

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **037479**

(13) **B1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2021.04.01

(51) Int. Cl. **G01V 1/28** (2006.01)
G01V 1/30 (2006.01)

(21) Номер заявки
201991328

(22) Дата подачи заявки
2017.12.04

(54) ОСВЕЩЕННОСТЬ НЫРЯЮЩЕЙ ВОЛНЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ СЕЙСМОГРАММ МИГРАЦИИ

(31) **62/429,541**

(32) **2016.12.02**

(33) **US**

(43) **2019.10.31**

(86) **PCT/US2017/064506**

(87) **WO 2018/102814 2018.06.07**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
**БИПИ КОРПОРЕЙШН НОРТ
АМЕРИКА ИНК. (US)**

(56) **US-A1-2016187507**

US-A1-2013311151

US-A1-2016187512

ROMAIN BROSSIER ET AL: "Velocity model building from seismic reflection data by full-waveform inversion : Velocity model building from seismic reflection data", **GEOPHYSICAL PROSPECTING**, vol. 63, no. 2, 11 November 20149 (2014-11-11), pages 354-367, XP055457033, ISSN: 0016-8025, DOI: 10.1111/1365-2478.12190, abstract

(72) Изобретатель:
Ахмед Имтиаз (US)

(74) Представитель:
**Гизатуллина Е.М., Строкова О.В.,
Гизатуллин Ш.Ф., Лебедев В.В.,
Парамонова К.В., Угрюмов В.М.,
Глухарёва А.О. (RU)**

(57) Техническое решение для оценки глубины исследования сейсмической съемки предусматривает различные аспекты способа и устройства. Способ предназначен для применения в сейморазведке и предусматривает: прямое моделирование в модели свойств геологической среды подземной области с целью генерации набора низкочастотных сейсмических данных, при этом модель свойств геологической среды генерируют из данных, характеризующих эту подземную область; выполнение обратной временной миграции по низкочастотным сейсмическим данным с целью получения некоторого количества сейсмограмм с большими углами раскрытия; суммирование сейсмограмм с целью получения изображения освещенности ныряющей волны; и оценку глубины исследования полноволновой инверсии по изображению освещенности ныряющей волны. Устройство может включать в себя вычислительное устройство, запрограммированное для выполнения этого способа, и/или запоминающее устройство для хранения программ, закодированное при помощи компьютерных программ, исполнение которых осуществляет этот способ.

B1

037479

037479

B1

Ссылка на родственные заявки

Согласно настоящей заявке испрашивается приоритет в соответствии с предварительной заявкой на выдачу патента США № 62/429,541, поданной 2 декабря 2016 г. Ее раскрытие полностью включено в настоящую заявку посредством ссылки.

Область техники, к которой относится настоящее изобретение

Настоящее изобретение относится к оценке проектов и результатов сейсмической съемки и, в частности, к оценке глубины исследования при таких работах.

Предшествующий уровень техники настоящего изобретения

В настоящем разделе этого документа представлены избранные разделы существующего уровня техники, которые могут быть связаны с различными аспектами настоящего изобретения, описанными и/или заявленными ниже. Эта информация предназначена для лучшего понимания различных аспектов настоящего раскрытия. Таким образом, это является обсуждением предшествующего уровня техники. То, что уровень техники является предшествующим, никоим образом не означает, что он также является известным уровнем техники. Предшествующий уровень техники может быть известным или неизвестным уровнем техники. Настоящее обсуждение следует рассматривать с этой точки зрения, а не как признание известного уровня техники.

Поиск углеводородов часто осуществляют с помощью "сейсморазведочных работ". При сейсморазведочных работах акустические сигналы сейсмических частот передают в землю при помощи импульсных источников, свип-источников или других типов сейсмических источников. Энергия от этих сигналов распространяется через землю, и структура подземной толщи (толщ) горных пород характерным образом изменяет сигналы и их свойства. Затем сейсмические сигналы частично возвращаются на поверхность земли за счет различных механизмов, например отражения, преломления и пр. Вернувшиеся сигналы получают и регистрируют в виде сейсмических данных.

Сейсмические данные характеризуют подземную область, через которую они распространяются, поскольку структуры толщ характерными способами изменяют сигналы и их свойства. По выявленным характерным изменениям сейсмического сигнала геофизики, как правило, могут делать предположения о структуре подземной области.

Анализ, при помощи которого геофизики это делают, в значительной степени зависит от вычислительных ресурсов. Наборы сейсмических данных настолько велики, что не поддаются численным расчетам и анализам вручную, поэтому для решения подобных задач геофизики обращаются к компьютерам. Эти наборы данных настолько велики и их обработка настолько сложна, что большинство численных задач также очень трудоемки с точки зрения вычислений. То есть для этого требуется много вычислительных ресурсов в течение длительного времени.

Такую компьютерную обработку применяют во многих аспектах сейсморазведки. Например, покрытие и качество сейсмической съемки будет существенно зависеть от местоположений источников и приемников, использованных при проведении съемки, их также называют "геометрией съемки". Однако сейсморазведка представляет собой слишком дорогой способ, чтобы применять для нахождения подходящей геометрии съемки метод проб и ошибок. Поэтому для оценки планируемой съемки иногда применяют компьютерную обработку с тем, чтобы определить какая геометрия съемки может дать наиболее желательные результаты.

Другой пример касается получения изображений. Сейсмические данные часто изображают или представляют в виде изображения области геологической среды, как правило, с целью визуального исследования. Получение изображения сейсмических данных очень трудоемко с точки зрения вычислений. Однако иногда полученное изображение не дает желаемой информации из-за неочевидных до обработки проблем с лежащими в его основе сейсмическими данными.

Существует ряд физических свойств подземной толщи горных пород, которые интересуют геофизиков. Одним из таких физических свойств является скорость, и ее часто изучают при помощи "скоростной модели". Скоростная модель - это представление толщи горных пород в геологической среде, которое может быть использовано при анализе сейсмических данных. Для преобразования сейсмических данных в "сейсмическое изображение" геофизики применяют анализ скоростей геологической среды. Вычисление скоростной модели также трудоемко с точки зрения вычислений, и его правильность и точность напрямую влияют на качество сейсмического изображения.

Другим физическим свойством, представляющим интерес при таких работах, является "глубина исследования". Глубиной исследования можно считать глубину, на которой полезная информация получена из области геологической среды в данной съемке, для данной координаты по широте и долготе. Она зависит от нескольких широко известных параметров, например расположения источника и приемника, свойств сейсмического сигнала, скорости в геологической среде и пр.

Таким образом, "геометрия съемки" и структура геологической среды могут оказывать значительное влияние на глубину исследования съемки в целом. Структура геологической среды и взаимодействие сейсмического сигнала со структурой геологической среды могут быть довольно сложными. Они будут отличаться в зависимости от местоположения в пределах подземной толщи горных пород. Поэтому глубина исследования представляет собой не столько цифру, сколько зависимость от ряда факторов, кото-

рые будут изменяться в зависимости от местоположения в пределах области геологической среды.

Вычисление глубины исследования обычно является трудоемким, и ее сложно определить однозначно для любого данного набора сейсмических данных. В некоторых случаях необходимо точно знать глубину исследования для одного из ранее упомянутых параметров, а именно скоростей геологической среды. Один из способов, применяемых при анализе сейсмических данных, представляет собой полноволновую инверсию (FWI), ее результат представляет собой скоростную модель, которую применяют для расчета сейсмического изображения. Иногда геофизики выполняют анализ глубины исследования скоростной модели по полноволновой инверсии - фактор глубины исследования и общая точность сейсмического изображения. Однако полноволновая инверсия является трудоемкой с точки зрения вычислений и достаточно дорого стоит, так что глубину исследований иногда не определяют количественно, а оценивают.

