

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(21) **202192926** (13) **A1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ**

(43) Дата публикации заявки  
2022.03.24

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

(22) Дата подачи заявки  
2020.04.06

(54) **4D СОВМЕСТНАЯ ИНВЕРСИЯ ВРЕМЕННОГО СДВИГА И АМПЛИТУДЫ ДЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ**

(31) 62/842,286

(72) Изобретатель:

(32) 2019.05.02

**Чжан Тинтин, Ло Саймон, Юсифов  
Анар (US)**

(33) US

(86) PCT/US2020/026853

(87) WO 2020/222975 2020.11.05

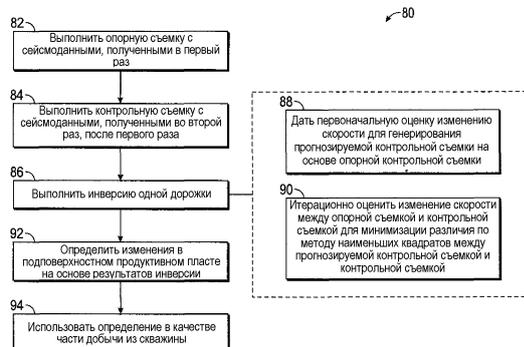
(74) Представитель:

(71) Заявитель:

**БП КОРПОРЕЙШН НОРТ  
АМЕРИКА ИНК. (US)**

**Веселицкий М.Б., Веселицкая И.А.,  
Кузенкова Н.В., Каксис Р.А., Белоусов  
Ю.В., Куликов А.В., Кузнецова Е.В.,  
Соколов Р.А., Кузнецова Т.В. (RU)**

(57) В заявке описан способ выполнения инверсии одной дорожки для определения изменений в подповерхностной зоне, включающий получение дорожки опорной сейсмограммы и дорожки контрольной сейсмограммы подповерхностной зоны в различные моменты времени. При осуществлении способа генерируют прогнозируемую дорожку контрольной сейсмограммы на основе дорожки опорной сейсмограммы посредством процедуры, в которой сообщают дорожке опорной сейсмограммы временной сдвиг, полученный из оценки изменений скорости, возникающих между дорожкой опорной сейсмограммы и дорожкой контрольной сейсмограммы, компенсируют изменения амплитуды между дорожкой опорной сейсмограммы и дорожкой контрольной сейсмограммы, причем изменениям амплитуды сообщают временной сдвиг, и минимизируют различие между прогнозируемой дорожкой контрольной сейсмограммы и дорожкой контрольной сейсмограммы итеративной оценкой изменений скорости для получения окончательной оценки изменений скорости. Изменения по меньшей мере части подповерхностной зоны могут быть определены с использованием окончательной оценки изменений скорости.



**A1**

**202192926**

**202192926**

**A1**

#### 4D СОВМЕСТНАЯ ИНВЕРСИЯ ВРЕМЕННОГО СДВИГА И АМПЛИТУДЫ ДЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ

5

##### Уровень техники

Настоящая заявка претендует на приоритет предварительной патентной заявки US 62/842286, поданной в патентное ведомство США 2 мая 2019 г. под названием "4D совместная инверсия временного сдвига и амплитуды для  
10 изменения скорости", раскрытие которой полностью включено в настоящую заявку посредством ссылки.

Настоящее раскрытие в целом относится к идентификации изменений в подповерхностной зоне Земли за некоторый промежуток времени, с использованием результатов сейсмической съемки. Настоящее раскрытие также  
15 относится к совмещению сейсмических изображений, представляющих одну и ту же область подповерхностной зоны во время сейсмической съемки.

Настоящий раздел предназначен для ознакомления читателя с различными аспектами существующего технического уровня, которые могут относиться к различным особенностям настоящего изобретения, описываемым и/или  
20 заявленным ниже. Представляется, что настоящее рассмотрение будет полезно для ознакомления читателя с информацией по предмету изобретения и обеспечит лучшее понимание различных особенностей настоящего изобретения. Соответственно, данная информация должна восприниматься именно с этой точки зрения, а не как описание достижений уровня техники.

Сейсмическая съемка обычно включает генерирование изображения или карты подповерхностной зоны Земли посредством отправки в геологическую среду звуковой энергии и записи отраженной звуковой энергии,  
возвращающейся от геологических слоев в подповерхностной зоне. В процессе сейсмической съемки, источник энергии помещается в различные места на  
30 поверхности Земли или над ней в области, где могут находиться залежи углеводородов. При каждой активизации источника, он генерирует сейсмический сигнал (например, звуковую волну), который распространяется вниз под Землей, отражается и, при возвращении записывается с использованием одного или более приемников, расположенных на подповерхностной зоне Земли

или над ней. Зарегистрированные приемниками сейсмические данные далее могут быть использованы для создания изображения или профиля соответствующей подповерхностной зоны.

Со временем, по мере извлечения углеводородов из подповерхностной зоны Земли, может меняться расположение, насыщенность и другие характеристики углеводородного продуктивного пласта (например, перекрывающие породы, интервал ствола скважины) внутри подповерхностной зоны. Поэтому, представляется полезным определить, как меняется со временем изображение или карта подповерхностной зоны с тем, чтобы ввести изменения в деятельность, относящуюся к извлечению углеводородов, для повышения эффективности добычи углеводородов из подповерхностной зоны Земли.

