (2021, №1-2), «Инженерная геология» (2022, №2; 2023, №1) и «Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология» (2023, №6); а также в 5 статьях в сборниках «Актуальные проблемы экологии и природопользования» (2019, 2020, 2022), «Ломоносовские чтения» (2021), «Инженерные изыскания в строительстве» (2022).

Личный вклад автора заключается в сборе, обработке и научном анализе фактического литературного и фондового материала; в личном обследовании массивов насыпных грунтов в обнажениях и скважинах, сопровождающемся отбором монолитов и проб; в полевых и лабораторных исследованиях состава, строения и свойств насыпных грунтов, слагающих массивы; в составлении типизации насыпных грунтов территории г. Москвы; в разработке методики комплексного ретроспективного анализа территорий совместно с Р.Ю. Жидковым и В.С. Рекуном.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 168 страницах и состоит из введения, 6 глав, выводов, списка литературы из 167 источников, из них 6 – фондовых, и 3 приложений. Текст содержит 60 графических иллюстраций и 20 таблиц.

Благодарности

В первую очередь автор хочет выразить благодарность научному руководителю профессору д.г.-м.н. **Е.Н. Самарину** за ценные советы, моральную поддержку и доценту к.г.-м.н. **С.К. Николаевой** за неоценимый вклад в разработку диссертационного исследования и становление автора в специальности.

Автор благодарен сотрудникам кафедры инженерной и экологической геологии, оказавшим всестороннюю поддержку при подготовке диссертационного исследования: заведующему кафедрой, профессору д.г.-м.н. В.Т. Трофимову, профессору д.г.-м.н. Е.А. Вознесенскому, профессору д.г.-м.н. В.А. Королеву за внимательное прочтение работы и конструктивную критику, О.И. Голубцовой, М.В. Фламиной, к.г.-м.н. И.А. Родькиной, к.г.-м.н. М.С. Чернову, к.г.-м.н. В.Н. Широкову, к.г.-м.н. В.В. Крупской, М.С. Никитину, И.В. Манухину, Н.П. Камышановой и Е.А. Савинковой за помощь в проведении лабораторных исследований грунтов, а также доценту кафедры геоэкологии экологического факультета РУДН Е.Н. Огородниковой за помощь и консультации при подготовке работы. Научному руководителю АО «МОСТДОРГЕОТРЕСТ» к.г.-м.н., д.ф.-м.н. ВМАК, академику РАЕН О.Р. Озмидову, генеральному директору ООО «Инженерная Геология» к.г.-м.н. И.В. Аверину, генеральному директору ГК «Петромоделинг» А.В. Бершову, генеральному директору ООО «НПЦ Основа» В.Н. Кляузову, генеральному директору ООО «ГеоЭкоАльянс» А.С. Морозову за оказанное содействие в сборе фактологического материала. Особую благодарность автор хочет выразить к.г.-м.н. главному инженеру по геологии отдела цифровой картографии ГБУ «Мосгоргеотрест» Р.Ю. Жидкову и инженеру В.С. Рекуну за вдохновение, помощь и моральную поддержку при подготовке диссертационной работы, а также ведущему специалисту ООО «ИГИИС» Н.А. Журавлёвой.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Современные представления о насыпных техногенных грунтах городских территорий

В главе приведен обзор исследований состава, строения и свойств техногенных и, в частности, насыпных грунтов, освещены вопросы их классифицирования и типизации, рассмотрены существующие подходы к картированию техногенных отложений, что позволило выделить основные направления, разрабатываемые в диссертационной работе.

В соответствии с ГОСТ 25100-2020 «Грунты. Классификация» техногенными грунтами называют «грунты, измененные, перемещенные или образованные в результате инженерно-

хозяйственной деятельности человека». По классификации техногенных грунтов А.П. Афолина с соавторами (1990) насыпные грунты могут быть как техногенно образованными, так и техногенно переотложенными.

На территории г. Москвы источником насыпных грунтов в первую очередь служит инженерно-строительная деятельность, заключающаяся как в выемке грунтов из котлованов и транспортных тоннелей с последующей отсыпкой в отвалы в качестве строительных отходов, так и в целенаправленном возведении земляных сооружений с заданными плотностными характеристиками. В результате хозяйственно-бытовой деятельности формируются грунты культурного слоя, полигоны ТКО. Промышленные предприятия Москвы до недавнего времени получали побочные продукты в виде зол и золошлаков теплоэнергетики и металлургических шлаков.

Первые детальные работы в области исследования техногенных грунтов принадлежат Ф.В. Котлову (1947), Ю.М. Абелеву и В.И. Крутову (1959), М.И. Хазанову (1975). Ими были созданы основополагающие общие классификации. В действующем ГОСТ 25100-2020 для техногенных грунтов приведена отдельная типизация, которая была переработана Е.А. Вознесенским (2019) с позиции современного грунтоведения. Среди частных классификаций стоит выделить работы Э.А. Лихачевой (1998) и Е.Н. Огородниковой, С.К. Николаевой, М.А. Нагорной, Е.П. Труфмановой (2015).

При этом не существует классификации, которая была бы разработана для г. Москвы с учетом специфики её геологического строения и истории градостроительного развития, учитывающая не только генетические, но и инженерно-геологические особенности насыпных грунтов, а также пространственное положение и строение массивов, сложенных ими.

