



МЕТОД ОТРАЖЕННЫХ ВОЛН В МОДИФИКАЦИИ ОБЩЕЙ ГЛУБИННОЙ ТОЧКИ В ИНЖЕНЕРНОЙ СЕЙМОРАЗВЕДКЕ

А.М. Турчков

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, Россия, e-mail: turchkov@gmail.com*

В статье рассмотрен метод отраженных волн в модификации общей глубинной точки в инженерной сейсморазведке и освещены его основные особенности. Дан обзор популярной аппаратуры для производства работ, приведены методика проведения работ на продольных и поперечных волнах, граф обработки, результаты, полученные вследствие обработки данных методом отраженных волн.

Инженерные изыскания, инженерная сейсморазведка, метод отраженных волн, МОВ-ОГТ

REFLECTION SEISMIC FOR ENGINEERING APPLICATIONS

A.M. Turchkov

*M.V. Lomonosov Moscow State University, Subdepartment of Seismometry and Geoacoustics,
1, Leninskie Gory, GSP-1, Moscow, 119991, Russia, e-mail: turchkov@gmail.com*

The method of CMP seismic reflection profiling is considered as applied to engineering geotechnical purposes. Reported are basic principles of near-surface seismics, most broadly used instruments and configurations for *P* and *S* component acquisition, standard processing procedures, as well as some data processing results.

Engineering survey, shallow seismic, reflection seismic, CMP method

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время метод отраженных волн в модификации общей глубинной точки (МОВ-ОГТ) получил наибольшее распространение в сейсморазведке и используется для изучения геологического строения в нефтегазовой отрасли. Данный метод довольно подробно описан во многих работах (см., напр.: [Боганик, 2006]). Вместе с тем МОВ-ОГТ является одним из наиболее эффективных геофизических методов исследований при производстве инженерно-геологических изысканий.

ОСОБЕННОСТИ МАЛОГЛУБИННЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ РАБОТАХ МОВ-ОГТ

Нормативные документы

Основными нормативными документами, регулируемыми сейсморазведочные работы МОВ-ОГТ при инженерно-геологических изысканиях, являются следующие:

СП 11-105-97. Общее правило производства работ. Ч. I: Правила производства геофизических исследований (М., 2004);

СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. VI: Правила производства геофизических исследований (М., 2004);

РСН 66-87. Технические требования к производству геофизических работ. Сейсморазведка (Гострой РСФСР).

В приложении Д, СП 11-105-97 описаны основные задачи, которые могут быть решены при использовании данного метода:

- определение кровли скальных и мощности перекрывающих их дисперсных грунтов;
- обнаружение и оконтуривание зон повышенной трещиноватости, тектонических нарушений и активных разрывных структур;
- обнаружение и оконтуривание карстовых полостей и подземных выработок;
- изучение опасных геологических и инженерно-геологических процессов.

Основные различия малоглубинных и глубинных исследований

В отличие от нефтяной сейсморазведки (диапазон изучаемых глубин колеблется от первых сотен метров до нескольких километров), в инженерной сейсморазведке метод отраженных волн не имеет такого доминирующего положения. Основная причина заключается в сложности адаптации уже наработанных методик, используемых в нефтяной сейсморазведке, к изучению верхней части разреза. Многие обрабатывающие процедуры МОВ-ОГТ (например, деконволюция, миграция, AVO-анализ) работают в предположении “дальней зоны” [Yilmaz, 1987]. Это означает, что длина волны импульса источника много меньше, чем расстояние до отражающих границ. При

изучении малых глубин длина волны импульса источника соизмерима с расстоянием до изучаемой границы.

Несмотря на вышесказанное, у малоглубинных сейсморазведочных исследований есть ряд принципиальных преимуществ. Основное из них заключается в контролируемости источника упругих колебаний. Как правило, в качестве такового используется обыкновенная кувалда. Производя разнонаправленные удары кувалдой, в зависимости от положения приемников можно возбуждать волны различного типа (продольные или поперечные) и поляризации (вертикальной или горизонтальной) [Тихонов, 2008]. Данная особенность позволяет проводить работы МОВ-ОГТ с использованием различных типов волн (см. раздел “Методика проведения работ МОВ-ОГТ”) в зависимости от геологических условий и решаемых задач.

Особенности проведения работ на разрезах с инверсным слоем

Одной из особенностей проведения наземных сейсморазведочных работ при изучении малых глубин является зависимость получаемой волновой картины от условий возбуждения/приема. Наиболее значимые изменения волновой картины происходят, когда работы ведутся на разрезах, в верхней части которых находится т. н. инверсный слой. В работе [Скворцов, 2007] под инверсным подразумевается слой малой мощности (от 0.1 до 2 м) и с высокими значениями скоростей продольных (2000–3000 м/с) и поперечных

(900–1500 м/с) волн. Инверсный слой может присутствовать в разрезе, например в зимний период, когда в верхней части разреза появляется слой сезонного промерзания. Инверсный слой может иметь также техногенную природу (асфальтовое покрытие).

Наличие даже совсем маломощного (до 0.1 м) инверсного слоя в верхней части разреза резко меняет структуру волнового поля [Там же]. В первую очередь это связано с изменениями, касающимися поверхностной волны. На сейсмограммах, полученных при обычных условиях возбуждения/приема, поверхностная волна имеет ярко выраженную скоростную дисперсию. На сейсмограммах, полученных на разрезах с инверсным слоем, поверхностная волна имеет, как правило, только одну ось синфазности, с кажущейся скоростью, приблизительно равной скорости поперечной волны в верхней части разреза.

На рис. 1 приведены сейсмограммы ОПВ, полученные при одном положении приемной линии, но при различных условиях возбуждения/приема. Слева на рисунке изображена сейсмограмма, полученная в зимний период (мощность инверсного слоя 0.5 м), справа – в летний период. На сейсмограмме, полученной в зимний период, ось синфазности отраженной волны (вершина гиперболы 220 мс) прослеживается на всем диапазоне удалений (46 м). На сейсмограмме, полученной в летний период, ось синфазности этой же отраженной волны на удалениях до 40 м не прослеживается. Отраженная волна на этих удалениях интерферирует с высокоамплитудной поверхностной волной.

