

(19)



Евразийское
патентное
ведомство

(11) 037382

(13) B1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2021.03.23

(21) Номер заявки
201791217

(22) Дата подачи заявки
2015.12.02

(51) Int. Cl. G01V 1/38 (2006.01)

(54) СПОСОБ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ НИЗКОЧАСТОТНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

(31) 62/086,581

(32) 2014.12.02

(33) US

(43) 2018.01.31

(86) PCT/US2015/063492

(87) WO 2016/090031 2016.06.09

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

(72) Изобретатель:
Брендерс Эндрю Джеймс, Деллингер
Джозеф Энтони, Этжен Джон Теодор,
Оупеншо Грэм, Росс Аллан (US)

(74) Представитель:
Гизатуллина Е.М., Угрюмов В.М.,
Строкова О.В., Карпенко О.Ю. (RU)

(56) US-A1-2012155217
US-A1-2013013212
US-A1-2014336939
US-A1-2003218937
US-A1-2014081576
WO-A2-2010149589
US-B1-7257049

(57) Способ для использования в геофизических съемках служит для сбора сейсмических данных (сейсмической съемки) на низких частотах с целью получения лучших начальных моделей свойств геологической среды, а не для расширения полосы частот пневмопушек с целью получения широкополосных изображений, как это делают при традиционных работах.

B1

037382

037382

B1

Ссылка на родственные заявки

Согласно настоящей заявке испрашивается приоритет в соответствии с предварительной заявкой на выдачу патента США № 62/086581, поданной 2 декабря 2014 г. с названием "Сейсмическая съемка на низких частотах с применением буксируемых на глубине тяжелых источников сейсмических колебаний", содержание которой полностью включено в настоящую заявку посредством ссылки.

Заявление касательно исследования или разработки, финансируемой из федерального бюджета
Не применимо.

Предшествующий уровень техники настоящего изобретения

Раскрываемый в настоящем документе способ относится к сейсмическим съемкам и, в частности, к морским съемкам на низких частотах с буксированием тяжелых источников сейсмических колебаний на большой глубине.

Поиски углеводородов и некоторых других флюидов значительно осложнены тем, что они находятся в залежах под землей, в определенных типах геологических формаций. Для выявления и определения местоположения таких залежей следует использовать не прямые, а не прямые наблюдения. Сейсмическая съемка включает в себя передачу акустических (или звуковых) волн выбранных сейсмических частот в природную среду таким образом, что они могут проникать в землю и проходить через изучаемые подземные геологические формации. Во время их прохождения через толщи определенные особенности этих толщ будут возвращать волны назад к поверхности, где отраженные волны регистрируют. Таким образом, зарегистрированные сейсмические данные содержат информацию о подземных геологических формациях, причем по этой информации можно установить наличие и местоположение залежей углеводородов. Другими словами, сейсмические данные характеризуют геологические формации, от которых они получены.

Например, одним из известных инструментов, который часто используют в анализе сейсмических данных, является так называемая "скоростная модель". Скоростная модель - это представление геологических формаций, которое может быть использовано для анализа. В том числе, оно может быть использовано для преобразования сейсмических данных в одну или более "сейсмических областей", которые отображают геологические формации разными способами. Качество этих изображений часто зависит от качества скоростной модели. Также оно может быть использовано другими способами, например, для анализа разных геофизических характеристик формаций. Также в данном контексте используют и подразумевают аналогичные соображения в отношении других типов моделей подстилающих геологических формаций, которые в настоящем документе обобщенно называют "моделями свойств геологической среды".

Со временем возросла необходимость более точно определять местоположение залежей углеводородов. Иногда повышение точности связано с новыми способами съемки. В других случаях такого повышения достигают за счет способов обработки сейсмических данных; подобный способ описан ниже. Иногда повышения достигают путем сочетания разработок и в съемке, и в обработке.

Низкочастотная съемка - это сравнительно новая разработка в области сейсмических съемок. Исторически в сейсмических съемках используют сейсмические сигналы с частотами в диапазоне от 8 до 80 Гц, поскольку такие сигналы пригодны с точки зрения технических проблем, характерных для сейсмических съемок. Термин "низкие частоты" в этом историческом контексте понимают как частоты, ниже которых получение удовлетворительного отношения сигнал-помеха с использованием традиционных источников сильно усложняется по мере уменьшения частот, т.е. при частотах ниже приблизительно 6-8 Гц.

Использование низких частот для получения изображения по морским сейсмическим данным оказалось сложным для частот ниже приблизительно 6 Гц, особенно для частот ниже приблизительно 4 Гц. Причем эта сложность двоякая: 1) на низких частотах естественные фоновые сейсмические помехи геологической среды постепенно усиливаются; 2) мощность традиционных широкополосных источников, таких как пневмопушки, постепенно снижается. В результате в морских глубоководных сейсмических данных отношение сигнал-помеха может снижаться для частот ниже 4 Гц более чем на 30 дБ на октаву.

Таким образом, несмотря на то, что в целом может существовать много подходящих способов получения сейсмических изображений, необходимость повышения эффективного отношения сигнал-помеха на низких частотах продолжает стимулировать появление новшеств в данной области техники. В частности, помимо прочего, необходимы способы съемки и обработки, которые улучшают сбор данных (съемку) и использование низкочастотных сейсмических данных с более низкими частотами. По указанной причине эта область техники открыта для улучшений или, по меньшей мере, альтернативных средств, способов и конфигураций, которые могли бы способствовать усилиям по улучшению ситуации. В итоге, в данной области техники хорошо примут описанный в настоящем документе способ.

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 настоящего изобретения. На фигурах изображено следующее:

На фиг. 1 схематически представлена морская сейсмическая съемка в соответствии с одним кон-

кретным вариантом осуществления раскрываемого здесь способа;

на фиг. 2 схематически представлена расстановка одиночных приемников в вариантах морской сейсмической съемки, которая показана на фиг. 1;

на фиг. 3 представлен способ извлечения, который может быть использован в некоторых вариантах осуществления;

на фиг. 4 представлен альтернативный вариант осуществления, в котором сейсмический источник буксируют с кормы, а не с борта судна с источниками;

на фиг. 5 представлен способ буксировки, который включает в себя систему подавления вибрации, вызванной образованием вихревых потоков, в том виде, как она использована в варианте осуществления на фиг. 4;

на фиг. 6 графически представлена концепция съемки с одновременным использованием зуммерных, импульсных и свип-источников.

Раскрытие вариантов осуществления

Раскрываемый в настоящем документе способ служит для сбора сейсмических данных (сейсмической съемки) на низких частотах с целью получения лучших начальных моделей свойств геологической среды, но не для расширения полосы частот пневмопушек для получения широкополосных изображений, как это делают при традиционных работах. Такие модели должны быть не абсолютно точными, а просто пригодными в качестве начальной модели для итеративного уточнения при таком подходе, где используют способы с обновлением модели, такие как полноволновая инверсия (FWI). Кроме того, было бы полезно обновлять модели свойств геологической среды до относительно больших глубин.

В связи с этим возникает вопрос о том, какие низкие частоты желательны. Одной областью интереса при сейсмических съемках являются соляные толщи. Для солей толщиной 3 км со скоростью 4600 м/с половина длины волны при нулевом удалении, которая уместится в соли, будет давать частоту $(4600/2)/3000 = 0.77$ Гц. На больших удалениях для получения такого же вертикального волнового числа частота не должна быть такой низкой. При этом соответствующие частоты ниже тех, что в данной области техники считают возможным создавать с использованием (даже очень больших) пневмопушек. Примечательно, что для традиционного получения сейсмических изображений чаще всего используют морские буксируемые косы, а не одиночные приемники. К сожалению, морские буксируемые косы создают значительные помехи на частотах ниже приблизительно 4 Гц, которые представляют наибольший интерес, что осложняет проблему отношения сигнал-помеха на низких частотах.

Что касается обновления моделей свойств геологической среды до относительно больших глубин, главное правило состоит в том, что глубина проникновения ныряющих волн (и, таким образом, обновления FWI) обычно составляет приблизительно 1/3 от максимального удаления. Так, например, для улучшения модели свойств геологической среды до глубины 10 км, при съемке следует использовать удаления по меньшей мере до 30 км. То есть, для большинства источников приемники должны находиться в диапазоне удалений до 30 км от источника.

Эти факторы оказывают влияние на другие аспекты проектирования съемки. Обсуждаемые частоты настолько низкие, что даже по консервативному критерию дискретизации Найквиста (принципу теории дискретизации, который широко известен специалистам в данной области техники), для съемки не требуются источники и приемники с шагом дискретизации, типичным для традиционных съемок. Критерий дискретизации Найквиста в применении к расстоянию между источниками и приемниками определяет их плотность как "2 точки на длину волны вдоль поверхности регистрации". Типичный шаг между пунктами взрыва при традиционных съемках составляет 50 м или менее, что при скорости волн в воде 1500 м/с дает в соответствии с критерием Найквиста частоты $(1500 \text{ м/с}/50 \text{ м})/2 = 15$ Гц и ниже. Для волн с частотой 2 Гц в соответствии с критерием Найквиста источник или приемник потребуется только на каждые $(1500 \text{ м/с}/2 \text{ Гц})/2 = 375$ м. В соответствии с критерием Найквиста типичное расстояние в 430 м между одиночными донными морскими приемниками в традиционной съемке достаточно для регистрации на частотах 1.74 Гц и ниже. Таким образом, от рассматриваемых частот зависит, будет ли достаточной "плотность" пунктов взрыва или приемников.

