



УДК 550.834.042

КАРСТОВЫЕ ОПАСНОСТИ ГОРОДА МОСКВЫ И ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

А. Ю. Скорнякова¹¹Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Статья посвящена изучению карстовых процессов в Москве, которые представляют серьёзную угрозу для городской инфраструктуры и экосистем. Рассмотрены геологические особенности столицы, включая формирование карстовых воронок и провалов, связанных с растворением известняков и доломитов под воздействием подземных вод. Особое внимание уделено геофизическим методам, таким как сейсморазведка, электроразведка и гравиразведка, которые позволяют выявлять карстовые зоны, оценивать риски и разрабатывать меры по их минимизации. Подчёркивается важность комплексного подхода и постоянного мониторинга для обеспечения безопасности городской среды. Статья также включает анализ геологического строения Москвы и классификацию геофизических методов, применяемых для изучения карстовых процессов.

Ключевые слова: карстовые процессы, геофизические методы, Москва, карстовые пустоты, сейсморазведка, электроразведка, гравиразведка

EDN: YKPIDH

1. ВВЕДЕНИЕ

Карстовые процессы представляют собой важный аспект геоморфологии, имеющий значительное влияние на человеческую деятельность, инфраструктуру и экосистемы. В условиях мегаполисов, таких как Москва, карстовая опасность может представлять серьёзную угрозу для зданий, дорог и других инфраструктурных объектов. В данном обзоре рассматриваются основные аспекты карстовой опасности в Москве, включая причины, а также как геофизические методы могут быть использованы для изучения карстовых процессов и как они помогают в оценке рисков и управлении ими. Несвоевременное обнаружение карстовых воронок и их ликвидация являются наиважнейшей задачей при проектировании техногенных объектов.

Оценка карстово-суффозионной опасности в Москве – это процесс, требующий комплексного подхода и использования современных геофизических методов. С учетом уникальных геологических условий столицы важно предусмотреть все возможные риски и разработать адекватные мероприятия для их минимизации [Кочев и Богданов, 2017]. Эффективное использование геофизических методов в сочетании с продвинутыми моделями и постоянным мониторингом состояния подземных вод позволит не только лучше понять текущие риски, но и предугадывать потенциальные угрозы, тем самым сохраняя безопасность городской среды.

Электронная почта авторов для переписки:

Скорнякова Александра Юрьевна, e-mail: alyaskorniyakova@mail.ru

<https://elibrary.ru/ykpidh>Адрес редакции журнала
«Гелиогеофизические исследования»:ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

Оценка опасности проводится с помощью «Карты опасности древних карстовых форм и современных карстово-суффозионных процессов» масштаба 1:10000. Используемый в карте критерий районирования по степени закарстованности карбонатного массива обладает сильной изменчивостью не только по глубине, но и по латерали. При масштабе 1:10000 эта изменчивость игнорируется [Кочев и др., 2018].

2. ОСОБЕННОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МОСКВЫ

Москва расположена на Московской возвышенности, где докембрийские и мезозойские отложения формируют основу карстового образования. В основном, карстовые процессы связаны с растворением известняков и доломитов под воздействием субповерхностных вод. Эти условия способствуют формированию карстовых явлений, включая воронки, пещеры и провалы. На таких основаниях происходит активное растворение пород под воздействием подземных вод, что, в свою очередь, вызывает образование пустот и трещин в грунте.

Москва лежит в пределах долины р. Москвы и ее притоков, Теплостанской возвышенности, Москворецко-Яузского и Яузско-Пехорского междуречий. На большей части территории слаборастворимые известняки и доломиты среднего карбона, а также чередующиеся карбонатные и глинистые породы верхнего карбона, покрыты мощным (более 20 метров) слоем нерастворимых глинистых и песчаных грунтов, образовавшихся в юрский, меловой и четвертичный периоды (рис. 1). Карстовые явления активно развиваются в районе юго-западной части города, что связано с наличием подземных вод и геологических особенностей [Аникеев, 2017].