Слабо изучены вопросы трансформации свойств грунтов при извлечении из природных массивов и переотложении в виде насыпей, изменения свойств переотложенных грунтов во времени. Картирование техногенных отложений также носит поверхностный характер – используются классические интерполяционные методы по пробуренным скважинам или простое вычитание цифровых моделей рельефа разных лет.

Таким образом, анализ исследований инженерно-геологических особенностей насыпных грунтов выявил необходимость в создании региональной типизации насыпных грунтов, детальном изучении формирования свойств техногенно переотложенных грунтов и разработке эффективной методики их картирования.

Глава 2. Характеристика объектов исследования

В главе приведена характеристика инженерно-геологических условий территории г. Москвы, описаны распространение, мощность, состав и строение массивов насыпных грунтов на ключевых участках.

Москва находится в центральной части Восточно-Европейской равнины в двух крупных геоморфологических областях: Смоленско-Московской возвышенности и Мещерской низменности. Абсолютные отметки колеблются в пределах 114,2-254,4 м.

В геологическом строении верхних горизонтов земной коры территории г. Москвы до глубины 75 м (наибольшее заглубление Московского метрополитена) принимают участие отложения каменноугольной, юрской, меловой и четвертичной систем, представленные грунтами различных классов и подклассов: скальными, дисперсными связными и дисперсными несвязными, – все эти различия служат исходным материалом для формирования массивов техногенно перемещенных и отчасти техногенно образованных насыпных грунтов.

Гидрогеологические условия территории г. Москвы до глубины инженерно-хозяйственного освоения характеризуются наличием двух гидрогеологических этажей, разделенных юрским водоупором: мезокайнозойского и каменноугольного.

Представленные в диссертационной работе результаты базируются на исследовании 95 участков, равномерно распределенных по территории г. Москвы с учетом освоенности. Выбранные объекты имеют разный возраст, состав, строение и происхождение, отсыпаны с разной целью и подверглись различному постгенетическому преобразованию, что позволило составить исчерпывающую типизацию насыпных грунтов г. Москвы и в полной мере оценить их инженерно-геологические особенности. Для оценки трансформации свойств техногенно переотложенных грунтов и определения значений влажности, плотности и физико-механических характеристик насыпных грунтов для типизации выбраны и описаны 11 ключевых участков.

Для техногенно переотложенных насыпных грунтов в большинстве случаев исходным природным материалом служат четвертичные отложения ледникового и аллювиального генезиса, реже встречаются переотложенные меловые пески, юрские глины, каменноугольные известняки и глины. Возраст насыпных грунтов на исследуемых участках на момент проведения инженерно-геологических изысканий составлял преимущественно 30-70 лет. В отдельных случаях были изучены свежотсыпанные грунты, возраст которых не превышал 5 лет, а также грунты культурного слоя.

Глава 3. Методика решения поставленных задач

В главе описывается общая схема методики решения поставленных задач (рис. 1). Оценка изменения грунтов при техногенном перемещении производилась путем сравнения показателей их состава, строения и свойств в естественном залегании и переотложенном состоянии, определенных в полевых и лабораторных условиях по стандартным методикам. Типизация насыпных грунтов территории г. Москвы составлена в соответствии с законами логики по В.А. Королеву (2016). Методика комплексного ретроспективного анализа рельефа городских территорий разработана совместно с сотрудниками ГБУ «Мосгоргеотрест».