Для получения эффективной полноволновой инверсии нужно иметь хорошую дискретизацию либо на стороне источников, либо на стороне приемников, необязательно на обеих. Таким образом, при хорошей дискретизации на стороне источников расстояние между приемниками (шаг) может быть гораздо большим, чем ~400 м, которые получены по критерию Найквиста, т.е., 2 км и больше.

В соответствии с другим вариантом в низкочастотной съемке могут использовать сетку одиночных донных морских приемников, размещенных для съемки на традиционных частотах; это так называемая "совмещенная" съемка. Тогда типичного расстояния между одиночными донными морскими приемниками приблизительно в 400 м - сетки с большим шагом (т.е. не отвечающей критерию Найквиста) на традиционных частотах - может быть достаточно, чтобы гарантировать, что в соответствии с критерием Найквиста дискретизация приемников хорошая для достаточно низких частот. Когда дискретизация хорошая на стороне приемников, низкочастотные профили возбуждения могут иметь большое расстояние друг от друга, т.е., 2 км и больше.

Заметим, что с точки зрения вычислений зачастую более эффективно иметь небольшое расстояние

между приемниками, чем между источниками. Чтобы использовать это, для целей вычисления можно применить принцип сейсмической взаимности и поменять ролями источники и приемники, что широко известно в данной области техники. Таким образом, физические источники или приемники могут определять точки отсчета в рассчитанном волновом поле "приемников".

На практике полноволновая инверсия может зачастую давать полезные результаты, даже если при съемке для источников или приемников не был соблюден критерий дискретизации Найквиста. Полноволновая инверсия осуществляет обратное распространение остаточного волнового поля (разности между волновым полем, спрогнозированным на приемниках, и тем, что на них было фактически измерено). Таким образом, для целей обновления скоростной модели имеет значение именно дискретизация остаточного волнового поля, а не волнового поля приемников. Если скоростная модель, использованная для создания прогнозного волнового поля, является хорошим приближением истинной скоростной модели, скорость изменения фазы прогнозного или измеренного волнового поля приемников будут одинакова. Тогда с увеличением расстояния сдвиг по фазе между ними (т.е., фаза остаточного волнового поля) будет накапливаться довольно медленно. Таким образом, длина волны остаточного волнового поля может быть значительно больше, чем длина волны волнового поля приемников, что позволяет соответственно увеличить расстояние между приемниками для представления остаточного волнового поля.

То, насколько дискретизация может выходить за пределы критерия Найквиста, зависит от (неизвестной) точности скоростной модели. На практике выбор расстояния между источником и приемником определяется балансом между тем, насколько мы верим в нашу скоростную модель, и затратами. И для пунктов взрыва, и для приемников сокращение расстояния между ними по инлайну обычно гораздо дешевле, чем по направлению кросслайна (вкрест профилей), поэтому ограничивающим фактором чаще всего является расстояние источников или пунктов взрыва по кросслайну.

В данном контексте "инлайн" и "кросслайн" четко определены для профиля возбуждения. Инлайн - это направление, в котором движется судно. Кросслайн - направление, перпендикулярное направлению инлайна. В случае морских донных групп приемников с одинаковым расстоянием по ортогональным направлениям X и Y в декартовых координатах "инлайн" и "кросслайн" будут определены относительно профилей возбуждения в съемке. Однако в случае, когда расстояние между приемниками в донной морской группе приемников не одинаковое, "инлайн" - это ось с большей плотностью (меньшим шагом), "кросслайн" - ось с меньшей плотностью (большим шагом) приемников. В таком случае обычно направление инлайна может быть направлением движения подводных аппаратов с дистанционным управлением (ROV) при развертывании одиночных морских приемников. Экономические соображения обычно будут диктовать условие, чтобы расстояние по кросслайну было большим или равным расстоянию по инлайну.

Другое широко известное соображение при проектировании морских сейсмических съемок - влияние отражений от поверхности моря в дальней зоне, в частности провалы в частотном спектре на частоте 0 Гц. В подходе, раскрываемом в настоящем документе, судно буксирует источники и, в некоторых вариантах осуществления приемники так глубоко, как возможно, с тем, чтобы ослабить негативное воздействие провалов в частотном спектре. Кроме того, источники тяжелые и поэтому в представленных в настоящем документе вариантах осуществления их буксируют под большим углом буксировки.

Таким образом, в разных сочетаниях в зависимости от варианта осуществления этот конкретный подход реализует ряд уникальных принципов проектирования, таких как буксировка более тяжелых источников на большей глубине, сведение к минимуму низкочастотных помех, очень большие удаления (расстояния между источниками и приемниками) и разреженная сетка съемки (по сравнению с традиционными работами). Тем самым, в способе, раскрываемом в настоящем документе, используют геометрию с большими удалениями и одиночными донными морскими приемниками, что более подробно описано ниже.

Принцип буксировки на большей глубине предполагает буксировку сейсмического источника (источников) глубже, чем типичная глубина буксировки, в том числе, пневмопушек. В одном конкретном варианте осуществления раскрываемого способа сейсмический источник достаточно тяжелый и подвешен практически вертикально под судном с источниками. Для целей настоящего раскрытия это называют "тяжелой буксировкой".

От традиционных работ тяжелая буксировка отличается весом на буксирном тросе. При традиционных работах буксируемый объект (например, сейсмический источник) имеет почти нейтральную плавучесть в воде, и буксирный трос лишь незначительно поддерживает его. На самом деле вес регуляторов погружения достаточно часто используют для того, чтобы полностью отделить буксируемый объект от вертикальной компоненты троса. При тяжелой буксировке буксируемый объект не обладает нейтральной плавучестью и буксирный трос нагружен значительным весом. В некоторых вариантах осуществления нагрузка на буксирный трос может составлять до нескольких тонн. В контексте настоящего раскрытия изобретения тяжелая буксировка - это буксировка, при которой сейсмический источник достаточно тяжелый, чтобы его буксировка происходила под большим углом, как описано ниже.

У тяжелой буксировки есть некоторые преимущества. Одно из них состоит в том, что судно с источниками не должно буксировать сейсмический источник за собой, а может буксировать источник с борта судна с источниками. При сильном волнении моря движение средней части судна меньше, чем

движение кормы, что позволяет сохранять более стабильную глубину буксировки сейсмического источника. Таким образом, буксировка сейсмического источника с борта судна с источниками может давать преимущество - сводить к минимуму вертикальную качку на тросе, который буксирует сейсмический источник. Это полезно, потому что изменения глубины могут искажать резонансную частоту сейсмического источника или приводить к сильному натяжению буксирного троса. В этом конкретном варианте осуществления глубина буксировки определяется эффективностью устройства, которая зависит от сбалансированности глубины и преимуществ более глубокой буксировки, при этом сводят к минимуму негативное воздействие провалов в частотном спектре на частоте 0 Гц. Согласно альтернативным вариантам осуществления глубина буксировки может быть ограничена глубиной моря, весом и прочностью троса или другими факторами.

Описанная выше тяжелая буксировка также ослабляет требования к скорости судна, поскольку скорость судна не требуется поддерживать, чтобы сохранить стабильное следование буксирного троса за судном с источниками. Напротив, судно с источниками должно идти достаточно быстро, чтобы сохранять хорошее управление самим судном и в некоторых вариантах осуществления, стабильную ориентацию сейсмических источников. Поэтому скорость судна могут контролировать с учетом времени, которое требуется сейсмическому источнику для создания достаточной энергии в нужном диапазоне частот на одном "пункте взрыва"; ширину пункта взрыва определяют по критерию Найквиста для наибольшей изучаемой частоты. Если требуется больше энергии на пункт взрыва, ее можно получить, просто медленнее буксируя сейсмический источник. Если судно с источниками может поддерживать фиксированное местоположение, а стабильность сейсмического источника не является проблемой, он может даже делать паузу в местоположении каждого пункта взрыва и излучать энергию так долго, как необходимо.

У тяжелой буксировки есть также некоторые недостатки. Как известно специалистам в данной области техники, буксирные тросы могут быть подвержены вибрации, вызванной образованием вихревых потоков (VIV), а туго натянутый под большим углом буксирный трос с подвешенным устройством может быть особенно подвержен VIV. Чтобы удерживать буксирный трос (тросы) от вибрации, которая возникает при их движении через воду, может быть необходимо некоторое подавление VIV. Может быть необходимо запланировать альтернативные направления профилей возбуждения, чтобы избежать усиления VIV при движении судна против сильного течения.

При тяжелой буксировке для предотвращения передачи вертикальных движений от судна на устройство можно использовать некоторые типы систем, такие как компенсатор вертикальной качки. Подавление VIV обычно включает в себя защиту буксирного троса, например, ворсистым материалом или оболочкой аэродинамической формы. Проектирование или приобретение компенсатора вертикальной качки, который предполагает буксирный трос с подвешенным грузом и оснащенный устройством для подавления VIV, может быть нецелесообразным. Может быть необходима "косвенная" компенсация вертикальной качки с тросом, который проходит через компенсатор вертикальной качки и контролирует движение другого троса, оснащенного системой для подавления VIV, который соединен с устройством.

С учетом изложенных выше соображений, в разных вариантах осуществления раскрываемого здесь способа используют расположенные на большом расстоянии друг от друга (~2 км) одиночные донные морские приемники, размещенные с очень большими удалениями источник-приемник (≥ 15 и по меньшей мере до ~30 км); профили возбуждения расположены на большом расстоянии друг от друга (~400 м), чем в традиционной съемке (но с хорошей дискретизацией для достаточно низких частот); причем исследовательское судно относится к типу, который может буксировать подводный аппарат с дистанционным управлением (ROV), а не к типичным судам, буксирующим морскую косу, а также сейсмический источник, который буксируют на большой глубине (30 м и более) с борта судна с источниками. Судно с источниками включает в себя некоторое устройство для компенсации вертикальной качки с тем, чтобы устойчиво поддерживать глубину и снижать напряжение в буксирном тросе, а также в некоторых вариантах осуществления, некоторый тип подавления VIV с тем, чтобы не допускать вибрации туго натянутого буксирного троса.

