

Картирование структуры подземной выработки методами наземной сейсморазведки на примере исследования Девятовской каменоломни (Новомосковский административный округ)

- Романов В.В., РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, г. Москва.
- Кауркин М.Д., Андреев Д.О., Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва.
- Иванов А.А., РГГРУ им. Серго Орджоникидзе, г. Москва.

Аннотация: Приводится опыт по изучению уникального природно-техногенного объекта Московской агломерации наземной инженерной сейсморазведкой. Небольшая глубина кровли разрабатываемых пород — известняков подольского горизонта — позволила сочетать возможности модификаций МОВ–ОСТ и МПВ–ОГП на одних профилях.

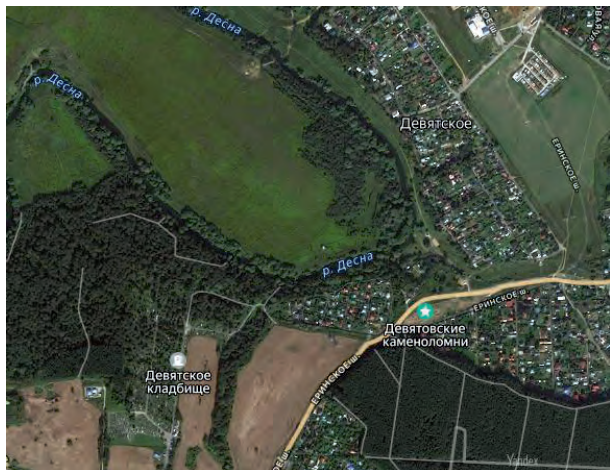
Ключевые слова: сейсморазведка, карстовые процессы, каменоломни.

Введение

Карстовым процессом называется процесс растворения горной породы с последующим выносом растворённого материала. Закарстованность карбонатных пород подземного пространства Московской агломерации в своё время облегчала их разработку, а карстовые пещеры стали основой для будущих горных выработок — каменоломен. Неглубоко залегающие пласты известняков оптимальны для ручной добычи, однако проявления карстового процесса увеличивали риск обрушения горных выработок и оседания покрывающих их грунтов. Скрытые карстовые полости стали серьёзным препятствием для строительства Московского метрополитена, а в перспективе — ограничат темпы и охват освоения подземного пространства. В процессе развития Московской агломерации происходило и происходит упорядочивание структуры, в том числе и за счёт уплотнения застройки окраинных территорий, где высвобождаются значительные пространства смешанного экстенсивного землевладения. В частности, на юго-западе окраины города XIX – первой половины XX веков на месте Дорогомиловских каменоломен и промзоны возник деловой центр Москва-Сити и Экспоцентр [Логунова, 2025]. Строительство в карстово-опасных районах предполагает обязательные

дорогостоящие и времязатратные меры защиты с целью предотвращения активизации и снижения активности карстовых процессов. Интерес к заброшенным каменоломням объясняется, во-первых, их приуроченностью к опасным в карстовом отношении районам, кроме того, подземные ходы становятся областями выноса материала из вышележащих отложений, наравне с естественными проявлениями карста, что может вызвать провал или оседание кровли выработки [Романова и др., 2025].

На территории Новой Москвы (Троицкий и Новомосковские административные округа) располагается более десяти бывших каменоломен, что требует серьёзного внимания к этой проблеме при застройке местности, прокладке коммуникаций и строительстве дорог. Девятовские каменоломни располагаются в узкой и глубокой долине Десны, немного севернее места впадения Десны в Пахру, у деревни Девятово (55.463719, 37.524496), квартал № 115 района Щербинка Новомосковского административного округа (Рис. 1). В тектоническом плане объект исследования относится к области сочленения Троицко-Любучанской впадины и Климовско-Ватутинского поднятия Московской котловины. Рельеф долины Десны здесь объясняется врезанием реки в известняки среднего карбона и



▲ Рис. 1. Единственный сохранившийся вход в Девятовские каменоломни.

преобладанием глубинного размыва. Каменоломни основаны для добычи (лома) так называемого подольского мрамора — плотных хомогенных известняков, имеющих способность к полировке (Рис.2).

