

Анализ параметров систем наблюдений с перекрытием в инженерной сейсморазведке

- Романов В.В., Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, г. Москва
- Кауркин М.Д., Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва
- Иванов А.А., Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе (МГРИ), г. Москва

Аннотация: сейсморазведка часто применяется в инженерно-геофизических исследованиях из-за высокой помехоустойчивости и обширной группы решаемых задач. С помощью инженерной сейсморазведки картируется кровля скальных и мерзлых грунтов, уровень грунтовых волн; выделяются техногенные полости, зоны повышенной или пониженной трещиноватости, проявления карста и суффозии; определяются физико-механические свойства грунтов. В современной сейсморазведке востребована сейсмотомография, методы отраженных и преломленных волн. В результате реализации этих методов формируются сейсмические изображения грунтовой толщи – глубинные разрезы, качество которых во многом определяется перекрытием – важнейшим параметром любой регулярной системы наблюдений. Кратность перекрытия определяет степень подавления случайных сейсмических колебаний и мешающих регулярных волн при суммировании трасс, имеющих общую среднюю точку. Поэтому, когда в методах отраженных и преломленных волн реализуется автоматическая обработка, система наблюдений должна обеспечить высокое значение кратности и максимальную равномерность распределения этого параметра по профилю. Инженерная сейсморазведка реализуется томографическими системами наблюдений, когда пункт возбуждения размещается во многих позициях по отношению к неподвижной приемной линии. Значение и равномерность распределения кратности зависит от малости шага возбуждения и конфигурации шаблонов. На краях шаблонов кратность закономерно уменьшается и качество сейсмических разрезов пропорционально падает. Это проблема решается перекрытием приемных линий смежных шаблонов и добавлением в систему наблюдений выносных расстановок. В публикации рассматриваются подходы к оптимизации и стандартизации систем наблюдений, выравнивания кратности, предлагается терминологическая база в данной предметной области, учитывающая специфику выполнения инженерной сейсморазведки.

Ключевые слова: инженерная сейсморазведка; метод отраженных волн; сейсмотомография; метод преломленных волн; системы наблюдений; кратность перекрытия.

Введение

Методы сейсморазведки активно применяются в инженерно-геофизических исследованиях из-за небольшой чувствительности к электромагнитным помехам и широкого круга решаемых задач. Эти особенности сейсморазведки особенно актуальны при инженерно-геофизических исследованиях в крупных городах, где фон помех очень велик, а

инженерно-геологические условия отличаются большим разнообразием. С помощью инженерной сейсморазведки определяется рельеф и сохранность кровли скальных и мерзлых грунтов, определяется уровень грунтовых волн, выделяются локальные неоднородности – техногенные полости, зоны повышенной трещиноватости и разуплотнения, проявления карстово-суффозионного

процесса; определяются физико-механические свойства грунтов в естественном залегании [12]. Основной объем работ в инженерной сейсморазведке выполняется сейсмотомографией (СТ), методом отраженных волн в модификации общей средней точки (МОВ-ОСТ), в меньшей мере – методом преломленных волн в модификации общей глубинной площадки (МПВ-ОГП) [10].

В настоящее время в инженерной сейсморазведке активно применяется динамическая обработка данных, когда изображение среды формируется на основе обработанных и просуммированных трасс полевых сейсмограмм [7]. Подобные изображения содержат информацию не только о форме границ, но и о динамических свойствах целевых волн. Такие параметры, как амплитуда, частота и форма импульса на глубинных разрезах являются индикаторами общего состояния грунтов вблизи границ и наличия локальных неоднородностей [20]. Для создания разрезов с достаточной для уверенной интерпретации амплитудной разрешенностью, используются системы наблюдения с перекрытием. В таких системах каждой глубинной точке (площадке) соответствует несколько трасс и их суммирование позволяет ослабить уровень случайных и регулярных помех [3]. Кратность систем определяет, при правильной обработке, качество формируемых сейсмических разрезов. Системы с перекрытием также применяются в сейсмотомографии, в которой определяющее значение имеет равномерность и частота покрытия изучаемого объекта устройствами для возбуждения и приема поля [5, 13].

В инженерной сейсморазведке работы традиционно ведутся отрядами из двух-трех человек [2], число кос не превышает двух, операции по смот-

ке/размотке кабеля и установке/сбору приемников выполняются вручную, применяются мобильные ручные ударные источники. Поэтому возбуждение колебаний и перемещение источника по профилю выполняется значительно быстрее, чем перемещение косы и установка приемников в новых пунктах. Эта особенность предопределила технологию регистрации сейсмограмм при многих положениях пункта возбуждения относительно одного участка профиля, где находятся пункты приема, аналогично приемной антенне с развитой апертурой [4].

Специального названия для этой технологии в нормах инженерной сейсморазведки не приведено, терминология в данной области также вызывает вопросы. В частности, при описании системы наблюдений в работах [1, 18] использовано несколько неоднозначных или избыточных по формулировке терминов: «приемная расстановка (стоянка)», «число каналов» «шаг между пунктами приема (сейсмоприемниками)», «система – встречные и нагоняющие годографы», «промежуточные пункты возбуждения». Обозначенные ситуации во многом определяются несовершенством нормативной базы в области инженерной сейсморазведки, особенно – в области терминов и определений.

В статье будут использованы термины: «приемная линия», «линия возбуждения», «шаблон», заимствованные из трехмерной сейсморазведки [14, 23], но достаточно точно отражающие суть базовой технологии инженерной сейсморазведки. Приемной линией будет назван участок профиля, где находятся пункты приема с одновременно работающими сейсмическими приемниками. Неподвижная приемная линия используется для регистрации сейсмограмм с

пунктов, образующих линию возбуждения [14]. Расстояния между соседними элементами в линиях будут названы «шаг приема» и «шаг возбуждения», соответственно. Количество элементов – «порядок приемной линии» и «порядок возбуждения». Система из одного пункта возбуждения и приемной линии будет обозначена как «расстановка», множество расстановок с общей приемной линией – «шаблон». Дистанцией будет называться расстояние между пунктом приема и возбуждения, удалением разность их координат, то есть дистанция – это модуль удаления.