#### Сущность изобретения

Ниже приводится краткое изложение существа раскрытых здесь некоторых вариантов осуществления. Следует иметь в виду, что приводимые особенности служат в качестве краткого изложения существа этих конкретных вариантов осуществления и не предназначены для ограничения области притязаний раскрытия. В действительности, настоящее раскрытие может охватывать различные особенности, которые могут быть и не упомянуты ниже.

Представлен способ инверсии одной дорожки для оценки изменения скорости по совокупности 4D сейсмических данных из подповерхностной зоны. Совокупность 4D сейсмических данных включает данные двух 3D съемок одной и той же области, выполненных в два разных момента времени – опорной съемки, или съемки исходного состояния, и контрольной съемки. Опорная съемка и контрольная съемка, каждая имеют дорожки сейсмограммы, показывающие, каким образом происходит отражение сейсмических волн внутри подповерхностной зоны. Изменения скорости сейсмических волн, используемые для 3D съемки, приводят к временному сдвигу на дорожках сейсмограмм. Изменения амплитуды между дорожками опорной съемки и контрольной съемки могут быть результатом изменения скорости и/или изменения плотности. В некоторых случаях, если изменение плотности пренебрежимо мало, причиной как временного сдвига, так и изменений амплитуды будет изменение скорости.

Метод инверсии одной дорожки в одном или более вариантах осуществления использует две совокупности 3D сейсмических данных (включая

дорожку сейсмограммы опорной съемки и дорожку сейсмограммы контрольной съемки) и оценку сейсмического импульса для продуктивного пласта подповерхностной зоны. Целевая функция, используемая для инверсионного процесса, определяется минимизацией по методу наименьших квадратов. В 5 частности, в одном или более вариантах осуществления минимизируется различие наименьших квадратов между прогнозируемой дорожкой сейсмограммы контрольной съемки (контрольной сейсмограммы) и наблюдаемой дорожкой контрольной сейсмограммы (где различие выражено целевой функцией). Изменение скорости, выраженное в целевой функции, 10 определяется итерацией для минимизации различия по методу наименьших квадратов между прогнозируемой дорожкой контрольной сейсмограммы (генерируемой на основе дорожки сейсмограммы опорной съемки) и наблюдаемой дорожкой контрольной сейсмограммы. Генерированная прогнозируемая дорожка контрольной сейсмограммы обычно имеет две части. 15 Одна часть сообщает временной сдвиг (возникающий от изменения прогнозируемой скорости) дорожке сейсмограммы опорной съемки (опорной сейсмограммы), а другая часть компенсирует изменение амплитуды от дорожки сейсмограммы исходного состояния к дорожке контрольной сейсмограммы с прогнозируемым изменением скорости. Коррекция временного сдвига также 20 применяется к изменению амплитуды.

Как только оценка изменения скорости достигает точки, где различие между прогнозируемой дорожкой контрольной сейсмограммы и наблюдаемой дорожкой контрольной сейсмограммы достигает порогового значения или становится меньше него, прогнозируемое изменение скорости может быть 25 использовано для оценки изменений в исследуемой подповерхностной зоне. В частности, может быть сгенерирована карта изменений скорости в подповерхностной зоне для оценки изменений в этой зоне между моментом времени, когда была сделана опорная съемка, и моментом времени, когда проводится контрольная съемка.

### 30 Краткое описание чертежей

Различные особенности настоящего раскрытия будут более понятны при ознакомлении с приведенным далее подробным описанием и ссылками на чертежи, на которых:

на фиг. 1 представлена блок-схема различных процессов, которые могут быть осуществлены на основе анализа сейсмических данных, полученных посредством системы сейсмической разведки, в соответствии с представленными вариантами осуществления;

5 на фиг. 2 схематически представлен вид сбоку примера осуществления системы морской съемки в морских условиях;

на фиг. 3 схематически представлен вид сбоку примера осуществления системы наземной съемки в наземных условиях;

10 на фиг. 4 представлена блок-схема примера осуществления вычислительной системы, пригодной для выполнения описанных здесь операций на основе данных, полученных системой морской съемки, показанной на фиг. 2, и/или системой наземной съемки, показанной на фиг. 3;

15 на фиг. 5 представлена блок-схема варианта осуществления способа определения изменений в подповерхностной зоне посредством инверсии одной дорожки, выполненной над совокупностью 4D данных сейсмической съемки;

на фиг. 6 в схематичной форме показан пример метода использования в настоящем раскрытии целевой функции для генерирования прогнозируемой дорожки контрольной сейсмограммы на основе дорожки опорной сейсмограммы, с использованием прогнозируемого изменения скорости;

20 на фиг. 7А-7В представлено сравнение между моделью истинной скорости и моделью, полученной в соответствии с инверсией одной дорожки согласно настоящему раскрытию;

25 на фиг. 8А и 8Б представлено сравнение моделей скорости, когда изменения амплитуды не имеют временного сдвига и когда изменения амплитуды подвержены временному сдвигу;

на фиг. 9 приведен график изменения плотности и изменения скорости в виде функции материалов продуктивного пласта;

30 на фиг. 10 приведено сравнение результатов, полученных в примерах инверсии с использованием целевой функции, где для учета изменения плотности не используется скалярный множитель, и инверсии с использованием целевой функции, где для учета изменения плотности скалярный множитель используется.