Согласно схеме спелестологического районирования каменоломни находятся на территории Нижнедевятского участка Подольского района. В стратиграфическом отношении разрабатываемый пласт относится к подольскому горизонту московского яруса среднего карбона. Мощность пласта 1,1 м, ширина ходов каменоломни в среднем около 2 м, высота «ходки» в рост человека 1,7-1,9 м, глубина кровли каменноугольного скального основания 7-8 м [Сохин, Долотов, 2016]. Покрывающей толщей для скального основания являются песчано-глинистые отложения четвертичного возраста. Каменоломни функционировали с 1869 до 1917 годы, когда более востребованным стало карбонатное сырье для производства портландцемента, добываемое открытым способом. Далее, до конца 1990-х годов у трёх наземных входов в каменоломни существовал небольшой карьер (Рис.3), который был ликвидирован для застройки. В настоящее время существует только одна точка доступа — вход №3.



▲ Рис. 2. Рельсовый путь в одной из выработок Девятовских каменоломен.

Изучение закарстованных территорий с помощью геофизических методов с успехом выполняется с 40-ых годов прошлого века. В регионах с доказанной карстовой опасностью применение геофизики при инженерных изысканиях под строительство является обязательным. Основными методами исследований являются методы электроразведки и сейсморазведки, реже применяется гравиразведка и скважинные методы [Давыдов, 2023]. Учитывая тот факт, что часть ходов Девятовских каменоломен засыпано и недоступно для визуального осмотра, особенно перспективным способом их изучения являются наземные геофизические методы в сочетании с заверочным бурением и методами исследования скважинного и межскважинного пространства. Для оценки эффективности

▼ Рис. 3. Борт заброшенного карьера у бывших Девятовских каменоломен (1972 год).



выбранного подхода у входа №3 в феврале 2026 года были выполнены инженерно-геофизические исследования для картирования кровли каменноугольных известняков и выявления скрытых полостей (ходов) в скальном основании.

Методика выполнения работ

Работы выполнялись по схеме наблюдений У-У системой наблюдений с неподвижной приёмной линией [Романов, 2022], относительно которой с постоянным шагом перемещался источник сейсмических волн — две серии по десять разнонаправленных горизонтальных ударов. С учётом ожидаемой глубины и горизонтальных размеров объектов поиска шаг приёма был выбран 1 м, длина и порядок приёмной линии (расстановки) 47 м и 48, соответственно [Романов и др., 2024, № 1]. Источник смещался с ПК –8 м с шагом 2 м, до ПК 54 м, то есть система наблюдений включала расстановки всех типов — выносные, фланговые и центральные. Общее количество физических наблюдений на одну приёмную линию — 32. Принимая во внимание, что приёмная линия смежных расстановок располагается на одном участке профиля [Романов и др., 2025],

применённая технология, широко распространённая в инженерной сейсморазведке, может быть названа системой с многократным самоперекрытием (СМСП). Такое название раскрывает характерную особенность применённой системы наблюдений — накопление кратности за счёт полного самопересечения приёмной линии. На рис. 4 показаны таблицы координат средних точек для системы наблюдений с многократным перекрытием (СМП) [Петрашень, Рудаков, 1996] и многократным самоперекрытием (СМСП). В первом случае приёмная линия ($N = 12$, $\Delta x_{пп} = 1$ м) перемещается на шаг возбуждения $\Delta x_{пв} = 2$ м после получения сейсмограммы ОПВ, во втором — перемещается только источник. Обращает на себя внимание вдвое большая номинальная кратность СМСП, чем у СМП с такими же шагами возбуждения и приёма, а также порядка приёмной линии.

Однако "платой" за удвоение номинальной кратности становится сброс кратности сразу после середины приёмной линии, тогда как в СМП номинальная кратность сохраняет постоянное значение. Графики кратности, подтверждающие сказанное, приведены на рис. 5. Кроме того, отмечает-

▼ Рис. 4. Таблицы координат средних точек для СМСП (слева) и СМП (справа).