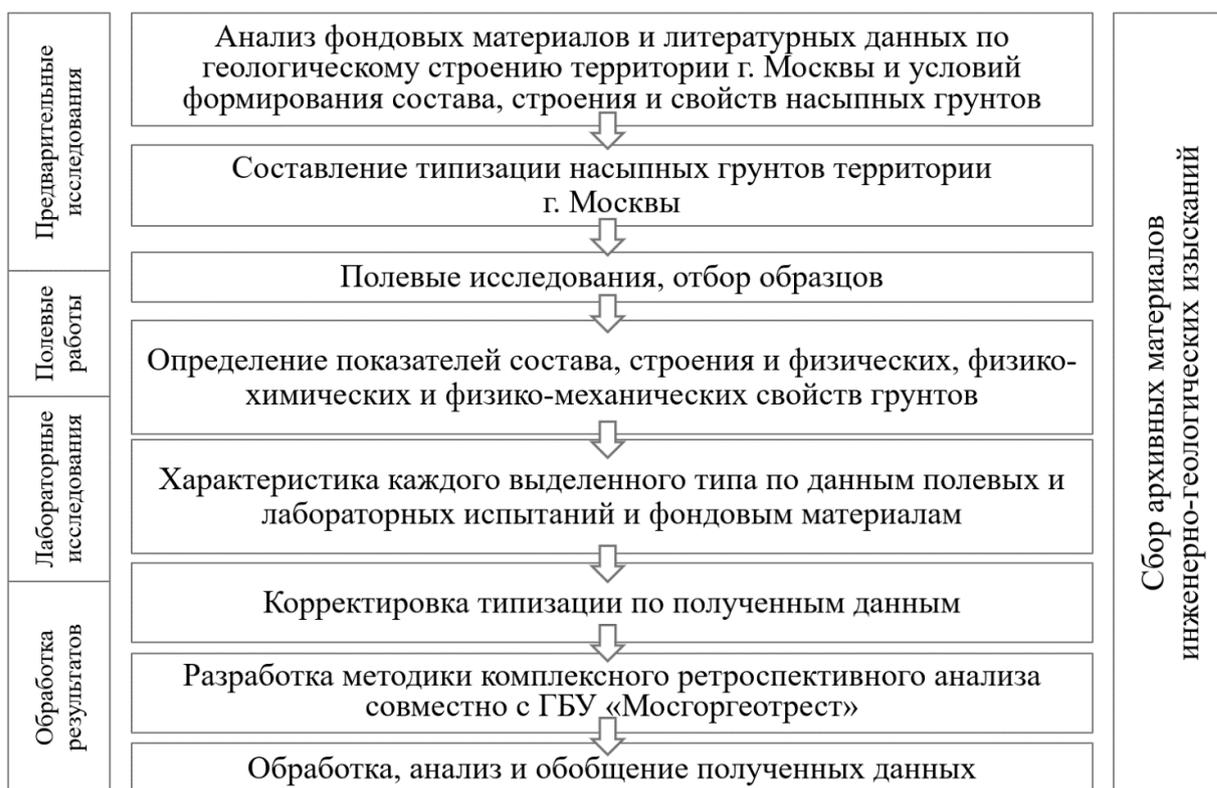


Рисунок 1. Общая методологическая схема решения поставленных задач

Глава 4. Закономерности формирования состава, строения и свойств техногенно перетолженных насыпных грунтов (на примере массивов в западной части г. Москвы и месторождения строительных песков «Тимковское»)

В главе представлены результаты исследований изменения состава, строения и свойств грунтов при техногенном перемещении, включающем в себя дробление, выемку, транспортировку и отсыпку грунтов, часто сопровождаемых неконтролируемым смешением с другими грунтами или отходами.

Любая осадочная горная порода имеет предысторию своего зарождения (мобилизацию исходных веществ), историю накопления начального продукта (осадка) и его вещественно-структурного преобразования в породе с последующими постгенетическими изменениями и окончательным разрушением на дневной поверхности, или полной метаморфизацией и переплавлением в недрах. В отличие от природной техногенная мобилизация вещества реализуется при разработке грунтов, далее происходит их транспортировка с последующей «седиментацией» (отсыпкой разными способами). Процессы техногенного диагенеза протекают с разной скоростью (в зависимости от наличия или отсутствия предварительного уплотнения). После формирования насыпного массива к процессам диагенеза (слеживания, формирования новых связей, упрочнения) добавляются гипергенные процессы, которые могут приводить во времени к регрессивному литогенезу (рис. 2). Описанные техногенные процессы протекают с несоизмеримо большими скоростями, чем природные.



Рисунок 2. Схема стадий техногенного литогенеза

Изменения, которые грунты претерпевают в процессе техногенного перемещения, определяются, главным образом, их исходными инженерно-геологическими характеристиками и природными и техногенными факторами, главными из которых являются литологический состав грунтов и цель отсыпки.

Для *песчаных грунтов* четвертичного возраста при техногенном перемещении особую роль играют изменения их гранулометрического состава и плотность отсыпки или укладки. Процессы консолидации в песчаных насыпных массивах завершаются быстро, поэтому давность отсыпки не является определяющим фактором формирования их свойств. Укладка песков при оптимальной влажности с плотностью, соответствующей проектному коэффициенту уплотнения 0,95-0,98, приводит к увеличению угла внутреннего трения и снижению сжимаемости относительно их залегания в естественном состоянии. Нецеленаправленная отсыпка, наоборот, приводит к повышению неоднородности, снижению плотностных и физико-механических характеристик песчаных грунтов.

Показатели свойств песчаных грунтов зависят не только от технологии отсыпки, но и от способа их добычи. Разработка обводненных месторождений строительных песков производится гидромеханизированным способом, что позволяет «отмыть» пылеватые и глинистые частицы и изменить свойства песков (табл. 1).

Таблица 1. Характеристика строительных песков месторождения «Тимковское»

Геологический индекс	Содержание глинистых и пылеватых частиц, %	Средний диаметр частиц, мм	Кф, м/сут	ρ_d , г/см ³	W _{опт} , %
aQ _{III-IV}	4	0,20	0,1	1,68	14,3
tQ _{IV}	0	0,21	2,7	1,59	13,4

Для *глинистых грунтов* наблюдается другая закономерность: даже целенаправленная укладка с послойным уплотнением зачастую не позволяет достичь исходных физико-механических характеристик грунтов и плотности, при этом насыпь, сложенная глинистыми грунтами, может уплотняться под собственным весом в течение нескольких лет. В глинистые грунты при формировании насыпи часто попадает крупнообломочный материал: строительный и бытовой мусор, обломки раздробленных горных пород, песчаные грунты, происходит уменьшение дисперсности. Расширяется диапазон изменения показателей физических и физико-механических свойств грунтов, а характер изменения зависит от способа отсыпки (целенаправленное или стихийное).

Особенно неблагоприятно процесс перемещения сказывается на грунтах дочетвертичного возраста, особенно, литифицированных. Разрушение прочных структурных связей глинистых и скальных грунтов или нарушение плотной упаковки частиц в песчаных грунтах приводит к необратимому снижению физико-механических характеристик грунтов даже при целенаправленной укладке. Так, нижнемеловые пылеватые пески, слагающие оползневой склон на Воробьевых горах, подверглись ступенчатой переработке – гравитационному, водно-гравитационному и техногенному перемещению. В процессе природного воздействия происходила сортировка частиц грунтов, повышение однородности гранулометрического состава, вместе с тем и естественное разуплотнение до рыхлого состояния. Техногенное воздействие, наоборот, привело к попаданию в грунты антропогенных включений, увеличению коэффициента неоднородности, и они вновь были техногенно уплотнены (рис. 3).