### Подробное описание осуществления изобретения

Ниже приводится описание одного или более частных вариантов осуществления. В стремлении дать краткое описание этих вариантов осуществления в настоящем описании приводятся не все признаки практической реализации. Следует понимать, что разработка любой такой практической реализации, как в любом инженерном проекте, так и в опытно-конструкторской работе, для достижения конкретных целей разработки требует решения многочисленных специфичных для реализации задач, например, соблюдение различных системных или коммерческих ограничений, которые могут меняться от одного исполнения к другому. Более того, следует понимать, что подобные опытно-конструкторские разработки могут быть сложными и продолжительными, но при этом будут представлять собой стандартный набор процессов конструирования, изготовления, массового производства, осуществляемых специалистами, ознакомившимися с настоящим раскрытием.

Как было показано выше, обработка сейсмических данных может дать ценную информацию, касающуюся подповерхностных зон Земли, например, расположение и характеристики залежей углеводородов. Сейсмические данные, полученные в течение некоторого времени, также могут быть обработаны для оценки того, как эти зоны могут изменяться со временем (преобразовываться), например, из-за добычи углеводородов. На основе изменений во времени геологического горизонта Земли и расположения и характеристик углеводородных залежей, деятельность по добыче углеводородов может быть подвергнута корректировке, для более эффективного извлечения углеводородов.

Один способ получения более точных данных, представляющих геологические продуктивные горизонты, включает осуществление, в соответствии с настоящим раскрытием, способа инверсии одной дорожки для оценки скорости, на основе совокупности 4D сейсмических данных. Вообще, совокупность 4D сейсмических данных согласно настоящему раскрытию включает по меньшей мере две 3D съемки одной и той же области/участка в двух или более разных моментах времени. Для простоты изложения, рассматриваются две 3D съемки, проведенные в разные моменты времени. В настоящем описании, термином "инверсия" обозначается процесс, в котором

производится оценка модели подповерхностной зоны на основе полученных сейсмических данных (например, результатов сейсмических съемок).

Одна из 3D съемок (например, первая съемка) может считаться опорной сейсмической съемкой, или "опорной съемкой", а другая из 3D съемок (например, вторая съемка) может считаться контрольной сейсмической съемкой, или "контрольной съемкой". Опорная съемка и контрольная съемка обе включают соответствующие наборы дорожек сейсмограммы, а дорожки сейсмограммы каждой из съемок представляют анализируемую подповерхностную зону в соответствующий момент времени (или период времени). В соответствии с настоящими вариантами осуществления, опорная съемка выполняется перед контрольной съемкой. Таким образом, различия между съемками показывают изменения в исследуемой подповерхностной зоне, а контрольная съемка может быть выполнена для оценки изменений в подповерхностной зоне за некоторый период времени после опорной съемки, например, для оценки того, как добыча углеводородов повлияла на подповерхностную зону.

Более конкретно, изменения в подповерхностной зоне за период между моментом опорной съемки и моментом контрольной съемки повлекут за собой изменения в распространении сейсмических волн через эту зону. Например, изменения в подповерхностной зоне могут включать изменения материалов в этой зоне, что может повлиять на скорость распространения сейсмических волн через зону и характер отражения сейсмических волн. Соответственно, дорожки сейсмограммы опорной съемки и контрольной съемки могут отличаться в отношении амплитуды различных пиков сейсмических волн, и могут отличаться по времени, когда эти пики приняты приемниками, которые генерируют каждую отдельную дорожку сейсмограммы. Каждая дорожка сейсмограммы может включать последовательность точек, и каждая из этих точек может соответствовать скорости сейсмической волны для этой точки. Может быть проведена оценка различия в скорости в данной точке между дорожкой опорной сейсмограммы и дорожкой контрольной сейсмограммы для определения, например, изменений в подповерхностной зоне в месте, соответствующем этой точке.

В соответствии с настоящими вариантами осуществления, может быть выполнен сдвиг дорожек опорной сейсмограммы до совпадения с дорожками контрольной сейсмограммы для оценки локальных изменений скорости. Как показано в настоящем описании, считается, что изменения скорости

5 представляют, в данной точке на дорожке сейсмограммы, изменение скорости сейсмической волны между опорной сейсмической съемкой и контрольной сейсмической съемкой в данной точке. Изменение скорости в точке на дорожке сейсмограммы может быть выражено математически как разница скорости между опорной съемкой и контрольной съемкой в этой точке, деленная на

10 скорость в опорной съемке в этой точке.

Локальные изменения скорости могут быть использованы совместно для оценки изменений в подповерхностной зоне. В частности, локальные изменения скорости могут в целом считаться результатом изменения сейсмического отражателя в этом месте. При этом может быть сформирована карта изменений

15 скорости в подповерхностной зоне для демонстрации изменений материалов в зоне с течением времени. Это, в свою очередь, позволит откорректировать процессы добычи для повышения эффективности подземных операций, например, извлечения углеводородов.

Сдвигание дорожки опорной сейсмограммы для совмещения с дорожкой контрольной сейсмограммы может быть выполнено использованием процесса, в котором изменения скорости между данными отдельных точек опорной и контрольной дорожек оцениваются итерационным процессом. Итерации

20 проводятся, пока различие между опорной и контрольной дорожками не будет снижено до заданного порогового значения. Как только таким путем будет достигнут минимум различия, изменения скорости могут быть использованы для

25 построения упомянутой выше карты скоростей.

В одном или более вариантах осуществления может выполняться минимизация различия (выраженного через целевую функцию) посредством реализации алгоритма оптимизации методом наименьших квадратов. Этот

30 алгоритм оптимизации может учитывать изменения между опорной съемкой и контрольной съемкой, возникающие из-за временного сдвига и из-за изменений амплитуды.