	0	2	4	6	8	10
0	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
1	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5
2	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
3	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5
4	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0
5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5
6	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
7	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5
8	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0
9	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5
10	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
11	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5

	0	2	4	6	8	10
0	0.0					
1	0.5					
2	1.0	2.0				
3	1.5	2.5				
4	2.0	3.0	4.0			
5	2.5	3.5	4.5			
6	3.0	4.0	5.0	6.0		
7	3.5	4.5	5.5	6.5		
8	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	
9	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	
10	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
11	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5
12		7.0	8.0	9.0	10.0	
13		7.5	8.5	9.5	10.5	
14			9.0	10.0		
15			9.5			

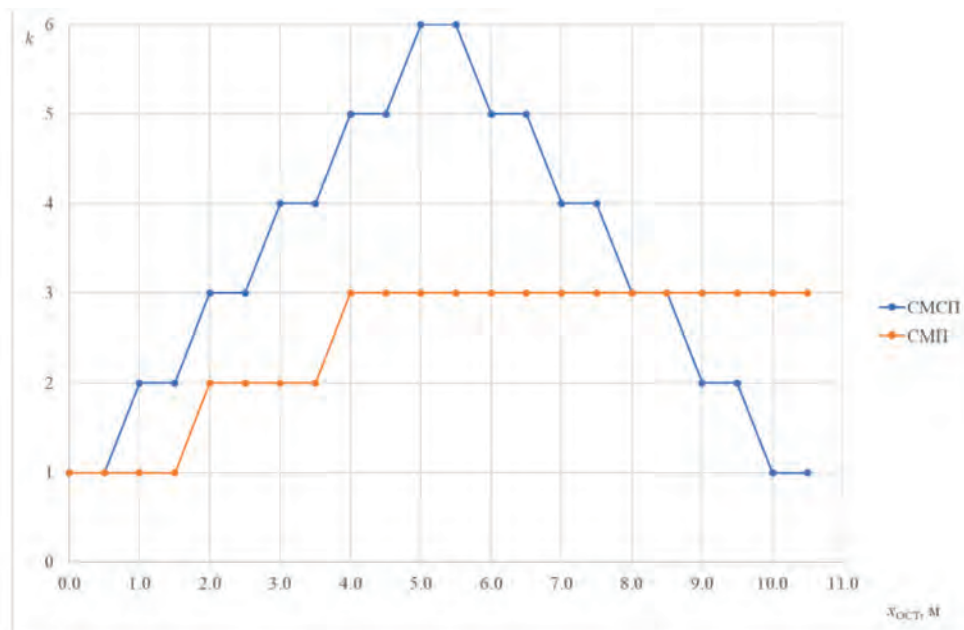


Рис. 5. Графики кратности для двух разновидностей систем наблюдений.

ся, что зоны постоянной кратности в случае СМСП в два раза короче, а ширина зон набора и сброса кратности на 1 м больше, чем у СМП [Романов и др., 2024, №3]. Далее приведены выражения для расчёта номинальной кратности k_{max} и ширины зон постоянной кратности в неполнократных зонах $\Delta_{ПК}$, где коэффициент $m = 2$ для СМП и $m = 1$ для СМСП.