Одно из технических решений для оценки в этом контексте известно как эмпирическое правило "треть максимального удаления". Согласно этому правилу геофизик предполагает, что глубина исследования полноволновой инверсии в любой данной точке области геологической среды составляет одну треть от максимального расстояния между источниками и приемниками. Точность этой оценки достаточно высока в большинстве случаев, но нередко ее применяют в ситуациях, когда это неуместно. Как правило, это техническое решение с эмпирическим правилом используют в качестве технического решения для оценки глубины исследования и неправильно, и чрезмерно.

Краткое описание фигур

Прилагаемые фигуры, которые включены в настоящий документ и составляют его часть, иллюстрируют варианты осуществления настоящего изобретения и вместе с описанием служат для пояснения принципов предлагаемого изобретения. На фигурах изображено следующее:

на фиг. 1 представлена последовательность операций в способе технического решения, раскрываемого в настоящем документе;

на фиг. 2А-2В показано вычислительное устройство, которое могут использовать для реализации некоторых аспектов технического решения, раскрываемого в настоящем документе;

на фиг. 3 проиллюстрированы некоторые понятия, связанные с заявленным предметом изобретения в условиях типичной сейсмической съемки;

на фиг. 4 представлена графическая визуализация типичной скоростной модели, которую могут применять в некоторых вариантах осуществления настоящего изобретения;

на фиг. 5 представлена графическая визуализация синтетических низкочастотных данных, полученных путем прямого моделирования из скоростной модели, показанной на фиг. 4;

на фиг. 6 представлена графическая визуализация угловых сейсмограмм, полученных путем обратной временной миграции низкочастотных данных, показанных на фиг. 5. Углы раскрытия сейсмограммы увеличиваются на разрезе слева направо;

на фиг. 7А-7С представлена графическая визуализация освещенностей ныряющей волны, полученных из угловых сейсмограмм с большими углами, которые показаны на фиг. 6, для максимальных удалений 8, 12 и 15 км, соответственно.

Подробное раскрытие настоящего изобретения

Техническое решение, раскрываемое в настоящем документе, обеспечивает способ, при помощи которого глубина исследования (DOI) сейсмической съемки может быть оценена по параметрам проекта съемки и геологической модели вместо или в дополнение к эмпирическому правилу одной трети максимального удаления. Техническое решение основано на том, что скоростные модели из полноволновой инверсии (FWI) наиболее чувствительны к присутствию низкочастотной информации о ныряющих волнах, полученной на больших удалениях и зарегистрированной в каждой сейсмограмме общего пункта взрыва. Поскольку первая итерация полноволновой инверсии приблизительно равна миграции, можно аппроксимировать влияние данной геометрии съемки путем запуска одной итерации обратной временной миграции (RTM) для каждого местоположения пункта взрыва и суммирования для данной геометрии как при получении изображения. Путем включения только низкочастотной части волнового поля ныряющей волны из сейсмограмм изображения можно оценить глубину исследования (DOI) полноволновой инверсии для данной геометрии съемки.

Раскрываемое в данном документе техническое решение будет раскрыто в контексте скоростной модели, как описано выше. Однако это техническое решение не является столь ограниченным. Специалистам в данной области техники, понимающим преимущества от использования настоящего раскрытия, будет очевидно, что скорость представляет собой лишь одно из моделируемых свойств геологической среды. Следует понимать, что техническое решение, описанное в настоящем документе, могут также применять к другим моделям свойств геологической среды, а не только к скоростным моделям.

Далее приведено подробное описание варианта осуществления(й) (иллюстративных вариантов осуществления) предлагаемого изобретения, пример(ы) которого(ых) представле(н) на прилагаемых чертежах. Везде, где это возможно, для ссылки на одни и те же или подобные части на чертежах будут использованы одинаковые позиции.

На фиг. 1 представлено графическое изображение последовательности 100 операций согласно од-

ному конкретному варианту осуществления настоящего изобретения. Из описания в настоящем документе специалистам в данной области техники будет понятно, что последовательность операций в значительной степени, а в некоторых вариантах осуществления полностью, реализована на компьютере. В этой связи на фиг. 2А-2В представлены примеры вычислительных устройств, при помощи которых могут быть выполнены реализованные на компьютере аспекты этой последовательности 100 операций.

На фиг. 2А показаны отдельные части архитектуры аппаратного и программного обеспечения вычислительного устройства 200. В зависимости от конкретной реализации вычислительное устройство 200 может быть вычислительным устройством общего назначения или специальным вычислительным устройством. Вычислительное устройство 200 предусматривает, по меньшей мере, электронный процессор 203, взаимодействующий с хранилищем 206 по каналам 209 передачи информации.

Электронный процессор 203 может быть любым подходящим процессором или группой процессоров, известных в данной области техники. Специалистам в данной области техники будет понятно, что, в зависимости от известных подробностей конкретной реализации, в разных вариантах осуществления некоторые типы процессоров будут более предпочтительны. Специалистам в данной области техники также будет понятно, что данные и наборы данных, подобные тем, что используют в способе, раскрываемом в настоящем документе, имеют довольно большой объем и что описанная здесь обработка требует большого объема вычислений. Поэтому типичные реализации электронного процессора 203 фактически содержат несколько групп электронных процессоров, распределенных между несколькими согласованно работающими вычислительными устройствами. Один из таких вариантов осуществления описан ниже. Эти соображения таким же образом оказывают влияние на реализацию хранилища 206 и каналы 209 передачи информации.

Хранилище 206 может включать в себя среду для постоянного хранения, такую как магнитный жесткий диск и/или оперативная память (RAM) и/или съемные носители, такие как оптический диск 215. Хранилище 206 содержит ряд программных компонент. Эти компоненты включают в себя операционную систему 212 (OS); приложение 214; скоростную модель 216 (VM), структуру данных, в которой могут храниться низкочастотные сейсмические данные 218 (LFSD); структуру данных, в которой может храниться некоторое количество сейсмограмм 220; и структуру данных, в которой может храниться изображение 222. Хранилище 206 может быть распределено между несколькими вычислительными устройствами, как описано выше.

Так же, как и электронный процессор 203, конструктивные ограничения во всех конкретных вариантах осуществления могут оказывать влияние на конструкцию хранилища 206 в зависимости от конкретной реализации. Например, как отмечено выше, раскрываемый метод работает на объемных массивах данных, что обычно упрощается использованием разных накопителей данных, таких как избыточный массив независимых дисков (RAID). Специалистам в данной области техники известны также другие типы накопителей данных, которые могут быть использованы в дополнение или вместо RAID.

Электронный процессор 203 работает под управлением операционной системы 212 и исполняет прикладную программу 214 с использованием канала 209 передачи информации. Этот процесс может начинаться автоматически, например, при запуске или по команде пользователя. Пользователь может напрямую отдавать команду при помощи пользовательского интерфейса 224.

Пользовательский интерфейс 224 содержит программу 226 пользовательского интерфейса (UIS) и дисплей 228. Эта система может также предусматривать периферийные устройства ввода/вывода (I/O), такие как кнопочная панель или клавиатура 230, мышь 232 или джойстик 234. Такие детали конкретной реализации не имеют значения для раскрываемого здесь технического решения. Например, некоторые варианты осуществления могут не содержать периферийных устройств ввода/вывода, если дисплей 228 оснащен сенсорным экраном. Соответственно, раскрываемая здесь технология допускает разные варианты этого аспекта компьютерной системы 200, и могут быть использованы любые обычные реализации, известные в данной области техники.

Кроме того, нет требований, чтобы функциональные возможности описанной выше компьютерной системы 200 были реализованы так, как описано в настоящем документе. Например, прикладная программа 214 может быть реализована в виде других программных компонент, таких как служебный процесс или утилита. Функциональные возможности приложения 214 не обязательно должны быть объединены в одну программную компоненту и могут быть распределены между двумя или более программными компонентами. Таким же образом структуры данных могут быть реализованы с использованием любых подходящих структур данных, известных в данной области техники.