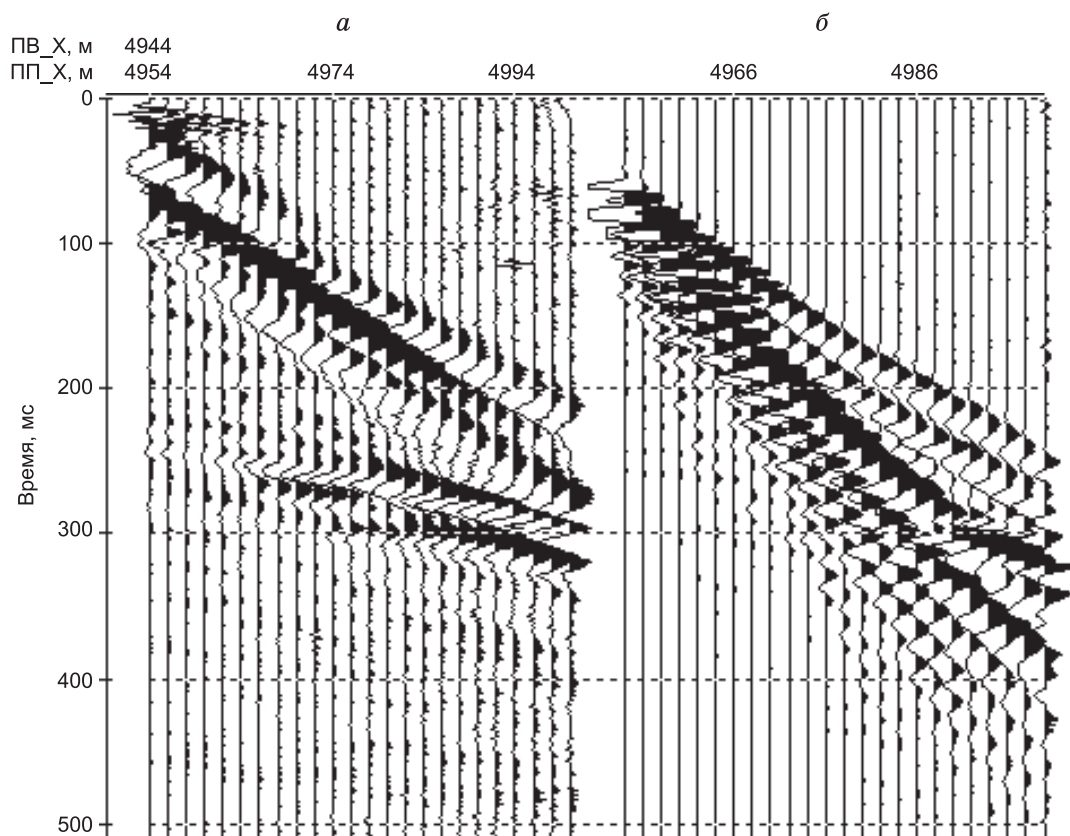


Рис. 1. Сейсмограммы ОПВ, полученные при одном положении приемной линии в различных условиях возбуждения/приема: в зимний период (а), в летний период (б).

ПВ_Х – координата пункта возбуждения, ПП_Х – координата пункта приема.



Рис. 2. Строительная кувалда – источник упругих колебаний.

Аппаратура для производства работ МОВ-ОГТ

В состав сейсморазведочной аппаратуры входят: сейсморазведочные станции, сейсμοприемники и источники упругих колебаний.

Наиболее распространенным способом *возбуждения упругих волн* является применение механического источника типа “падающий груз”. Как правило, при производстве работ используется обыкновенная строительная кувалда (рис. 2). В редких случаях, когда ставится задача исследовать большие глубины (от 100 до 500 м), используются механические системы, которые с ускорением сбрасывают груз (весом от 10 до 100 кг) с небольшой высоты (от 0,5 до 3 м). На рис. 3 изображен сейсмический источник “ESS 200”

(Electric Seismic Source 200), смонтированный на автомобильном прицепе. Ударная часть источника представляет собой колонну весом 90 кг. В момент дистанционной инициализации возбуждения колонна поднимается на высоту ~ 0.5 м и под тяжестью собственного веса ударяется о металлическую плиту. Для увеличения ускорения падения колонны в источнике используется толстый резиновый жгут.

Помимо механических, в инженерной сейсморазведке применяются источники импульсного типа. Наиболее распространенными в производстве являются: малогабаритный электромагнитный источник сейсмических волн “Геотон 06” (рис. 4), импульсный источник упругих колебаний (рис. 5).

Прием колебаний

Для приема упругих колебаний при работах МОВ-ОГТ используются сейсμοприемники GS-20DX (производство OYO-GEO Impulse International, Уфа) с горизонтальными (Y-компонента) и вертикальными (Z-компонента) осями максимальной чувствительности. Приемники соединяются с сейсмостанцией сейсмической косой; обладают частотной характеристикой с собственной частотой 10 Гц, которая обеспечивает равномерность в полосе частот 10–500 Гц, что дает возможность принимать в неискаженном виде колебания от описанных выше источников продольных и поперечных *Sh*-волн (рис. 6).



Рис. 3. Источник сейсмических колебаний “ESS 200”, смонтированный на автомобильном прицепе.



Рис. 4. Малогабаритный электромагнитный источник сейсмических волн “Геотон 06” (ООО “Геосейс”, Москва).

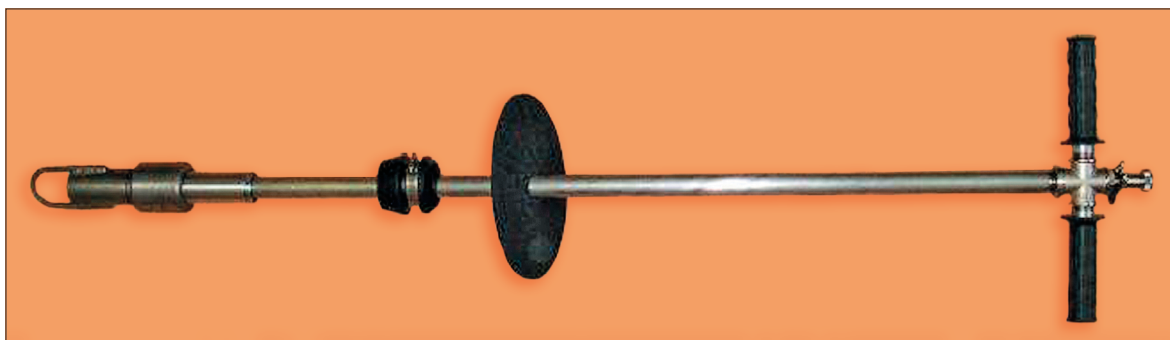


Рис. 5. Импульсный источник упругих колебаний (Горный институт КрО РАН, Пермь).

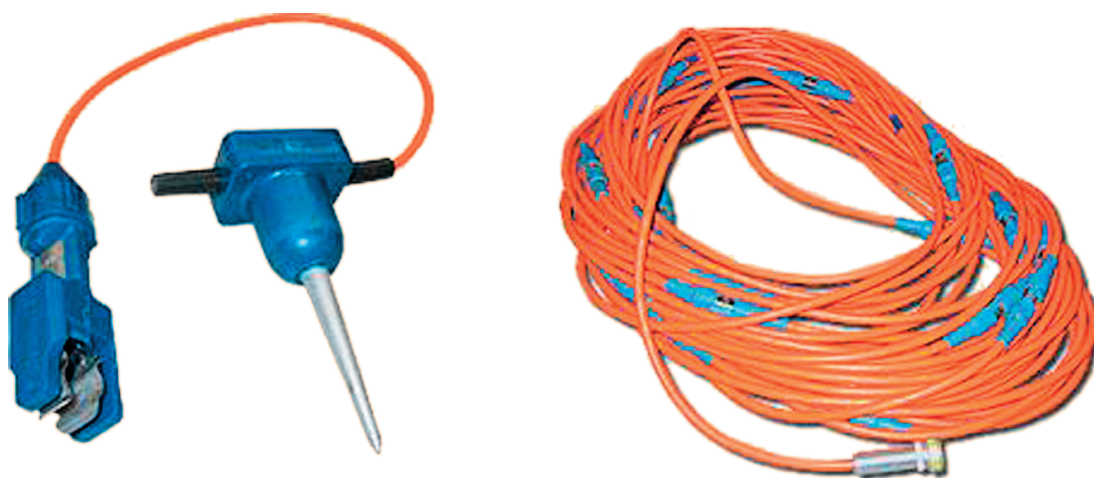


Рис. 6. Сейсмоприемник "GS-20DX" и сейсмическая коса.

Для производства работ МОВ-ОГТ используются два основных типа сейсморазведочных станций – линейные и телеметрические. В системе регистрации с линейным разделением каналов линии связи (провода) находятся между сейсмоприемником и сеймостанцией. Информация передается в виде аналогового сигнала и может претерпевать в процессе передачи значительные искажения, связанные как с взаимными влияниями между каналами и наводками, так и с низкочастотной фильтрацией, обусловленной омическим сопротивлением проводов и электрической емкостью между ними.

К наиболее часто используемым *линейным сеймостанциям* относятся: "Лакколит X-M2" (ООО "Логис", Жуковский), "Эллис-3" (ООО "ГЕО-СИГНАЛ", Москва), "Диоген-24/14" (НТК "Диоген", Москва) "SGD-SEL" (ООО НПК "СибГеофизПрибор", Новосибирск) (рис. 7).

"Лакколит X-M2" – станция, предназначенная для производства сейсморазведочных работ методами преломленных и отраженных волн при проведении геолого-геофизических исследований. Станция состоит из одного или нескольких регистраторов "Лакколит X2" и персонального компьютера или специализированного блока управления. Каждый регистратор обеспечивает получение данных с 24 сейсмических каналов и их предварительную обработку.