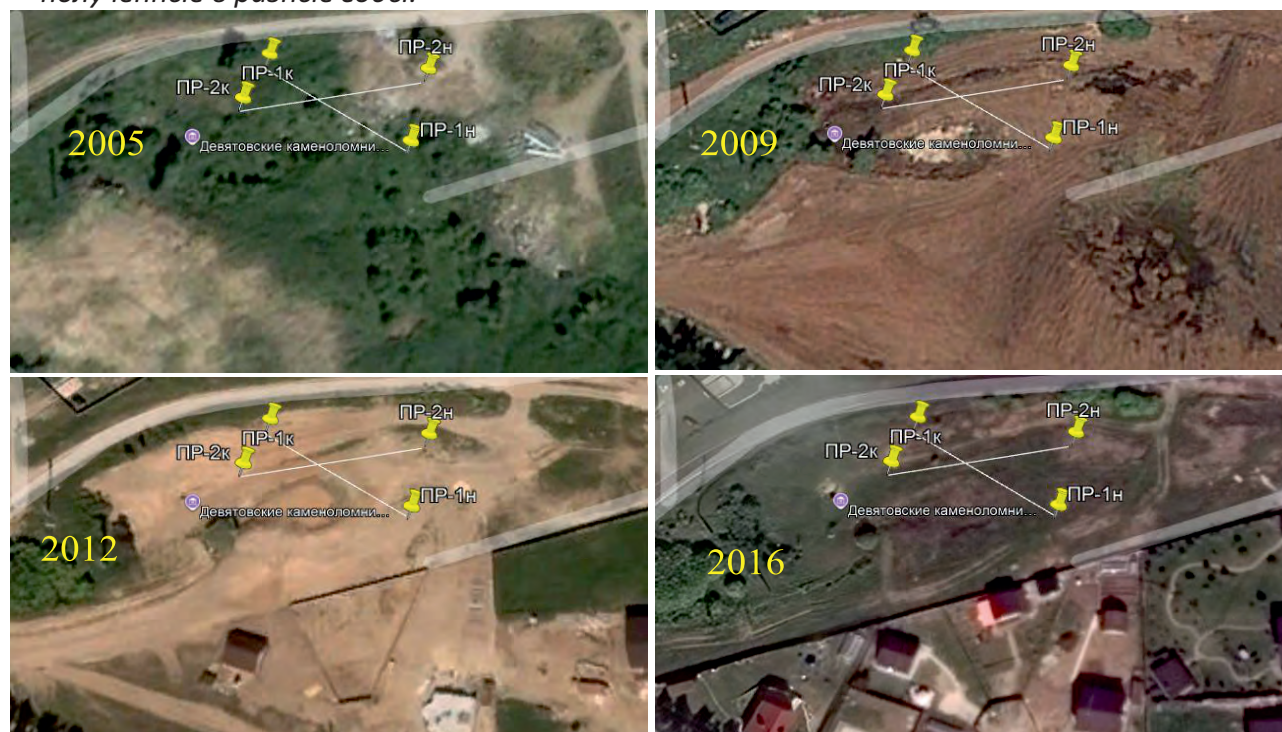
$$k_{max} = \frac{N}{m \cdot \delta}$$

$$\Delta_{ПК} = m \cdot \delta$$

Сейсморазведочные работы проводились по системе из двух пересекающихся в центральном пункте (ПК 23,5 м) профилей. Первый профиль (ПР-1) ориентировался вдоль засыпанного борта бывшего карьера, второй (ПР-2) — поперёк борта (Рис. 6).

В момент проведения работ на объекте

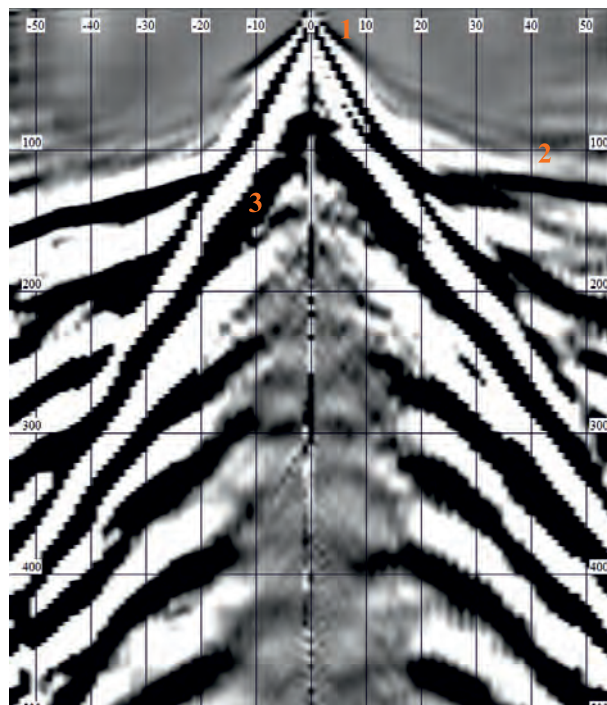
Рис. 6. Профили сейсморазведки на спутниковых снимках Google Earth, полученные в разные годы.