Кроме того, для полноволновой инверсии обычно нужны только зарегистрированные гидрофонами данные по упругим волнам. Если проект съемки требует регистрации только гидрофонами, приемники, которые используют в качестве одиночных донных морских приемников, могут быть развернуты из "корзины", которую перемещают в десятках метров над дном моря. Одиночные донные морские приемники выбрасывают из корзины и они падают с небольшой высоты на дно моря. Эти одиночные донные морские приемники можно извлекать, помещая в воду над ними плавучую морскую косу, которая может зацеплять их, проходя над ними "по касательной".

Заметим, что не все варианты осуществления будут обладать всеми этими характеристиками. Например, даже несмотря на то, что одиночные морские приемники могут быть расположены с большим шагом (2 км и более между приемниками по кросслайну), в некоторых вариантах осуществления (например, в "совмещенных" съемках) между ними могут быть выбраны традиционные расстояния (450 м или меньше в обоих направлениях - по инлайну и кросслайну). В этом случае из-за хорошей дискретизации приемников (при достаточно низких частотах) профили возбуждения не должны иметь хорошей дискре-

тизации даже для низких частот, а потому шаг между ними может быть еще больше (2 км и более).

Аналогично, в некоторых вариантах осуществления может быть выбрано одновременное развертывание низкочастотных источников и традиционных источников и, таким образом, для профилей низкочастотного возбуждения могут использовать традиционные расстояния (50 м и менее), а не большие расстояния между профилями возбуждения (~400 м и более), как в соответствии с другими вариантами осуществления. Профили возбуждения и приемные профили могут быть ориентированы перпендикулярно друг к другу; и те, и другие с большим расстоянием в направлении по кросслайну и с небольшим расстоянием (менее 400 м) по инлайну. Дополнительную информацию о таком конкретно проектировании можно найти в заявке на патент США, которая имеет приоритет в соответствии с предварительной заявкой № 62/086362, которая называется "Массивы головных волн в морских сейсмических съемках" и была подана в тот же день от имени авторов изобретения Эндрю Дж. Брендерса и др., обе они имеют одного и того же правообладателя. Специалистам в данной области техники, понимающим преимущества от настоящего раскрытия изобретения, будут очевидны и другие сочетания, которые могут быть реализованы в соответствии с другими вариантами осуществления.

Далее приведено подробное описание варианта осуществления(s) (иллюстративных вариантов осуществления) настоящего изобретения, пример(ы) которого(ых) представлен(ы) 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 представлен один конкретный вариант осуществления морской сейсмической съемки 100, проведенной в соответствии с одним аспектом раскрываемого здесь способа. Морскую сейсмическую съемку 100 проводят с использованием по меньшей мере одного низкочастотного сейсмического источника 103, причем этот источник буксирует судно 106 с источниками. Она также включает в себя некоторое количество приемных профилей 109, которые размещены на дне 112 моря. В данном случае "низкочастотная" означает ниже 4 Гц. Каждый приемный профиль 109 содержит несколько одиночных донных морских приемников 115, которые в представленном варианте осуществления являются гидрофонами; однако в соответствии с другими вариантами осуществления они могут быть геофонами или многокомпонентными приемниками. В соответствии с другими вариантами осуществления "низкочастотные" означает ниже 6 Гц.

В этом одном конкретном варианте осуществления используют представленную на фиг. 2 расстановку 200 одиночных приемников 115. Этот конкретный вариант осуществления более подробно раскрыт в патенте США № 6975560, он модифицирован, как описано в настоящем документе. Одиночные приемники 115 размещают с подвешенного устройства 201, которое спущено с исследовательского судна 203 при помощи подводного аппарата 206 с дистанционным управлением (ROV) на конце устройства 209 управления тросом. Таким же образом, с использованием подводного аппарата 206 с дистанционным управлением одиночные приемники 115 извлекают на подвешенное устройство 201, а затем на исследовательское судно 203. Дополнительную информацию о том, как выполняют эту операцию, можно найти в патенте США № 6975560.

В этом конкретном варианте осуществления одиночные приемники 115 могут быть извлечены, как показано на фиг. 3. Каждый одиночный приемник 115 лежит на дне 112 моря, как описано выше. Поплавок, например плавучий привязной буй 116, прикреплен с одной стороны приемника и плавает над одиночным приемником 115. Трос 117 сам по себе может быть плавучим или может быть рассчитан на плавучесть буя 116. Буй 116 включает в себя крюк 300 или другую аналогичную конструкцию, которая прикреплена на конце, противоположном тому, которым трос 117 прикреплен к приемнику. Заметим, что размер, вес и расположение крюка 300 должны быть такими, чтобы он был направлен вертикально вверх, как показано на фиг. 3, а не поворачивался вниз.

Поскольку буй 116 плавает над дном 112 моря и одиночным приемником 115, его можно извлекать с помощью буксируемого захватывающего устройства 305, которое проходит по касательной над приемными профилями 109. Захватывающее устройство 305 может буксировать, например, аппарат 206 с дистанционным управлением (ROV) или надводное судно. После захвата аппарат 206 с дистанционным управлением (ROV) может помещать одиночные приемники 115 обратно на подвешенное устройство 201. Когда подвешенное устройство 201 заполнено или все одиночные приемники 115 извлечены, подвешенное устройство 201 может быть поднято на надводное судно 203. В соответствии с другим вариантом захваченные одиночные приемники 115 могут быть непосредственно извлечены на поверхность.

Возможно множество вариантов этого способа "прохода по касательной". Согласно альтернативным вариантам осуществления буй 116 может быть расположен над крюком 300 или крюк 300 может быть заменен деталью из черного металла, а захватывающее устройство 305 может быть электромагнитом и пр.

Раскрываемый здесь способ допускает и другие варианты развертывания и извлечения одиночных приемников 115. Например, в съемках, известных как электромагнитные (или ЭМ), традиционно используют "всплывающие" одиночные приемники. При развертывании таких одиночных приемников их выбрасывают с борта судна с источниками и позволяют им свободно упасть на дно моря, причем их местоположение может быть определено способами акустической гидролокации, которые хорошо известны в

данной области техники. По окончании сейсмической съемки на одиночные приемники посылают сигнал с поверхности, который дает им команду отпустить якорь и всплыть на поверхность. Якорь может быть изготовлен из вещества, которое за несколько месяцев безопасно растворяется в морской воде; в некоторых случаях это занимает несколько лет. В некоторых вариантах якорь могут отпускать не по сигналу, а в заданный момент времени. В некоторых вариантах осуществления якорь могут заменять, например, плавучим пузырем и для всплытия одиночного приемника вытеснять газом воду в его камере.

В соответствии с другим вариантом осуществления, который особенно подходит для развертывания на мелководье, одиночные приемники могут быть прикреплены или встроены в донную морскую сейсмическую косу, причем эту косу разматывают с движущегося судна и позволяют ей лечь на дно моря. Затем донную морскую сейсмическую косу зацепляют за один конец, этот конец поднимают и кабель сматывают обратно на судно в порядке, обратном тому, как его развертывали. Эти и другие подобные варианты находятся в пределах объема изложенной ниже формулы изобретения. Следует заметить, что такие способы особенно пригодны для развертывания и извлечения гидрофонов, поскольку для них не требуется аккуратное сцепление с дном или точное ориентирование.

В варианте осуществления на фиг. 2 предусмотрены пункты взрыва, которые расположены достаточно плотно в направлении и по инлайну, и по кросслайну (~400 м и меньше), так что нет необходимости определять расстояние между приемниками по критерию Найквиста. Поэтому в варианте осуществления на фиг. 2 использованы одиночные донные морские приемники 115 с большим шагом между ними. В данном случае "с большим шагом" означает, что расстояние N_s между одиночными приемниками больше или равно ~750 м или приблизительно соответствует удвоенному критерию Найквиста для частоты 2 Гц. В некоторых вариантах осуществления могут использовать расстояние N_s между одиночными приемниками, большее или равное ~1 км, или ~2 км, или ~4 км. В некоторых вариантах осуществления могут использовать расстояние между одиночными приемниками, равное по обеим осям, как показано на фиг. 2.

В соответствии с другими вариантами осуществления большей эффективности могут достигать, развертывая и извлекая одиночные приемники с использованием сетки одиночных приемников, в которой одиночные приемники расположены с большим шагом вдоль одной оси, чем вдоль другой; например, расстояние между одиночными приемниками по инлайну ~400 м, а расстояние по кросслайну ~800 м, или ~1 км, или ~2 км, или ~10 км. Расстояние между одиночными приемниками, большее чем приблизительно 2 км, может быть непригодным для целей традиционного получения изображения, но может быть пригодным для целей предлагаемого изобретения, поскольку цель состоит в получении не детального изображения отражающих границ, а только "улучшенных начальных скоростных моделей".