"Эллис-3" – 48-канальная сеймостанция, в которой реализованы аппаратные и программные алгоритмы, позволяющие осуществлять полный контроль измерительного оборудования (как самой станции, так и подключаемой косы с сейсмоприемниками).

"Диоген-24/14" – 24-канальная станция, обладающая широким частотным диапазоном регистрируемых сигналов, что позволяет проводить измерения как на обычных грунтах, так и на скальных основаниях, железобетонных сооружениях (плотинах, эстакадах и т. д.). Сеймостанция портативная, что существенно расширяет диапазон ее применения (горные выработки, карьеры, труднопроходимые местности).

"SGD-SEL" – 48-канальная станция, предназначенная для предварительного усиления, аналого-цифрового преобразования и записи информации в энергонезависимом запоминающем устройстве регистратора, а также для отображения сейсмической информации на экране встроенного графического дисплея.

При эксплуатации линейных станций для работ МОВ-ОГТ необходимо использовать коммутаторы приемной линии. К коммутаторам подключается приемная линия с числом каналов большим, чем может оцифровать линейная станция. В коммутаторах задается протокол переключения в приемной линии активных каналов, информация с которых передается



"Лакколит Х-М2"



"Диоген-24/14"



"Эллис-3"



"SGD-SEL"

Рис. 7. Линейные сейсмостанции.

на станцию. Принцип действия коммутатора 48 каналов для 24-канальной станции приведен на рис. 8. С использованием коммутаторов становится возможным реализовывать центральную и фланговую системы наблюдений, которые в основном используются для проведения работ МОВ-ОГТ. Современные сейсмические станции включают в себя встроенные коммутаторы.

В телеметрической системе сбора информации сейсмический сигнал преобразуется из аналоговой формы в цифровую до момента передачи в центральный модуль. Все элементы, необходимые для оцифровки сигнала (усилитель, фильтры и т. д.), находятся непосредственно около сейсмоприемников.

Среди телеметрических станций наиболее известны "ТЕЛСС-3" (ООО "ГЕОСИГНАЛ", Москва) и

"SGD-SET" (ООО НПК "СибГеофизПрибор", Новосибирск) (рис. 9). Телеметрическая станция "ТЕЛСС-3" обеспечивает возможность совместного использования кабельных и автономных модулей, что значительно повышает возможности по развертыванию системы и отработке больших площадей в самых различных ландшафтных условиях.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ МОВ-ОГТ

Работы МОВ-ОГТ в инженерной сейсморазведке проводятся с использованием продольных (P) и поперечных (S) волн. Для реализации полевой методики работы на том или ином типе волн используются различные компоненты возбуждения/приема. При проведении двумерных сейсмических исследований обычно выбирается следующая система координат [Тихо-

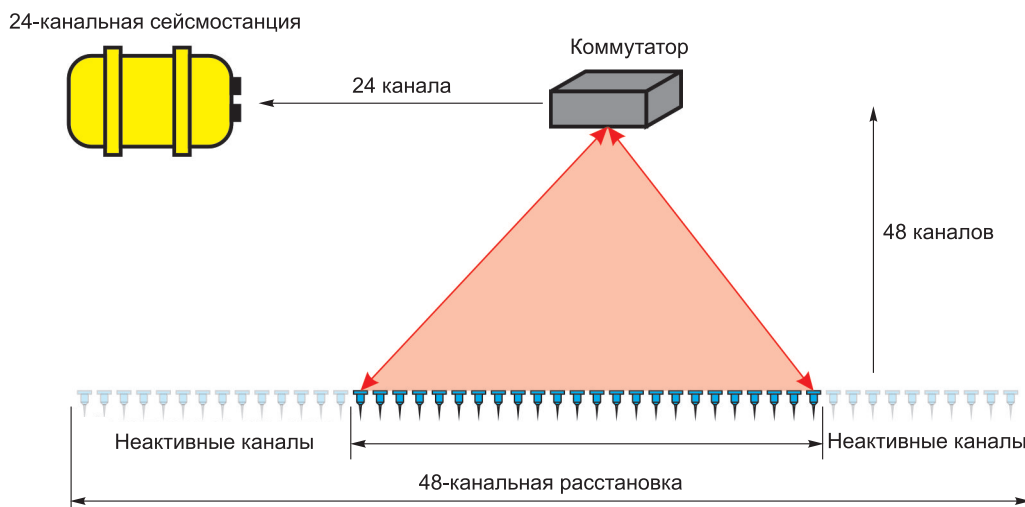


Рис. 8. Схема действия коммутатора приемной линии.



"ТЕЛСС-3"



"SGD-SET"

Рис. 9. Телеметрические сейсмостанции.

нов, 2008]: ось Z направлена вертикально вниз, ось X – вдоль линии профиля, ось Y – перпендикулярно линии профиля в горизонтальной плоскости (рис. 10).

На рис. 10, а приведена схема наблюдений Z - Z (вертикальное возбуждение колебаний, вертикальный прием). При такой методике проведения полевых работ возбуждаются и принимаются преимущественно продольные волны. Такая система наблюдений относительно просто реализуема и имеет широкое распространение в нефтяной сейсморазведке. В инженерной сейсморазведке широкое распространение имеет схема наблюдений Y - Y (возбуждение и прием колебаний производятся в плоскости, перпендикулярной оси профиля). При такой методике возбуждаются и принимаются преимущественно поперечные волны горизонтальной поляризации (Sh -волны) (см. рис. 10, б).

Традиционно наиболее успешно в инженерной сейсморазведке применяется МОВ-ОГТ на поперечных волнах горизонтальной поляризации (Sh -волны) [Скворцов, 2007; Гайнанов, 2006]. Можно выделить следующие основные причины:

- поперечные волны горизонтальной поляризации не порождают обменных волн при преломлениях и отражениях на границах разделов сред. Таким образом, наблюдаемые гиперболические оси синфазности на сейсмограммах ОПВ, полученных по методике Y - Y , должны соответствовать только отраженным и кратно отраженным поперечным Sh -волнам;

- скорости поперечных волн меньше, чем скорости продольных. На рис. 11 приведен пример двух полевых сейсмограмм ОПВ при одном положении приемной линии: полученные при регистрации по схеме Z - Z (а) и при регистрации по схеме Y - Y (б). На сейсмограмме

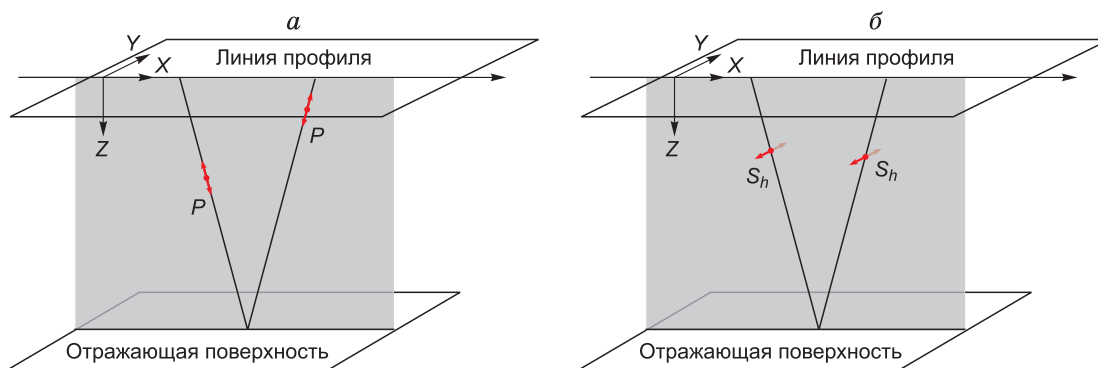


Рис. 10. Схемы наблюдений в сейморазведке: расстановка Z-Z (а); расстановка Y-Y (б).