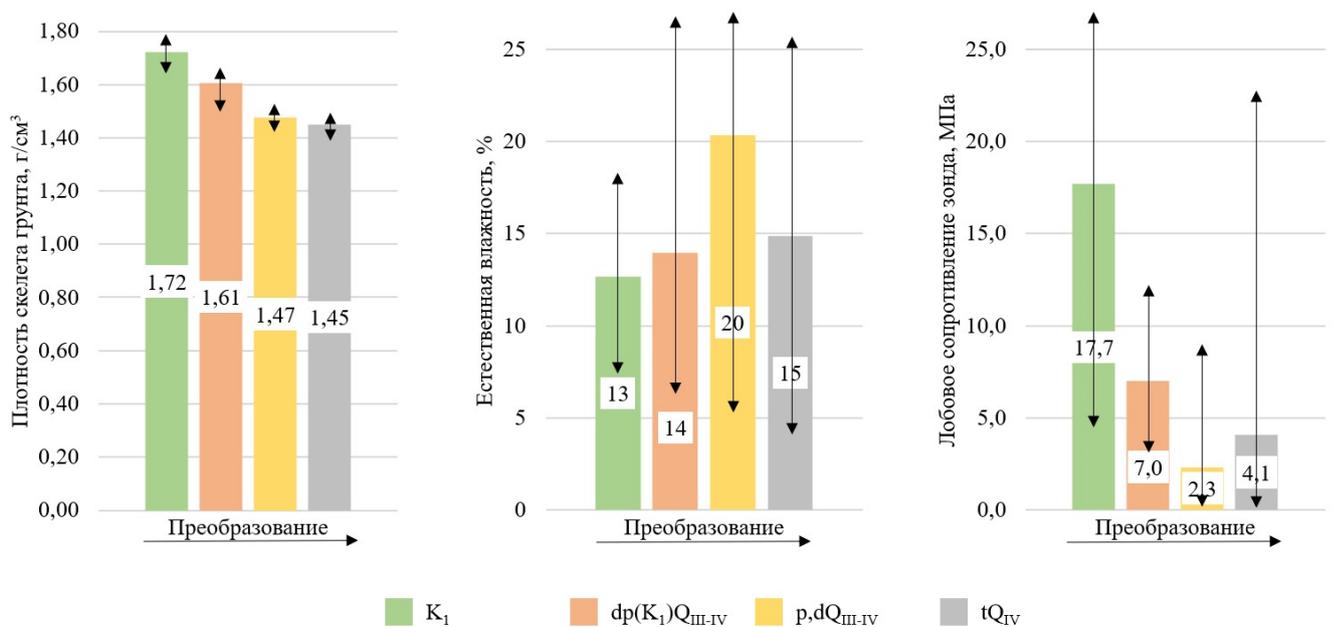


Рисунок 3. Изменение инженерно-геологических характеристик пылеватых песков мелового возраста при гравитационном, водно-гравитационном и техногенном перемещении

Юрские и каменноугольные глины твердой и полутвердой консистенции подвержены набуханию и необратимому разуплотнению. Каменноугольные мергели и известняки при разработке дробятся и переходят в класс дисперсных грунтов щебенистой и дресвяной размерности с заполнителем или без него.

При извлечении грунтов из транспортных тоннелей происходит их разуплотнение, связанное со снятием бытовой нагрузки, дроблением породы, образованием пустотности и набуханием. Коэффициент разрыхления, под которым понимается отношение объема горной породы в отвале к объему горной породы в массиве, зависит от литологического состава, степени литификации (возраста), консистенции и плотности природного сложения (табл. 2).

Таблица 2. Коэффициенты разрыхления грунтов на территории г. Москвы

Геологический индекс	Наименование грунта	Проектная плотность, г/см ³	Коэффициент разрыхления
gQ _{IIms}	суглинки полутвердые	2,17	1,31
gQ _{I_ds}	суглинки полутвердые	2,12	1,41
a,fQ _{Ivk-ds} ¹	пески мелкие средней плотности	-	1,18
aQ _{III}	пески мелкие средней плотности	1,92	1,55
K ₁	пески средней крупности плотные	2,05	1,35
K ₁	пески пылеватые плотные	2,02	1,49
K _{1pr}	суглинки полутвердые	2,01	1,25
K _{1pr}	глины полутвердые	1,93	1,46
J _{3fl}	глины полутвердые	1,92	1,88
J _{2-3vd-er}	глины полутвердые	1,77	1,68
C _{3ts} ²	глины мергелистые твердые	2,71	1,72
C _{3kr} ₂	глины твердые	2,11	2,12
C ₂₋₃	известняки и мергели	2,31	1,75

Примечание: коэффициенты разрыхления вычислены по данным АО «МОСТДОРГЕОТРЕСТ».

Таким образом, изменение состава, строения и свойств грунтов при техногенном перемещении носит разнонаправленный характер, который зависит как от характеристик грунтов в естественном залегании, так и от способа и технологии отсыпки. Стоит отметить, что неконтролируемое смешение грунтов разного литологического состава при перемещении препятствует прогнозированию свойств насыпных грунтов в отвале, поэтому рекомендуется их раздельное складирование.

Глава 5. Типизация насыпных техногенных грунтов территории г. Москвы

В главе приведена разработанная автором типизация насыпных техногенных грунтов территории г. Москвы, описаны инженерно-геологические особенности каждого выделенного типа.