В частности, для обновления различных моделей скорости сейсмических волн, сейсмических изображений, карт характеристик продуктивных пластов и т.д., вычислительная система может использовать характеристики изменений скорости для более точного определения мест расположения и свойств различных геологических горизонтов внутри подповерхностной зоны Земли. По существу, разведка на залежи углеводородов (например, бурение, выбор мест бурения, добыча) может быть усовершенствована модификацией работ в соответствии с обновленными местами и свойствами углеводородных залежей внутри подповерхностной зоны, в соответствии с обновленными моделями скорости или обновленными сейсмическими изображениями.

Сразу следует заметить, что сейсмические данные могут быть получены с использованием большого числа разных систем и способов сейсмической разведки, два из которых рассмотрены со ссылкой на фиг. 2 и 3. Вне зависимости от использованного способа сбора сейсмических данных, после того, как данные получены, вычислительная система может провести анализ этих данных, и может использовать результаты анализа сейсмических данных (например, сейсмограммы, карту геологических продуктивных горизонтов) для выполнения различных операций в области разведки углеводородов и производственной сфере. Например, на фиг. 1 показана блок-схема способа 10, раскрывающая различные процессы, которые могут быть проведены на основе анализа полученных сейсмических данных. Хотя описание способа 10 приводится в определенном порядке, отмечается, что осуществление способа 10 может проводиться в любом подходящем порядке.

На фиг. 1, в шаге 12, на основе анализа сейсмических данных могут быть определены места расположения и свойства месторождений углеводородов в подповерхностной зоне Земли, ассоциированные с соответствующей сейсмической съемкой. В одном варианте осуществления, сейсмические данные, полученные с использованием нескольких источников и приемников или в различные моменты времени, могут быть подвергнуты анализу для построения карты или профиля, иллюстрирующего различные геологические формации в подповерхностной зоне.

На основе идентифицированных местоположений и свойств месторождений углеводородов, в шаге 14 могут быть исследованы определенные места или

части подповерхностной зоны. Другими словами, организации, занимающиеся разведкой углеводородов, могут использовать местоположения месторождений углеводородов для выбора на поверхности подповерхностной зоны участков для буровых работ. При этом организации, проводящие разведку углеводородов, могут использовать местоположения и свойства месторождений углеводородов, и соответствующих покрывающих пород для определения трассы бурения, параметров бурения и т.д.

После того, как разведочное оборудование было установлено в пределах подповерхностной зоны, на шаге 16 углеводороды, хранящиеся в месторождении углеводородов, могут быть добыты через скважины естественного фонтанирования, скважины с механизированной добычей и т.д. На шаге 18 добытые углеводороды могут транспортироваться на нефтеперегонные заводы и тому подобное, посредством транспортных средств, трубопроводов и т.д. На шаге 20, добытые углеводороды могут быть подвергнуты обработке посредством различных процессов переработки для получения разных продуктов, использующих углеводороды.

Отмечается, что процессы, рассмотренные со ссылкой на способ 10, могут включать другие подходящие процессы, которые могут быть основаны на расположении и свойствах месторождений углеводородов, определяемых сейсмическими данными, собранными посредством одной или больше сейсмических съемок. Нужно понимать, что сами по себе описанные выше процессы не предполагают существование исчерпывающего перечня процессов, которые могут быть выполнены после определения расположений и свойств месторождений углеводородов в подповерхностной зоне. Например, действия, представленные шагом 12, также могут включать получение и анализ дополнительных сейсмических данных, например, полученных позднее, для оценки изменений в данном подповерхностном продуктивном пласте (например, на основе оценки изменений скорости), для более эффективного извлечения углеводородов).

С учетом сказанного, рассмотрим на фиг. 2 систему 22 морской съемки (например, для использования в сочетании с шагом 12 на фиг. 1), которая может быть использована для сбора сейсмических данных, относящихся к подповерхностной зоне Земли в морской акватории. Вообще, морская

сейсмическая съемка, использующая систему 22 морской съемки, может проводиться в океане 24 или другом водном массиве над подповерхностной зоной 26 Земли, лежащей под морским дном 28.

Система 22 морской съемки может включать судно 30, сейсмический источник 32, сейсмическую косу 34, приемник 36 и/или другое оборудование, которое может быть полезным в сборе сейсмических изображений, представляющих геологические горизонты в подповерхностной зоне 26 Земли. Судно 30 может буксировать сейсмический источник 32 (например, решетку пневматических пушек) которая может генерировать энергию, например, акустические волны (например, сейсмические колебания), направленные на морское дно 28. Судно 30 также может буксировать сейсмокосу 34, имеющую приемник 36 (например, гидрофоны), которые могут принимать сейсмические колебания (волны), представляющие энергию выходных колебаний сейсмических источников 32 после их отражений от различных геологических образований в подповерхностной зоне 26. Хотя приемник 36 описан как буксируемый судном 30, в некоторых вариантах осуществления приемник 36 также может быть расположен на поверхности морского дна 28. Кроме того, хотя описанная система 22 морской съемки включает один сейсмический источник 32 (на фиг. 2 изображенный в виде решетки воздушных пушек) и один приемник 36 (на фиг. 2 представленный в виде множества гидрофонов), отмечается, что система 22 морской съемки может включать большое число сейсмических источников 32 и большое число сейсмических приемников 36. Аналогично, хотя система 22 морской съемки описана выше в отношении одной сейсмокосы (сейсморазведочного кабеля) 34, надо иметь в виду, что система 22 морской съемки может включать большое число сейсморазведочных кабелей 34. Кроме того, дополнительные суда 30 могут иметь дополнительные источники 32, сейсмокосы 34 и тому подобное, для осуществления работы системы съемки.