В частности, заметим, что если одиночные приемники развертывают с аппарата с дистанционным управлением (ROV), преимущество использования большего чем 400 м расстояния по инлайнам между одиночными приемниками, может быть небольшим, поскольку для больших расстояний между ними время, которое ROV тратит на их укладку, не является основным фактором, который определяет затраты; напротив, таким фактором становится время, которое ROV тратит на переходы от одного местоположения одиночного приемника до другого. Таким же образом расстояние между одиночными приемниками в традиционных донных морских сейсмических косах составляет приблизительно 50 м и, таким образом, расстояние между ними фиксировано. Затраты на съемку определяются тем, сколько требуется сейсмических кос, что определяется шагом между одиночными приемниками вдоль кросслайна, который будет выбран настолько большим, насколько возможно, учитывая геофизические цели; обычно оно будет гораздо больше чем 50 м. Однако для других вариантов осуществления, таких как автономные одиночные приемники, которые плывут к заданному местоположению и устанавливаются самостоятельно, основной затратой может быть общее количество одиночных приемников, а не расстояние между ними; в этом случае может быть мало оснований для использования большего расстояния вдоль одной оси, чем вдоль другой.

Вернемся к фиг. 1; как отмечено выше, судно 106 с источниками буксирует по меньшей мере один низкочастотный сейсмический источник 103. В некоторых вариантах осуществления низкочастотный сейсмический источник 103 могут буксировать традиционным способом - за кормой судна 106 с источниками. Однако в представленном варианте осуществления низкочастотный источник(и) 103 буксируют с борта судна 106 с источниками, как показано на фиг. 1.

В представленном варианте осуществления источники 103 низкочастотные зуммерные источники и/или узкополосные свип-источники. "Зуммерный" источник излучает большую часть своей энергии на одной монохромной частоте или на небольшом количестве монохромных частот. "Узкополосный свип-источник" излучает свип-сигналы, но в отличие от традиционного широкополосного свип-источника излучает только в узкой полосе частот (менее двух октав). Каждый из источников 103 будет содержать приемник или датчик (не показан), который будет регистрировать волновое поле, излучаемое этим источником. В одном конкретном варианте осуществления зуммерный или узкополосный источник реализован с использованием источника, описанного и заявленного в патенте США № 8387744. Сигнал, который излучает этот источник, не только низкочастотный, но также и узкополосный. Однако способ не

ограничен съемкой с этим конкретным источником. В соответствии с другими вариантами осуществления могут использовать другие типы низкочастотных источников.

Согласно альтернативному варианту осуществления зуммерный или узкополосный источник реализован с использованием варианта осуществления источника, который описан и заявлен в заявке на патент США № 14/515223 "Система и способ управления резонансной частотой с активной обратной связью", поданной 15 октября 2014 г. от имени авторов изобретения Марка Фрэнсиса Льюсьена Харпера и Джозефа Энтони Деллингера. В этом варианте осуществления источник включает в себя поршень-излучатель с низким коэффициентом трения, совершающий возвратно-поступательные движения с резонансной частотой, которой управляет двусторонняя регулируемая газовая пружина. В соответствии с одним вариантом осуществления для герметизации гидростатической изоляции поршень-излучатель изолируют от внешнего давления жидкости при помощи внешней жидкости (как правило, морской воды). Баланс между внешним и внутренним давлением жидкости определяет частоту колебаний поршня-излучателя. Внутреннее давление жидкости обеспечивает пара газовых пружин. Жесткостью первой газовой пружины управляет не один, а два прессовых поршня, они воздействуют на поршень газовой пружины, который соединен с поршнем-излучателем. Эта управляемая газовая пружина работает параллельно со второй, фиксированной (т.е., не управляемой) газовой пружиной, которая представляет собой корпус этого устройства.

Пара прессовых поршней на контакте с управляемой газовой пружиной обеспечивают две степени свободы, которые могут быть использованы при работе этого устройства. Для управления резонансной частотой источника необходима только одна степень свободы. Вторую степень свободы могут использовать для управления центром колебаний поршня газовой пружины и, таким образом, плавучестью источника. Управление плавучестью источника позволяет буксировать его на более постоянной глубине. В некоторых вариантах осуществления процесс обратной связи, аналогичный тому, в котором для управления резонансной частотой используют прессовые поршни, может быть задействован, чтобы использовать прессовые поршни также и для одновременного управления плавучестью и для достижения желательной постоянной глубины буксировки.

В соответствии с одним вариантом осуществления в проект профиля свип-сигнала, т.е. в расчетные траектории двух прессовых поршней на контакте с управляемой газовой пружиной, может быть включена дополнительная степень свободы. Расчетные траектории описывают, как прессовые поршни должны двигаться с течением времени во время свип-сигнала. Как указано выше, одна стратегия состоит в проектировании траекторий для поддержания постоянной плавучести во время свип-сигнала. Эта стратегия может быть также использована для сохранения центра колебаний поршня газовой пружины в пределах доступного окна перемещений, что позволяет ей достигать максимальной амплитуды во время колебаний и при этом поддерживать минимальный требуемый предел безопасности в обеих крайних точках перемещения.

Однако в соответствии с другими вариантами осуществления, где постоянная плавучесть не является проблемой, дополнительная степень свободы может быть использована для изменения акустических свойств свип-сигнала, например для максимального понижения или максимального повышения излучаемых гармоник основного тона. Это требует использования дополнительной степени свободы для такого регулирования свойств управляемой газовой пружины, чтобы сделать совместное влияние всех параллельно работающих пружин, которые вместе управляют резонансным движением поршня, соответственно либо более, либо менее линейным. Точные данные о том, как достичь этого, будут зависеть от конструкции конкретного используемого устройства.

Существуют также другие стратегии, позволяющие поддерживать колебания поршня газовой пружины в его доступном окне перемещения, и они могут быть использованы по отдельности или в сочетании с другими стратегиями. Измерения перемещения поршня могут быть использованы в контуре обратной связи с целью коррекции глубины буксировки в реальном времени. В одном примере осуществления изобретения при опасности столкновения поршня с внешним пределом перемещения, глубина буксировки будет увеличена путем приложения большего наружного давления и перемещения поршня в обратном направлении. При опасности столкновения поршня с внутренним пределом перемещения, глубина буксировки будет снижена аналогичным способом - перемещением поршня наружу.

Для обеспечения "объемного управления" устройством вместо одного профиля может быть использовано несколько профилей с разными амплитудами. В одном варианте осуществления, где границы движения поршня не поддерживают достаточно точно (например, из-за волнения на море, проблем с буксировочным оборудованием или по причине неопытности операторов), могут быть использованы менее жесткие низкоамплитудные профили, которые обеспечивают больший зазор на обоих концах хода поршня. Тогда скорость буксировки можно регулировать вместе с амплитудой профиля, чтобы поддерживать на "пунктах взрыва" постоянное отношение сигнал-помеха. В одном примере осуществления низкоамплитудный профиль может быть компенсирован выделением большего времени на "пункт взрыва", что требует использования профиля большей продолжительности, а это, в свою очередь, требует меньшей скорости буксировки для того, чтобы этот более длинный профиль соответствовал одному "пункту взрыва" по критерию Найквиста.

Показано, что низкочастотные источники 103 буксируют на больших глубинах; в некоторых вариантах осуществления будут буксировать множество низкочастотных источников, каждый из них - на глубине, подходящей для его частотного диапазона. Таким образом, чем больше глубина буксировки, тем ниже частота зуммерного источника или узкополосного свип-источника. Например, можно обратиться к патенту США № 12/291221 или патенту США № 7257049, где описана взаимосвязь между глубиной и частотой съемки. Для некоторых типов источников существующий частотный диапазон смещается вверх с увеличением глубины, например, потому что повышение давления воды увеличивает резонансную частоту этого источника. Таким образом, в соответствии с другими вариантами осуществления низкочастотные источники будут буксировать на меньшей глубине, несмотря на то, что это будет вызывать большее ослабление за счет отражения волн-спутников, обусловленных поверхностью.

Возможно множество вариантов этой системы съемки, и их разработка с помощью этого раскрытия изобретения находится в пределах возможностей специалистов в данной области. Данная система съемки, представленная на фиг. 1, может собирать 2D, 3D или 4D данные. Наряду с донными морскими сейсмическими косами или одиночными приемниками могут быть использованы другие системы регистрации, включая "одиночные приемники на тросах", приемники, расположенные в скважине, приемники, подвешенные к беспилотным роботам Wave Gliders, приемники, плавающие в толще воды, вертикальные косы или низкочастотные косы, буксируемые на глубине. В соответствии с одним вариантом осуществления одиночные приемники на тросах - это донные морские одиночные приемники, которые имеют независимые блоки регистрации с автономным питанием, "нанизанные" на тросы, которые используют для их развертывания. Варианты проектирования распределения нескольких судов также будут понятны специалистам в данной области техники, которые оценят преимущества от использования настоящего изобретения.

Низкочастотная узкополосная съемка может быть проведена одновременно с традиционной высокочастотной широкополосной съемкой, или за отдельный проход, или за несколько отдельных проходов. Либо сначала может быть проведена низкочастотная узкополосная съемка, а позднее более высокочастотная широкополосная съемка. Либо низкочастотная узкополосная съемка может быть использована в дополнение к ранее проведенной традиционной более высокочастотной съемке таким образом, что первоначальные данные будут переобработаны вместе с дополнительными низкочастотными данными.

В соответствии с одним вариантом осуществления низкочастотные данные могут быть использованы для расширения полосы частот традиционных более высокочастотных данных, посредством этого будут получены изображения с расширенной полосой частот. По расширенным данным может быть повторно получено изображение с использованием той же скоростной модели, что и раньше.