Сама технология будет условно называться «томографической», т.к. такая система наблюдений отвечает требованием сейсмотомографии, весьма распространенной сейчас в практике инженерной сейсморазведки. После отработки всех пунктов возбуждения (ПВ) одной линии, приемная линия перемещается по профилю встык или с перекрытием, после чего шаблон реализуется повторно. Целью работы является анализ особенностей реализации томографических систем наблюдений с перекрытием в инженерной сейсморазведке, а также влиянию параметров систем на качество получаемых динамических разрезов.

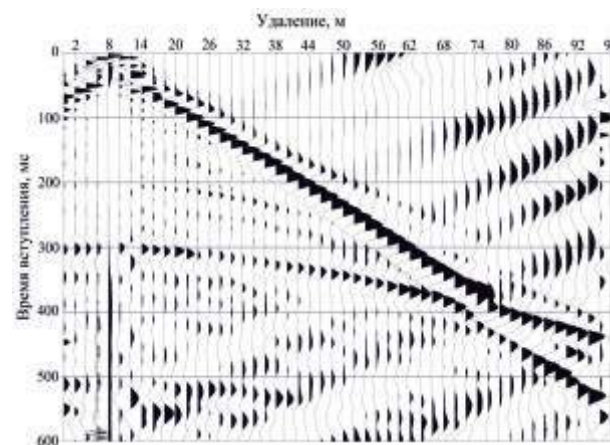
Методика полевых работ и результаты обработки данных

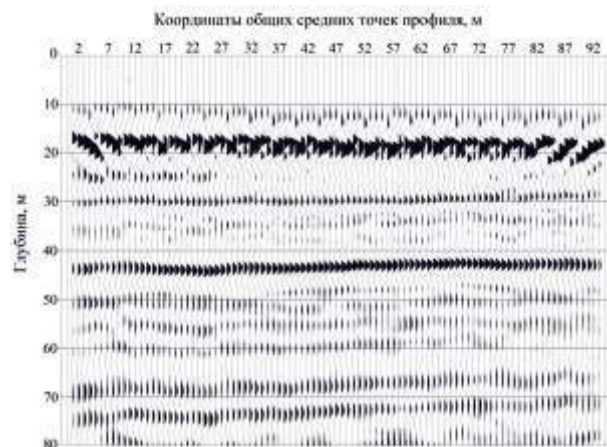
При составлении конфигурации шаблона в первую очередь выбирались шаг пунктов приема (ПП) $\Delta x_{ПП}$ и порядок приемной линии N . От них зависит глубинность сейсморазведки и горизонтальная разрешающая способность получаемых изображений. Для изучения глубин до 10-15 м применялась приемная линия ($N = 24$, $\Delta x_{ПП} = 1-2$ м) [18], для увеличения глубинности порядок линии увеличивался до $N = 48$. Шаг возбужде-

ния выбирался кратным шагу пунктов приема (1-3) $\Delta x_{ПП}$. В шаблон включались фланговые, центральные и выносные расстановки, шаг возбуждения выносных расстановок также выбирался кратным шагу приема [11]. При работах на нормальных скоростных разрезах и при картировании неглубоко залегающих границ (< 10 м), получаемые данные обрабатывались по МПВ-ОГП, на частично – инверсных, когда первый слой разреза имел повышенную скорость, по МОВ-ОСТ [16]. Пример полевой сейсмограммы МОВ, полученной на юго-западе г. Москвы, приведен на рис. 1.

Несмотря на относительно высокий уровень полезного сигнала (интервал времени 200-300 мс), на необработанной сейсмограмме заметно влияние помех – поверхностных и боковых волн, шума. На рис. 2 показан динамический глубинный разрез, полученный с кратностью 2 на удалениях 14-20 м путем настройки сортировки трасс до суммирования. Заметно влияние поверхностной волны Лява, подавленной из-за малой кратности [9] на «глубинах» 10-25 м. Поверхностные волны – это основные сейсмические волны-помехи, которые значительно осложняют прослеживание отраженных волн, выделяемых в последующих вступлениях. Однако, они отли-

▼ Рис. 1. Полевая сейсмограмма с записью отраженных волн.

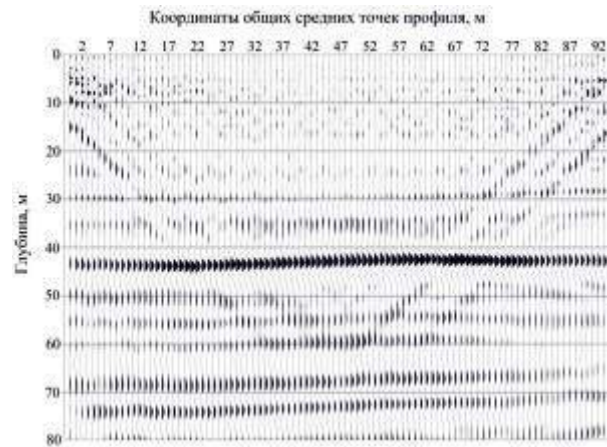




▲ Рис. 2. Глубинный динамический разрез МОВ-ОСТ с фиксированной кратностью 2.

чаются от полезных отраженных волн по частоте (F) и волновому числу (K). Разделение волн по указанным признакам реализуется F - K фильтрацией. Однако методически обоснованные шаги приема в инженерной сейсморазведке (1-2 м) для F - K фильтрации слишком велики и поверхностные волны подавляются недостаточно [22]. Полезные отражения приурочены к кровле юрских глин и каменноугольных известняков на глубине 29-30 м и 40-43 м, соответственно.