был постоянный снежный покров с мощностью до 1,5 м. Утепляющее действие слоя снега остановило промерзание приповерхностного слоя, поэтому скоростной разрез сохранил здесь черты “летнего”, что было установлено по волнам Лява на сейсмограммах. На суперсейсмограмме (Рис. 7) выделяется прямая волна со скоростью 190 м/с, преломлённая волна со скоростью 1100–1200 м/с и цуг поверхностных волн Лява со скоростями 120–150 м/с.

Наличие динамически выраженных первых вступлений позволило построить глубинные разрезы по способу МПВ–ОГП. Граф обработки включал в себя процедуры предварительной обработки, начальной обработки, суммирования, постобработки и миграции (Табл. 1).

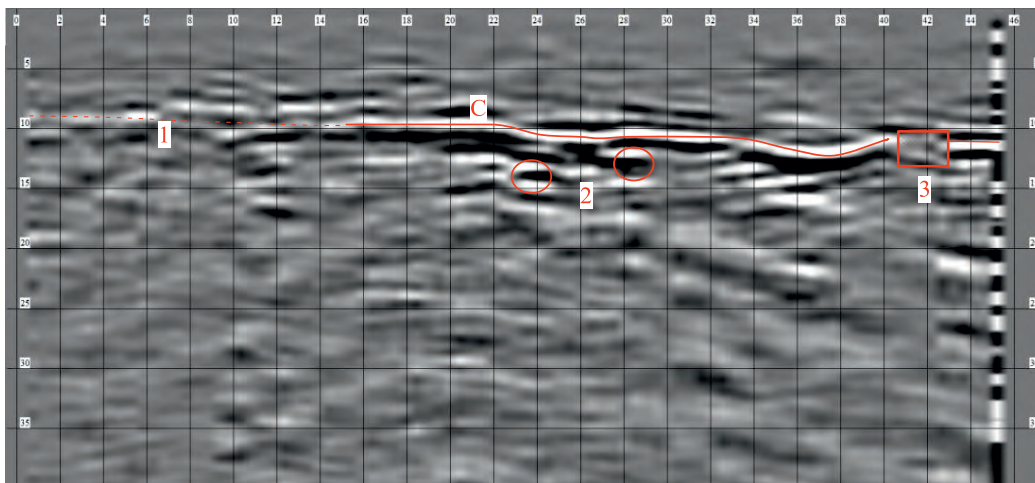
На Рис. 8. показан результат обработки



▲ Рис. 7. Сейсмограмма по профилю ПР-2. 1 — прямая волна, 2 — преломлённая волна, 3 — поверхностные волны.

▼ Табл. 1. Граф обработки МПВ–ОГП.

Стадия	Процедура	Значения параметров
Предварительная обработка	Монтирование реализаций сейсмограмм	
	Вертикальное суммирование	
	Вычитание суммограмм	
	Ввод геометрии в заголовки трасс	
	Загрузка в систему обработки	
Начальная обработка	Сортировка	По ОСТ, способ центрального луча, диапазон удалений 20–22 м
	Программная регулировка усиления по удалению	Степенной закон, показатель $N=2$
	Полосовая фильтрация	0–10–60–70 Гц
	Адаптивное вычитание когерентных помех	На основе фильтра Винера, стабилизирующий коэффициент 25%
	Ввод кинематических поправок	По скорости 190 м/с
Суммирование		
Постобработка	Когерентная фильтрация	Подавление осей синфазности с кажущейся скоростью менее 1000 м/с
Миграция		По Кирхгофу, апертура 3 трассы, средняя скорость миграции 190 м/с



▲ Рис. 8. Глубинный разрез МПВ–ОГП по ПР-1. С — преломляющая граница, приуроченная к кровле относительно сохранных каменноугольных известняков подольского горизонта, 1 — зона ухудшения прослеживания границы, 2 — локальные аномалии, возможные подземные ходы, 3 — зона потери корреляции, указывающие на карстовую полость или выработку с обрушенной кровлей.