Основой для построения типизации послужили разработки Ф.В. Котлова (1977), А.П. Афолина и др. (1990), Е.Н. Огородниковой и С.К. Николаевой (2015), М.А. Викторовой (2007). Предлагается следующая последовательность деления.

Признаком для выделения **групп** насыпных грунтов предлагается их генезис по виду хозяйственной деятельности человека. Грунты разделены по группам на *инженерно-строительные, хозяйственно-бытовые, промышленные и смешанного генезиса*.

Подгруппы целесообразно разделять по способу образования грунтов – путем укладки или стихийной отсыпки. В пределах одной группы грунты могут отсыпаться как целенаправленно с соблюдением проектных требований (отсыпки с последующим уплотнением, укладки), так и стихийно, если это, например, грунты строительных отвалов. В этих двух случаях грунты будут иметь значения показателей физических и физико-механических свойств, различающиеся в разной степени за счет уплотнения в первом случае и неизбежной неоднородной пустотности при хаотичной отсыпке во втором.

Типы насыпных грунтов (центральный и самый важный таксон) следует выделять непосредственно по результату хозяйственной деятельности в виде переотложенного или образованного грунта, формирующего насыпной массив или его часть.

Насыпные грунты могут иметь *локальное* распространение, если они сосредоточены в пределах одного здания или группы сооружений, *площадное*, если насыпь выходит за пределы микрорайона, а её площадь существенно превышает мощность отложений, и *линейное*, если длина насыпи существенно превышает ширину.

Виды предлагается выделять по литологическому составу грунтов – крупнообломочные, песчаные, глинистые, а также песчаные и глинистые с крупнообломочными включениями.

Разновидности, как в большинстве инженерно-геологических классификаций природных грунтов, традиционно выделяются по количественным показателям состава, строения, состояния и свойств грунтов в соответствии с действующими нормативными документами.

Типизация включает краткую характеристику выделенных типов: вещественный состав, распространение, формируемые мощности. Для каждого вида приведены диапазоны значений влажности, плотности, модуля деформации, сцепления и угла внутреннего трения и их средние показатели. Сокращенная схема типизации приведена в табл. 3.

Таблица 3. Сокращенная схема инженерно-геологической типизации насыпных грунтов территории г. Москвы

Группа (по виду деятельности)	Подгруппа (по способу образования)	Тип (по результату хозяйственной деятельности)	Характеристика грунтов		Вид (по литологическому составу)	
			распространение	максимальные мощности толщ, м		
Инженерно-строительные	плановмерно возведенные насыпи из природных грунтов и грунтовых смесей	грунты насыпей линейных сооружений	линейное	до 20	песчаные глинистые	
		грунты песчаных подушек, обратных засыпок и насыпных территорий	локальное, площадное	до 15	песчаные	
		грунты гидротехнических сооружений	локальное, линейное, площадное	до 30	преимущественно песчаные, реже крупнообломочные, глинистые	
	плановмерно возведенные насыпи из строительных отходов	грунты защитных экранов хранилищ коммунальных и промышленных отходов	локальное, площадное	до 1-2	глинистые	
		грунты планировки территории	локальное, площадное	до 5	песчаные глинистые	
		грунты полигонов приема строительных отходов	локальное, площадное	до 40	преимущественно глинистые	
	стихийно отсыпанные строительные отходы	грунты несанкционированных отвалов из котлованов и транспортных тоннелей	грунты разрушенных строительных конструкций и дорожных покрытий	локальное, площадное	до 30	крупнообломочные песчаные глинистые
						блочные, крупнообломочные, реже песчаные

Продолжение таблицы 3

Группа (по виду деятельности)	Подгруппа (по способу образования)	Тип (по результату хозяйственной деятельности)	Характеристика грунтов		Вид (по литологическому составу)
			распространение	максимальные мощности толщ, м	
Хозяйственно-бытовые	планомерно и стихийно отсыпанные коммунальные отходы	грунты полигонов ТКО и несанкционированных свалок	локальное	до 45	песчаные
				до 30	глинистые
Промышленные	стихийно отсыпанные бытовые отходы и природные грунты	грунты культурного слоя	площадное	до 25	песчаные и глинистые с крупнообломочными включениями
		грунты-отходы металлургической промышленности	локальное	до 15	крупнообломочные, песчаные
Смешанного генезиса	планомерно возведенные насыпи из природных грунтов и промышленных отходов	грунты-отходы топливно-энергетической промышленности	локальное, площадное	до 14	песчаные
		грунты строительных насыпей с примесью зол и шлаков	локальное, линейное	до 10	песчаные
	стихийно отсыпанные строительные, промышленные и бытовые отходы	грунты отвалов строительных, бытовых и промышленных отходов	локальное, площадное	до 25	преимущественно крупнообломочные, реже песчаные и глинистые, с крупнообломочными включениями

Глава 6. Применение комплексного ретроспективного анализа при определении конфигурации массивов насыпных грунтов

В главе приведена верификация цифровой модели восстановленного рельефа (ЦМВР), построенной по разработанной методике комплексного ретроспективного анализа, и оценка возможности применения методики на всей территории г. Москвы.

Цель разработанной методики заключается в построении ЦМВР, соответствующей подошве техногенных отложений. Вычитание ЦМВР из современного рельефа позволяет более точно определять мощность насыпных грунтов на исследуемых участках.