Z-Z четко выделяется годограф однократно отраженной продольной волны, которая по своим кинематическим характеристикам очень близка к годографу головной волны. В то же время на сейсмограмме Y-Y выделяются сразу несколько (в диапазоне от 90 до 120 мс) годографов отраженных волн с различной интенсивностью;

– резкое увеличение скоростей продольных волн в породах, залегающих ниже уровня грунтовых вод. Контрасты скоростей продольных волн в верхней части разреза ниже уровня грунтовых вод становятся незначительными;

– возможность использования технологии вычитания “левых” и “правых” ударов.

Несмотря на перечисленные преимущества, в случае, когда в разрезе нет инверсного слоя, зачастую

провести работы МОВ-ОГТ на поперечных волнах не представляется возможным. Основная причина этого заключается в наличии на сейсмических записях высокоамплитудной поверхностной волны, обладающей сильной дисперсией. Такая поверхностная волна интерферирует с отраженными волнами и не позволяет выделить их на записях. На рис. 12 приведен пример сейсмограммы, на которой нельзя проследить оси синфазности отраженных волн по причине их интерференции с высокоамплитудной поверхностной волной.

В случае, когда невозможно провести работы на поперечных волнах, можно провести работы на продольных волнах с использованием фланговой расстановки.

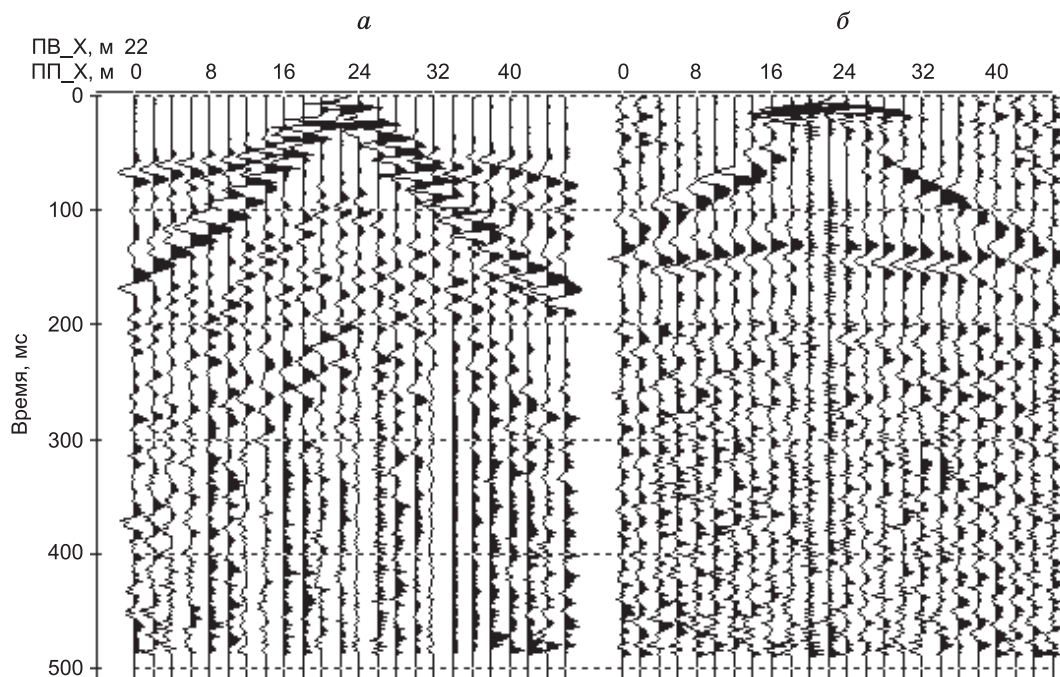


Рис. 11. Сейсмограммы ОПВ, полученные при одном положении приемной линии: расстановка Z-Z (а), расстановка Y-Y (б).

ПВ_X – координата пункта возбуждения, ПП_X – координата пункта приема.

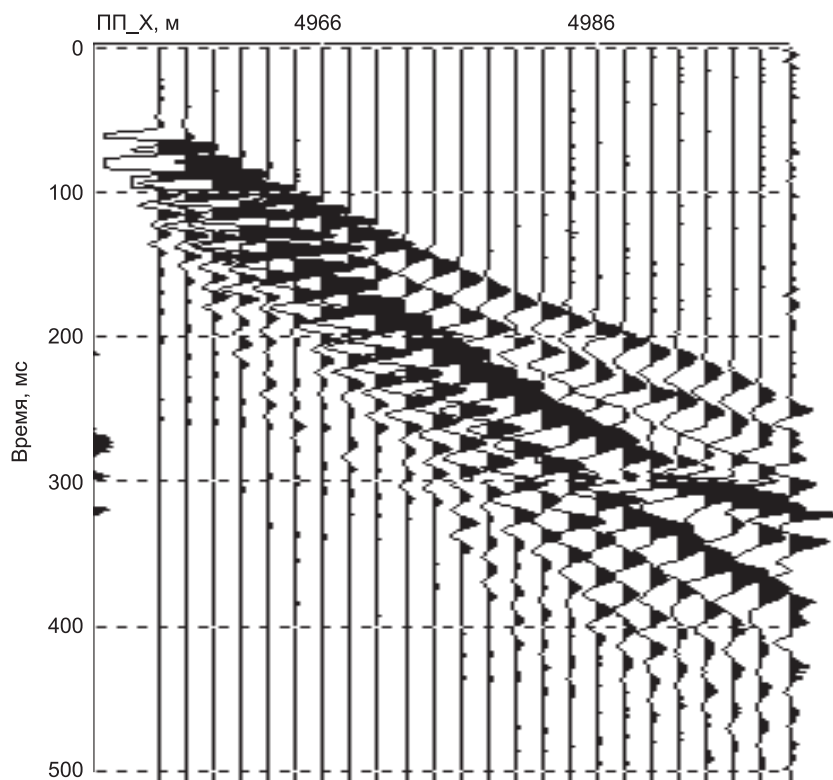


Рис. 12. Сейсмограмма ОПВ, на которой невозможно проследить оси синфазности отраженных волн.
ПП_X – координата пункта приема.

Методика проведения работ МОВ-ОГТ на продольных волнах

Работы МОВ-ОГТ на продольных волнах (схема регистрации – $Z-Z$) целесообразно проводить с использованием фланговой расстановки: пункт возбуждения располагается на некотором выносе от первого пункта приема. При переходе пункта возбуждения на следующий пикет вся приемная линия перемещается на то же расстояние. Таким образом, удаления между источниками и приемниками остаются постоянными на всех сейсмограммах (рис. 13).

При выборе оптимального удаления пункта возбуждения необходимо исходить из условий места проведения сейсморазведочных работ. Удаление должно

быть таким, чтобы на сейсмограмме отраженные волны прослеживались на как можно большем числе трасс (т. е. не были проинтерферированы с поверхностными волнами), но при этом кривизна годографов отраженных волн была достаточной, чтобы оценить по ним скорость до отражающей границы. Для выбора оптимального выноса необходимо сначала провести опытно-методические работы. На рис. 14 приведены сейсмограммы, полученные в ходе выполнения опытно-методических работ в Калининградской области при удалении пункта возбуждения, равном 50 м и 120 м. Отраженные волны в диапазоне 100–300 мс (справа) прослеживаются практически на всех удалениях, в отличие от отраженных волн на сейсмограмме слева.

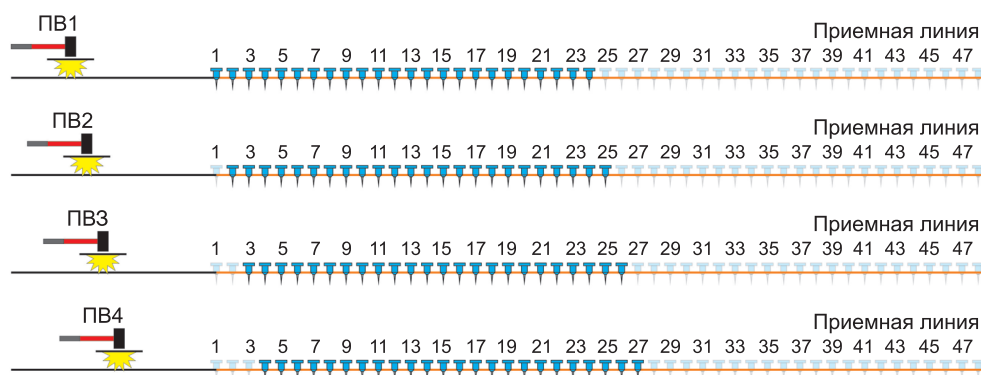


Рис. 13. Фланговая расстановка.