На фиг. 3 представлен вариант осуществления наземной системы 38 съемки (например, для использования в сочетании с шагом 12 на фиг. 1), которая может быть использована для получения информации, относящейся к подповерхностной зоне 26 Земли для неморских условий. Система 38 наземной съемки может включать наземный сейсмический источник 40, расположенный на поверхности 42 Земли, и один или более наземных приемников 44, также

расположенных на поверхности 42 (или другом подходящем месте). В некоторых вариантах осуществления, система 38 наземной съемки может включать более одного сейсмических источников 40 и первый и второй приемники 44 и 46. Для целей рассмотрения, на фиг. 3 показаны один наземный сейсмический источник 40 и два сейсмических приемника 44 и 46. Наземный сейсмический источник 40 может генерировать энергию (например, акустические волны, сейсмические колебания), направленные на подповерхностную зону 26 Земли. При достижении различных геологических образований (например, соляных куполов, разрывов, складок и т.д.) в подповерхностной зоне 26, энергия выходных колебаний наземного сейсмического источника 40 может отражаться от этих геологических образований (в частности, границ раздела между разными материалами породы) и собираться или регистрироваться одним или более наземными приемниками (например, 44 и 46) в качестве исходных сигналов.

В некоторых вариантах осуществления, наземные приемники 44 и 46 могут быть распределены по поверхности 42, образуя сетчатую структуру. При этом каждый наземный приемник 44 или 46 может принимать, сигнал, соответствующий отраженному сейсмическому колебанию в ответ на энергию, направленную в подповерхностную зону 26 от сейсмического источника 40. В некоторых случаях, одно сейсмическое колебание, генерированное сейсмическим источником 40, может отразиться от разных геологических образований и может быть принято разными приемниками. Например, как показано на фиг. 3, сейсмический источник 40 может генерировать выходное колебание, энергия которого направлена в подповерхностную зону 26 в виде сейсмической волны 48. Первый приемник 44 может принять отражение сейсмической волны 48 от одного геологического образования, а второй приемник 46 может принять отражение сейсмической волны 48 от другого геологического образования. Таким образом, первый приемник 44 может принять первое отраженное сейсмическое колебание 50, а второй приемник 46 может принять второе отраженное сейсмическое колебание 52.

Принятые данные для каждого из этих каналов (первый и второй приемники 44, 46) могут быть обработаны для получения набора дорожек сейсмограммы. Набор дорожек сейсмограммы по всем приемникам, используемым в системе 38 в данное время (например, первый период времени),

может рассматриваться как совокупность дорожек сейсмограммы, соответствующих данной сейсмической съемке. Сейсмические съемки могут проводиться в различные моменты времени для оценки изменений в подповерхностном продуктивном пласте.

5           Вне зависимости от того, каким образом были собраны сейсмические данные, вычислительная система (например, для использования в сочетании с шагом 12 на фиг. 1) может выполнить анализ сигналов (сейсмических колебаний), полученных приемниками 36 морского базирования и приемниками 44 и 46 наземного базирования, для определения информации, относящейся к геологической структуре, расположению и свойствам месторождений углеводородов и т.п. внутри подповерхностной зоны 26. На фиг. 4 приведен пример такой вычислительной системы 60, которая может выполнять различные операции по анализу данных для изучения сейсмических данных, собранных приемниками 36, 44, 46 для определения структуры и/или оценки изменений сейсмических свойств геологических формаций в подповерхностной зоне 26. Фактически, в настоящем рассмотрении вычислительная система 60 запрограммирована для выполнения корректировок сейсмической съемки, инверсии дорожек сейсмограмм и описанных процедур анализа.

20           Как показано далее на фиг. 4, вычислительная система 60 может включать коммуникационный компонент 62, процессор 64, запоминающее устройство 66, устройство 68 хранения данных, порты 70 ввода/вывода (I/O), дисплей 72 и тому подобное. Коммуникационный компонент 62 может быть беспроводным или проводным компонентом, который может обеспечивать связь между приемниками 36, 44, 46, одной или более базами 74 данных, другими вычислительными устройствами, и другими устройствами, обладающими возможностью связи. В одном варианте осуществления, вычислительная система 60 может принимать данные 76 (например, сигналы, сейсмические данные, сейсмограммы, дорожки сейсмограмм), которые ранее могли быть получены сейсмическими приемниками через сетевой компонент, базу данных 74 или т.п. 25           Процессор 64 вычислительной системы 60 может анализировать или обрабатывать приемные данные 76 для определения различных признаков, относящихся к геологическим формациям в подповерхностной зоне 26 Земли. 30

Процессор 64 может быть компьютерным процессором или микропроцессором любого типа, способным исполнять компьютерную программу. Процессор 64 может также включать несколько процессоров, которые могут выполнять описанные ниже операции. Запоминающее устройство 5 66 и устройство 68 хранения данных могут быть любым подходящим готовым изделием, которое может служить средой для хранения исполняемого процессором машиночитаемого кода (программы), данных, и т.д. Эти готовые изделия могут представлять собой машиночитаемую среду (например, любую подходящую форму для запоминания и хранения данных), которая может 10 хранить исполняемую процессором программу, используемую процессором 64 для осуществления раскрываемых здесь способов. Вообще, процессор 64 может исполнять программные приложения, которые включают программы обработки сейсмических данных, собираемых посредством приемников сейсмической системы, в соответствии с описанными здесь вариантами осуществления.