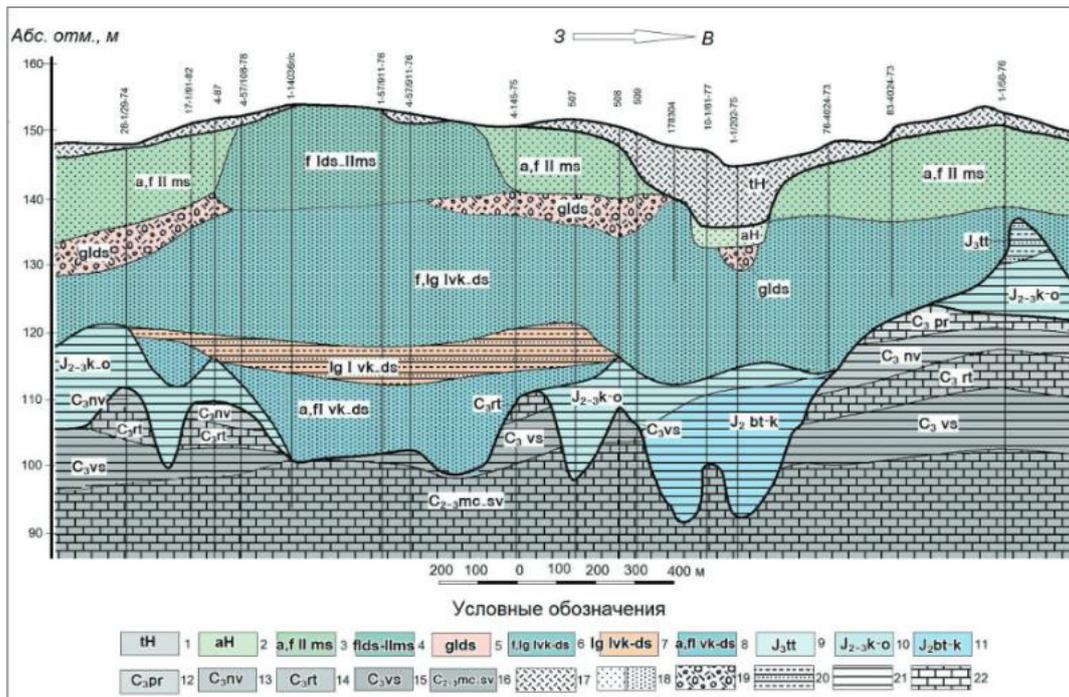


Рис. 1. Сводный геологический разрез г. Москвы. Четвертичная система: Голоцен: 1 – техногенные образования; 2 – иллювиальные отложения русла и поймы; Средний неоплейстоцен: 3 – аллювиально-флювиогляциальные отложения 3-й надпойменной террасы (Ходынской); межледниковые отложения донско-московского горизонтов: 4 – флювиогляциальные отложения; Нижний неоплейстоцен: 5 – ледниковые изложения донского горизонта; межледниковые отложения сетуньско-донского горизонта: 6 – флювиогляциальные и озерно-ледниковые; 7 – озерно-ледниковые; 8 – аллювиальные и флювиогляциальные. Юрская система. Верхним отдел: 9 – титонский ярус; Средний-верхний отделы нерасчлененные: 10 – келловейский и оксфордский ярусы. Средний отдел: II – батский и келловейский ярусы нерасчлененные. Каменноугольная система. Верхним отдел. Касимовский ярус. Дорогомилловский горизонт: 12 – перхуровская толща; Хамовнический горизонт: 13 – неверовская толща. 14 – ратмировская толща; Кревякинский горизонт: 15 – воскресенская толща. Средний и верхний отделы нерасчлененные: 16 – московский ярус и суворовская толща. Состав отложений: 17 – насыпные образования; 18 – пески; 19 – суглинки с гравиеем; 20 – переслаивание супесей, суглинков и песков; 21 – глины и суглинки; 22 – известняки [Аникеев и др., 2018]

Гидрогеологические условия до глубины 70-140 метров на юго-западе и 90-100 метров на северо-востоке города характеризуются наличием комплекса грунтовых вод, или надюрского напорно-безнапорного водоносного комплекса, и трех напорных водоносных горизонтов – гжельского, касимовского и мячковско-подольского. Первые два приурочены к верхнекаменноугольным карбонатным породам, последний к среднекаменноугольным. В глинисто-песчаных отложениях доюрской долины р. Москвы выделяется также келловей-батский напорный горизонт, связанный с трещинно-карстовыми водами.