В соответствии с другим вариантом осуществления низкочастотная узкополосная съемка может быть проведена на участке, который оказался сложным для получения изображения с использованием имеющихся традиционных, более высокочастотных, данных. Низкочастотные узкополосные данные затем могут быть использованы в полноволновой инверсии для построения улучшенной скоростной модели, а затем она может быть уточнена с использованием имеющихся данных традиционной, более высокочастотной, съемки. Затем уточненная скоростная модель может быть использована для повторного получения изображения по имеющимся сейсмическим данным традиционной, более высокочастотной, съемки, что даст улучшенное изображение.

Эти два варианта осуществления также могут быть использованы в сочетании, так что низкочастотная узкополосная съемка сначала может быть использована для улучшения скоростной модели, а затем для расширения полосы частот данных, по которым изображение повторно получают с использованием улучшенной скоростной модели.

Низкочастотные источники 103 могут работать непрерывно. Каждый из низкочастотных источников 103 может работать на одной частоте или попеременно на двух или нескольких дискретных частотах ("зуммерные" низкочастотные источники), либо на изменяемых во времени частотах в узкополосном диапазоне низких частот, которые предназначены для расширения диапазона частот, причем эту полосу частот создают широкополосные источники ("создание узкополосного свип-сигнала" низкочастотными источниками). Источники могут создавать волны с постоянной амплитудой, либо амплитуду волн могут изменять (увеличивать или уменьшать).

В представленном варианте осуществления два низкочастотных источника 103 излучают зуммерный сигнал на частотах, соответственно, 1.4 и 2.72 Гц. В соответствии с другими вариантами осуществления может быть использован один источник, одновременно излучающий зуммерный сигнал на первой (основной) и второй гармониках 1.4 и 2.8 Гц, или один источник может попеременно излучать на частотах 1.4 и 2.72 Гц. В соответствии с другим вариантом осуществления такой вариант может быть реализован с использованием альтернативных частот в диапазонах, которые описаны в этом документе.

Перейдем к узкополосной съемке со свип-сигналами; в этом случае не пытаются изменять свип-сигнал в достаточно широкой полосе частот, чтобы получить поддающееся интерпретации сейсмическое изображение только по полученным данным. Напротив, данные обрабатывают, чтобы обеспечить достаточно отношение сигнал-помеха для полноволновой инверсии. Так, например, мы можем изменять свип-сигнал в диапазоне двух октав - от 2 до 8 Гц. Минимальная приемлемая ширина полосы частот для

изображения, пригодного для интерпретации, составляет приблизительно три октавы.

Далее целесообразно, чтобы для предотвращения нежелательной интерференции гармоник между сейсмическими источниками было выбрано смещение частот зуммерных источников. Например, если в теории предполагают, что следует использовать источники, которые излучают волны с частотой 1.0 и 2.0 Гц, во избежание конфликта частот одного источника со второй гармоникой другого может быть предпочтительным использовать вместо этого частоты 0.9 и 2.1 Гц. При необходимости можно расширить гармоники или субгармоники на выходе зуммерного или узкополосного источника, используя гармоники или субгармоники в качестве дополнительных зуммерных источников. Так, например, один источник может одновременно создавать волны с частотой 1.4 и 2.8 Гц.

В некоторых вариантах осуществления системы регистрации имеется недостаток в виде "звона" - помех, которые создает регистрирующее электронное оборудование, обычно на небольшом количестве дискретных частот. Следует уделять должное внимание тому, чтобы до развертывания определить страдает ли от "звона" система регистрации, которую предполагают использовать, а также измерить ее параметры. Некоторое оборудование, которое используют в поле, также может создавать мощную энергию на конкретных дискретных частотах. В идеале, параметры помех окружающей среды на будущем участке съемки должны быть измерены до начала съемки с тем, чтобы определить какие частоты могут иметь локальные искажения за счет антропогенных помех. В рамках проектирования съемки частоты зуммерных источников следует выбирать такими, чтобы избежать тех частот, которые сильно "загрязнены" узкополосными помехами либо от окружающей среды, либо от регистрирующего оборудования.

При использовании множества узкополосных низкочастотных источников 103 они могут работать независимо или одновременно. Узкополосные низкочастотные источники 103 могут работать непрерывно или периодически. Каждый узкополосный низкочастотный источник 103 регистрирует сигнал, который излучает, поскольку эту информацию будут использовать при обработке собранных данных. Приемники могут осуществлять регистрацию непрерывно. В некоторых вариантах осуществления местоположения всех источников и приемников также будут регистрировать непрерывно.

Во время съемки судно 106 с источниками буксирует низкочастотные источники 103 вдоль профилей 118 возбуждения (показан только один). В представленном варианте осуществления шаг S_s между пунктами возбуждения вдоль профиля относительно велик по сравнению с традиционными съемками. В данном случае "относительно велико/большое" в этом конкретном варианте осуществления означает "приблизительно до 400 м"; это больше, чем в традиционных съемках, но ближе к критерию Найквиста для частот приблизительно 2 Гц или ниже. Профили возбуждения располагают так, что по сравнению с традиционными работами удаления источник-приемник очень большие. В данном случае относительно большие удаления источник-приемник составляют приблизительно до 30 км. В соответствии с другими вариантами осуществления могут использовать профили возбуждения, расположенные с большим шагом, без больших удалений источник-приемник, или профили возбуждения с очень большими удалениями источник-приемник.

В контексте настоящего документа термин "с большим шагом/на большом расстоянии" используют в смысле, противоположном термину "расположенные плотно/на небольшом расстоянии". Термин "расположенные плотно/на небольшом расстоянии" означает дискретизацию в соответствии с широко известным критерием Найквиста. Таким образом, термин "с большим шагом/на большом расстоянии" обозначает дискретизацию, которая не отвечает критерию Найквиста.

В некоторых вариантах осуществления приемники могут быть расположены ближе друг к другу вдоль направления инлайна, чем в направлении вдоль кросслайна, при этом профили возбуждения ориентированы параллельно направлению вкрест приемным профилям. То есть, направление вдоль профилей возбуждения – это направление вкрест к приемным профилям, а направление вкрест к профилям возбуждения - это направление вдоль приемных профилей. Дополнительную информацию об этом конкретном проектировании можно найти в заявке на патент США, которая имеет приоритет в соответствии с предварительной заявкой № 62/086362, которая называется "Массивы головных волн в морских сейсмических съемках" и была подана настоящим в тот же день от имени авторов изобретения Эндрю Дж. Брендерса и др., обе они имеют одного и того же правообладателя.

Низкочастотные сейсмические источники 103 также буксируют на большой глубине и, в результате "тяжелой буксировки", под большим углом. В проиллюстрированном варианте осуществления "большая глубина" составляет не менее 30 м, но в разных вариантах осуществления она может быть разной, например от ~30 до ~60 м или в некоторых вариантах осуществления до ~100 м. Для целей настоящего раскрытия изобретения угол буксировки - это отклонение буксирного троса от вертикали, причем эта вертикаль перпендикулярна к усредненной поверхности 121 моря. В проиллюстрированном варианте осуществления большой угол буксировки - это ~10° от вертикали, но в разных вариантах осуществления он может быть другим.

При угле буксировки, достаточно близком к вертикали, тяжелая буксировка может создавать вибрации, вызванные образованием вихревых потоков (VIV); это явление известно в данной области техники. Известны способы подавления VIV, но их может быть недостаточно, если эти вибрации становятся

довольно сильными. Таким образом, точные величины при буксировке под большим углом будут разными в зависимости от варианта осуществления, например угол буксировки, сила VIV, количество и эффективность способов подавления VIV (если они есть), которые используют. Специалисты в данной области техники, которые понимают преимущества от использования настоящего изобретения, могут также понять и оценить другие факторы. Так, угол "буксировки под большим углом" - это угол, который достаточно близок к вертикали, чтобы вибрации, вызванные образованием вихревых потоков (VIV), начали вызывать проблемы. Заметим, что использование способов подавления VIV может оказывать влияние на величину угла при буксировке под большим углом.

Как указано выше, судно 106 с источниками может задействовать способ подавления VIV. В данной области техники известно несколько таких способов; можно использовать любой подходящий способ. Однако в варианте осуществления на фиг. 4 использован, а на фиг. 5 представлен один такой нетрадиционный способ. Заметим, что в варианте 400 осуществления, который представлен на фиг. 4, источник 103 буксируют с кормы 405 или за судном 106' с источниками, а не с борта, как описано выше. Специалисты в данной области техники, которые понимают преимущества настоящего раскрытия изобретения, легко смогут адаптировать этот способ для использования в вариантах осуществления, в которых используют буксировку с борта, а не с кормы.

Буксировочное устройство 500, показанное на фиг. 5, обычно содержит лебедку 505, компенсатор 510 вертикальной качки и шкив 515 за бортом. В состав шкива 515 за бортом входит неподвижный шкив 520, к которому на кабеле 555 подвешен свободный шкив 525. Лебедка 505 через свободный шкив 525 поднимает и спускает на шлангокабеле 530 источник 103. Свободное вращение свободного шкива 525, обозначенное стрелкой 535, обеспечивает подвешивание свободного шкива 525 на фиксированном шкиве 520. Свободное движение кабеля 555, обозначенное стрелкой 540, традиционным способом обеспечивает компенсатор 510 вертикальной качки.