Запоминающее устройство 66 и устройство 68 хранения данных могут быть 15 использованы для сохранения данных, анализа данных, программных приложений и т.д. Запоминающее устройство 66 и устройство 68 хранения данных может быть представлено энергонезависимым машиночитаемым носителем (например, запоминающим устройством или устройством хранения 20 данных в любой подходящей форме), который может хранить исполняемую процессором 64 программу для осуществления различных методов, приведенных в настоящем раскрытии. Следует иметь в виду, что энергонезависимость просто означает, что среда является материальным носителем, а не сигналом.

Портами 70 ввода-вывода могут быть интерфейсы, которые могут 25 соединяться с другими периферийными компонентами, в частности, устройствами ввода (например, клавиатурой, мышью), датчиками, модулями ввода/вывода (I/O) и т.п. Порты 70 (I/O) могут обеспечить связь вычислительной системы 60 с другими устройствам в системе 22 морской съемки, системе 38 наземной съемки или другими, через порты 70 (I/O).

Дисплей 72 может отображать изображения, связанные с ПО или 30 исполняемыми программами, обработка которых производится процессором 64. В одном варианте осуществления, дисплеем 72 может быть тачскрин дисплея, позволяющий вводить данные пользователю вычислительной системы 60.

Дисплей 72 также может быть использован для просмотра и изучения результатов анализа собранных сейсмических данных для определения геологических формаций внутри подповерхностной зоны 26, расположения и свойств месторождений углеводородов в подповерхностной зоне 26 и т.п.

5 Дисплеем 72 может быть дисплей любого подходящего типа, например, жидкокристаллический дисплей (LCD), плазменный дисплей или дисплей на органических светодиодах (OLED). Следует также отметить, что помимо упомянутого здесь отображения посредством дисплея 72, вычислительная система 60 также может осуществлять отображение посредством других  
10 материальных средств, например, на бумаге (посредством печати) и др.

С учетом сказанного, описанный здесь способ также может быть осуществлен с применением суперкомпьютера, использующего несколько вычислительных систем 60, систему облачных вычислений, или иные средства для распределения процессов по большому числу вычислительных систем. В  
15 этом случае, каждая вычислительная система 60, работающая как часть суперкомпьютера, может и не включать каждый компонент, упомянутый как часть вычислительной системы 60. Например, каждая вычислительная система 60 может не включать компонент 72 отображения, поскольку большое число компонентов 72 отображения могут оказаться бесполезными для  
20 суперкомпьютера, предназначенного для непрерывной обработки сейсмических данных.

После выполнения различной обработки сейсмических данных, вычислительная система 60 может сохранять результаты анализа в одной или более базах 74 данных. Базы 74 данных могут быть связаны передачей сигналов  
25 с сетью, которая может обмениваться данными с вычислительной системой 60 посредством коммуникационного компонента 62. Кроме того, базы данных 74 могут хранить информацию, относящуюся к подповерхностной зоне 26, например, ранее полученные сейсмограммы, данные геологических проб, сейсмические изображения, дорожки сейсмограмм и т.п., полученные при  
30 съемке подповерхностной зоны 26.

Хотя описанные выше компоненты были рассмотрены применительно к вычислительной системе 60, надо заметить, что вычислительная система 60 может состоять из аналогичных компонентов. Более того, вычислительная

система 60 может быть частью системы 22 морской съемки или системы 38 наземной съемки, и может осуществлять наблюдение и управление некоторыми операциями источников 32 или 40, приемников 36, 44, 46 и др. Кроме того, нужно заметить, что перечисленные компоненты приведены в качестве примера, и описываемые здесь варианты осуществления не ограничены компонентами, описанными со ссылкой на фиг. 4.

В некоторых вариантах осуществления, вычислительная система 60 может вырабатывать двухмерное представление или трехмерное представление подповерхностной зоны 26 на основе сейсмических данных, полученных посредством упомянутых выше приемников. Помимо этого, сейсмические данные, ассоциированные с комбинациями нескольких источников/приемников, могут быть объединены для создания почти непрерывного профиля подповерхностной области 26, которая может простираться на некоторое расстояние. В двухмерной (2-D) сейсмической съемке места размещения приемников могут быть расположены вдоль одной линии, в то время как в трехмерной (3-D) съемке точки размещения приемников могут быть распределены по поверхности в виде сетчатой структуры. При этом 2-D сейсмическая съемка может давать картину поперечного сечения (вертикальный срез) слоев Земли, расположенных непосредственно под точками записи. 3-D сейсмическая съемка, напротив, может создавать "куб" или объем данных, который может соответствовать 3-D картине подповерхностной зоны 26.

Кроме этого, 4-D сейсмическая съемка (периодическая съемка) может включать сейсмические данные, полученные многократной 3-D съемкой. Используя разные сейсмические изображения, полученные в разные моменты времени, вычислительная система 60 может сравнить два изображения для обнаружения изменений в подповерхностной зоне 26.