Как и в случае с электронным процессором 203 и хранилищем 206, реализация канала 209 передачи информации будет зависеть от конкретной реализации. Если компьютерная система 200 установлена на одном вычислительном устройстве, канал 209 передачи информации может быть, например, системой шин этого одного вычислительного устройства. Либо если компьютерная система 200 реализована на множестве объединенных в сеть вычислительных устройств, тогда канал 209 передачи информации может использовать проводную или беспроводную связь между вычислительными устройствами. По этой причине реализация канала 209 передачи информации будет существенно зависеть от конкретного варианта осуществления настолько, насколько это очевидно специалистам в данной области техники, пони-

мающим преимущества от использования настоящего изобретения.

Как видно из описания в настоящем документе, некоторые части представленного здесь подробного описания изложены в терминах программно реализованной процедуры, содержащей символические представления операций над битами данных в памяти компьютерной системы или вычислительного устройства. Эти описания и представления являются средствами, которые специалисты в данной области техники используют для более эффективной передачи содержания своей работы другим специалистам в данной области техники. Процедура и функционирование требуют конкретных манипуляций физическими величинами, которые приведут к физическим изменениям конкретного устройства или системы, на которой выполняют эти действия или на которой хранят результаты. Обычно, но не обязательно, эти величины принимают форму электрических, магнитных или оптических сигналов, которые можно хранить, передавать, комбинировать, сравнивать или выполнять с ними другие действия. Иногда, особенно в целях широкого использования, считают удобным называть эти сигналы битами, значениями, элементами, символами, терминами, числами и т.д.

Однако следует помнить, что все эти и аналогичные термины должны быть связаны с соответствующими физическими величинами и являются просто удобными обозначениями, которые применяют для этих величин. Если в настоящем раскрытии специально не оговорено или из него иным образом не очевидно, эти описания относятся к действиям и процедурам электронного устройства, которое выполняет действия и преобразует данные, представленные в виде физических (электронных, магнитных или оптических) величин в хранилище некоторого электронного устройства, в другие данные, также представленные в виде физических величин в хранилище или на передающих или отображающих устройствах. Типичными терминами в таком описании, среди прочих, могут быть: "обработка", "вычисление", "расчет", "нахождение", "вывод на экран" и подобные им.

Кроме того, выполнение функций программного обеспечения изменяет вычислительное устройство, на котором оно происходит. Например, сбор данных будет так же физически изменять содержимое хранилища, как и последующая обработка данных. Физическое изменение - это "физическое преобразование", которое приводит к изменению физического состояния хранилища данных вычислительного устройства.

Заметим, что программно реализованные аспекты изобретения обычно записывают на некоторый носитель (запоминающее устройство для хранения программ) или реализуют с использованием некоторой среды передачи информации. Запоминающее устройство для хранения программ может быть магнитным (например, жесткий диск) или оптическим (например, постоянное запоминающее устройство на компакт-диске или CD-ROM), оно может быть предназначено только для чтения или для неограниченного доступа. Таким же образом среда передачи информации может быть коаксиальным кабелем, витыми парами, оптическим волокном или некоторой другой средой передачи информации, известной в данной области техники. Изобретение не ограничено этими аспектами любых реализаций.

На фиг. 2В изображен пример части компьютерной системы 250, при помощи которой выполняют такую обработку в представленном варианте осуществления. Компьютерная система 250 подключена к (компьютерной) сети, но подключение компьютерной системы 250 к сети не является обязательным требованием. Варианты осуществления могут задействовать, например, одноранговую архитектуру или некоторый гибрид одноранговой и клиент-серверной архитектуры. Для применения настоящего изобретения размеры и местоположение компьютерной системы 250 не существенны.

Размеры и местоположение могут изменяться от нескольких устройств локальной сети (LAN), расположенной в одном помещении, до многих сотен или тысяч устройств, распределенных по всему миру в виде корпоративной компьютерной системы.

Проиллюстрированная часть компьютерной системы 250 включает в себя сервер 252, запоминающее устройство 254 и рабочую станцию 256. Каждая из этих компонент может быть реализована в аппаратных средствах обычным способом. Варианты осуществления могут также содержать разные вычислительные устройства, используемые для реализации компьютерной системы 250. Кроме того, специалистам в данной области техники будет понятно, что компьютерная система 250 и даже показанная ее часть могут быть гораздо более сложными. Однако такие детали обычны, и мы не будем их обсуждать или демонстрировать, чтобы не затруднять понимание заявленного ниже предмета изобретения.

На фиг. 2В показано, что приложение 214 находится на сервере 252, а скоростная модель 216, низкочастотные сейсмические данные 218, сейсмограммы 220 и изображение 222 находятся на запоминающем устройстве 254. Это только один из способов размещения разных программных компонент, наш способ не зависит от их расположения. Несмотря на то, что в некоторых вариантах осуществления проблемы быстрогодействия при определенных местоположениях могут быть смягчены, в других случаях местонахождение компонент программного обеспечения значения не имеет.

Раскрываемый здесь способ допускает некоторые изменения в обработке в зависимости от способа сбора данных и реализации конкретных целей для конечного продукта. Специалистам в данной области техники будет очевидно, что независимо от подхода к обработке обычно будет существовать некоторый уровень предварительной обработки. Такую предварительную обработку обычно будут использовать в разных вариантах осуществления раскрываемого здесь способа. Однако в силу повсеместности в данной

области техники и знакомства специалистов данной области техники с такой предварительной обработкой, мы не будем дальше обсуждать ее для сохранения ясности, чтобы не отвлекаться от объекта изобретения, заявленного ниже.

На фиг. 1 и 2В показано, что пользователь 258 вызывает на рабочей станции 256 приложение 214 для исполнения способа 100. Как было упомянуто выше, предполагается, что скоростная модель 216 уже была создана на момент, когда пользователь 258 запускает способ 100. Скоростная модель 216 представляет собой модель конкретной подземной области, где съемка уже была проведена или съемку планируют. Она создана с применением технических решений, широко известных в данной области техники. В тех вариантах осуществления, где скоростная модель 216 не была сгенерирована заранее, сначала ее генерируют с применением этих широко известных технических решений. Дальнейшее обсуждение этих технических решений, широко известных в данной области техники, будет пропущено ради ясности и с тем, чтобы не затруднять понимание настоящего изобретения.

Скоростная модель 216 сгенерирована из данных (не показаны), характеризующих подземную область. В проиллюстрированных вариантах осуществления эти данные представляют собой сейсмические данные, полученные в предшествующих сейсмических съемках. В других вариантах осуществления для этой цели вместо или в дополнение к сейсмическим данным могут использовать другие источники данных, если желательны сейсмические данные. К таким источникам данных можно отнести, например, каротажи, гравиметрические съемки, электромагнитные съемки, геологические исследования и пр. Специалисты в данной области техники, понимающие преимущества настоящего раскрытия, могут знать и о других источниках данных, которые могут подходить для этой цели.

Полноволновая инверсия (FWI) сейсмических данных с достаточно низкими частотами и достаточно высоким отношением сигнал-помеха представляет собой одно из технических решений, широко известных в данной области техники, для построения скоростной модели по сейсмическим данным. В одном варианте осуществления полноволновую инверсию начинают с низких частот (самых низких) и затем добавляют всё более высокие частоты. Таким образом, модель свойств геологической среды, одно из которых представляет собой скорость, медленно приобретает четкие очертания, когда в ходе повторяющихся запусков инверсии постепенно добавляют всё более тонкие особенности. Скоростная модель на выходе каждого этапа этой процедуры затем становится начальной моделью для следующего этапа. См. статью L. Sirgue & R. G. Pratt, "Efficient Waveform Inversion and Imaging: A Strategy for Selecting Temporal Frequencies", 69 *Geophysics* 231 (2004).