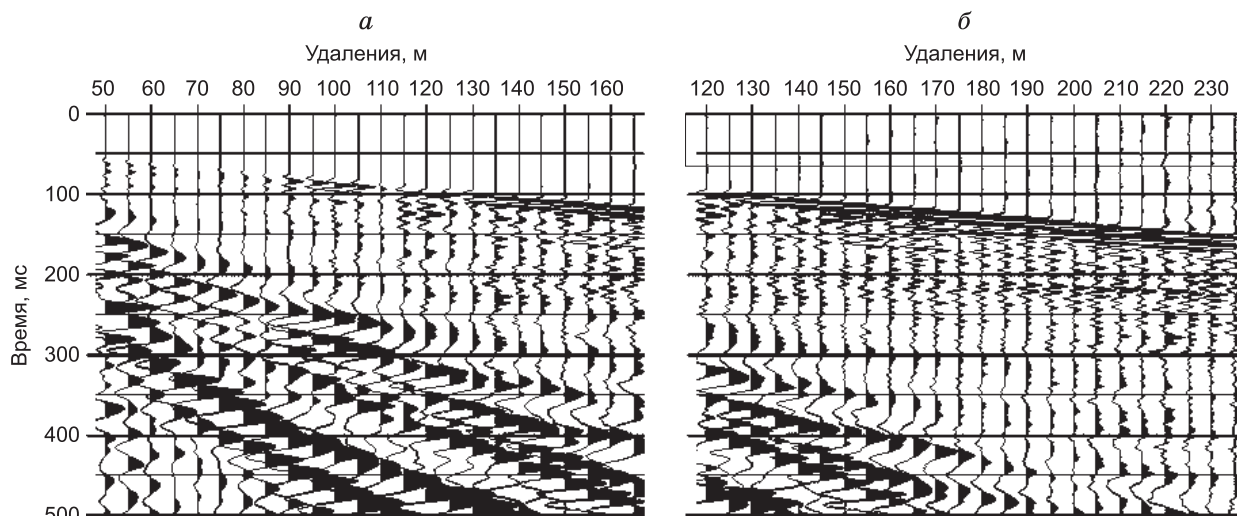


Рис. 14. Выбор оптимального выноса.

Кривизны годографов отраженных волн на обеих сейсмограммах достаточно для того, чтобы оценить по ним скорость до отражающей границы. Поэтому в данном примере в качестве оптимального выбран вынос 120 м.

Методика проведения работ МОВ-ОГТ на поперечных волнах

При производстве работ МОВ-ОГТ на поперечных волнах в инженерной сейсморазведке целесообразно использовать центральную расстановку: пункт возбуждения располагается в центре приемной линии. При переходе пункта возбуждения на следующий пикет вся приемная линия перемещается на то же расстояние. Таким образом, пункт возбуждения при каждом положении остается в центре приемной линии (рис. 15).

Обработка данных методом МОВ-ОГТ в инженерной сейсморазведке проводится по следующему

графу: ввод данных в систему обработки → присвоение геометрии → повышение соотношения сигнал/шум (полосовая фильтрация, автоматическая регулировка усиления (АРУ)) → сортировка по ОГТ → скоростной анализ → ввод кинематических поправок → суммирование по ОГТ.

Такого рода обработка данных реализована в программном пакете Radex ProPlus Advanced-2012 (ООО “Деко-геофизика СК”, Москва).

Основные процедуры, используемые для улучшения соотношения сигнал/помеха, – частотная фильтрация и АРУ. Допускается также применение двумерной фильтрации для борьбы с поверхностными волнами. Результат применения данных процедур приведен на рис. 16. После ввода геометрии сейсмограммы ОПВ сортируются по координатам ОГТ и строятся сейсмограммы ОГТ (рис. 17). По сейсмограммам ОГТ, собранным в суперсейсмограммы (рис. 18), проводится скоростной анализ (рис. 19). По

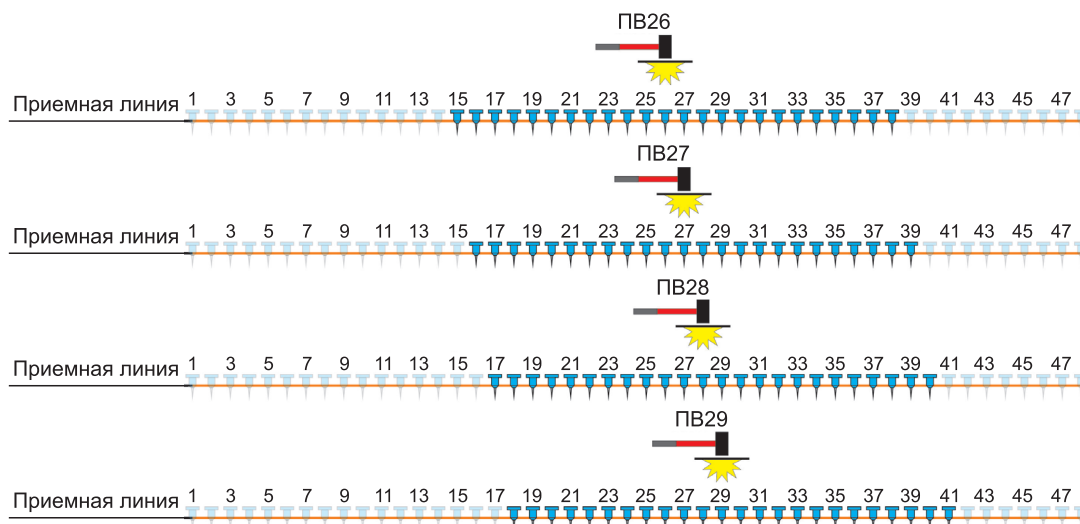


Рис. 15. Центральная расстановка.

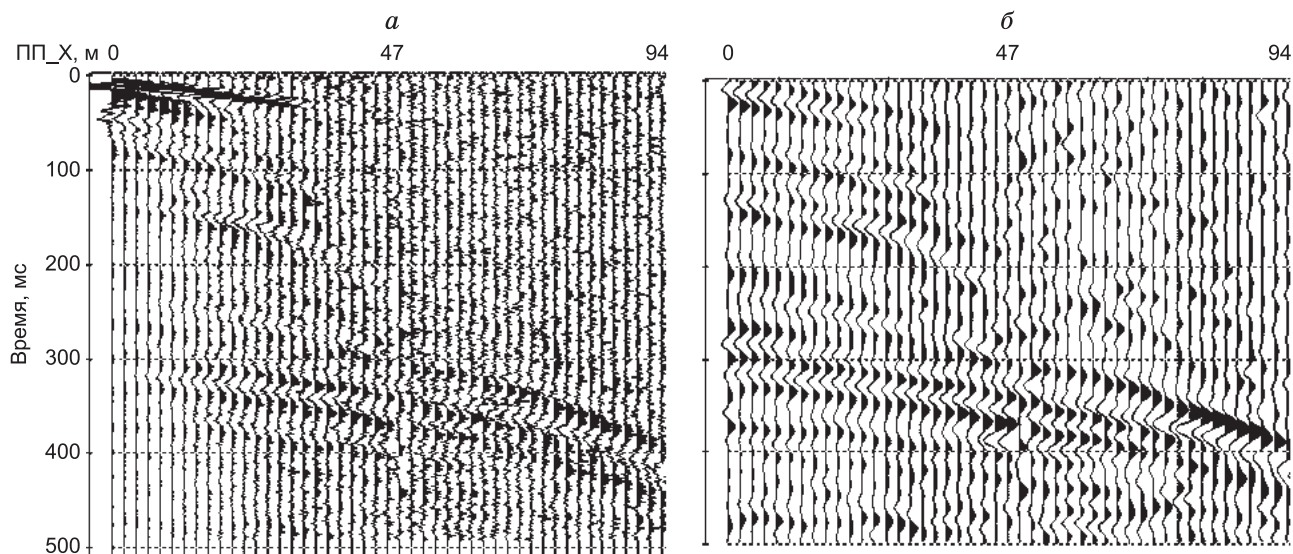


Рис. 16. Сейсмограмма до (а) и после (б) частотной фильтрации и АРУ.
ПП_X – координата пункта приема.