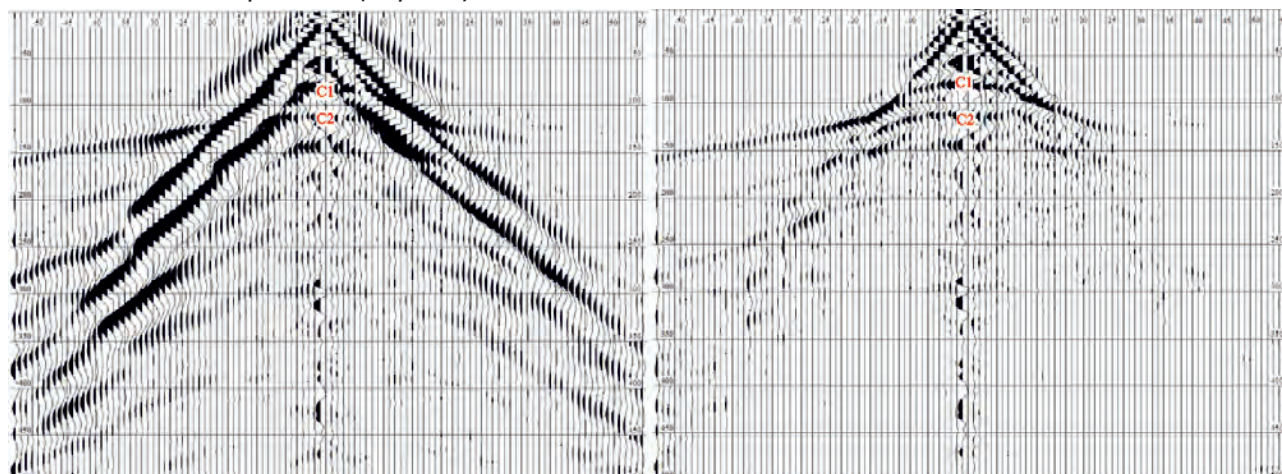
сейсмограмм по профилю ПР-1 по способу МПВ–ОГП. Преломляющая граница С здесь приурочена к кровле относительно сохранных каменноугольных известняков, кровля элювия выделена не была. На ПК 22 м наблюдается ступенеобразный изгиб кровли каменноугольных известняков, соответствующий засыпанному борту карьера. В интервале ПК 0–14 м кровля известняков прослеживается фрагментарно, что связывается с худшими поверхностными сейсмогеологическими условиями или повышенной трещиноватостью и закарстованностью известняков. В интервале ПК 34–40 м наблюдается прогиб в релье-

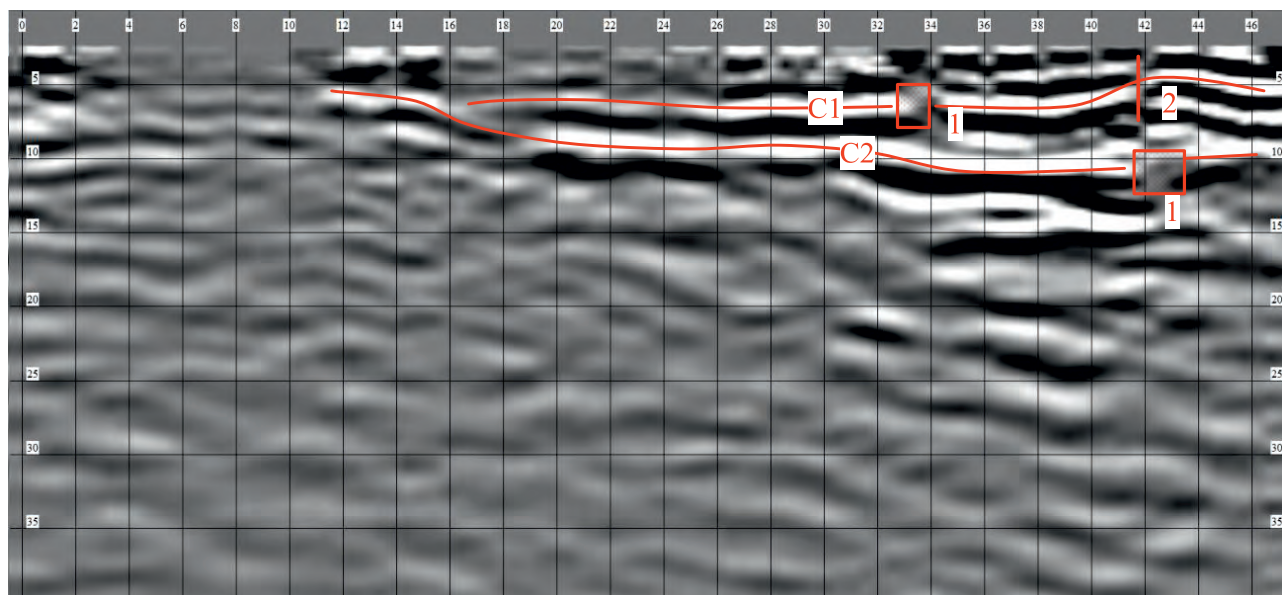
фе границы, в западной части прогиба выделяется зона потери корреляции, отождествляемая с провалом выработки каменолен [Антоновская и др., 2025]. В центральной части профиля ПР-1 выделено две аномалии, предположительно указывающие на карстовые полости или подземные ходы.