Кроме того, скоростная модель 216 проиллюстрированных вариантов осуществления представляет собой "гладкую" скоростную модель. В данном случае термин "гладкая" указывает на то, что скоростная модель была отфильтрована низкочастотным фильтром так, чтобы масштаб длины скоростей был больше длины сейсмических волн в исследовании. Однако такое сглаживание необязательно для осуществления всех вариантов настоящего изобретения. Некоторые другие варианты осуществления могут использовать несглаженную скоростную модель.

На фиг. 1 и 2А способ 100 начинают с прямого моделирования (в блоке 110) по скоростной модели 216 подземной области для создания набора низкочастотных сейсмических данных 218. В частности, это прямое моделирование известно как прямое моделирование распространения волн "туда и обратно". Согласно другим вариантам осуществления прямое моделирование может быть "односторонним", что обычно считают менее точным, чем двустороннее моделирование. Однако согласно данному варианту осуществления ссылки на прямое моделирование описывают двустороннее моделирование. Общая концепция двустороннего прямого моделирования по скоростной модели широко известна в данной области техники. Однако настоящее изобретение имеет по меньшей мере два отличия от обычной практики.

Одно отличие состоит в том, что прямое моделирование (в блоке 110) выполняют выборочно с одной или несколькими частными геометриями съемки или местоположениями источников и приемников. Выбор геометрии съемки будет зависеть от варианта осуществления, поскольку глубина исследования полноволновой инверсии зависит от геометрии съемки. В некоторых вариантах осуществления могут оценивать глубину исследования полноволновой инверсии для сейсмической съемки, которая уже была проведена. В этих вариантах осуществления будут использовать фактическую геометрию съемки, развернутую во время съемки. Этот способ также может быть использован для оценки глубины исследования предлагаемой съемки. В таких вариантах осуществления с целью определения наилучшей глубины исследования полноволновой инверсии для изучаемой подземной области могут использовать несколько предлагаемых геометрий съемки.

Второе отличие состоит в том, что моделируемые сейсмические сигналы, которые используют в прямом моделировании (в блоке 110), будут рассчитаны на получение низкочастотных сейсмических данных. Специалистам в данной области техники будет понятно, что сейсмическая съемка или ее прямое моделирование обычно будут включать в себя получение сейсмических данных в некотором диапазоне частот. Например, в одном варианте осуществления используют диапазон частот, охватывающий три октавы вплоть до представляющих интерес частот, которые позволяют различать структуры в геологической среде с разрешающей способностью в десятки метров. Специалистам в данной области техники также будет понятно, что прямое моделирование является трудоемким с точки зрения вычислений и ог-

раничение прямого моделирования низкочастотными сейсмическими данными ускорит процедуру прямого моделирования. Способ, раскрываемый в настоящем документе, работает с низкочастотными сейсмическими данными, и поэтому сейсмические сигналы, используемые в прямом моделировании (в блоке 110), могут быть соответственно рассчитаны на снижение суммарных вычислительных затрат на прямое моделирование (в блоке 110).

В рамках настоящего раскрытия термин "низкая частота", как правило, означает 2-6 Гц. Теоретически заявленный способ может использовать частоты ниже 2 Гц. Однако в силу признанных геофизических ограничений и аппаратурных проблем сейсмические источники в полевых условиях редко работают на частотах ниже 2 Гц. Заявленный способ может использовать частоты выше 6 Гц, но оценка глубины исследования полноволновой инверсии ограничена этой частотой, и чем выше частота, тем, как правило, меньше оценка глубины исследования полноволновой инверсии.

Следовательно, могут существовать необычные обстоятельства, при которых "низкая частота" модельных сейсмических данных выходит за диапазон 2-6 Гц. Например, может быть известно, что конкретные сейсмические данные не содержат помех, поэтому могут быть использованы частоты ниже 2 Гц. Таким же образом технология может развиваться до такой степени, что в полевых условиях будут легко достижимы частоты ниже 2 Гц. Либо могут изучать малую глубину исследования полноволновой инверсии, в этом случае могут использовать частоты выше 6 Гц. Однако предполагается, что в большинстве вариантов осуществления будут использованы "низкие частоты" в диапазоне от 2-6 Гц.

В любом случае, в контексте "низких частот" термин "приблизительно" означает, что численное определение находится в пределах погрешности, допустимой в отрасли. Например широко известно, что по различным причинам во время съемки могут изменяться настройки аппаратуры и измерения. Таким образом, частота "приблизительно 2 Гц" включает в себя частоты не точно равные 2.0 Гц, а частоты, которые несколько отличаются в пределах допустимой погрешности. Таким же образом частотный диапазон приблизительно 2-6 Гц может включать в себя частоты, выходящие за пределы диапазона 2.0-6.0 Гц, при условии, что они находятся в пределах допустимой погрешности. Что представляют собой "пределы допустимой погрешности" будет зависеть от обстоятельств, которые очевидны специалистам в данной области техники, понимающим преимущества от настоящего раскрытия.

Заявленный способ не зависит от типа моделируемых источников и сигналов, которые они передают. Моделируемые источники могут быть импульсными источниками, свип-источниками или источниками другого типа, известными в данной области техники. Специалистам в данной области техники, понимающим преимущества от настоящего раскрытия, будет также очевидно, что каждый из этих типов моделируемых источников будет генерировать свой тип сигнала. Заявленный способ может применяться с каждым из них.

На фиг. 1 способ 100 продолжают выполнением (в блоке 120) обратной временной миграции по низкочастотным сейсмическим данным, полученным путем прямого моделирования (в блоке 110). Цель этой обратной временной миграции состоит в получении (в блоке 120) некоторого количества сейсмограмм изображения с большими углами раскрытия. Обратная временная миграция сама по себе широко известна в данной области техники в отличие от ее применения в данном случае. Предполагается, что в вариантах осуществления заявленного способа будут применяться технические решения обратной временной миграции, которые различны для больших углов раскрытия и остальных углов. Одно из таких технических решений описано в опубликованном патенте США 2014/0293744, который называется "Зеркальный фильтр (SF) и сейсмическая миграция с частичным изображением в направлении падения (DOP1)", поданном 31 марта 2014 года от имени изобретателя Qie Zhang и принадлежащем тому же правообладателю.

В контексте настоящего описания изобретения "большие углы раскрытия" означают углы, которые больше или равны приблизительно 160° . Как показано на фиг. 3, обычно они включают в себя то, что в данной области техники называют "ныряющими волнами" 300 и энергией 310 обратного рассеяния. Ныряющие волны 300 представляют собой те волны, не отражающиеся, а преломляющиеся на поверхности 320 земли, где происходит регистрация. Изменения сейсмической скорости, характеризующей подземную толщу 330 горных пород, постепенно изменяют направление распространения энергии и перенаправляют ее траекторию не вниз, а вверх. Угол раскрытия вдоль пути ныряющих волн равен 180° . Энергия 310 обратного рассеяния является результатом отражения от отражающей поверхности 340 в подземной толще горных пород 330. Угол раскрытия вдоль пути волны 310 обратного рассеяния имеет величину 180° .

В данном контексте "приблизительно" означает, что точное измерение того, что составляет "большой угол раскрытия", может до некоторой степени изменяться в зависимости от точности алгоритма обратной временной миграции. В этом случае можно ослабить требования до значений $\geq 160^\circ$, чтобы включить значительное количество энергии, которая близка к этому углу, хотя и не совсем равна тому, что желательно. Таким образом, в некоторых вариантах осуществления требования могут быть ослаблены с тем, чтобы охватить эту энергию. Специалисты в данной области техники, понимающие преимущества

настоящего раскрытия, при реализации заявленного способа легко смогут составить собственное мнение на этот счет.