вертикальным спектром скоростей для каждой суперсейсмограммы определяется скоростной закон, который используется для расчета кинематических поправок. Кинематические поправки вводятся в каждую сейсмограмму ОГТ. После этого проводится суммирование по ОГТ: все трассы в сейсмограмме ОГТ суммируются в одну трассу. Совокупность всех таких трасс представляет собой временной разрез (рис. 20).

Необходимо отметить важную особенность обработки данных МОВ-ОГТ при исследовании малых глубин: проведение скоростного анализа очень часто оказывается невозможным. При обычных в инженерной сейсморазведке значениях центральных частот отраженных волн (10–70 Гц) и радиусов кривизны годографов (отражения от глубин до 100 м) вертикальные спектры скоростей становятся не пригодными для определения скоростного закона. Максимумы на вертикальном спектре скорости, соответствующие отражениям, “размываются” по горизонтали и сливаются с максимумами, обусловленными другими событиями. На вертикальном спектре появляются также ложные максимумы, которые соответствуют осям синфазности поверхностных волн (при исследовании малых глубин кинематика поверхностных волн близка к кинематике отраженных) и результатам интерференции нескольких типов волн (рис. 21).

В случае, когда качественный скоростной анализ невозможен, скорости определяются вручную с помощью аппроксимации теоретической гиперболой. Часто для введения кинематических поправок используется всего одна скорость для всех отраженных волн. Это становится возможным по причине того, что при малых удалениях контраст эффективных скоростей для малых глубин небольшой. В таком случае при вводе в сейсмограмму ОГТ поправки, рассчитанной по постоянной скорости, отраженные волны не допрямляются или перепрямляются незначительно, и это практически не влияет на результат после суммирования по ОГТ.

ПРИМЕРЫ РАБОТ

Ниже приведены три примера сейсморазведки МОВ-ОГТ в Москве и Московской области. Во всех случаях сейсморазведка проводилась в ходе инженерно-геологических изысканий с целью оценки карстовой опасности. Для решения поставленной задачи были проведены работы на поперечных волнах. Для оценки карстовой опасности анализировались оси синфазности, соответствующие кровле каменноугольных отложений (известняков) на предмет наличия в них карстовых пустот.

Суммарный временной разрез по профилю 4 на участке строительства Индустриального парка “Восточный” (Московская обл., Ногинский р-н) (рис. 22). Кровля известняков располагается на отметках 150–170 мс (скорость до границы 250–300 м/с). Ось синфазности, соответствующая кровле известняков, выдержана по профилю. По результатам сейсморазведочных исследований на данном участке не обнаружено карстовых полостей.

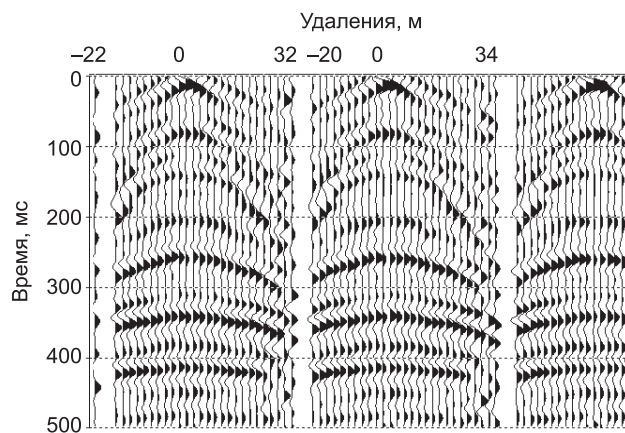


Рис. 17. Сейсмические трассы, собранные в сейсмограммы ОГТ.

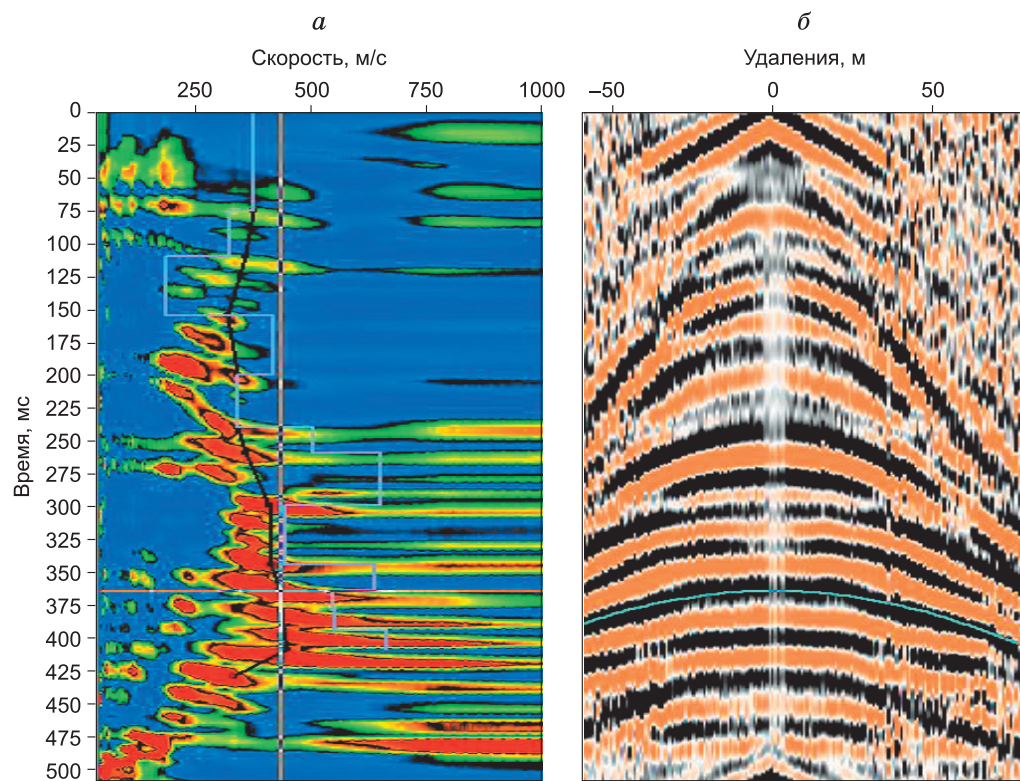


Рис. 18. Окно интерактивного анализа скоростей: вертикальный спектр скорости (а), суперсейсмограмма ОГТ (б).