После применения к сейсмическим данным вычитания скоростей в интервале 120–160 м/с и обработки по графу МОВ–ОСТ удалось выделить два отражения (С1, С2) — от кровель элювиальных и сохранных известняков (Рис. 9).

Данные по профилю ПР-2 приведены на

▼ Рис. 9. Выделение отражений С1, С2 на суперсейсмограмме (слева) после процедуры вычитания скоростей (справа).





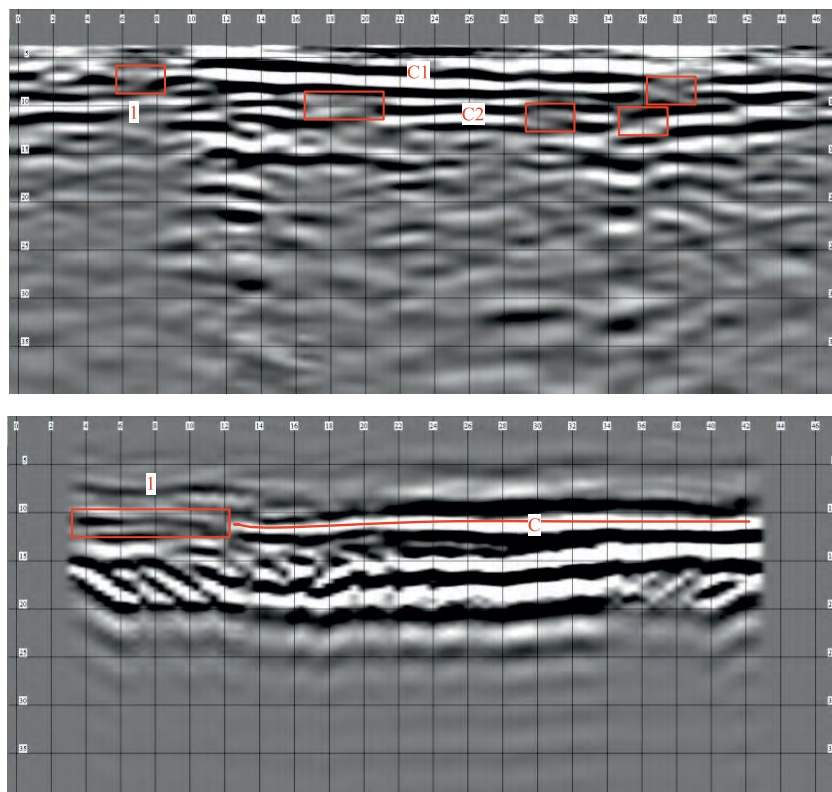
▲ Рис. 10. Глубинный разрез МОВ–ОСТ по ПР-1. C1, C2 — отражающие границы, 1 — зоны потери корреляции, указывающие на карстовые полости или выработки с обрушенной кровлей, 2 — возможное проявление дизъюнктивной тектоники.

рис.11. Интерес представляет зона ПК 0–12 м, где не прослеживаются преломляющие и отражающие границы, что может быть объяснено пересечением по протиранию крупной заваленной выработки или приповерхностной зоной повышенной скорости, вероятнее всего техногенной природы.