Только что описанное устройство отделяет систему 545 подвески (т.е., в данном варианте осуществления лебедку 505, фиксированный шкив 520 и свободный шкив 525) от системы 550 компенсации вертикальной качки (т.е., в этом конкретном варианте осуществления компенсатор 510 вертикальной качки). Следовательно, компенсация вибрации "непрямая" по сравнению с традиционными работами, в которых компенсацию вибрации применяют непосредственно к буксирному тросу. Такое разделение, помимо прочего, позволяет управлять движением свободного шкива 525 при помощи системы 550 компенсации вертикальной качки с кабелем 555, который имеет меньшую толщину, чем шлангокабель 530. В некоторых вариантах осуществления такое разделение облегчает также подъем сейсмического источника 103 из воды на буксирном 530 тросе без использования овершота (инструмента-ловителя). В представленном варианте осуществления это также устраняет с пути троса механическое окончание, связанное с электронно-оптическим шлангокабелем, и, как правило, повышает надежность буксирного троса. Специалистам в данной области техники, понимающим преимущества данного раскрытия изобретения, будут понятны другие положительные стороны и преимущества такого разделения.

Вернемся к фиг. 5; шлангокабель 530 заключен в защитную трубу 560, которая подавляет VIV. В представленном варианте осуществления защитная труба 560 содержит волокнистый материал, который рассеивает в шлангокабеле 530 энергию и гасит колебания, которые вызваны движением шлангокабеля 530 относительно толщи 127 воды, в частности, связанные с движением судна 106' с источниками. Волокнистый материал может быть, например, рыхлым плетеным волокном или волокном с бахромой, либо любой другой системой подавления VIV, известной в данной области техники.

Защитная труба 560 со шлангокабелем 530 будет слишком толстой, чтобы проходить через компенсатор вертикальной качки в традиционной системе. Заметим, что одно из преимуществ разделения системы 545 подвески от системы 550 компенсации вертикальной качки состоит в том, что движением свободного шкива 525 можно управлять при помощи компенсатора 510 вертикальной качки с использованием троса 555, который тоньше, чем шлангокабель 530. Трос 555 достаточно тонкий и проходит через систему компенсации вертикальной качки. Итак, другое преимущество такого разделения состоит в том, что оно позволяет использовать защитную трубу 560 вместе с шлангокабелем 530.

В соответствии с другим вариантом осуществления (не показан) шлангокабель 530 заменяют на буксирный трос. Буксирный трос вместе с защитной трубой 560 для подавления VIV тоже слишком толстый и не проходит через систему компенсации вертикальной качки. Буксирный трос нагружен весом источника 103, но в отличие от шлангокабеля не служит для электропитания или телеметрии. Для этих целей с судна развешивают отдельный шлангокабель (не показан). Шлангокабель обычно не нагружен весом устройства, и во избежание его сильного натяжения может быть развернут дополнительный шлангокабель. Тем самым, шлангокабель меньше подвержен нежелательным вибрациям, вызванным образованием вихревых потоков (VIV), хотя в некоторых вариантах осуществления подавление VIV будет также использовано для не сильно натянутого шлангокабеля, чтобы стабилизировать его движение в толще воды. Шлангокабель должен быть плавучим (чтобы избежать переплетения с источником 103) и в некоторых вариантах осуществления может быть достаточно прочным, чтобы выдерживать вес устройства - тогда его можно использовать для развешивания и извлечения, а также в качестве альтернативной поддержки системы в случае выхода из строя системы 545 подвески или буксирного троса 530.

Различие между буксировкой с борта и буксировкой с кормы в основном сводится к экономическим соображениям. Для буксировки с борта требуется большой неподвижный кран. Суда, например водолазные суда и суда обеспечения строительных работ, оборудованные такими кранами, известны в данной области техники и представлены на рынке. Однако они довольно дорогие. Буксировку с кормы могут выполнять суда обеспечения, которые менее дорогие, чем водолазные суда и суда обеспечения строительных работ.

Вернемся к фиг. 1; во время съемки источник(и) 103 излучают в толщу 127 воды один или несколько описанных выше сейсмических сигналов 124, которые проходят через дно 112 моря и затем взаимодействуют с подземной толщей 130. Затем измененные сейсмические сигналы 133 распространяются обратно (возвращаются) на группу 136 приемников, которые установлены на дне 112 моря, как описано выше. Одиночные приемники 115 улавливают сейсмические сигналы 133 и регистрируют их как сейсмические данные. Затем зарегистрированные сейсмические данные передают на вычислительный центр 139. Эту передачу могут осуществлять, например, в виде копии на магнитной ленте 142 или через спутник 145.

Как описано выше, в раскрываемом здесь способе используют низкочастотные источники и в некоторых вариантах осуществления могут использовать и другие типы источников. В разных частотных диапазонах разные типы источников (например, импульсные по сравнению со свип-источниками) могут работать лучше. В условиях, где свип-источники (устройства, которые излучают сигнал с непрерывно изменяющейся частотой) работают лучше, оптимальными могут быть разные их типы (широкополосные или узкополосные). Таким образом, могут существовать условия, в которых может быть целесообразно использование больше, чем одного типа источников или режима работы.

Таким образом, в некоторых вариантах осуществления низкочастотный источник могут использовать в сочетании с импульсным источником, а именно, пневмопушками. Сила звука пневмопушки больше, чем у согласованного свипа от низкочастотного устройства, по меньшей мере, для частот выше приблизительно 4 Гц. На более низких частотах порог микросейсмических фоновых помех постоянно возрастает и на уровне ниже приблизительно 2 Гц становится преобладающим фактором. Затем в определенный момент становится полезной узкополосная зуммерная съемка, которая описана выше. В некоторых вариантах осуществления вместо монохромного зуммера могут даже использовать очень узкополосный свип-сигнал (например, 1.7-1.8 Гц).

Варианты осуществления с использованием зуммерных источников могут также разделять "зуммерные" свип-сигналы. Например, одно устройство может непрерывно излучать зуммерный сигнал на конкретной частоте, тогда как другое устройство излучает зуммерный сигнал на другой конкретной частоте. На других частотах, которые не настолько ограничены фоновыми помехами, один низкочастотный источник может охватывать две или более частот путем их циклического перебора, излучения зуммерного сигнала одного тона, затем другого и пр. Если доступно множество низкочастотных источников, в некоторых вариантах осуществления могут развертывать их и собирать данные одновременно, принимая меры предосторожности, если устройства имеют перекрывающиеся частоты.

Однако в зуммерной съемке не нужно использовать перекрывающиеся частоты. Поэтому частоты могут быть разделены при помощи полосовой фильтрации. В этом случае перекрытие может быть только между верхним диапазоном низкочастотного свип-источника и нижним диапазоном пневмопушки. Низкочастотные источники и пневмопушки почти наверняка будут развертывать с разных судов, поскольку требования к буксировке у них неодинаковы. (Вероятно, пневмопушки будут буксировать те же суда, которые буксируют сейсмические косы.) Даже если это будет не так, пневмопушки и низкочастотные источники следует разделять при помощи способов работы с синхронными источниками; в этих способах используют значительные отличия в формах импульса пневмопушек и низкочастотных свип-источников. Если съемку с пневмопушками выполняют в другое время, разделение несложное.

На фиг. 6 представлена спектрограмма съемки с "одновременным использованием зуммерных, импульсных и свип-источников". Заметим, что разные источники в любом сочетании могут срабатывать одновременно или могут быть разделены по времени. Некоторое количество широкополосных (~6-100 Гц) импульсных сигналов 600 указывает на срабатывание пневмопушек. Все сигналы (свип-сигналы 610 (2-8 Гц), бихроматические (двухтоновые) зуммерные сигналы 620 (0.98 и 1.4 Гц) и монохромный зуммерный сигнал 630 (0.7 Гц)) создает низкочастотный источник, такой как описан выше.

Монохромные зуммерные сигналы имеют преимущество - они "вкладывают" максимально возможную энергию источника сейсмических колебаний в конкретную частоту. Если во время обработки данные разделяют на "пункты взрыва", существует полная свобода в том, как это делать: параметром обработки становится шаг между пунктами взрыва по инлайну. Однако недостаток состоит в том, что для обработки полученных в результате данных может быть нужно внести изменения в "старый" граф обработки, в котором предполагали, что сигналы дискретны, "пункты взрыва" не перекрываются, а источники во время "взрыва" неподвижны.

Преимущество двухтоновых зуммерных сигналов заключается в том, что один источник за один проход может эффективно обеспечивать два чередующихся профиля возбуждения. Еще одно их преимущество состоит в том, что их легко приспособить к "старым" графам полноволновой инверсии, пред-

назначенным для данных импульсных пневмопушек; но чтобы получить это преимущество, двухтоновый зуммер должен быть надлежащим образом спроектирован.

Рассмотрим предлагаемый двухтоновый зуммерный источник с частотами 1.55 и 2 Гц, который будут развертывать с судна с источниками, которое движется со скоростью 4 узла (~ 2 м/с). Каждая частота должна быть повторена прежде, чем источник пройдет большее расстояние, чем требуемый шаг дискретизации пунктов взрыва по инлайну для этой частоты. Более высокая частота требует более мелкого шага дискретизации, чем низкая частота, поэтому управляющей является верхняя частота 2 Гц. При частоте 2 Гц шаг дискретизации для волн, которые распространяются в воде со скоростью 1500 м/с, составляет 375 м. Источник проходит это расстояние за $375 \text{ м} / 2 \text{ м/с} = 187.5 \text{ с}$, это устанавливает верхний предел длительности полного двухтонового зуммерного сигнала.

Если нужно иметь возможность аппроксимировать источник как стационарный в период времени одночастотного зуммерного сигнала, за это время следует пройти не больше, чем приблизительно половину расстояния по критерию Найквиста. Таким образом, для верхней частоты 2 Гц максимальное расстояние, которое пройдет источник, должно составить приблизительно $375 \text{ м} / 2 = 187.5 \text{ м}$; источник, который движется со скоростью 4 узла, пройдет это расстояние приблизительно за 94 с. Для более низкой частоты 1.55 Гц шаг дискретизации по Найквисту составляет $\sim 484 \text{ м}$; источник, который движется со скоростью 4 узла, пройдет это расстояние приблизительно за 242 с, а половину этого расстояния приблизительно за 121 с.