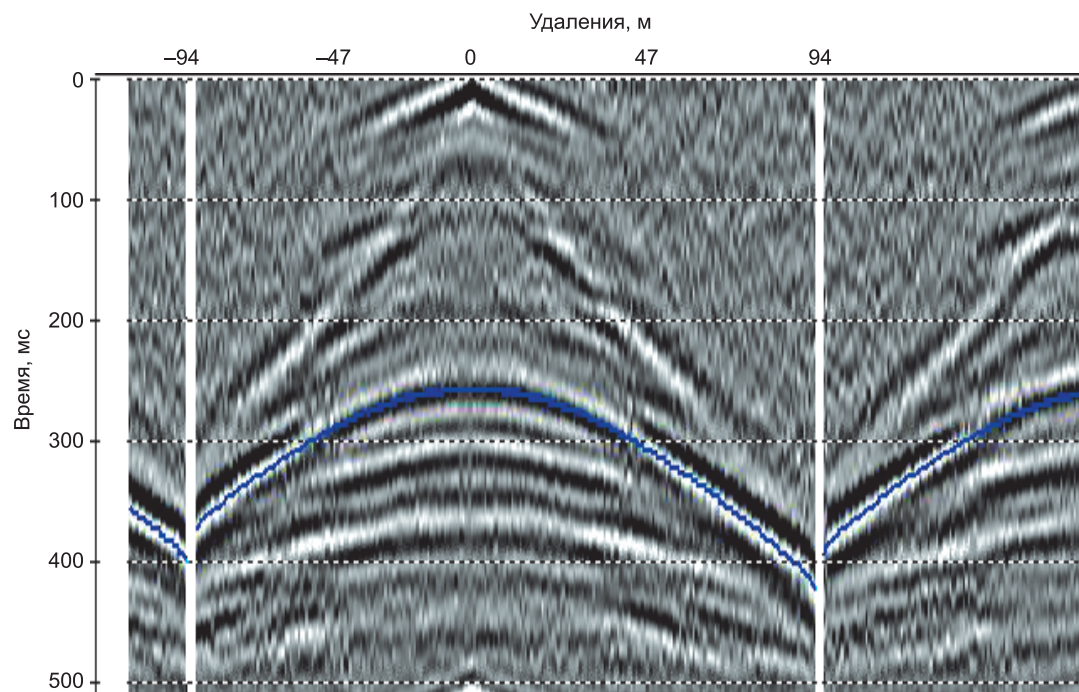


Рис. 19. Суперсейсмограмма ОГТ.

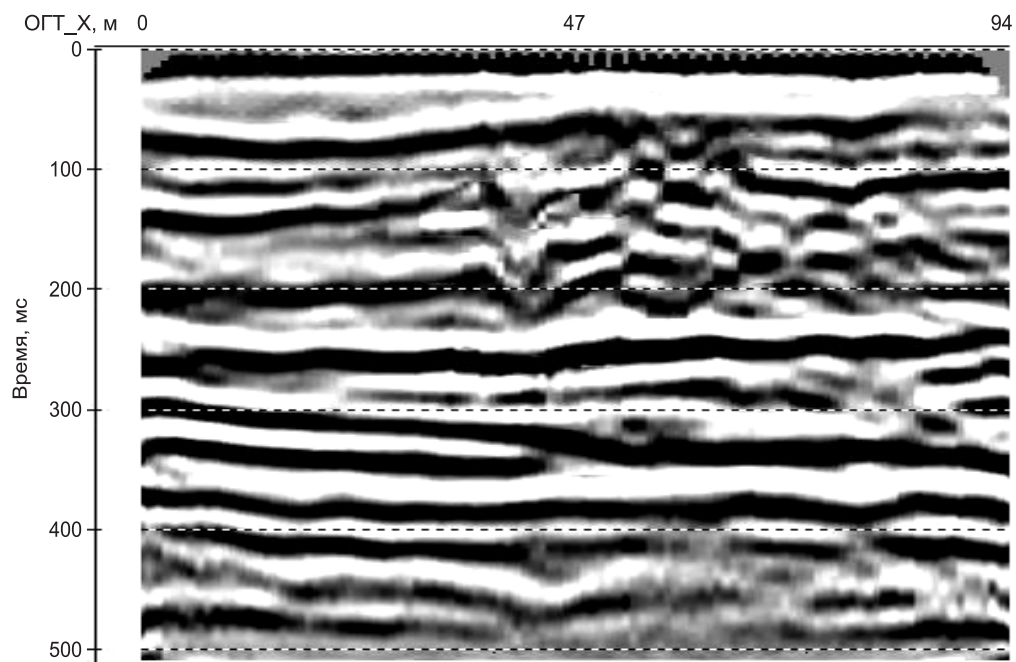


Рис. 20. Суммарный временной разрез.
ОГТ_X – координата ОГТ.

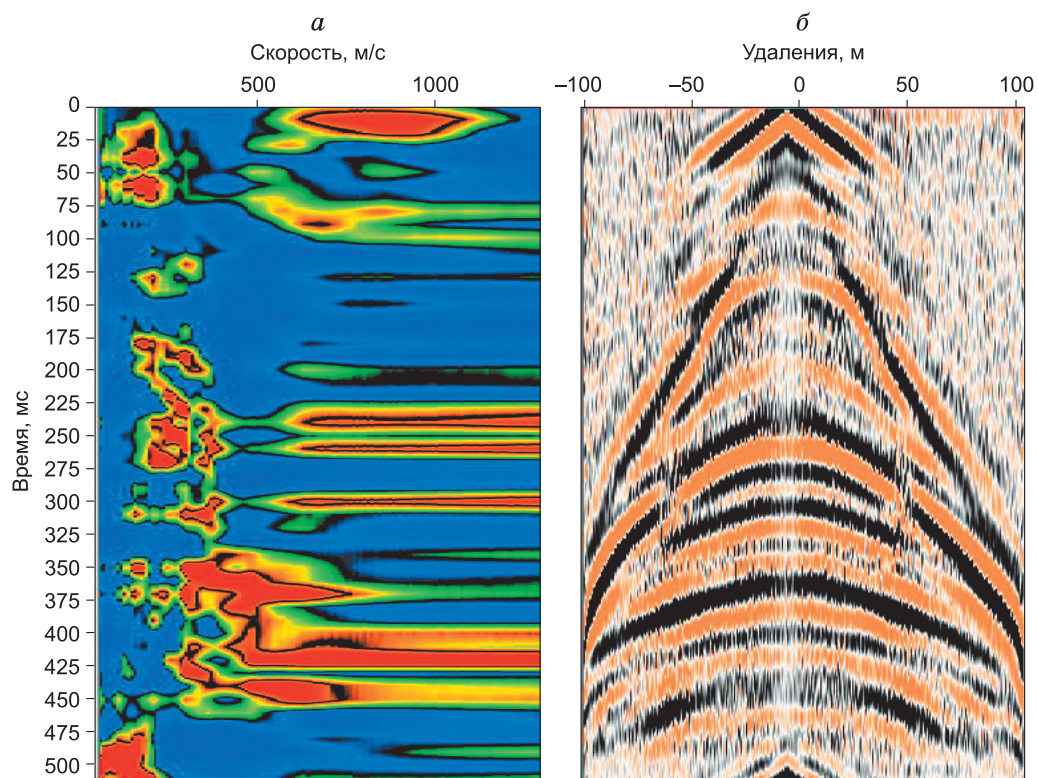


Рис. 21. Вертикальный спектр скорости (а) и суперсейсмограмма ОГТ (б).

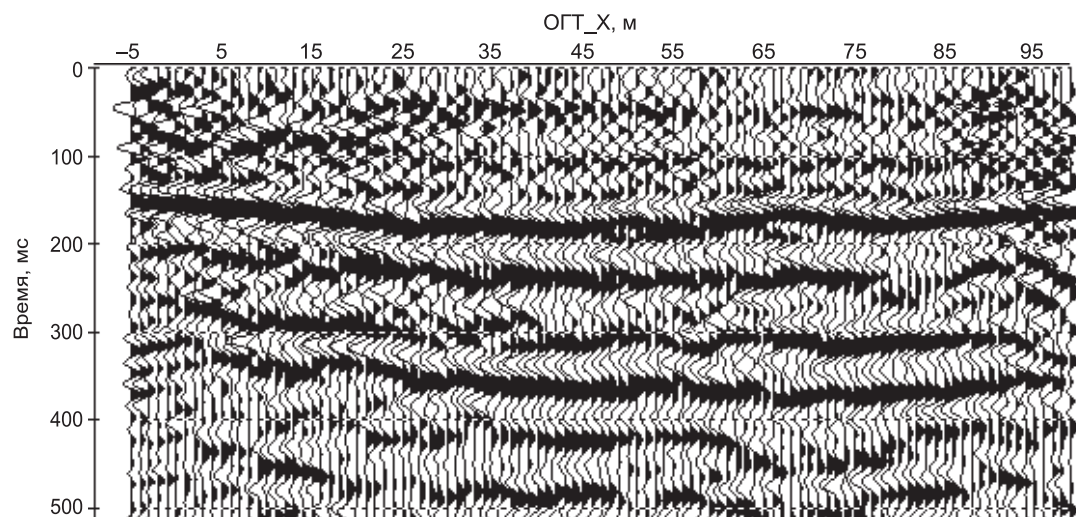


Рис. 22. Временной разрез по профилю 4 на участке строительства Индустриального парка “Восточный” (Московская обл., Ногинский р-н).