Как отмечено выше, предполагается, что в большинстве вариантов осуществления будут применять технические решения обратной временной миграции (RTM), которые будут различать и отбирать сейсмограммы с большими углами раскрытия.

Обратная временная миграция представляет собой пример миграции на основе волнового поля, где волновые поля генерируют и используют для формирования сейсмического изображения путем прямого моделирования волнового поля (или волнового поля источника), выполняют обратное распространение набора зарегистрированных сейсмических данных при помощи той же программы прямого моделирования (волновое поле приемника) и применяют условие получения изображения, например взаимная корреляция при нулевой задержке между волновыми полями источника и приемника. Способы миграции на основе волнового поля, как правило, считают желательными для подземной области, имеющей сложное геологическое строение и содержащей геологические структуры с крутым падением. И хотя обратная временная миграция более затратна, чем лучевая миграция, она дает более точное сейсмическое изображение.

На фиг. 1 показано, что далее способ 100 продолжает суммирование (в блоке 130) сейсмограмм изображения с большими углами раскрытия для получения изображения освещенности ныряющей волны. Заметим, что изображение освещенности ныряющей волны содержит не только ныряющие волны, но также и энергию обратного рассеяния, чьи углы раскрытия составляют $\geq 160^\circ$, как описано выше. Само по себе суммирование широко известно в данной области техники в отличие от его применения в данном контексте. Оно включает в себя суммирование сейсмограмм для генерирования изображения освещенности ныряющей волны.

Способ 100 затем завершается оценкой (в блоке 140) глубины исследования (DOI) полноволновой инверсии по изображению освещенности ныряющей волны. Обычно это включает в себя визуализацию изображения освещенности ныряющей волны для визуального исследования. Специалистам в данной области техники будет понятно, что глубина исследования представляет собой не число, а скорее зависимость. Как правило, пользователю требуется оценить, достаточна ли глубина исследования полноволновой инверсии для изучения интересующей области в геологической среде. Специалисты в данной области техники, понимающие преимущества настоящего раскрытия, смогут найти ответ на этот вопрос путем визуального исследования изображения освещенности ныряющей волны. Однако в некоторых вариантах осуществления может быть выбрано осуществление этой стадии при помощи компьютерной технологии.

Для более глубокого понимания предмета изобретения, заявленного ниже, далее будет представлен конкретный пример. В данном конкретном варианте осуществления выполняют оценку геометрии съёмки для новой съёмки подземной области, на которой уже проводили съёмку. Цель будущей съёмки состоит в получении дополнительной информации о подземной области, которая не была охвачена предыдущей съёмкой.

Один из вопросов при проектировании новой съёмки заключается в том, чтобы обеспечить покрытие конкретного интересующего участка в подземной области. Как отмечено выше, одним из аспектов покрытия является глубина исследования полноволновой инверсии, а одним из факторов глубины исследования является геометрия съёмки. Поскольку съёмку подземной области ранее проводили, существует старая скоростная модель для этой подземной области. Эту старую скоростную модель сгенерировали и сгладили в соответствии с общепринятой практикой. Старая скоростная модель для этого конкретного варианта осуществления показана на фиг. 4. Поскольку старая скоростная модель уже имеется и поскольку геометрия съёмки влияет на покрытие (включая глубину исследования), было бы желательно протестировать покрытие и глубину исследования различных возможных геометрий съёмки на старой скоростной модели.

В общепринятой практике глубину исследования полноволновой инверсии могут определять путем выполнения трехмерной (3D) полноволновой инверсии (FWI) на старой скоростной модели и затем изучать результаты с тем, чтобы определить глубину, до которой обновлена скоростная модель. Однако вычислительная трудоемкость запуска трехмерной полноволновой инверсии, как правило, не позволяет применять ее для анализа влияния разных геометрий сейсмических 3D съёмок по скоростной модели, рассчитанной при помощи полноволновой инверсии. По этой причине преобладающим способом определения глубины исследования полноволновой инверсии для предлагаемой геометрии съёмки является эмпирическое правило одной трети максимального удаления.

В отличие от него заявленный ниже способ можно применять для анализа влияния различных геометрий сейсмической 3D съёмки на получаемую скоростную модель геологической среды. Он также относительно нетрудоемкий с точки зрения вычислений. Для каждого пункта взрыва делают по одному запуску моделирования и построения изображения по пункту взрыва, при этом желательную геометрию съёмки можно оценить путем простого суммирования подмножества индивидуально мигрированных сейсмограмм общего пункта взрыва, относящихся к исследуемой геометрии. Способ получения изображения является линейным, тогда как полноволновая инверсия является нелинейным итеративным спосо-

бом.

В этом конкретном варианте осуществления генерируют данные прямого моделирования с частотами менее 6 Гц и рассчитывают изображение обратной временной миграции (RTM) только по той части угловых сейсмограмм, которые имеют большие углы раскрытия $\geq 160^\circ$. То есть этот вариант осуществления включает в себя только данные обратной временной миграции, которые удовлетворяют условию изображения углов раскрытия, близких к условию изображения ныряющих волн. (Заметим, что это будет включать в себя не только ныряющие волны, но и некоторую энергию обратного рассеяния, как описано выше.) Он различает эти большие углы путем вычисления угловых сейсмограмм в обратной временной миграции при помощи технического решения оптического потока, которое описано в вышеупомянутом опубликованном патенте США 2014/0293744. Для данной геометрии съемки соответствующую сумму этих низкочастотных угловых сейсмограмм с большими углами называют изображением освещенности ныряющей волны (DWI), которое почти соответствует глубине исследования полноволновой инверсии для этой же геометрии съемки.

По существу в данном варианте осуществления предусмотрен трехстадийный способ получения изображения освещенности ныряющей волны, что показано на фиг. 1. Он начинается с прямого моделирования (в блоке 110) по гладкой скоростной модели для генерирования низкочастотных (2-6 Гц) данных, таких как показаны на фиг. 5. Далее (в блоке 120) следует запуск низкочастотной обратной временной миграции (2-6 Гц), включая вычисление угловых сейсмограмм при помощи технического решения оптического потока, описанного выше. На фиг. 6 представлена графическая визуализация угловых сейсмограмм, полученных путем обратной временной миграции низкочастотных данных в этом варианте осуществления и показанных на фиг. 5. Затем (в блоке 130) генерируют сумму части угловых сейсмограмм, имеющих большие углы раскрытия. Эта сумма представляет собой изображение освещенности ныряющей волны, которое почти соответствует глубине исследования полноволновой инверсии для данной геометрии съемки. На фиг. 7A-7C представлена графическая визуализация изображений освещенностей ныряющей волны, которые получены из угловых сейсмограмм с большими углами, показанных на фиг. 6, для максимальных удалений 8, 12 и 15 км, соответственно.

Глубину исследования для конкретной геометрии съемки, использованную для получения изображения освещенности ныряющей волны, можно затем оценить путем визуального изучения графических изображений, таких как показаны на фиг. 7A-7C. Например, рассмотрим изображение освещенности ныряющей волны на фиг. 7A. Темные области изображения содержат полезную информацию, поэтому глубиной исследования полноволновой инверсии для этого конкретного варианта осуществления при максимальных удалениях 8 км (фиг. 7A) можно считать границу между темной и светлой областями на изображении. Заметим, что глубина исследования зависит от расстояния максимального удаления, что можно видеть из сравнения фиг. 7A-7C друг с другом.

Затем этот способ можно применить для каждой из предлагаемых геометрий съемки, чтобы увидеть, какая из этих геометрий даст желательную глубину исследования. В случаях когда желательному стандарту отвечает несколько геометрий съемки, пользователь может выбрать одну из них или несколько, которые, как представляется, дадут наиболее приемлемые результаты. Такой подход позволяет достичь этой желаемой цели без полных затрат на полноволновую инверсию даже для одной геометрии съемки. Он также помогает обеспечить достижение желательных результатов по глубине исследования без фактического осуществления предлагаемой съемки.