Обычно желательно, чтобы отношение сигнал-помеха на двух частотах было приблизительно одинаковым. Если отношение сигнал-помеха снижается со скоростью приблизительно 30 дБ на октаву, $2.0/1.55$, это ~ 0.37 октав, тогда уменьшение отношения сигнал-помеха от самой высокой до самой низкой частоты составляет приблизительно 30 умножить на 0.37, т.е. 11 дБ. Источник всегда работает со своей максимальной амплитудой, поэтому единственный способ получить 11 дБ состоит в том, чтобы увеличить период времени накопления сигнала. Повторные циклы источника когерентно суммируются (линейно за время накопления сигнала). Помехи за более длительное время тоже суммируются, но некогерентно (как квадратный корень времени накопления сигнала), так что отношение сигнал-помеха увеличивается как квадратный корень времени накопления сигнала. 11 дБ - это амплитудный множитель ~ 3.56 , квадрат этой величины составляет ~ 12.7 , это означает, что для получения одинакового отношения сигнал-помеха длительность работы на нижней частоте должна быть в 12.7 раз больше, чем на верхней частоте.

На практике если две эти частоты относительно близки друг к другу, такое отношение недостижимо, поскольку нужно также обеспечить достаточную паузу для полного затухания стоячих волн в геологической среде, которые на конкретной частоте создает зуммерный источник; при этом сигналы от соседних "пунктов взрыва" на этой частоте не перекрываются. Для глубоководной части Мексиканского залива это время составляет от 20 до 40 с. Поэтому на практике мы отводим свип-сигналу на нижней частоте насколько возможно больше времени, а затем излучение на верхней частоте происходит достаточно долго, чтобы заполнить минимальную паузу, которая необходима между последовательными зуммерными сигналами на нижней частоте. В этом случае двухтоновый зуммерный сигнал должен состоять из 121 с на частоте 1.55 Гц, за чем следует приблизительно 30 с на частоте 2 Гц.

Другое проектное решение состоит в выборе скорости переключения с одной частоты на другую. Отчасти она будет зависеть от физических ограничений (насколько быстро устройство способно изменить частоту), но можно также выбирать более медленный переход от частоты к частоте, чем это физически необходимо, чтобы получить некоторые преимущества узкополосного свип-сигнала.

В диапазоне частот, который необходим для достижения геофизических целей и который определяют путем моделирования, имеет значение достижение отношения сигнал-помеха. В лучшем случае уровни помех могут быть оценены только заранее. Помехи окружающей среды на частотах ниже приблизительно 2 Гц изменяются в зависимости от состояния моря, которое зависит от погоды. Погоду невозможно точно спрогнозировать надолго вперед и при проектировании съемки желательно учитывать эту неизвестную изменчивость. Так, например, проектирование съемки может дать серию профилей с переменными амплитудами, длинами и скоростями буксировки, с выбором профиля/профилей, которые следует использовать в данный день в поле в зависимости от, например, состояния моря, измеренных и оцененных уровней помех и точности управления глубиной буксировки. Этот пример служит только для иллюстрации общих принципов проектирования. Выбор разных частот, оценки тренда отношения сигнал-помеха, требуемых минимальных и максимальных скоростей судна с источником и пр. будет давать разные результаты.

Вернемся к концепции съемки с одновременным использованием зуммерных, импульсных и свип-источников; в некоторых вариантах осуществления для обработки традиционный массив широкополосных данных объединяют с одним или несколькими массивами данных низкочастотной зуммерной съемки и массивами узкополосной съемки со свип-источниками. Один или несколько массивов данных низкочастотной зуммерной съемки, один или несколько массивов данных узкополосной съемки со свип-источниками, и традиционные массивы широкополосных данных могут быть собраны (в результате

съемки) в любом порядке. В частности, они могут быть собраны последовательно, или с чередованием профилей возбуждения, или с чередованием в пределах профиля возбуждения, либо могут быть собраны одновременно и разделены с использованием любого из стандартных способов, известных специалистам в данной области техники; либо можно использовать любое сочетание этих способов. Один или несколько массивов данных могут быть "старыми" данными, полученными ранее для других целей.

В некоторых вариантах осуществления массив "традиционных широкополосных" данных может быть получен с использованием в качестве источников не пневмопушек, а широкополосных источников другого типа, например морской акустической системы, которая излучает широкополосный псевдослучайный шум. В соответствии с другими вариантами осуществления "традиционные широкополосные" источники могут быть свип-источниками, которые излучают сигналы в достаточном диапазоне, чтобы считать их широкополосными, либо могут использовать сочетание свип-источников, которые вместе дают широкую полосу частот. В этом случае весь необходимый диапазон частот может быть покрыт только зуммерными и свип-источниками (фиг. 6).

В морской съемке с одновременным использованием зуммерных, импульсных и свип-источников или зуммерных и свип-источников приемники могут быть одиночными донными морскими приемниками или морскими донными косами, но также могут быть морскими косами, подвешенными к беспилотным роботам приемниками Wave Gliders, приемниками в скважине и пр. В некоторых вариантах осуществления регистрацию разных источников могут выполнять отдельные приемники. Например, импульсные широкополосные сейсмические сигналы могут регистрировать традиционными косами (которые могут иметь достаточно низкие помехи на частотах выше приблизительно 6 Гц, что достаточно для этой цели), а зуммерный и свип-сигналы - одиночными морскими донными приемниками или косами с низким уровнем помех, буксируемыми на большой глубине.

Несмотря на описание с точки зрения морских съемок, специалисты в данной области техники легко поймут, что эта концепция съемки с одновременным использованием зуммерных, импульсных и свип-источников или зуммерных и свип-источников может быть также успешно применена к наземным съемкам с наземными вибраторами вместо зуммерных и свип-источников, динамитом вместо импульсных источников и геофонами вместо приемников.

В одном конкретном варианте осуществления низкочастотные сейсмические данные, полученные как описано выше, обрабатывают в соответствии с раскрытием в заявке на патент США № 14/525451, которая называется "Двухэтапное создание скоростной модели", которая подана 28 октября 2014 г. от имени авторов изобретения Эндрю Дж. Брендерса и Джозефа Э. Деллингера (номер дела 500453). В соответствии с раскрытием в этой заявке процесс применим к разработке моделей всякого рода свойств геологической среды. Специалисты в данной области техники, понимающие преимущества настоящего раскрытия изобретения, поймут как модифицировать описанную здесь съемку с тем, чтобы включить раскрываемые здесь принципы, и как применить раскрываемый способ обработки к полученным сейсмическим данным.

Другой способ съемки изложен в заявке на патент США № 13/327524 "Сейсмическая съемка с использованием узкополосных сейсмических источников", поданной 15 декабря 2011 от имени авторов изобретения Джозефа Э. Деллингера и др., и опубликованной 21 июня 2012 г. как публикация патента США 2012/0155217. Специалисты в данной области техники, понимающие преимущества настоящего раскрытия изобретения, также поймут, как модифицировать описанную здесь съемку с тем, чтобы включить раскрываемые здесь принципы.

Следующие заявки на патент и патенты включены в настоящий документ посредством ссылки на те части, которые перечислены, и для указанных целей, как если бы они были изложены здесь дословно.

Заявка на выдачу патента США № 14/525451 "Двухэтапное создание скоростной модели", поданная 28 октября 2014 г. от имени авторов изобретения Эндрю Брендерса и Джозефа Деллингера (номер дела 500453) - за принципы, касающиеся обработки и представленные в настоящем документе на фиг. 1 и 7 и в сопутствующем тексте, конкретнее в параграфах [0025]-[0064] и [0079]-[0111].

Заявка на выдачу патента США № 13/327524 "Сейсмическая съемка с использованием узкополосных сейсмических источников", поданная 15 декабря 2011 г. от имени авторов изобретения Joseph A. Dellinger и др., опубликована 21 июня 2012 г. как опубликованный патент США 2012/0155217, и настоящим совместно уступает в отношении идей, связанных с получением данных (съемками), находящихся в параграфах [0024]-[0040], [0054]-[0059], [0065]-[0088] и модифицированными, как изложено в настоящем документе.

Патент США № 6,975,560 "Геофизический способ и оборудование", выданный 13 декабря 2005 г. компании BP Corporation North America Inc. как правопреемнику авторов изобретения Эйвинда В. Берга и др. - за принципы, касающиеся развертывания одиночных приемников с подвесного устройства при помощи ROV и, в частности, принципы от столбца 1, строки 30 до столбца 2, строки 9; от столбца 2, строки 21 до столбца 3, строки 37; от столбца 4, строки 57 до столбца 5, строки 16; от столбца 5, строки 27 до столбца 8, строки 45, а также чертежи, на которые ссылается настоящий документ.

Патент США № 8387744 "Морские сейсмические источники", выданный 5 марта 2013 г. компании BP Corporation North America Inc. как правопреемнику авторов изобретения Марка Харпера и др. - за

принципы, касающиеся проектирования и работы зуммерного и узкополосного сейсмического источника - со столбца 5 строки 62 до столбца 12 строки 46.

Заявка на выдачу патента США № 14/515223 "Система и способ управления резонансной частотой с активной обратной связью", поданная 15 октября 2014 г. от имени авторов изобретения Марка Фрэнсиса Льюиса Харпера и Джозефа Энтони Деллингера.