В тальвеге и в центральной части доледниковой долины р. Москвы, где размыты экранирующие глины верхней юры, а песчаные грунты залегают на сильно закарстованных каменноугольных карбонатных породах, наблюдается оседание земной поверхности. Иногда процесс локализуется, и возникают воронки оседания, поперечные размеры которых много больше глубины.

Провалы-воронки с обрывистыми краями, глубиной ненамного меньше, а иногда и заметно больше диаметра, как правило, образуются в склонах палеодолины. Здесь существуют оптимальные условия для их формирования – небольшая мощность юрских экранирующих глин, повышенные трещиноватость и закарстованность трещиноватых пород, залегающих под ними, и большие градиенты вертикальной фильтрации.

Особенно опасна ситуация в местах наложения разновозрастных долин р. Москвы – доюрской, доледниковой и современной. Основная часть аварийных ситуаций, связанных с карстообразованием в Москве, приурочены к участку пересечения погребенных врезов третьей надпойменной (Ходынской) террасы р. Москвы. Результаты карстования (открытые и запечатанные полости, зоны дробления и повышенной трещиноватости) на всех этапах геологической истории здесь «суммируются».

По наблюдениям многих геологов, карстово-суффозионные воронки на северо-западе Москвы не появляются там, где каменноугольные карбонатные породы непосредственно контактируют с четвертичными песками. Для их образования нужен разделяющий глинистый пласт небольшой мощности. Этот феномен объясняется тем, что связные грунты над закарстованным массивом консервируют результаты длительного континентального перерыва. Несвязные грунты, заполняя трещинно-поровое пространство в растворимых породах, напротив, нивелируют эти результаты. Поэтому существование открытой карстовой полости, способной принимать обломочный материал, наиболее вероятно под глинистым слоем, в известняках, перекрытых песками, нужно еще освободить полость от заполнителя, что не всегда возможно. Для этого нужно динамическое и гидродинамическое воздействие извне [Аникеев и др., 2018].

3. ВЫДЕЛЕНИЕ КАРСТА ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Задачи геофизических исследований, проводимых в процессе инженерно-геологических работ на закарстованных территориях, должны быть адаптированы к возможностям методов в конкретных геологических условиях. Наиболее популярным геофизическим методом для детального картирования области карста является сейсморазведка. Карстовые зоны на разрезах ОГТ проявляются в виде специфических аномалий, связанных с изменением физических свойств пород. Вот основные признаки карста:

1. Хаотичные отражения. Карстовые зоны часто выглядят как области с хаотичным или слабовыраженным характером отражений. Это связано с нарушением структуры пород из-за растворения или разрушения.
2. Зоны отсутствия отражений. В карстовых полостях или зонах интенсивного растворения сейсмические сигналы могут не отражаться.
3. «Прогибы» или проседания слоев. Над карстовыми полостями могут наблюдаться прогибы или проседания вышележащих слоев.
4. Дифракционные аномалии. Резкие границы карстовых полостей могут вызывать дифракции, которые выглядят как гиперболические аномалии на разрезе.
5. Изменение амплитуд. В карстовых зонах амплитуды сейсмических отражений могут быть ниже из-за изменения акустических свойств пород.

Пример обнаружения карста на сейсмическом разрезе приведен на рисунке 2.