Однако заметим, что этот конкретный вариант осуществления является только одним примером того, как могут применять способ оценки глубины исследования для сейсмической съемки. В этом конкретном варианте осуществления цель состоит в оценке потенциальных геометрий будущей съемки. Выше упомянуты другие варианты применения.

Например, возможно, что съемка подземной области уже была проведена и геофизики хотят знать достаточно ли глубина исследования для того, чтобы полноволновая инверсия была полезной для анализа конкретной интересующей их области. Помимо прочего это знание может быть полезным для обоснования решения о том, запускать ли на сейсмических данных полную 3D полноволновую инверсию трудежку с точки зрения вычислений.

Один из подходов заключается в том, чтобы запустить 3D полноволновую инверсию и посмотреть, достаточно ли глубина исследования. Однако это мало поможет геофизику, если глубина исследования недостаточна. Геофизик может также применить эмпирическое правило одной трети максимального удаления, но правильность и точность этого способа недостаточны и он не учитывает особенности геологической среды. Техническое решение, описанное в настоящем документе, устраняет недостатки по обоим этим вопросам.

Другие варианты осуществления настоящего изобретения будут понятны специалистам в данной области техники при рассмотрении раскрытого в настоящем документе описания изобретения и практического использования изобретения. Предполагается, что описание изобретения и примеры будут рассматриваться только в качестве иллюстрации, а истинное существо и объем изобретения приведены в следующей формуле изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ для применения в сейсморазведке, который предусматривает прямое моделирование в модели свойств геологической среды подземной области с целью генерирования набора низкочастотных сейсмических данных, причем модель свойств геологической среды генерируют из данных, характеризующих эту подземную область;
 - выполнение обратной временной миграции по низкочастотным сейсмическим данным с целью получения некоторого количества сейсмограмм с большими углами раскрытия;
 - суммирование сейсмограмм с большими углами раскрытия с целью получения изображения освещенности ныряющей волны, и
 - оценку глубины исследования полноволновой инверсии по изображению освещенности ныряющей волны, где углы с большим раскрытием представляют собой углы, которые больше или равны 160° , причем низкочастотные сейсмические данные находятся в диапазоне 2-6 Гц.
2. Способ по п.1, дополнительно предусматривающий
 - подтверждение правильности обновленной модели свойств геологической среды с применением глубины исследования полноволновой инверсии;
 - обеспечение улучшенного сейсмического изображения подземной области с применением обновленной модели свойств геологической среды и
 - применение улучшенного сейсмического изображения подземной области для поиска углеводородов.
3. Способ по п.1, в котором модель свойств геологической среды представляет собой гладкую модель свойств геологической среды.
4. Способ по п.1, в котором данные, характеризующие подземную область, представляют собой набор сейсмических данных.
5. Способ по п.1, в котором оценка глубины исследования представляет собой оценку глубины исследования для предлагаемой геометрии съемки, которую применяли при прямом моделировании.
6. Способ по п.1, в котором модель свойств геологической среды представляет собой скоростную модель.
7. Способ для применения в сейсмической съемке, причем этот способ включает в себя
 - получение набора синтетических низкочастотных сейсмических данных, характеризующих подземную область, в том числе
 - получение геометрии съемки для сейсмической съемки;
 - получение модели свойств геологической среды подземной области, причем модель свойств геологической среды генерируют из данных, характеризующих эту подземную область; и
 - прямое моделирование в модели свойств геологической среды с применением геометрии съемки для генерации низкочастотных сейсмических данных; и
 - получение изображения низкочастотных сейсмических данных, в том числе
 - выполнение обратной временной миграции по низкочастотным сейсмическим данным с целью получения некоторого количества сейсмограмм с большими углами раскрытия;
 - суммирование сейсмограмм с большими углами раскрытия с целью получения изображения освещенности ныряющей волны; и
 - оценку глубины исследования полноволновой инверсии по изображению освещенности ныряющей волны, где углы с большим раскрытием представляют собой углы, которые больше или равны 160° ; и где низкочастотные сейсмические данные находятся в диапазоне 2-6 Гц.
8. Способ по п.7, в котором прямое моделирование включает в себя предложенную геометрию съемки для источников и приемников.
9. Способ по п.7, в котором прямое моделирование включает в себя фактическую геометрию съемки для источников и приемников, которую применяли для получения набора сейсмических данных, из которых была построена модель свойств геологической среды.
10. Способ по п.7, в котором обратная временная миграция предусматривает обратную временную миграцию оптического потока.
11. Способ для применения при оценке стратегии обработки сейсмических данных, предусматривающий
 - прямое моделирование в модели свойств геологической среды подземной области с целью генерирования набора синтетических низкочастотных сейсмических данных, причем модель свойств геологической среды генерируют из набора сейсмических данных, характеризующих эту подземную область;
 - выполнение обратной временной миграции по низкочастотным сейсмическим данным с целью получения некоторого количества сейсмограмм с большими углами раскрытия;
 - где углы с большим раскрытием представляют собой углы, которые больше или равны 160° ;
 - оценку глубины исследования по изображению освещенности ныряющей волны; и
 - на основе оцененной глубины исследования полноволновой инверсии определение возможности получения приемлемой глубины исследования с помощью этой стратегии обработки сейсмических дан-

ных, причем

низкочастотные сейсмические данные находятся в диапазоне 2-6 Гц.

12. Способ по п.11, дополнительно предусматривающий подтверждение правильности обновленной модели свойств геологической среды с применением глубины исследования полноволновой инверсии и

обеспечение улучшенного сейсмического изображения подземной области с применением обновленной модели свойств геологической среды.

13. Способ по п.11, в котором прямое моделирование включает в себя предложенную геометрию съемки для источников и приемников.

14. Способ по п.11, в котором прямое моделирование включает в себя фактическую геометрию съемки для источников и приемников, которую применяли для получения набора сейсмических данных, из которых была построена модель свойств геологической среды.

15. Способ для применения в сейсморазведке, который предусматривает

прямое моделирование в скоростной модели подземной области с целью генерирования набора синтетических низкочастотных сейсмических данных, причем скоростную модель генерируют из данных, характеризующих эту подземную область;

выполнение обратной временной миграции по низкочастотным сейсмическим данным с целью получения некоторого количества сейсмограмм с большими углами раскрытия;

суммирование сейсмограмм с большими углами раскрытия с целью получения изображения освещенности ныряющей волны, где углы с большим раскрытием представляют собой углы, которые больше или равны 160° ; и

оценку глубины исследования полноволновой инверсии по изображению освещенности ныряющей волны, причем

низкочастотные сейсмические данные находятся в диапазоне 2-6 Гц.

16. Способ по п.15, в котором прямое моделирование включает в себя предложенную геометрию съемки для источников и приемников.

17. Способ по п.15, в котором прямое моделирование включает в себя фактическую геометрию съемки для источников и приемников, причем эту геометрию съемки применяли для получения набора сейсмических данных, из которых была построена скоростная модель.

18. Способ по п.15, в котором сейсмограммы содержат ныряющие волны и энергию обратного рассеяния.

19. Способ для применения в сейсмической съемке, причем этот способ включает в себя

получение набора синтетических низкочастотных сейсмических данных, характеризующих подземную область, в том числе

получение геометрии съемки для сейсмической съемки;

получение скоростной модели подземной области, причем скоростную модель генерируют из данных, характеризующих эту подземную область; и

прямое моделирование в скоростной модели с применением геометрии съемки с целью генерации низкочастотных сейсмических данных; и

получение изображения низкочастотных сейсмических данных, в том числе

выполнение обратной временной миграции по низкочастотным сейсмическим данным с целью получения некоторого количества сейсмограмм с большими углами раскрытия;

суммирование сейсмограмм с большими углами раскрытия с целью получения изображения освещенности ныряющей волны, где углы с большим раскрытием представляют собой углы, которые больше или равны 160° ; и

оценку глубины исследования полноволновой инверсии по изображению освещенности ныряющей волны, причем низкочастотные сейсмические данные находятся в диапазоне 2-6 Гц.