В качестве исходных материалов необходимы:

- наиболее древний топографический план местности, содержащий численную информацию о рельефе в виде изолиний и отдельных отметок высот;
- выборка архивных скважин;
- современный топографический план, или цифровая модель рельефа (ЦМР).

В настоящем исследовании построение ЦМВР проводилось в программном комплексе ArcMap. Однако оно может быть воспроизведено в любом программном обеспечении для работы с пространственными данными.

1. Алгоритм Bottom. Построение растрового изображения с помощью инструмента Topo to Raster по отметкам подошвы техногенных отложений в архивных выработках.

2. Алгоритм Thick. С помощью инструмента Extract Values to Points для архивных скважин снимаются отметки современного рельефа. Производится вычитание отметки подошвы техногенных отложений из отметки современного рельефа – это процедура получения расчетной мощности (H_p). Далее производится построение растра по значениям в точках бурения скважин H_p (Topo To Raster). Участкам с отрицательными значениями H_p с помощью инструмента Con присваивается величина 0,5 м. Данная процедура может быть описана формулой 1.

$$H_p = \max(0.5, (Z-B)), (1)$$

где Z – отметка земной поверхности в точке бурения инженерно-геологической скважины, взятая из ЦМР, м; B – абсолютная отметка подошвы техногенных грунтов, задокументированная на момент бурения, м. В моделировании использование этого показателя вместо мощности техногенных грунтов, зафиксированной в буровых скважинах, позволяет сделать поправку на изменение рельефа земной поверхности (следовательно, и кровли техногенных отложений) с момента бурения скважины.

3. Алгоритм Max. С помощью инструмента Cell statistics отбирается максимум по двум растрам, полученным при выполнении алгоритмов Bottom и Thick. Помимо функции максимум можно использовать минимизацию и осреднение. Выбор функции повышает или

снижает точность построения ЦМВР в зависимости от метода интерполяции. Для инструмента *Toro To Raster*, входящего в состав программного комплекса *ArcMap*, наибольшую точность показала функция максимум.

4. Алгоритм *Paleo*. На данном этапе в качестве ЦМВР используются только архивные данные о рельефе. При необходимости производится оцифровка (векторизация) горизонталей. Она может производиться вручную непосредственно в программе *ArcMap* или автоматизировано с помощью программы *Easy Trace*. Далее необходимо построение растра восстановленного рельефа (*Toro To Raster*) по полученным горизонталям и точкам с абсолютными отметками.

5. Алгоритм *Paleo_Max*. С помощью инструмента *Cell statistics* применяется функция минимум к двум растрам, полученным при выполнении алгоритмов *Paleo* и *Max*. Последний шаг позволяет детализировать ЦМВР в метрах разреженной посадки архивных скважин или прорисовать овраги, в которые архивные скважины не попали (рис. 4).

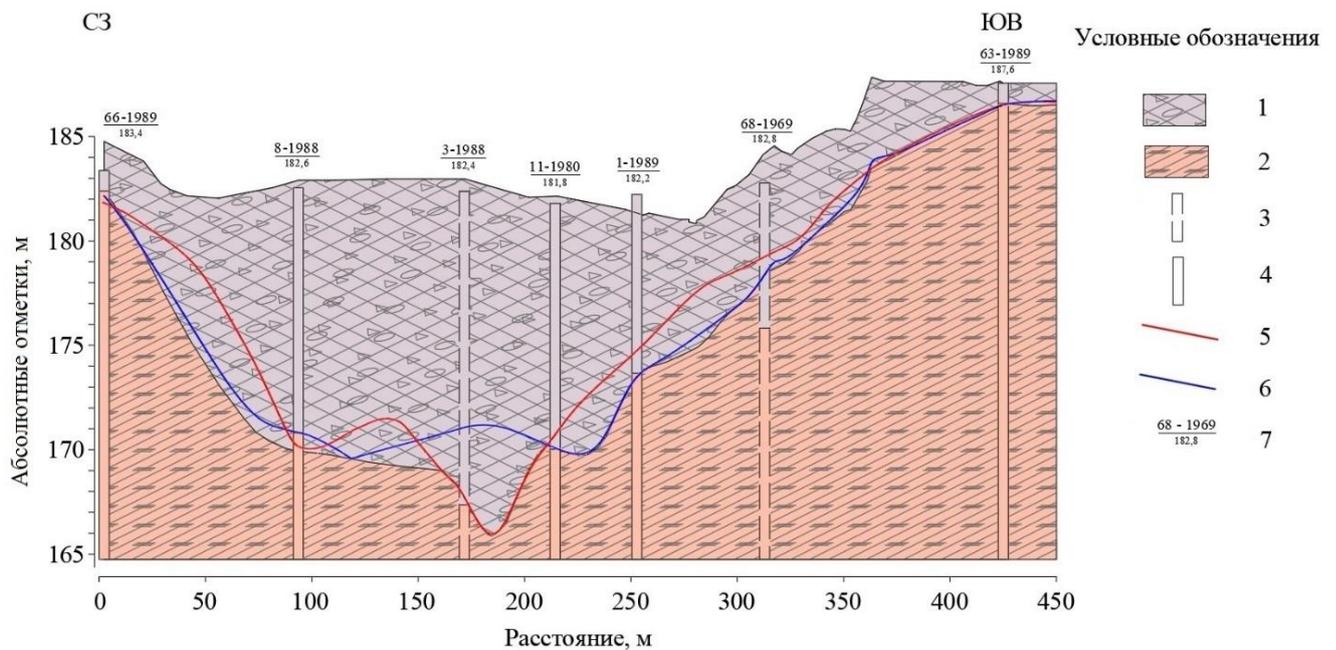


Рисунок 4. Характерный инженерно-геологический разрез территории изучаемого участка: 1 – техногенные грунты; 2 – природные грунты; 3 – скважина, использовавшаяся для оценки качества моделирования; 4 – скважина, использовавшаяся для построения модели; 5 – подошва техногенных отложений, построенная по алгоритму *Paleo*; 6 – подошва техногенных отложений, построенная по алгоритму *Max*; 7 – номер скважины, год бурения, абсолютная отметка устья