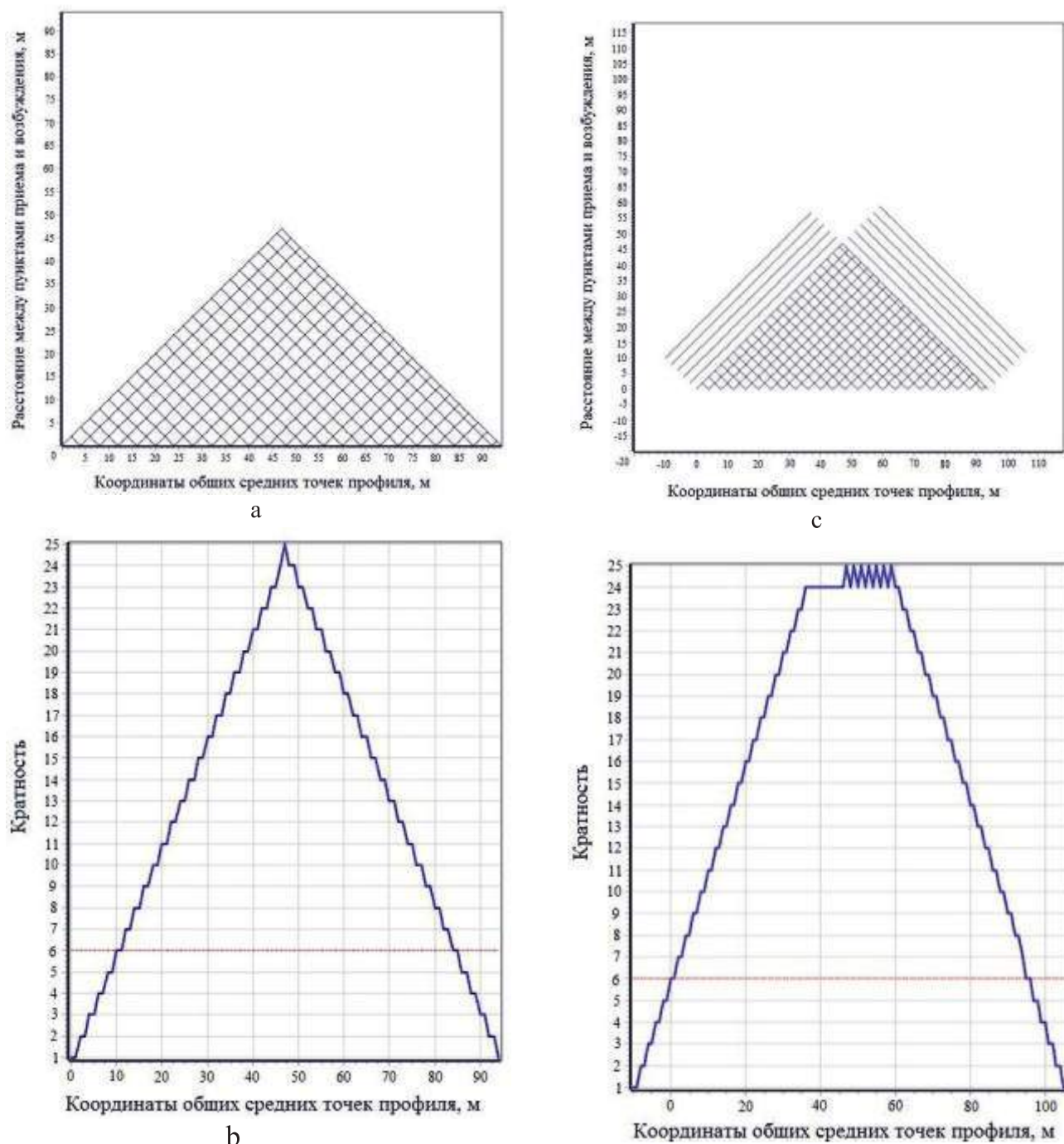
С увеличением кратности степень подавления поверхностных волн возрастала (рис. 3), однако падающая частота отражений уменьшалась. Это хорошо заметно при сравнении рельефа границы, выделяемой на глубинах 40-43 м на рис. 2 и рис. 3 при разном распределении кратности. Отражения от неглубоко залегающих горизонтов выделялись хуже, так как на трассах с большими удалениями они перекрывались поверхностными волнами [8]. В частично-инверсных разрезах [6] эта проблема не возникала. На концах приемной линии наблюдались неполнократные зоны с повышенным уровнем шума, неподавленных помех и низким уровнем полезного сигнала. Это объяснялась с одной стороны низкой кратностью системы наблюдений на краях линии, с другой



▲ Рис. 3. Глубинный динамический разрез МОВ-ОСТ с переменной кратностью 1-25.

стороны – высоким уровнем шума и низкой частотой сигнала на трассах с высокими удалениями. Свой вклад вносили и стандартные алгоритмы кинематики, приводящие к сильному растяжению импульсов отраженных волн, образованных на неглубоких границах. Применение верхнего мьютинга для устранения чрезмерно растянутых импульсов приводило к падению эффективной кратности на небольших временах нормального отражения [15]. Неравномерность кратности отрицательно сказывалась на качестве получаемых сейсмических изображений и возможности выделения аномалий по динамическим признакам. Наибольшее качество отражений наблюдалось в центре приемной линии, что характерно для томографических систем. В таких системах кратность линейно растет от начала приемной линии к ее середине, после чего линейно убывает. На концах приемной линии кратность равна 1, в центре – порядку приемной линии N .

При определении размеров интервалов набора и сброса кратности – неполнократных зон, применялось условие $k \leq M$, где k – кратность в данном пункте профиля, M – минимальная кратность, обеспечивающая достаточный уровень амплитудной разрешенности сейсмичес-