20. Способ по п.19, в котором прямое моделирование включает в себя предложенную геометрию съемки для источников и приемников.

21. Способ по п.19, в котором прямое моделирование включает в себя фактическую геометрию съемки для источников и приемников, причем эту геометрию съемки применяли для получения набора сейсмических данных, из которых была построена скоростная модель.

22. Способ для применения при оценке предлагаемого плана сейсмической съемки, предусматривающий

получение предлагаемой геометрии съемки для будущей сейсмической съемки и скоростной модели геологической области, которую предполагают исследовать, при этом скоростную модель генерируют из данных, характеризующих эту подземную область;

прямое моделирование в скоростной модели с предлагаемой геометрией съемки, которая определяет местоположения источника и приемника, с целью генерации набора синтетических низкочастотных сейсмических данных;

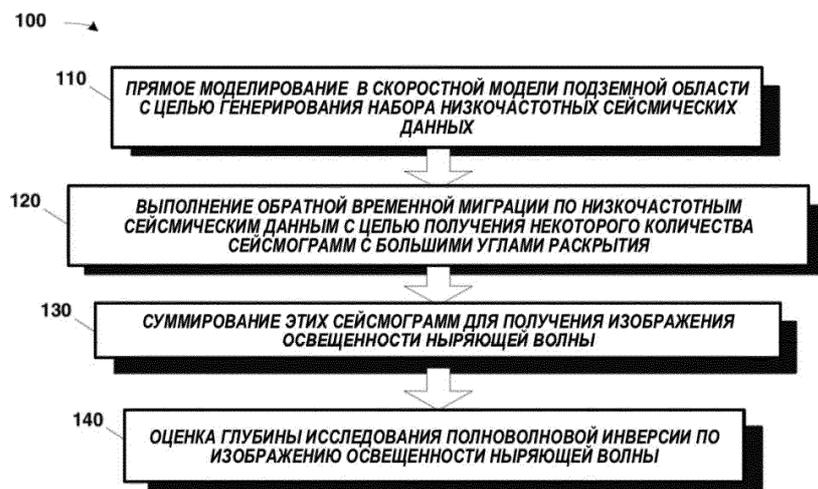
выполнение обратной временной миграции по низкочастотным сейсмическим данным с целью по-

лучения некоторого количества сейсмограмм с большими углами раскрытия;

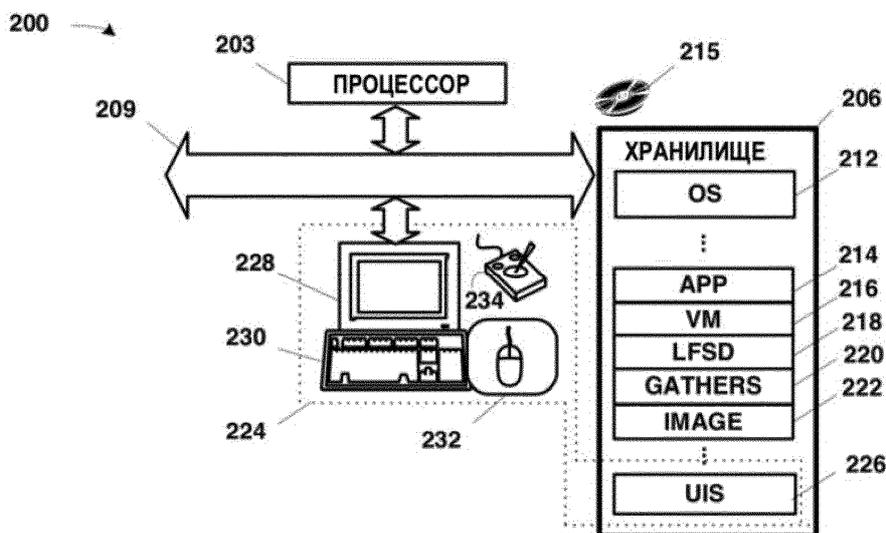
суммирование сейсмограмм с большими углами раскрытия с целью получения изображения освещенности ныряющей волны, где углы с большим раскрытием представляют собой углы, которые больше или равны 160° ; и

оценку глубины исследования полноволновой инверсии по изображению освещенности ныряющей волны для съемки подземной области с применением предлагаемой геометрии съемки, причем низкочастотные сейсмические данные находятся в диапазоне 2-6 Гц.

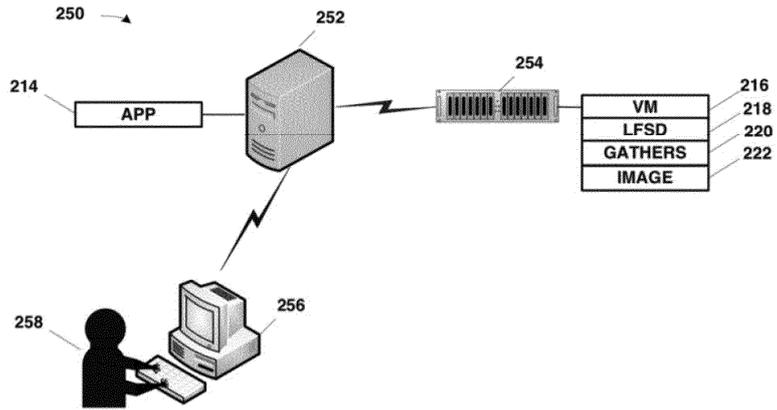
23. Способ по п.22, в котором сейсмограммы включают в себя ныряющие волны и энергию обратного рассеяния.