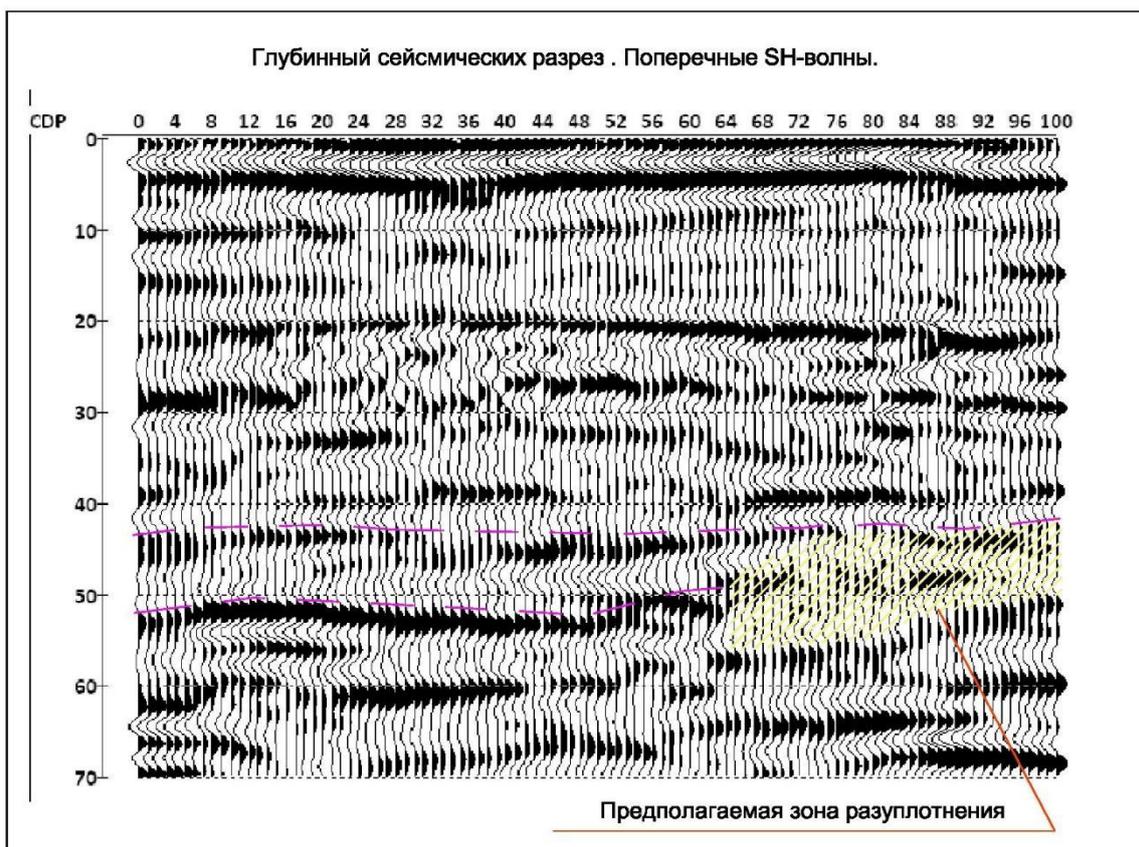


Рис. 2. Пример сейсмического разреза с предполагаемой зоной разуплотнения
(Данные ГБУ Мосгоргеотрест)

При использовании метода сейсмической томографии, карстовые области выделяются по характерным аномалиям в распределении скоростей сейсмических волн. Карст связан с наличием пустот, трещин, зон растворения и обрушения, что приводит к значительным изменениям физических свойств пород. На разрезах это проявляется следующим образом (рис. 3):

1. Низкие скорости волн. Карстовые полости и зоны интенсивного растворения заполнены воздухом, водой или рыхлыми отложениями, что приводит к резкому снижению скоростей сейсмических волн (как продольных, так и поперечных).
2. На томографических разрезах такие зоны выделяются как области с аномально низкими значениями скоростей (например, 1500–3000 м/с для карбонатных пород с пустотами, в отличие от 4000–6000 м/с для плотных карбонатов).
3. Неоднородности в распределении скоростей. Карстовые зоны могут выглядеть как «хаотичные» области с резкими переходами между высокими и низкими скоростями.
4. Границы с резкими перепадами скоростей. Границы карстовых полостей часто резкие, что приводит к сильным контрастам в скоростях на томографических разрезах. Например, плотные карбонатные породы (высокие скорости) могут резко переходить в зоны с пустотами (низкие скорости).
5. Аномалии формы и размера. Карстовые полости часто имеют неправильную форму (например, каверны, каналы, вертикальные "трубы" или горизонтальные "пещеры").
6. Связь с геологическими структурами. Карстовые зоны часто связаны с тектоническими нарушениями, трещиноватостью или зонами повышенной проницаемости. На томографических разрезах это может проявляться как линейные или ветвящиеся аномалии, следующие за разломами или трещинами.