Заявка на выдачу патента США, которая имеет приоритет в соответствии с предварительной заявкой № 62/086362 "Массивы головных волн в морских сейсмических съемках" и была подана в тот же день от имени авторов изобретения Эндрю Дж. Брендерса и др. (номер дела 500444), обе они имеют одного и того же правообладателя.

Там, где какой-либо патент, заявка на выдачу патента, либо документ, введенный в качестве ссылки, противоречит раскрытию (описанию) данного изобретения, данное изобретение превалирует.

В некоторых местах в описании изобретения использовано определение "приблизительно" или его математический эквивалент - символ "~". Это является признанием факта, который будет понятен специалистам в данной области техники, что в данной области деятельности точные числа могут быть другими. Например, при буксировке низкочастотных сейсмических источников течения, температуры, содержание солей и другие условия окружающей среды могут изменяться в период между развертыванием и извлечением, что затрудняет достижение и поддержание желательных числовых значений некоторых рабочих параметров. Таким же образом, параметры этого типа будут разными на разных участках работ, как и числовые значения разных величин. Специалисты в данной области техники, понимающие преимущества настоящего раскрытия изобретения, поймут изменения такого типа, и поймут приблизительные величины, и что они означают на месте строгих числовых значений.

Там, где настоящий документ ссылается на способ, который состоит из двух или более определенных стадий, эти определенные стадии могут быть выполнены в любом порядке или одновременно (за исключением случаев, когда контекст исключает такую возможность), и этот способ может также включать одну или более других стадий, которые выполняют до любой из определенных стадий, между двумя определенными стадиями, или после всех определенных стадий (за исключением случаев, когда контекст исключает такую возможность).

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 морской сейсмической съемки, причем этот способ включает в себя размещение группы приемников, в которой расстояние между одиночными приемниками на дне моря ≥ 400 м с по меньшей мере одним удалением источник-приемник ≥ 15 км, где по меньшей мере одно удаление источник-приемник представляет собой расстояние между сейсмическим источником и одиночным приемником из группы приемников;

буксировку сейсмического источника при помощи буксировочного троса с борта судна и на глубине ≥ 30 м вертикально ниже судна вдоль множества профилей возбуждения с расстоянием ≥ 400 м между ними;

компенсацию вертикальной качки судна для подавления вызванных вихрями вибраций в буксировочном тросе при буксировке сейсмического источника с борта судна и на глубине ≥ 30 м вертикально ниже судна и

передачу множества низкочастотных сейсмических сигналов, имеющих частоту < 4 Гц, от источника сейсмических колебаний по мере буксировки источника сейсмических колебаний вдоль профилей возбуждения.

2. Способ по п.1, в котором размещение группы приемников включает в себя размещение группы приемников, в которой множество одиночных приемников расположены на дне моря на расстоянии друг от друга ≥ 750 м по меньшей мере по одной оси;

3. Способ по п.2, в котором размещение группы приемников, в которой одиночные приемники расположены на расстоянии ≥ 750 м друг от друга, включает в себя размещение группы приемников, в которой расстояние между одиночными приемниками на дне моря составляет ~ 2 км по меньшей мере по одной оси.

4. Способ по п.1, в котором размещение группы приемников, в которой одиночные приемники расположены по меньшей мере с одним удалением источник-приемник ≥ 15 км, включает в себя размещение группы приемников, в которой одиночные приемники расположены по меньшей мере с одним удалением источник-приемник величиной от ~ 15 до ~ 30 км.

5. Способ по п.1, в котором буксировка источника сейсмических колебаний на глубине ≥ 30 м вклю-

чает в себя буксировку источника на глубине от ~30 до ~60 м.

6. Способ по п.1, в котором буксировка источника сейсмических колебаний включает в себя буксировку источника, причем буксировочный трос отклоняется на $\leq \pm 10^\circ$ от вертикали, которая перпендикулярна дну моря.

7. Способ по п.1, в котором буксировка источника сейсмических колебаний включает в себя остановку судна, с которого буксируют источник;

передачу сейсмических сигналов с источника сейсмических колебаний в пункте, в котором остановлено судно.

8. Способ по п.1, в котором передача сейсмических сигналов включает в себя передачу некоторого количества сейсмических сигналов от источника сейсмических колебаний в одном пункте.

9. Способ морской сейсмической съемки, причем этот способ включает в себя

размещение группы приемников, в которой расстояние между одиночными приемниками на дне моря ≥ 750 м вдоль по меньшей мере одной оси с по меньшей мере одним удалением источник-приемник ≥ 15 км, где по меньшей мере одно указанное удаление источник-приемник представляет собой расстояние между сейсмическим источником и одиночным приемником из группы приемников;

буксировку источника сейсмических колебаний при помощи буксировочного троса с борта судна и на глубине ≥ 30 м вертикально ниже судна вдоль множества профилей возбуждения;

компенсацию вертикальной качки судна для подавления вызванных вихрями вибраций в буксировочном тросе при буксировке сейсмического источника с борта судна и на глубине ≥ 30 м вертикально ниже судна и

передачу множества сейсмических сигналов от источника сейсмических колебаний по мере буксировки источника сейсмических колебаний вдоль профилей возбуждения.

10. Способ по п.9, в котором размещение группы приемников включает в себя размещение группы приемников, в которой множество одиночных приемников расположено на дне моря на расстоянии друг от друга ≥ 2 км по меньшей мере по одной оси.

11. Способ по п.10, в котором размещение группы приемников, в которой одиночные приемники расположены на расстоянии ≥ 2 км друг от друга на дне моря вдоль по меньшей мере одной оси, причем этот способ включает в себя размещение группы приемников, в которой расстояние между одиночными приемниками на дне моря ~4 км по меньшей мере по одной оси.

12. Способ по п.9, в котором размещение группы приемников, в которой одиночные приемники расположены по меньшей мере с одним удалением источник-приемник ≥ 15 км, включает в себя размещение группы приемников, в которой одиночные приемники расположены по меньшей мере с одним удалением источник-приемник до ~30 км.

13. Способ морской сейсмической съемки, причем этот способ включает в себя

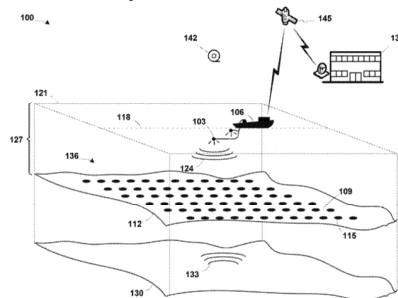
размещение группы приемников на дне моря с по меньшей мере одним удалением источник-приемник ≥ 15 км, где по меньшей мере одно указанное удаление источник-приемник представляет собой расстояние между сейсмическим источником и одиночным приемником из группы приемников;

буксировку источника сейсмических колебаний при помощи буксировочного троса с борта судна и на глубине ≥ 30 м вертикально ниже судна вдоль множества профилей возбуждения с расстоянием ≥ 400 м между ними;

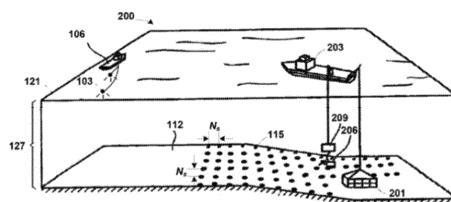
компенсацию вертикальной качки судна для подавления вызванных вихрями вибраций в буксировочном тросе при буксировке сейсмического источника с борта судна и на глубине ≥ 30 м вертикально ниже судна и

передачу множества сейсмических сигналов от источника сейсмических колебаний по мере буксировки источника сейсмических колебаний вдоль профилей возбуждения.

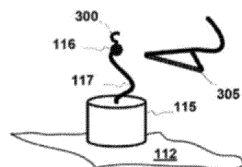
14. Способ по п.13, в котором буксировка источников сейсмических колебаний вдоль множества профилей возбуждения включает в себя буксировку источников сейсмических колебаний вдоль множества профилей возбуждения с расстоянием между ними ≥ 750 м.



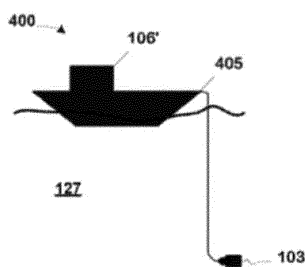
Фиг. 1



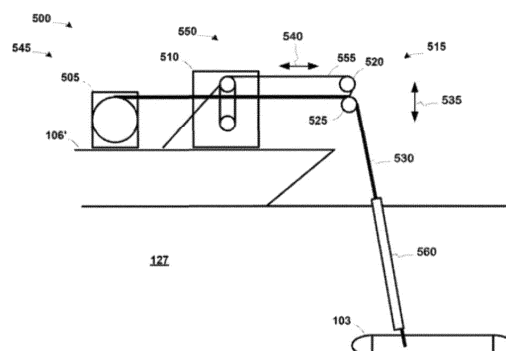
Фиг. 2



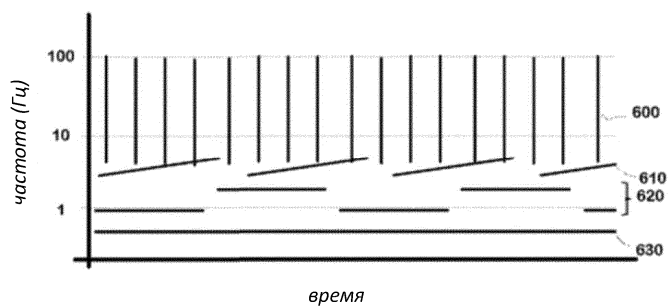
Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6