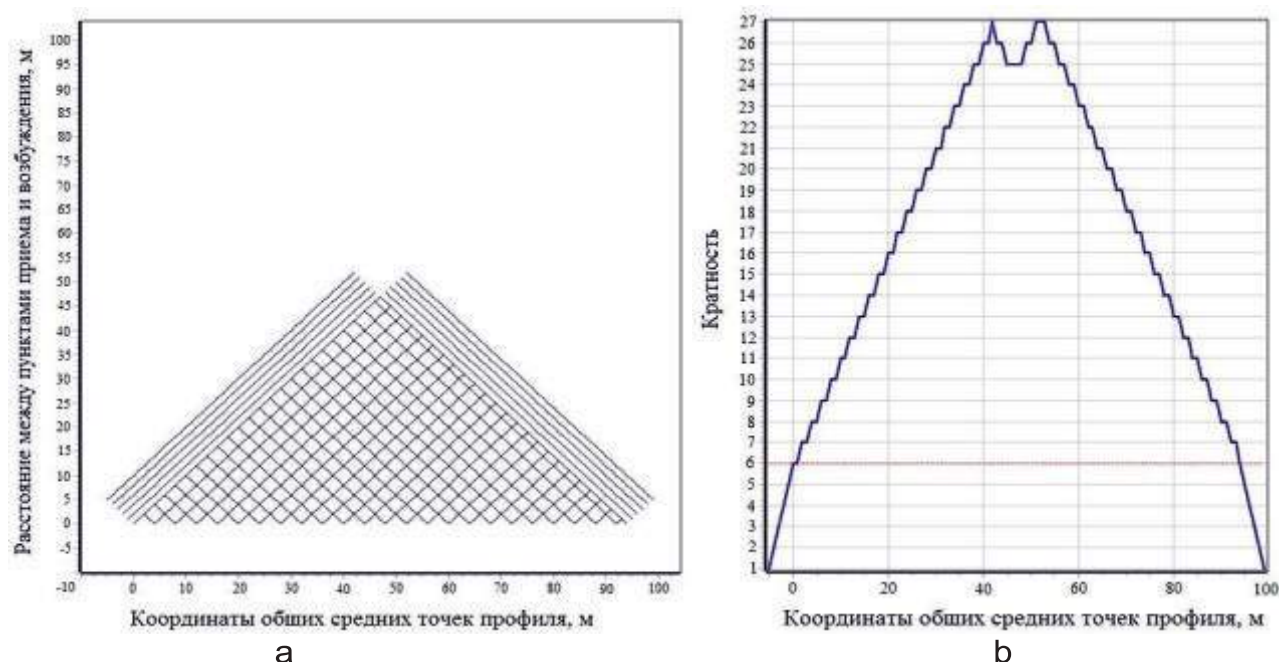
▲ Рис. 4. Системы наблюдений на обобщенной плоскости: а - шаблон без выносных расстановок, с - с пятью выносными расстановками слева и справа от приемной линии; b, d - карты кратности. Обозначения: красной пунктирной линией проведен уровень минимальной кратности.

кого разреза. В качестве M было выбрано значение 6 – половина от минимальной номинальной кратности в соответствии с СП 446.1325800.2019 «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ». Размер неполнократной зоны $L_{НК}$ определялся по формуле:

$$L_{НК} = (M - 1) \Delta x_{ПВ} = 5 \Delta x_{ПВ}$$

где $\Delta x_{ПВ}$ – шаг возбуждения.

Для сокращения суммарной протяженности неполнократных зон $L_{НК}$ до 10% от длины приемной линии ($N = 48$, $\Delta x_{ПВ} = 2$ м) потребовалось бы шаг пунктов возбуждения уменьшить до $\Delta x_{ПВ} = \Delta x_{ПВ} \cdot 0.1$.



▲ Рис. 5. Системы наблюдений на обобщенной плоскости (а) и карта кратности (b).
Обозначения: красной пунктирной линией проведен уровень минимальной кратности.

С увеличением шага пунктов возбуждения до $\Delta x_{пв} = 2 \cdot \Delta x_{пп}$ протяженность неполнократных зон $L_{нк}$ возрастала бы уже до 20% от длины приемной линии. В качестве эффективного инструмента для уменьшения неполнократных зон $L_{нк}$ использовались выносные расстановки, включаемые в конфигурацию шаблона. Если количество выносных расстановок по обеим сторонам приемной линии достигало M , то неполнократные зоны $L_{нк}$ исчезали полностью.

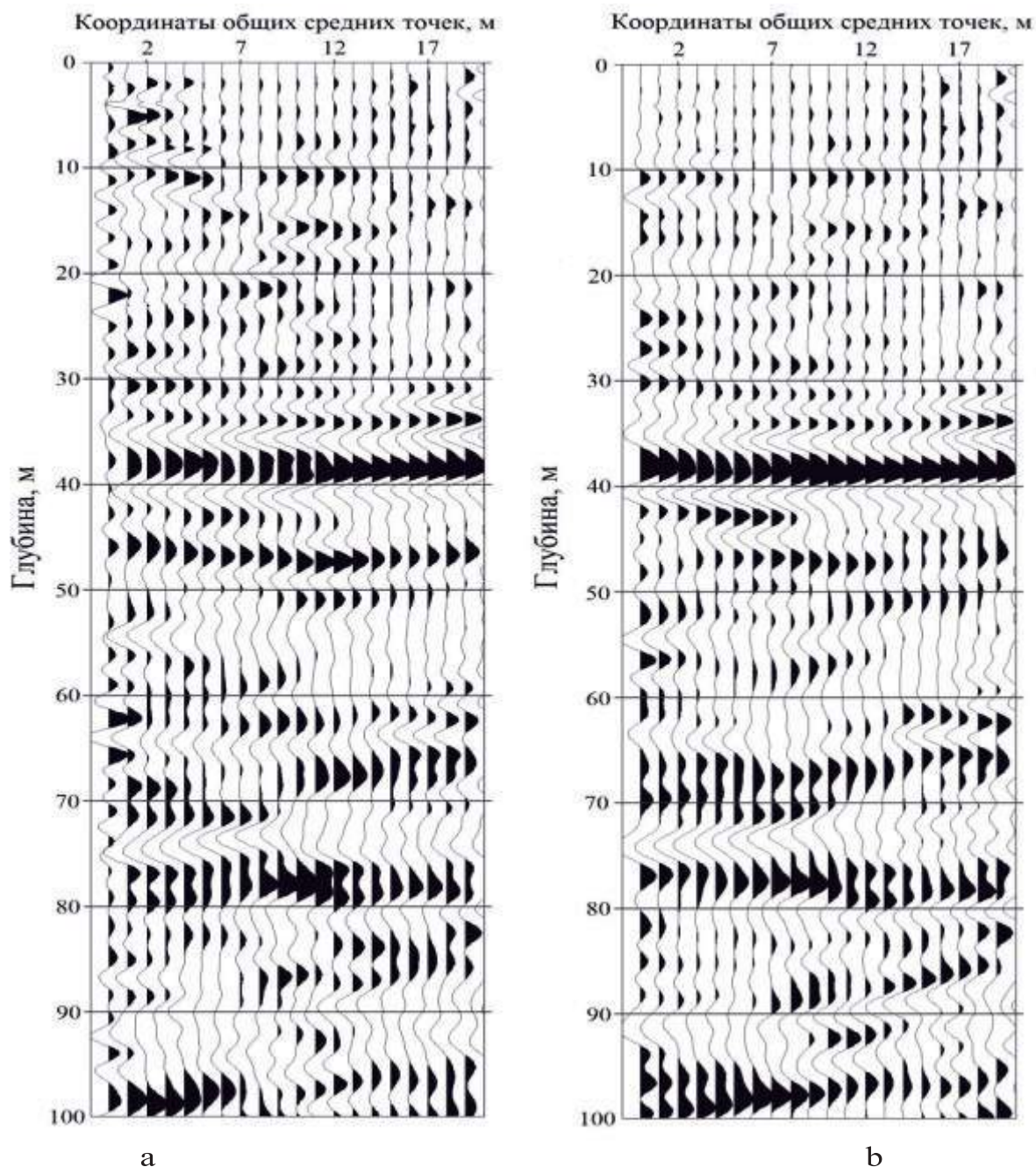
На рис. 4 сравниваются: система наблюдений из одного шаблона без выносных расстановок и с пятью выносными расстановками по краям приемной линии. Шаг возбуждения на выносах сохранялся таким, как и на приемной линии $\Delta x_{пв} = 2 \cdot \Delta x_{пп} = 4$ м. Выносные расстановки позволили выйти на кратность шесть на краях приемной линии и выровнять кратность в центральной части линии. На максимальную (номинальную) кратность ($k = 25$) выносные расстановки не повлияли.