Выводы

► Рис. 11. Глубинные разрезы МОВ–ОСТ и МПВ–ОГП по ПР-2.

C1, C2 — отражающие границы, C — преломляющая граница, 1 — зоны потери корреляции, указывающие на карстовые полости или выработки с обрушенной кровлей.



уменьшению относительного шага возбуждения и использованию большего количества выносных расстановок. Опыт выполненных исследований по картированию неглубоких сейсмических границ будет полезен при рекультивации старых карьеров, освоении пространства старых каменоломен и районов, опасных в карстовом отношении. Анализ результатов обработки выявил большую разрешающую способность метода отражённых волн, что согласуется с теоретическими выводами.

Литература

1. Антоновская Г. Н., Басакина И. М., Ваганова Н. В., Царев А. М. Сейсмические исследования карстовых пещер в Арктике: первые результаты // Арктика: экология и экономика. – 2025. – Т. 15, № 4(60). – С. 508-518. – DOI 10.25283/2223-4594-2025-4-508-518. – EDN IUDFKC.
2. Давыдов В. А. Выявление карста геофизическими методами с применением микросейсмических зондирований // Известия Уральского государственного горного университета. – 2023. – № 1(69). – С. 108-113. – DOI 10.21440/2307-2091-2023-1-108-113. – EDN NFYTMZ.
3. Логунова Е. Н. Окраинные пояса в структуре современного города: тенденции формирования и преобразований // Architecture and Modern Information Technologies. – 2025. – №. 4 (73). – С. 254-266.
4. Петрашень Г. И., Рудаков А. Г. Основные проблемы метода многократных перекрытий ОГТ и технологичных методик обработки его данных / Г. И. Петрашень, // Геофизика. – 1996. – № 1. – С. 3-13. – EDN TJUSKD.
5. Романов В. В. Анализ развития терминологической базы методики двумерной сейсморазведки и предложения по ее развитию и унификации // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2022. – Т. 64, № 1. – С. 61-74. – DOI 10.32454/0016-7762-2022-64-1-61-74. – EDN DIEHWD.
6. Романов В. В., Сергеев К. С., Рыжков В. И. Отличительные особенности реализации систем наблюдений с перекрытием в инженерной сейсморазведке // Инженерная и рудная геофизика 2025 : материалы научно-практической конференции и выставки, Екатеринбург, 21–25 апреля 2025 года. – Москва: ООО «Геомодель Развитие», 2025. – С. 300-303. – EDN TMRVLK.
7. Романов, В. В. Предложения рационализации систем наблюдений в инженерной сейсморазведке / В. В. Романов, К. С. Сергеев, В. И. Рыжков // Инженерная и рудная геофизика 2024. Инженерная и рудная геология 2024 : Материалы 20-й научно-практической конференции и выставки, Казань, 13–16 мая 2024 года. – Москва: ООО «Геомодель Развитие», 2024. – С. 202-205. – EDN ULGKOR.
8. Романов В. В., Кауркин М. Д., Андреев Д. О. Формирование графика кратности заданной формы в инженерной сейсморазведке // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2025. – № 3(86). – С. 94-97. – EDN FYSGYJ.
9. Романов В. В., Кауркин М. Д., Крячков И. В., Бабуркин И. А. Опыт реализации инженерной сейсмической томографии со сверхмалым шагом приема // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2025. – № 1(84). – С. 123-127. – EDN EZHRMS.
10. Романова Е. Р. Жидков Р. Ю., Абакумова Н. В. Установление происхождения замкнутых понижений рельефа на территориях с длительной историей освоения (на примере Троицкого и Ново-московского округов, г. Москва) // Вестник евразийской науки. – 2025. – Т. 17, № 2. – EDN PMYRPO.
11. Сохин, М. Ю., Долотов Ю. А. Спелестологическая изученность бассейна реки Пахры (Московская область). Часть 1: Верхнепахринский и Подольский спелестологические районы // Спелеология и спелестология: сборник материалов конференции. – 2016. – № 7. – С. 253-274. – EDN YOVWXN.