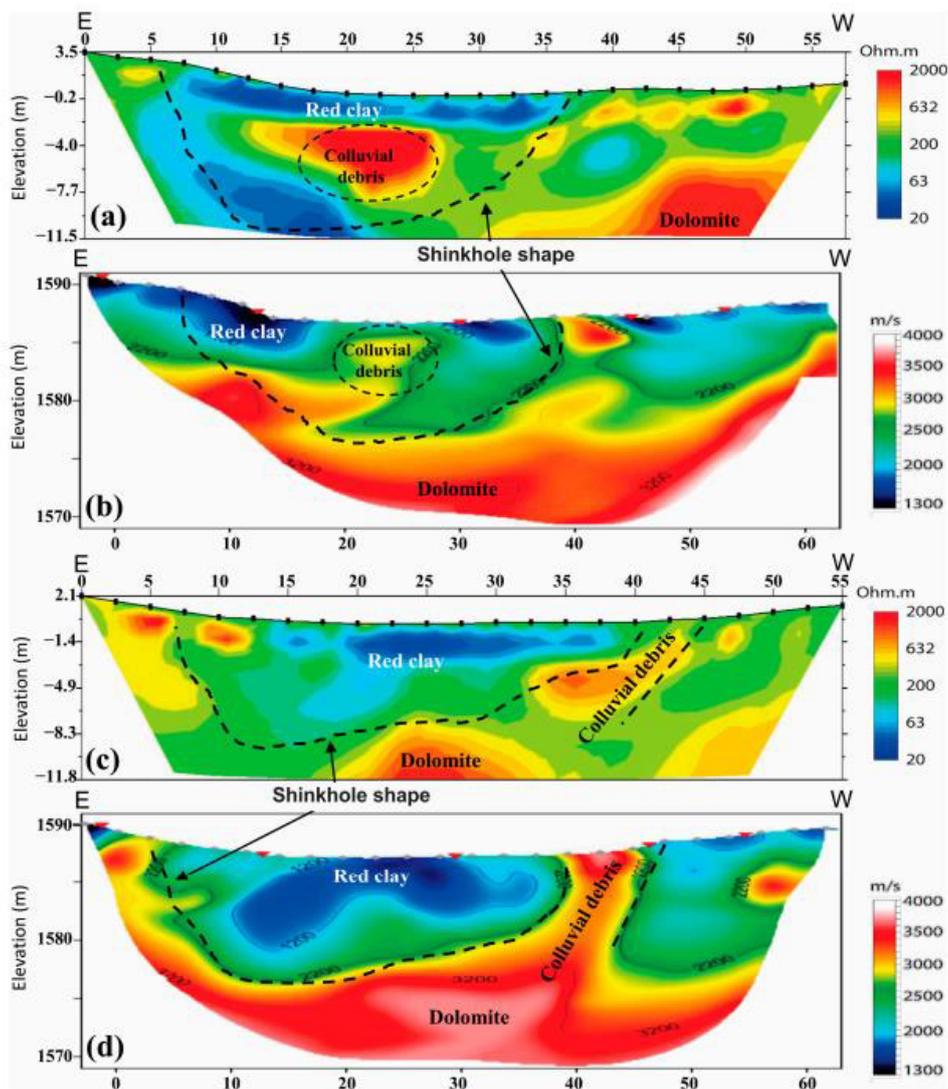


Рис. 3. Комплексная визуализация разрезов сейсмотомографии и электротомографии, с предполагаемыми зонами карстообразования [Jabrane et al., 2023]

Электроразведка и гравиразведка также успешно бесконтактно выявляют опасные области по значениям проводимости и плотности соответственно, но разрешающая способность методов не позволяет детально определять размеры изучаемого объекта. Однако, бывают участки, осложненные техногенными объектами или другими помехами, где необходимо применение нескольких геофизических методов для комплексного подхода.