Во многих случаях для размещения проектируемого количества выносных

пунктов возбуждения на профилях не хватало места. В этих ситуациях шаг возбуждения сокращался без уменьшения количества выносных пунктов (рис. 5). Неполнократные зоны по краям в том случае тоже отсутствовали.

На рис. 6 показаны краевые фрагменты глубинных разрезов. На рис. 6, b приведен разрез, полученный по шаблону без выносных расстановок, 6, а – с пятью выносами по обе стороны приемной линии. Во первом случае недостаточная кратность в интервале 0-10 м привела к увеличению помех на глубинном разрезе и изменению в форме импульса полезного отражения (39 м), что могло быть ошибочно проинтерпретировано как аномалия. Использование выносов в системе наблюдений позволило нарастить кратность в начале приемной линии и сделать сейсмический разрез более регулярным.

Интересны результаты, полученные при анализе разрезов, сформированных из одного массива полевых данных, но с разной кратностью перекрытия. Данное исследование было выполнено для

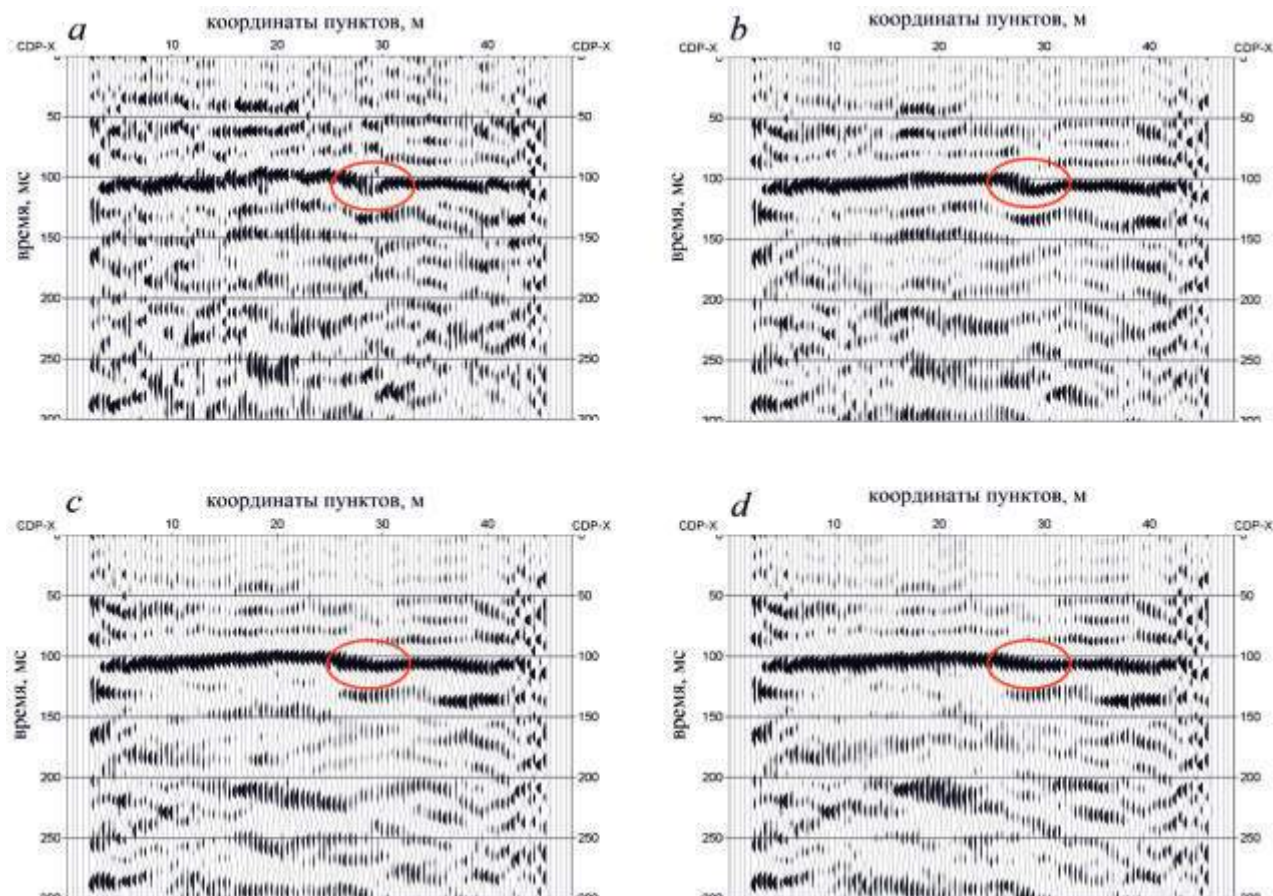


▲ Рис. 6. Фрагменты глубинных разрезов:
а – по системе без выносных расстановок, б – с выносами.