В любом случае, сейсмическая съемка может быть составлена из очень большого числа отдельных сейсмических записей или дорожек сейсмограмм. При этом, вычислительная система 60 может быть использована для анализа собранных сейсмических данных для получения изображения, создающего представление о подповерхностной зоне 26, и для определения расположения и свойств месторождений углеводородов, а также изменений, происходящих во времени в подповерхностной зоне 26 (например, из-за добычи углеводородов).

Различные алгоритмы обработки сейсмических данных могут храниться и использоваться вычислительной системой 60, например, для удаления шумов из полученных сейсмических данных, переноса предварительно обработанных сейсмических данных, идентификации сдвигов между большим числом сейсмических изображений, совмещения большого числа сейсмических изображений и т.д.

После того, как вычислительная система 60 провела анализ собранных сейсмических данных, результаты анализа сейсмических данных (например, сейсмограммы, сейсмические изображения, карты геологических формаций и т.д.) могут быть использованы для выполнения различных операций в разведке и добыче углеводородов. Например, как было описано выше, собранные сейсмические данные могут быть использованы для осуществления способа 10 на фиг. 1, где подробно указаны различные процессы, которые могут быть выполнены на основании анализа собранных сейсмических данных.

Таким образом, установлено, что используя любую систему или комбинацию систем, описанных выше применительно к фиг. 2-4, можно применить методы инверсии одной дорожки в оценке изменений скорости для 4D совокупности сейсмических данных. 4D совокупность сейсмических данных в основном включает по меньшей мере две совокупности 3D сейсмических данных, полученных в одном поле наблюдения в два разных момента времени. На фиг. 5 показан вариант осуществления способа 80 выполнения инверсии одной дорожки для оценки изменений скорости с последующим определением характеристик подповерхностной зоны Земли на основе этих оценок. В качестве примера, способ 80 может быть осуществлен отчасти или полностью вычислительной системой 60, показанной на фиг. 4.

Способ 80 в основном включает получение 4D совокупности сейсмических данных подповерхностной зоны, показанное, как получение (шаг 82) результатов опорной съемки с сейсмическими данными в первый момент времени и получение (шаг 84) результатов контрольной съемки с сейсмическими данными во второй момент времени, позже первого момента. В частности, опорная съемка может быть проведена перед добычей углеводородов из подповерхностной зоны, а контрольная съемка после добычи некоторого количества углеводородов. Настоящее раскрытие, однако, не ограничено такими случаями, и опорная и

контрольная съемки могут проводиться в любом из по меньшей мере двух моментов времени относительно процесса добычи углеводородов из подповерхностной зоны.

5 Как показано в настоящем раскрытии, сейсмические данные, полученные для опорной и контрольной съемок, в основном предусматривают сбор и/или  
обработку сейсмических данных для формирования последовательности дорожек сейсмограмм. Другими словами, опорная сейсмическая съемка ассоциирована с набором опорных сейсмограмм, а контрольная сейсмическая  
10 съемка ассоциирована с набором контрольных сейсмограмм. Необходимо отметить, что получение таких данных согласно действиям в шагах 82 и 84 может включать выполнение самих измерений (например, отправки колебаний в подповерхностную зону и сбор результирующих колебаний) или, в некоторых случаях, может включать выборку данных (например, например, с использованием компьютерной системы 60) из базы 74 данных. Кроме того, в  
15 некоторых вариантах осуществления, действия из шагов 82 и 84 могут просто представлять прием собранных опорных и контрольных сейсмических данных. Дорожки опорных сейсмограмм и дорожки контрольных сейсмограмм обычно представляют геологические характеристики подповерхностной зоны на момент времени проведения соответствующей съемки. Точнее говоря, дорожки  
20 сейсмограмм показывают, каким образом сейсмические колебания искажаются от своего исходного состояния из-за изменений коэффициента отражения при распространении колебаний по подповерхностной трассе от источника к детектору. Изменения коэффициента отражения обычно связаны с изменениями в материале, через который проходят сейсмические волны, или границами раздела, где происходит отражение или преломление сейсмического импульса.  
25

Таким образом, в соответствии с настоящими вариантами осуществления, действия, представленные шагами 82 и 84, могут сформировать дорожки опорных сейсмограмм и дорожки контрольных сейсмограмм. Как было показано выше, настоящее раскрытие включает метод инверсии одной дорожки, где  
30 модифицируются индивидуальные дорожки опорных сейсмограмм для получения соответствующих оценок дорожек контрольных сейсмограмм. Разница между соответствующими оценками дорожек контрольных сейсмограмм и дорожками контрольных сейсмограмм затем минимизируется, пока не

достигнет порога, для получения последовательности оценок изменений скорости для подповерхностной зоны.

Таким образом, согласно способу 80, после действий, представленных в шагах 82 и 84, следует процесс, в котором вычислительная система 60 выполняет инверсию одной дорожки (шаг 86), более подробно описанную ниже. Выходные данные вычислительной системы 60 после выполнения процесса инверсии одной дорожки, могут включать, в частности, последовательность оценок изменений скорости для каждой дорожки опорной сейсмограммы и соответствующей дорожки контрольной сейсмограммы.

При этом опорная сейсмическая съемка включает множество таких дорожек опорной сейсмограммы, а контрольная сейсмическая съемка включает множество таких дорожек контрольной сейсмограммы. В некоторых вариантах осуществления, опорная сейсмическая съемка и контрольная сейсмическая съемка обычно выполняются одинаковыми способами, так что источники и приемники, используемые для съемок, обычно располагаются в одних местах на земле (например, по отношению к исследуемой подповерхностной зоне). Если они не располагаются в основном в одних местах, то согласно известной методике вычислительная система 60 может выполнить корректирующее согласование, обеспечивающее возможность сравнения результатов опорной и контрольной сейсмических съемок.