При изучении методами электроразведки (например, методами вертикального электрического зондирования — ВЭЗ или электротомографии) можно выделить ряд характерных признаков выделения карста и карстовых процессов:

1. Аномалии удельного электрического сопротивления (УЭС). Карстовые пустоты и зоны разрыхления обычно заполнены воздухом или водой, что приводит к резкому изменению УЭС – пустоты, заполненные воздухом, будут иметь сопротивление, стремящееся к бесконечности; пустоты, заполненные водой, наоборот будут иметь низкое сопротивление (рис. 4), особенно при условии высокой минерализации воды; зоны разрыхления будут иметь промежуточные значения сопротивления, но отличающиеся от окружающих пород.
2. Резкие границы аномалий. Карстовые полости и каналы часто имеют четкие границы, что проявляется в резких изменениях УЭС на геоэлектрических разрезах.
3. Связь с геоморфологией. Аномалии УЭС часто коррелируют с поверхностными формами карстового рельефа (воронки, поноры, суходолы).

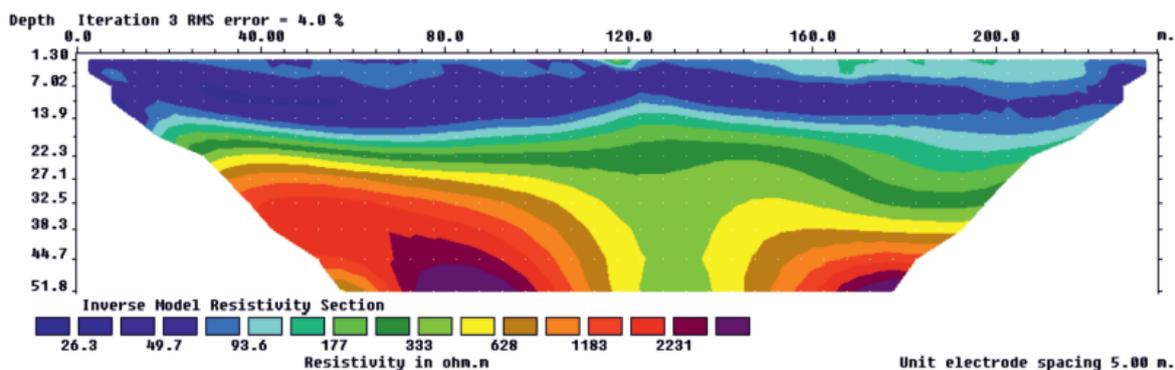


Рис. 4. Пример геоэлектрического разреза, с выявленными проявлениями карстовых процессов [Романов и др., 2021]

Характерные признаки выделения карста методом гравиразведки:

1. Локальные отрицательные аномалии силы тяжести. Карстовые пустоты или зоны разрыхления имеют меньшую плотность по сравнению с окружающими породами (рис. 5).
2. Комплексирование. Гравиразведка часто используется в комплексе с другими геофизическими методами (например, сейсморазведка, электроразведка) для уточнения интерпретации. Например, гравитационная аномалия, совпадающая с аномалией низкого электрического сопротивления, может указывать на водонасыщенную карстовую полость.
3. Поверхностные карстовые формы (например, воронки) создают слабые аномалии, так как их влияние на гравитационное поле невелико. Глубокие карстовые полости или системы пещер могут создавать более выраженные аномалии, особенно если они имеют значительные размеры.
4. Карстовые аномалии выделяются на фоне регионального гравитационного поля как локальные отклонения. Для их выделения часто применяют методы фильтрации данных (например, удаление регионального фона).