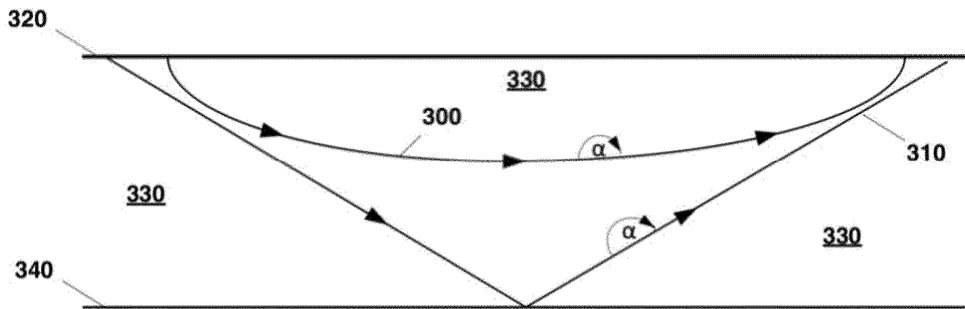
Фиг. 1



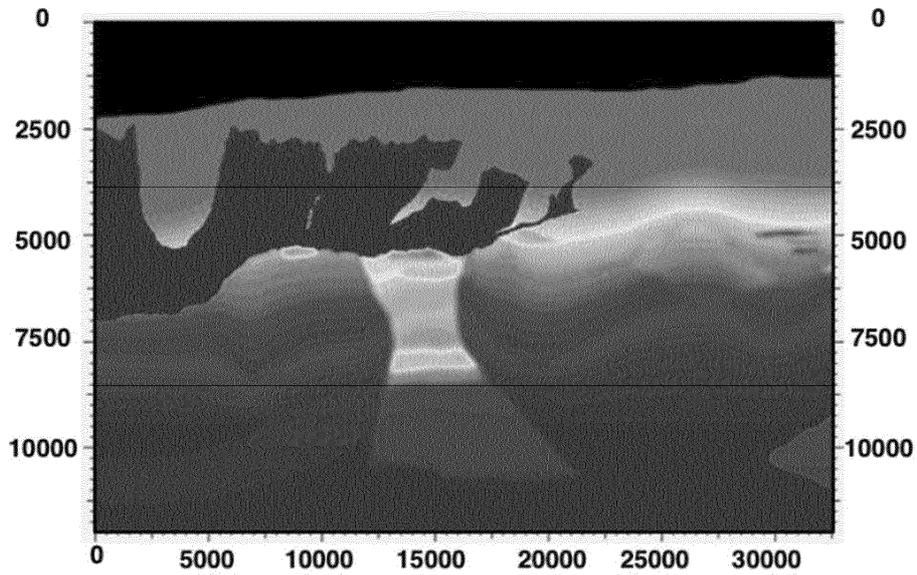
Фиг. 2А



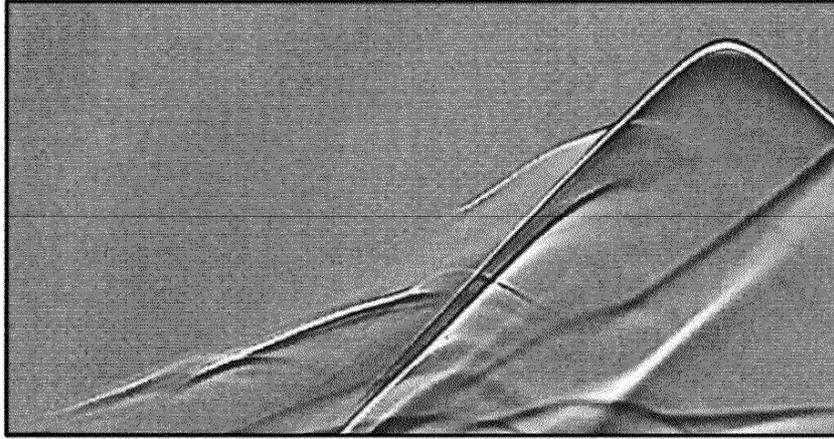
Фиг. 2В



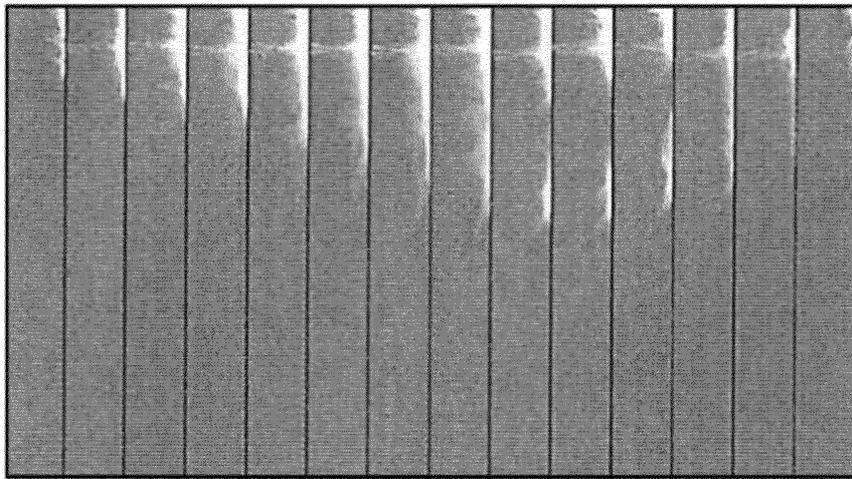
Фиг. 3



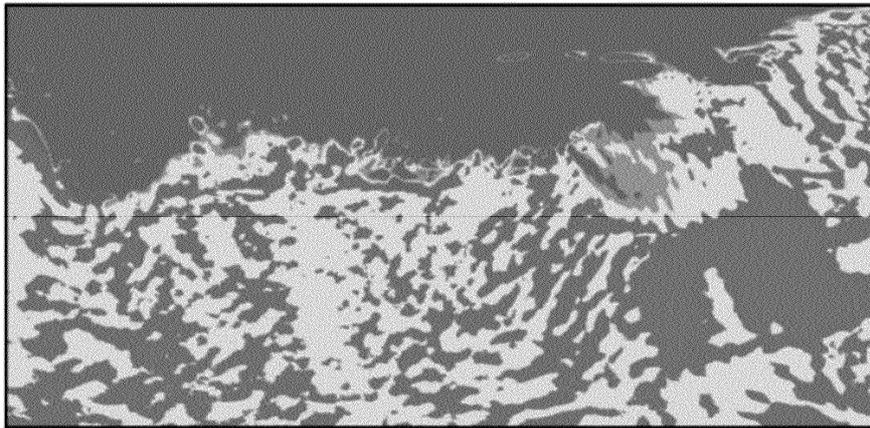
Фиг. 4



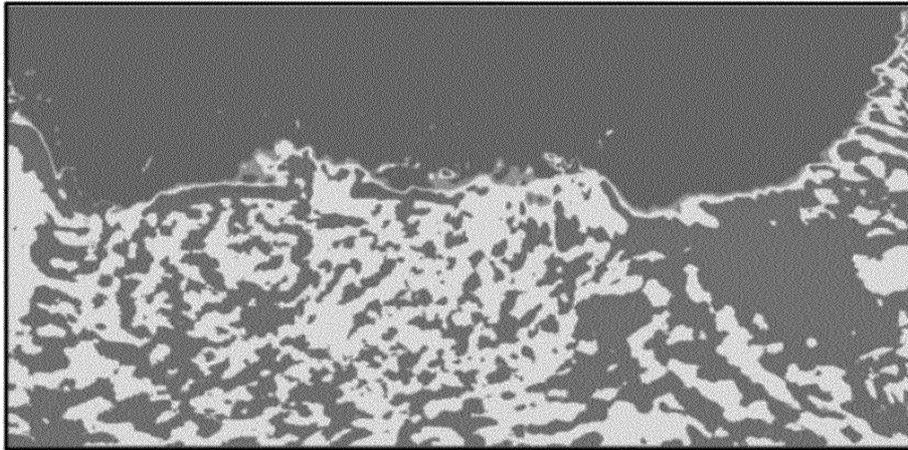
Фиг. 5



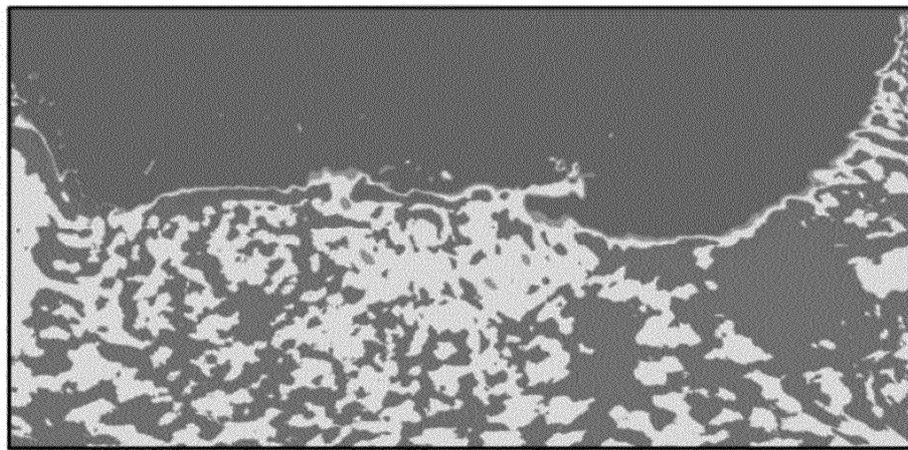
Фиг. 6



Фиг. 7А



Фиг. 7В



Фиг. 7С