выявления отрицательного влияния избыточной кратности на разрешающую способность сейсморазведки МОВ–ОСТ. Выбранный профиль был отработан приёмной линией с порядком 48, шаги возбуждения и приёма составили 1 м. Такая система наблюдений обеспечила номинальную кратность $K=48$.

При обработке число суммированных трасс с общей средней точкой ограничивалось значениями 1, 3, 6 ... 48. Ограни-

чение кратности при суммировании трасс дало несколько положительных эффектов. Во-первых, из-за уменьшения кратности качество разреза также становилось более равномерным, а размеры неполнократных зон уменьшались. Треугольное распределение кратности заменялось на более предпочтительное, трапециевидное. Во-вторых, снижение кратности позволило увеличить разрешающую способность и выделить боль-



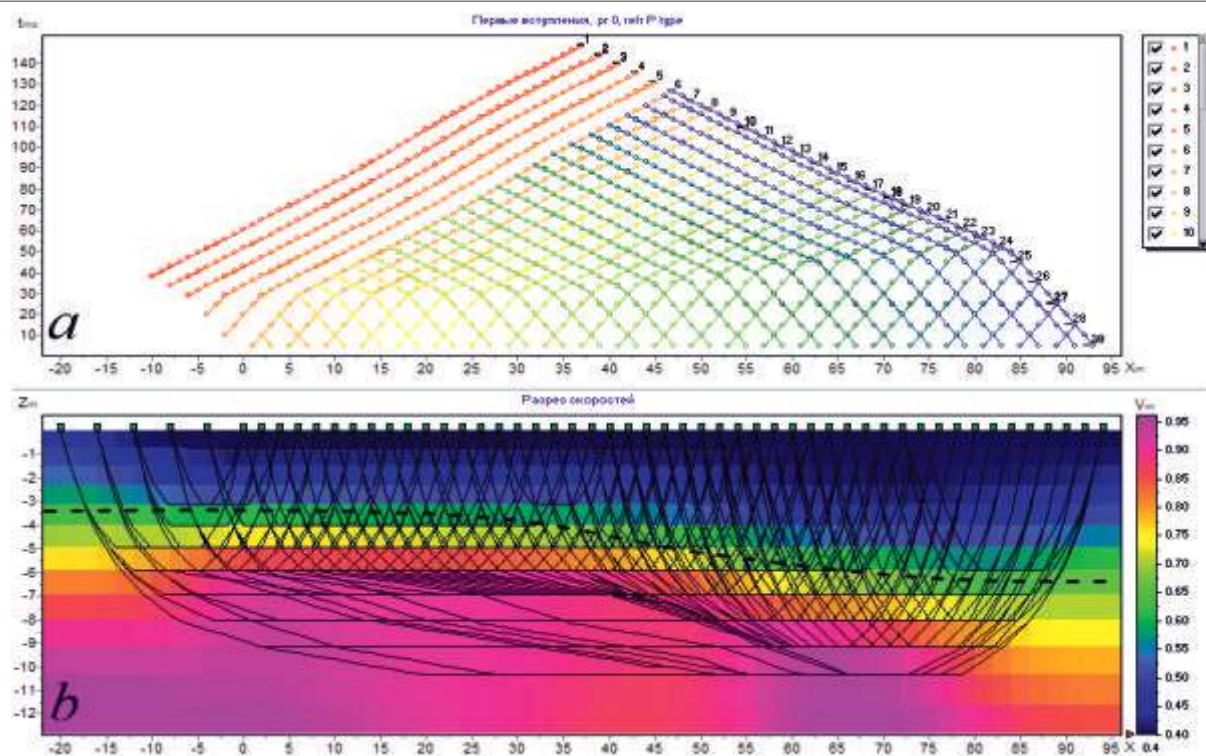
▲ Рис. 7. Временные разрезы, полученные по одному массиву данных с разной максимальной кратностью а — 1, b — 6, c — 12, d — 48. Обозначения: по горизонтали — координаты пунктов профиля, по вертикали — время нормального отражения, мс; красным выделена аномалия — тектонический разлом в кровле известняков касимовского яруса (Москва).

ше мелких деталей разреза, чем при максимальной кратности. Было установлено, что наиболее значимые изменения в содержании временных разрезов наблюдались при увеличении кратности в диапазоне 1–12, дальнейшее рост кратности уже не влияет на качество прослеживания отражающей границы. Наоборот, рельеф границы при кратности больше 12 выполаживался, контуры аномалий, выделенных при меньшей кратности, расплывались из-за падения вертикальной и горизонтальной разрешённости. Этот пример показывает, что при высоком отношении «сигнал / помеха» полезных волн уменьшение шага возбуждения следует рассматривать как способ повышения горизонтальной разрешенности разрезов небольшой

кратности, а не наращивания количества суммируемых трасс.

При изучении сред со значительным вертикальным градиентом скорости, а также при отсутствии отражённых волн на сейсмограммах применялась сейсмическая томография (СТ). В основе алгоритма обработки СТ лежит инверсия — автоматизированное восстановление распределения истинной скорости сейсмических волн в равномерной сети ячеек по полю годографов первых вступлений. Под разрешающей способностью томографии понимается возможность разделения близко расположенных аномалий скорости и выделения аномалий небольшого размера.