Результатом выполнения каждого алгоритма является ЦМВР, однако, последовательное их выполнение позволяет увеличить точность построения. Для оценки алгоритмов был выбран участок на юго-западе г. Москвы. Для моделирования и оценки его качества использовалась выборка из 568 архивных скважин, из которых 25% выработок не привлекались для построения модели, а были случайным образом отобраны для ее проверки.

Были использованы два вида метрик качества, определяемых при анализе цифровых пространственных данных, – средняя абсолютная ошибка (Mean Absolute Error – MAE) и среднеквадратичная ошибка (Root Mean Squared Error – RMSE), вычисляемые по формулам 2 и 3 соответственно. Чем ниже значения MAE и RMSE, тем лучше модель соответствует набору данных.

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|, \quad (2)$$

где y_i – фактическое значение для i -го наблюдения; \hat{y}_i – прогнозируемое значение для i -го наблюдения; n – размер выборки.

$$\text{RMSE} = \frac{1}{n} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}. \quad (3)$$

Для оценки влияния методов интерполяции было выполнено сравнение результатов работы каждого алгоритма с применением различных интерполяционных методов – Topo to Raster, (ArcMap), реализации ординарного кригинга (Golden Software Surfer), модуля RBF (радиальная базисная функция) (Alglib) и линейного интерполятора, основанного на триангуляционном построении поверхности (программа Safe Software FME). Результаты работы программ, основанных на различии алгоритмов, показаны на рис. 5.

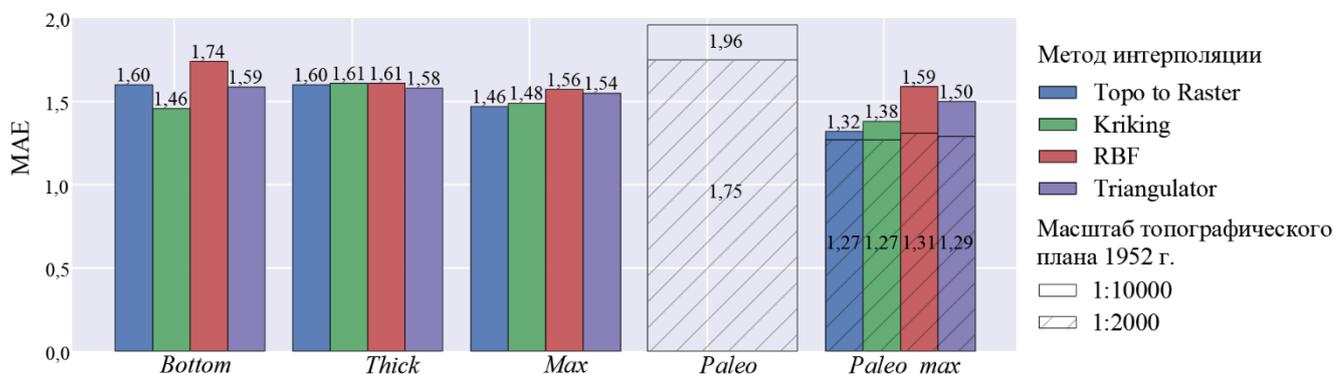


Рисунок 5. Результаты оценки средней абсолютной ошибки (MAE) алгоритмов по контрольной выборке

Верификация полученных результатов показала более высокую точность комплексного ретроспективного анализа по сравнению с тривиальными способами картирования, применявшимися ранее – интерполяции абсолютных отметок подошвы техногенных отложений в выработках (Bottom) и простого вычитания древних топографических планов из современного рельефа (Paleo). В зависимости от выбранного метода интерполяции и детальности исходных данных уменьшение MAE при комплексном подходе составляет 0,08-0,64 м.

Описанная методика была использована при формировании цифрового слоя техногенных отложений в региональной геологической модели г. Москвы, разрабатываемой в ГБУ «Мосгоргеотрест». Для этого на основе обработки комплекса архивных картографических

источников был создан цифровой слой восстановленного рельефа. Картографические материалы, сгенерированные на основе модельных данных, позволили существенно уточнить результаты геологического картографирования г. Москвы.

ВЫВОДЫ

1. В геологическом строении территории г. Москвы на глубину до 75 м принимают участие четвертичные, меловые, юрские и каменноугольные отложения, по литологическому составу представленные песками различной крупности, супесями, суглинками, глинами и известняками. В процессе строительной деятельности именно из них формируются массивы насыпных преимущественно техногенно переотложенных грунтов. К формированию массивов техногенно образованных насыпных грунтов приводят хозяйственно-бытовая и промышленная деятельность: в г. Москве расположено 4 полигона ТКО (из которых 1 действующий) и 6 официально зарегистрированных полигонов приема строительных отходов, 3 крупных отвала металлургических шлаков действовавших ранее заводов, на твердом топливе работало 11 тепловых электростанций.