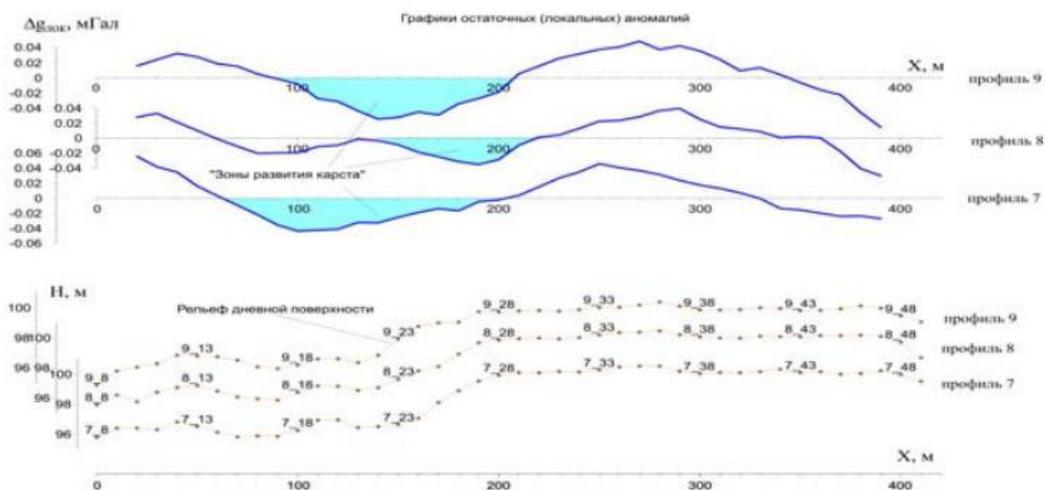


Рис. 5. Пример графиков гравиметрических аномалий ($\sigma=1,8 \text{ г/см}^3$, уровень условный) [Боровский и др., 2016]

В нормативном документе «Рекомендации по проведению инженерных изысканий, проектированию, строительству и эксплуатации зданий и сооружений на закарстованных территориях Нижегородской области» 2012 года приведены следующие специальные задачи:

- а. обнаружение полостей (при благоприятных условиях) и определение их размеров;
- б. выявление зон повышенной трещиноватости в карстующихся отложениях;
- в. выявление разуплотненных зон в покровной и карстующейся толщах;
- г. выявление зон тектонических нарушений;
- д. выявление погребенных эрозионных форм;

- е. определение минерализации, скорости и направления потока подземных вод, мест питания и разгрузки;
- ж. оценка степени разрушенности карстующихся отложений;
- з. изучение изменчивости физико-механических свойств карстующихся и покровных отложений.

Таблица 1. Сопоставление геофизических методов по решаемым задачам карстовых опасностей [Рекомендации по оценке геологического риска, 2002]

№ п/п	Наименование метода	Основные инженерно-геологические задачи исследований	Примечание
Основные методы			
1	Гравиразведка	Задачи а, б, в, г, д, з	Выполняется в варианте микрогальной точности (микрोगравиразведка)
2	Сейсморазведка	Задачи а, б, в, г, ж, з	Преимущественно методом преломленных волн (МПВ)
3	Электроразведка	Задачи а, б, в, г, д, ж, з	Выполняется методов вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ); - в осложненных геоэлектрических условиях двухсторонними трехэлектродными установками
Вспомогательные методы			
4	Геофизическое исследование скважин (ГИС)	Задачи а, б, е	Получение параметрических характеристик разреза для уточнения геолого-геофизической интерпретации
5	Межскважинное радио- и сеймопросвечивание		На промышленных площадках под особо сложными и ответственными эксплуатируемыми и проектируемыми сооружениями переходит в основные методы
6	Непродольное сеймопрофилирование и лучевая томография МОВ и МПВ	Задачи а, б, г, д	То же, что и п.5. На застроенных площадках
7	Сейсморазведка методами отражённых волн (МОВ, ОГТ) и анализа спектральных и амплитудных характеристик (MASW, SASW) сейсмических волн	Задачи а, б, в, г, д	Использование различных типов сейсмических волн
8	Вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ, ВЭЗВП) и профилирование (ЭП)	Задачи б, г, д	Выполняются для исследования геологической среды преимущественно в простых в геоэлектрическом отношении условиях
9	Метод естественного поля (ЕП)	Выявление очагов разгрузки трещинно-карстовых и поглощения поверхностных вод	Использование в условиях урбанизированных территорий затруднено

В более современном проекте нормативного документа СП ***.1325800.20** «Инженерные изыскания для строительства на закарстованных территориях» 2020 года в приложении Г перечислены задачи, связанные с изучением карста и методы их решения [Проект СП ***.1325800.20**, 2020].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Карстовые процессы в Москве становятся всё более актуальной проблемой с точки зрения геофизики, учитывая необходимость обеспечения безопасности городской инфраструктуры и здоровья населения. Геофизические методы исследования предоставляют мощные инструменты для детального анализа карстовых явлений и оценки связанных с ними рисков