Разрешающая способность сейсмотомографии зависит от лучевого покрытия

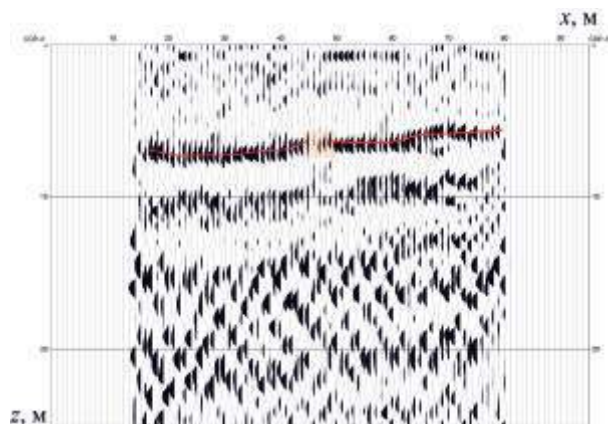


▲ Рис. 8. Поле годографов первых вступлений (а) и результат инверсии сейсмотомографии при изучении структурной аномалии уступообразной формы (b). Обозначения: а: по горизонтали — координаты пунктов профиля, по вертикали — время вступления, мс; ; b: по горизонтали — координаты пунктов профиля, по вертикали — глубина, м; пунктирной линией показан реальный рельеф границы, цветной заливкой — показаны значения истинной скорости. Обработка была выполнена в ПО Zond2DST (автор — А. Каминский).

— количества независимых лучей волн, пересекающих каждую ячейку сетки, в которой определяется истинная скорость сейсмических волн. Если лучевое покрытие неравномерно, то в ячейках с малым количеством лучей возникают артефакты — ложные аномалии, не обусловленные исходными данными[21]. Не меньшее значение имеет угловое покрытие — степень разброса направлений лучей, проходящих через каждую ячейку. Основное влияние на разрешающую способность оказывали шаги возбуждения и приёма, значения которых должны быть в несколько раз меньше размера выделяемых неоднородностей[17]. Наибольшая разрешающая способность достигалась при выборе шага возбуждения, равного шагу приёма. Это требование совпадает с критерием максимальной достижимой кратности в МОВ–ОСТ, что облегчало проектирование системы

наблюдений в ситуациях, когда структура волнового поля изменялась в пределах объекта исследования. В качестве примера можно привести ситуации, когда полевые работы выполнялись на частично заасфальтированных площадках.

Глубинность сейсмической томографии составляла 1/10 – 1/6 длины приёмной линии, в зависимости от распределения истинной скорости в изучаемой грунтовой толще. Основное экранирующее влияние на глубину проникновения лучей оказывали неглубокие и резкие преломляющие границы — уровень грунтовых вод, кровля скальных грунтов и тд. Также, как и в МОВ–ОСТ, качество результата инверсии падало по краям приёмной линии из-за закономерного уменьшения лучевого покрытия. Как правило, в зонах с недостаточным покрытием наблюдалось ложное «заваливание» рельефа изучаемых границ на



▲ Рис. 9 Глубинный разрез МПВ–ОГП. Обозначения: *a*: по горизонтали — координаты пунктов профиля, по вертикали — глубина, м; сплошной линией показан рельеф границы, заштрихованным прямоугольником — зона потери корреляции. Данные получены в Нижегородской области, при картировании кровли гипсов и выделении проявлений карстовых процессов.

концах приёмной линии, из-за они приобретали форму, напоминающую перевёрнутое корыто (Рисунок 8). Из-за того, что выносные пункты возбуждения располагаются за пределами приёмной линии, значительного увеличения лучевого покрытия за счёт выносов в сейсмотомография не происходило. Поэтому, включение большого количества выносных расстановок в систему наблюдений оказалось нецелесообразным. Результат инверсии поля годографов показан на рисунке 8.

При работах по методу МПВ–ОГП существенной проблемой является необходимость выделения целевых волн в первых вступлениях. Годограф первых вступлений имеет форму ломаной линии и прослеживание каждой волны возможно на дистанциях, превышающих дистанцию соответствующей точки излома d_{II} . Это расстояние примерно равно утроенной глубине картируемой сейсмической границы. На разрезах МПВ–ОГП, получае-

мых системами наблюдений без выносных расстановок, вначале и конце приёмной линии формировались зоны нулевой кратности общей протяжённостью $2d_{II}$ (Рис. 9). Для заполнения информацией этих пустых фрагментов разреза в систему наблюдений включались выносные расстановки, их количество определялось по формуле:

$$M = d_{II}/\Delta x_{ПВ} + 1$$

При реализации многоканального анализа поверхностных волн (MASW) использовались сейсмограммы, полученные по схеме Z-Z и содержащие записи поверхностных псевдорэлеевских волн.

По сейсмограммам автоматически строилось дисперсионное изображение, на нём вручную коррелировались дисперсионные кривые фундаментальной и высших мод. По дисперсионным кривым путем подбора определялись подходящие слоистые модели и строился разрез скоростей поперечных волн. Каждая сейсмограмма обрабатывалась отдельно от других, поэтому кратность перекрытия и наличие выносов напрямую не влияла на детальность и протяжённость получаемых сейсмических изображений.

Однако следует учитывать, что количество и положение точек записи результатов MASW зависит от шага возбуждения на приёмной линии и за её пределами.

Например, при расположении источника на 1 пункте приемной линии с длиной 94 м, точка записи MASW оказывалась на пункте с координатой 24 м. Чтобы заполнить пропуски в начале и конце приёмной линии, в систему наблюдения добавляли выносные расстановки. Для обработки применялся специализированный модуль программы Zond2DST (автор — А. Каминский)

Выводы

Анализ получаемых разрезов позволил выбрать оптимальное значение шага возбуждения в системах наблюдений с перекрытием – один или два шага приема. Для компенсации падения качества сейсмических разрезов на краях приемных линий оптимальным решением является введение выносных расстояний в шаблоны. При реализации подобных систем обеспечивается формирование сейсмических изображений высокого качества в методах отраженных и преломленных волн, а также в сейсмотомографии.