2. Разработка, перемещение и целенаправленная или стихийная отсыпка природных грунтов приводят к изменению их состава, строения и свойств:

- в ходе выемки котлованов происходит неконтролируемое смешение природных грунтов разных видов и возрастов;
- в глинистые грунты попадает крупнообломочный материал: строительный и бытовой мусор, обломки раздробленных горных пород, песчаные грунты, происходит уменьшение дисперсности. Расширяется диапазон вариации показателей физических и физико-механических свойств грунтов, характер изменения зависит от давности и способа отсыпки (целенаправленное или стихийное);
- песчаные грунты при целенаправленной укладке перемещаются в неизменном виде либо с меньшим содержанием тонкодисперсной составляющей за счет отмыва глинистых и пылеватых частиц при гидромеханизированном способе разработки, в ходе чего снижается неоднородность грунтов, повышается их коэффициент фильтрации, снижается природное сцепление;
- скальные и полускальные грунты при разработке дробятся и переходят в класс дисперсных грунтов щебенистой и дресвяной размерности с заполнителем или без него.

3. Разработана типизация насыпных грунтов территории г. Москвы, учитывающая их генетические и инженерно-геологические особенности. Таксоны выделены по следующим признакам: группы – по виду деятельности; подгруппы – по способу образования; типы (основная категория) – по результату хозяйственной деятельности; виды – по литологическому

составу; разновидности выделяются по количественным показателям состава, строения и свойств в соответствии с действующими нормативными документами. Выделены пятнадцать типов насыпных грунтов, приводятся их отличительные особенности и инженерно-геологическая характеристика, включающая описание объемов и источников насыпных грунтов, распространения и форм нахождения в массиве, особенности их состава, строения и свойств.

4. Разработана методика комплексного ретроспективного анализа территорий, заключающаяся в построении цифровой модели восстановленного рельефа (со снятым покровом техногенных отложений) по данным архивных геологических выработок и старых топографических планов, позволяющая увеличить точность картирования массивов техногенных отложений. На экспериментальном участке применение разработанной методики позволило уменьшить среднюю абсолютную ошибку (МАЕ) на 0,08-0,64 м по сравнению с применявшимися ранее способами картирования.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.6.7., опубликованные автором по теме диссертации

1. Абакумова, Н. В. Типизация насыпных грунтов Московской агломерации / Н. В. Абакумова // Инженерная геология. – 2022. – Т. 17. – № 2. – С. 6-26. Импакт-фактор РИНЦ 2022: 0,256. Объем публикации: 1,7 п.л., объем вклада соискателя: 1,7 п.л.

2. Абакумова, Н. В. Классификации техногенных отложений в инженерной геологии: исторический обзор, современный взгляд на проблему / Н. В. Абакумова, С. К. Николаева, Е. Н. Самарин // Инженерные изыскания. – 2021. – Т. 15. – № 1-2. – С. 28-40. Импакт-фактор РИНЦ 2022: 0,256. Объем публикации: 1,1 п.л., объем вклада соискателя: 0,9 п.л.

3. Жидков, Р. Ю. Оценка точности и достоверности инженерно-геологических моделей на основе принципов машинного обучения / Р. Ю. Жидков, Н. В. Абакумова, Н. Н. Ракитина и др. // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2023. – № 6. – С. 4-15. Импакт-фактор РИНЦ 2022: 0,575. Объем публикации: 1,5 п.л., объем вклада соискателя: 0,7 п.л.

4. Жидков, Р. Ю. Применение комплексного ретроспективного анализа при определении конфигурации массивов техногенных грунтов на примере г. Москвы / Р. Ю. Жидков, Н. В. Абакумова, В. С. Рекун // Инженерная геология. – 2023. – Т. 18. – № 1. – С. 18-34. Импакт-фактор РИНЦ 2022: 0,256. Объем публикации: 1,4 п.л., объем вклада соискателя: 0,6 п.л.

Публикации в иных изданиях:

5. Абакумова Н. В., Николаева С. К., Самарин Е. Н. Изменение состава строения и свойств перемещенных дисперсных грунтов при антропогенном литогенезе // Ломоносовские чтения 2021 г. Секция Геология (МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 20-29 апреля 2021). — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. — С. 21–25.

6. Огородникова, Е. Н. Насыпные грунты Москвы / Е. Н. Огородникова, С. К. Николаева, Н. В. Абакумова // Актуальные проблемы экологии и природопользования: сб. науч. Тр. XX Междунар. конф. – Т. 1. – М.: РУДН, 2019. – С. 310-314.

7. Проблемы освоения территорий, занятых массивами насыпных грунтов / Н. В. Абакумова, И. В. Аверин, Е. Н. Самарин, С. К. Николаева // Актуальные проблемы экологии и природопользования. Сб. науч. трудов XXI Междунар. конф. – Т. 1. – М.: РУДН, 2020. – С. 231-235.

8. Абакумова Н. В., Жидков Р. Ю., Юрьев А. Е. Моделирование техногенного изменения рельефа - первый шаг при проектировании зданий и сооружений на освоенных территориях // Инженерные изыскания в строительстве. Мат. IV Общерос. конф. – М.: Геомаркетинг, 2022. – С. 103-111.

9. Абакумова Н. В. Источники насыпных грунтов городских территорий как основа их систематизации // Актуальные проблемы экологии и природопользования. Сб. тр. XXIII Междунар. конф. – Т. 1. – М.: РУДН, 2022. – С. 257-261.