ОГТ_X – координата ОГТ.

Суммарный временной разрез по профилю 1 на объекте “Сигнальный проезд” (Москва) (рис. 23). Кровля известняков располагается на отметках 200–250 мс (скорость до границы 270–330 м/с). Соответствующая ось синфазности на пикетах 50–70 м обрывается, что может свидетельствовать о наличии карстовой полости. На данном участке по результатам сейсморазведочных исследований даны рекомендации по бурению дополнительных скважин и установлению природы аномалий на сейсмических записях. По ре-

зультатам дополнительного бурения некоторые аномалии соответствовали карстовым провалам. Участок строительства охарактеризован как карстоопасный.

Суммарный временной разрез по профилю 1 на объекте “Нанотехнологическая лаборатория на базе комплекса зданий научно-технологического центра нанотехнологий, центра синхротронного излучения, специализированного нейтронного центра с их реконструкцией” (Москва) (рис. 24). Кровля известняков располагается на отметках 140–170 мс (скорость

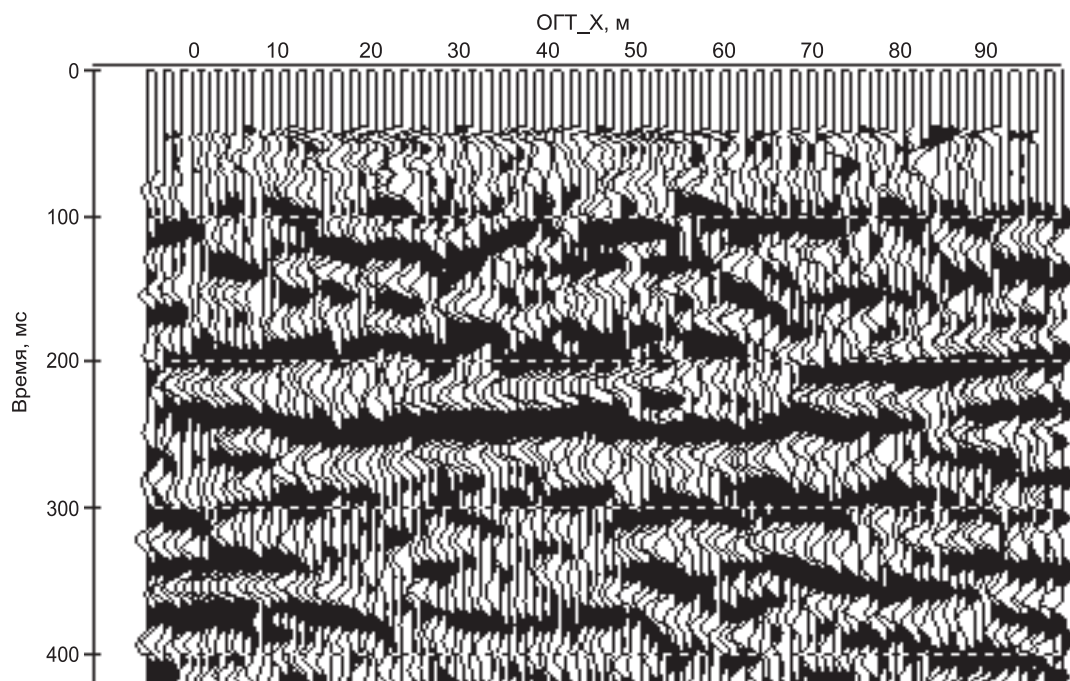


Рис. 23. Временной разрез по профилю 1 на объекте “Сигнальный проезд” (Москва).

ОГТ_X – координата ОГТ

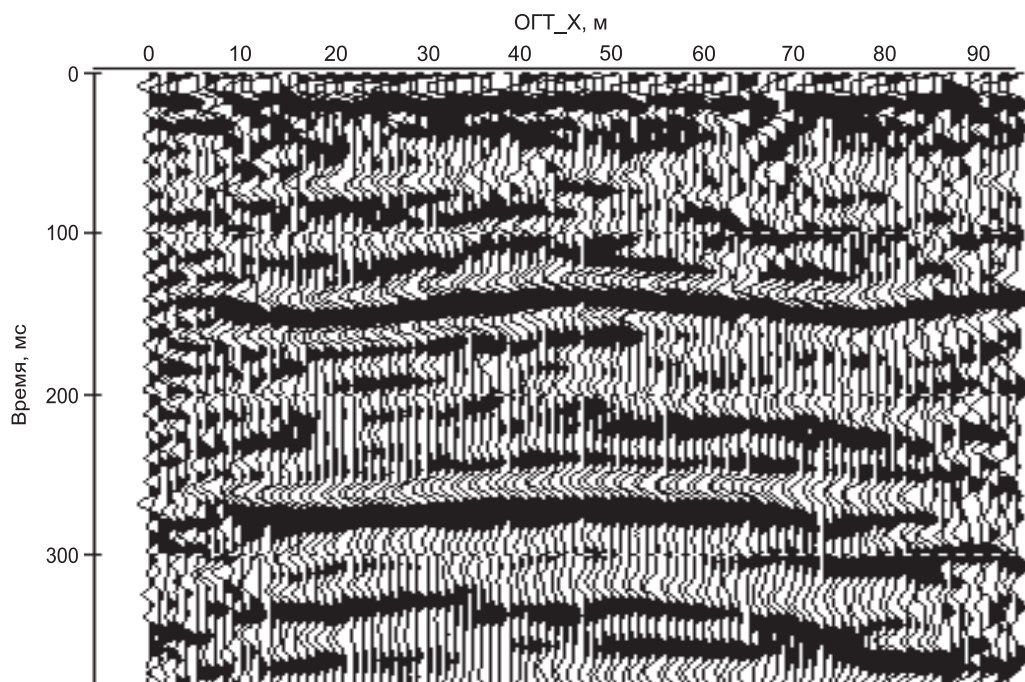


Рис. 24. Временной разрез по профилю 1 на объекте “Нанотехнологическая лаборатория на базе комплекса зданий научно-технологического центра нанотехнологий, центра синхротронного излучения, специализированного нейтронного центра с их реконструкцией” (Москва).

OGT_X – координата ОГТ.

до границы 280–300 м/с), ось синфазности, расположенная на отметках 280–340 мс, – кратное отражение от кровли известняков. Ось синфазности, соответствующая кровле известняков, выдержана по профилю. По результатам сейсморазведочных исследований на данном участке не обнаружено карстовых полостей в известняках.

Литература

Боганик Г.Н., Гурвич И.И. Сейсморазведка. Тверь: АИС, 2006. 744 с.
Гайнанов В.Г. Сейсморазведка. М.: Изд-во МГУ, 2006. 148 с.

Никитин В.Н. Основы инженерной сейсмологии. М.: Изд-во МГУ, 1981.

Скворцов А.Г. Высокорастворимая сейсморазведка на поперечных волнах при изучении малых глубин : Матер. науч.-практ. конф. «Инженерная и рудная геофизика – 2007». Геленджик, 2007.

Рагозин Н.А., Федотов А.С. Возможности обработки многоканальных сейсморазведочных данных // Инженерные изыскания. 2012. № 11. С. 29–35.

Тихонов А.А. Многоволновая сейсморазведка : учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ, 2008.

Yilmaz Özdoğan. Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data. Society of Exploration Geophysicists, 1987. 2027 p.

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

ТУРЧКОВ Алексей Михайлович – научный сотрудник кафедры сейсмометрии и геоакустики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, генеральный директор ООО “Геометрия”.
 E-mail: turchkov@gmail.com, тел.: 8 (495) 640-13-75.