Литература:

1. Артемьев Г.В., Рылов Е.С., Криволапчук М.Л., 2021. Опыт работы с цифровой инженерной сейсмостанцией ТЕЛЛС-3 для уточнения грунтовых условий в долине реки Авача (Елизовский городской округ). Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки, Том 35, № 2, с. 81-90, <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2021-35-2-81-90>.
2. Бабкин А.И., 2016. Апробация компактного механизированного ударного источника сейсмических волн для малоглубинных исследований в условиях вечной мерзлоты. Стратегия и процессы освоения георесурсов, Сборник научных трудов, Пермь, 2016, с. 218-220.
3. Герасимова И.Ю., Калашникова М.М., Бобров В.Ю., 2019. Сейсмический мониторинг свойств и строения верхней части разреза в зоне влияния карстового провала методом преломленных волн. Горный информационно-аналитический бюллетень, № 8, с. 169-179, <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-08-0-169-179>.
4. Заславский Ю.М., Заславский В.Ю., 2020. Оценка пространственной разрешающей способности при акустических исследованиях грунтов. Вычислительная механика сплошных сред, Том 13, № 1, с. 23-33.
5. Зеркаль С.М., Хогоев Е.А., 2005. Итерационная технология сейсмотомографической диагностики на основе кинематики рефрагированных волн. Доклады Академии наук, Том 401, № 4, с. 526-528.
6. Крылатков С.М., Крылаткова Н.А., Крылевская А.Н., 2013. Расчет теоретических сейсмограмм при наличии высокоскоростного приповерхностного слоя. 9th EAGE International scientific and practical Conference and Exhibition on Engineering and Mining Geophysics. European Association of Geoscientists & Engineers, 2013, cp-346-00053.
7. Пирогова А.С., Замотина З.С., Чегодаева А.Е. и др., 2021. Динамический анализ данных 3D-сейсморазведки для характеристики потенциально опасных геологических процессов и явлений на шельфе Охотского моря. Геофизика, № 6, с. 76-86.
8. Пригара А.М., Царев Р.И., Коноплев А.В. и др., 2014. Инженерно-геологическая оценка гидротехнических сооружений методами неразрушающего контроля. Фундаментальные исследования, № 11-2, с. 348-352.
9. Ли В.О., Владов М.Л., 2012. Анализ эффективности 2D сейсморазведки методом ОГТ при изучении приповерхностной части разреза. Вестник Московского университета. Серия 4. Геология, № 3, с. 52-60.
10. Рагозин Н.А., Пашко В.Ф., 2008. Проблемы обработки данных метода преломленных волн (МПВ) в инженерной сейсморазведке. 4th EAGE International scientific and practical Conference and Exhibition on engineering and mining geophysics. European Association of Geoscientists and Engineers, 2008. cp-199-

00072.

11. Романов В.В., Иванов А.А., Шматкова А.А., 2018. Опыт применения инженерной сейсморазведки МОВОГТ для оценки карстовосуффозионной опасности на территории Москвы и Московской области. Инженерная сейсморазведка-2018, Сборник тезисов научно-практической конференции, Москва, 2018, с. 20-24.

12. Романов В.В., Иванов А.А., Кауркин М.Д., 2021. Комплексирование электротомографии, георадиолокации и сейсморазведки при исследованиях проявлений сульфатного карста на примере Нижегородской области. Электроразведка 2021, Сборник тезисов научно-практической конференции, Москва, 2021, с. 64-68.

13. Сальников А.С., Канарейкин Б.А., Долгова С.В., Дунаева К.А., Сагайдачная О.М., Харламов А.С., 2012. Технология и результаты сейсмотомографических исследований на проходящих волнах в угольных шахтах Кузбасса. Технологии сейсморазведки, № 2, с. 74-88.

14. Санфиоров И.А., Жикин А.А., Ярославцев А.Г., Бабкин А.И., Чугаев А.В., Герасимова И.Ю., 2019. Малоглубинная сейсморазведка 3D на участках со сложным геологическим строением. Вестник Пермского федерального исследовательского центра, № 2, с. 18-28, <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2019.2.2>.

15. Санфиоров И.А., Мухамедшин А.М., Ярославцев А.Г., 2010. Сейсморазведочные исследования глубинного строения габбрового массива в центре мегаполиса. Горный информационно-аналитический бюллетень, № 12, с. 124-130.

16. Скворцов А.Г., 2018. Возможности и специфика использования отраженных волн в инженерной сейсморазведке. Инженерная сейсморазведка-2018. с. 8-12.

17. Тихоцкий С. А., Фокин И. В., Шур Д. Ю. Активная лучевая сейсмическая томография с использованием адаптивной параметризации системой вэйвлет-функций //Физика Земли. – 2011. – №. 4. – С. 67-67.

18. Телегин А.Н., Яковлев А.С., 2011. Основные требования к параметрам методики малоглубинных сейсморазведочных работ МОВ-ОГТ для решения инженерно-геологических задач. Записки Горного института, Том 189, с. 72-75.

19. Турчков А.М., Дерюгина Е.П., Забелян И.Г., 2010. Опыт применения 9-компонентной инженерной сейсморазведки. 6th EAGE International scientific and practical Conference and Exhibition on engineering and mining geophysics, European Association of Geoscientists and Engineers, 2010, cp-193-00058.

20. Федотов С.А., 2006. Технология малоглубинных геофизических исследований методами многоволновой сейсморазведки и электроразведки. Разведка и охрана недр, № 3, с. 51-54.

21. Шишкина М. А., Фокин И. В., Тихоцкий С. А. К вопросу о разрешающей способности межскважинной лучевой сейсмической томографии //Технологии сейсморазведки. – 2015. – Т. 1. – С. 5-21.

22. Яковлев А.С., 2011. Обоснование применения сейсморазведки методом отраженных волн способом общей глубинной точки для решения инженерно-геологических задач в Санкт-Петербурге и пригородах, дис. ... канд. геол.-мин. наук, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург.

23. Turchkov A.M. et al, 2021. Seismic 3D-4C CDP reflection method using shear waves for estimation of karst-suffusion gazard estimation in the moscow city area. Engineering and mining geophysics 2021. European Association of Geoscientists and Engineers, No. 1, pp. 1-9.