Анализ геологического строения в районе города Москвы показал, что известняки в кровле карбонатного массива в Москве чаще всего сильно трещиноваты или разрушены. В них сформированы обломочные зоны разной мощности (от 1 до 10 метров и более), встречаются небольшие открытые полости и широкие трещины. На таких участках допускается возможность суффозионного выноса песков и раздробленных глин в полое пространство растворимых отложений. Крупные (более 1,5-2 метров) полости в карбонатном массиве практически отсутствуют. Выявленные провалы карстово-суффозионного генезиса расположены в пределах поймы и надпойменных террас реки Москвы, на участке развития древней погребенной речной сети дочетвертичного возраста.

Геофизические методы играют ключевую роль в изучении карстовых процессов, позволяя выявлять подземные пустоты, трещины и зоны разуплотнения. С помощью сейсморазведки, электроразведки и гравиметрии можно точно определять структуру карстовых массивов, что помогает минимизировать риски при строительстве и прогнозировать возможные провалы грунта.

ЛИТЕРАТУРА

- *Аникеев А.В.* Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. РУДН, Москва, 2017.
- *Аникеев А.В., Козлякова И.В., Кожевникова И.А.* О поверхностных проявлениях карста в Москве. Инженерная геология, Том XIII, № 4-5, с. 74-88, 2018.
- *Боровский М.Я., Богатов В.И., Филимонов В.Н., Фахрутдинов Е.Г.* Геофизическое изучение участка проектируемой железной дороги. Журнал экологии и промышленной безопасности, № 1(65), с. 13-17, 2016.
- *Кочев А.Д., Богданов М.И.* Разработка нового свода правил «Инженерные изыскания для строительства на закарстованных территориях. Общие требования». Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации, Материалы докладов XIII Общероссийской научно-практической конференции изыскательских организаций. Москва, 2017, с 600-606.
- *Кочев А.Д., Чертков Л.Г., Зайонц И.Л.* Карстово-суффозионные процессы на территории г. Москвы и проблема оценки их опасности. Инженерная геология, Том XIII, № 6, с. 24-32, 2018.
- Проект СП ***.1325800.20** «Инженерные изыскания для строительства на закарстованных территориях», Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2020.
- Рекомендации по оценке геологического риска на территории г. Москвы, ГУП НИИЦ, 2002.
- *Романов В.В., Иванов А.А., Кауркин М.Д.* Комплексирование электротомографии, георадиолокации и сейсморазведки при исследованиях проявлений сульфатного карста на примере Нижегородской области. Электроразведка 2021: сборник тезисов научно-практической конференции, Онлайн-конференция, 24–26 марта 2021 года. – Москва: Издательский дом Академии Естествознания, 2021. – С. 64-68.
- *Jabrane O., Martínez-Pagán P., Martínez-Segura M.A., Alcalá F.J., El Azzab D., Váscquez-Maza M.D., Charroud M.* Integration of Electrical Resistivity Tomography and Seismic Refraction Tomography to Investigate Subsiding Sinkholes in Karst Areas. Water 2023, 15, 2192.

THE KARST HAZARDS OF MOSCOW AND GEOPHYSICAL METHODS OF THEIR DETERMINATION

Skornyakova A. Y.

The article is devoted to the study of karst processes in Moscow, which pose a serious threat to urban infrastructure and ecosystems. The geological features of the capital are considered, including the formation of karst craters and sinkholes associated with the dissolution of limestones and dolomites under the influence of groundwater. Special attention is paid to geophysical methods such as seismic, electrical and gravity exploration, which allow to identify karst zones, assess risks and develop measures to minimize them. The importance of an integrated approach and continuous monitoring to ensure the safety of the urban environment is emphasized. The article also includes an analysis of the geological structure of Moscow and a classification of geophysical methods used to study karst processes.

KEYWORDS: KARST PROCESSES, GEOPHYSICAL METHODS, MOSCOW, KARST VOIDS, SEISMIC EXPLORATION, ELECTRICAL EXPLORATION, GRAVITY EXPLORATION