Что касается инверсии одной дорожки, выполняемой вычислительной системой 60, то каждая дорожка опорной сейсмограммы может быть представлена последовательностью амплитудных значений в функции времени  $b(t)$ , а каждая дорожка контрольной сейсмограммы может иметь аналогичное представление  $m(t)$ . Количество амплитудных значений для дорожек опорной и контрольной сейсмограмм меняется в зависимости, в частности, от частоты выборки при сборе данных дорожек и общего времени получения данных. Таким образом, можно считать, что дорожка  $b(t)$  опорной сейсмограммы включает некоторое количество различных амплитудных значений  $b(t_i)$ , где  $b(t_i)$  представляет амплитудное значение для дорожки опорной сейсмограммы в некоторый момент  $t_i$  времени выборки. Дорожки контрольной сейсмограммы представлены аналогичным образом  $m(t_i)$  и, таким образом, существуют

моменты  $t_i$  времени, соответствующие выборкам дорожки опорной сейсмограммы и дорожки контрольной сейсмограммы.

Кроме того, на каждую дорожку опорной сейсмограммы приходится одна соответствующая дорожка контрольной сейсмограммы. Другими словами, для каждой дорожки  $b(t)$  опорной сейсмограммы имеется дорожка  $m(t)$  контрольной сейсмограммы, соответствующая по положению этой дорожке сейсмограммы. Различия между соответствующими дорожками опорной и контрольной сейсмограмм, которые могут быть определены вычислительной системой 60, могут включать, среди прочего, колебательные сигналы, имеющие разные максимумы, соответствующие максимумы имеют разные амплитуды, и соответствующие максимумы возникают в разные моменты времени по отношению к времени регистрации соответствующей дорожки сейсмограммы (например, одна дорожка оказывается сдвинутой по времени относительно другой). Такие различия могут быть рассмотрены в отношении к дорожке опорной сейсмограммы и дорожке контрольной сейсмограммы, показанным в виде крайних дорожек на фиг. 6 и описанным более подробно ниже. Сравнение между этими двумя дорожками, например, поточечно или даже по накопленному различию, посредством вычислительной системы 60, может дать оценку изменений, возникающих в исследуемой подповерхностной зоне.

В соответствии с настоящими вариантами осуществления, процесс инверсии одной дорожки, согласно шагу 86, может быть выполнен посредством процесса, в котором вычислительная система 60 учитывает изменения между конкретной дорожкой опорной сейсмограммы и соответствующей ей дорожкой контрольной сейсмограммы, в соответствии с временным сдвигом амплитудных значений, а также изменениями амплитуды, причем оба этих параметра могут быть выражены как результаты изменений скорости. Эти изменения скорости затем используются вычислительной системой 60 для оценки изменений в подповерхностной зоне.

В настоящих вариантах осуществления используется соотношение, относящееся к импедансу сейсмического импульса, распространяющегося через толщу земли. В частности, изменение  $\frac{\Delta I_p}{I_p}$  импеданса между дорожкой опорной сейсмограммы и соответствующей дорожкой контрольной сейсмограммы может

быть представлено как аппроксимирующая функция суммы изменения  $\frac{\Delta\rho}{\rho}$  плотности и изменения  $\frac{\Delta v}{v}$  скорости:

$$\frac{\Delta I\rho}{I\rho} \approx \frac{\Delta v}{v} + \frac{\Delta\rho}{\rho}$$

где  $\frac{\Delta I\rho}{I\rho}$  описывается выражением  $\frac{I\rho_b - I\rho_m}{I\rho_b}$ ,  $I\rho_b$  есть импеданс в некоторый момент времени для дорожки опорной сейсмограммы, а  $I\rho_m$  есть импеданс в момент  
5 времени, соответствующий дорожке контрольной сейсмограммы.  $\frac{\Delta v}{v}$  равно  $\frac{v_b - v_m}{v_b}$ ,  
а  $\frac{\Delta\rho}{\rho}$  равно  $\frac{\rho_b - \rho_m}{\rho_b}$ .  $v_b$  представляет скорость в момент времени для дорожки  
опорной сейсмограммы, и  $v_m$  представляет скорость в момент времени для  
дорожки контрольной сейсмограммы;  $\rho_b$  является плотностью в некоторый  
момент времени для дорожки опорной сейсмограммы, и  $\rho_m$  является плотностью  
10 в некоторый момент времени, соответствующий дорожке контрольной  
сейсмограммы.

В настоящих вариантах осуществления вычислительной системы 60  
устанавливается приблизительное соотношение между изменением скорости и  
изменением плотности, выражаемое следующим уравнением:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \approx \alpha \left( \frac{\Delta v}{v} \right)$$

15 где  $\alpha$  может считаться скалярным множителем. Если  $\alpha = 0$ , то изменение  
скорости является главной причиной для изменения импеданса от дорожки  
опорной сейсмограммы к дорожке контрольной сейсмограммы. Однако, даже в  
обстоятельствах, где изменения плотности отвечают за изменения импеданса,  
разница между дорожками опорной сейсмограммы и контрольной сейсмограммы  
20 может быть выражена только в понятиях изменений скорости, при этом  
изменение плотности учитывается вычислительной системой 60 через различные  
значения скалярного множителя  $\alpha$  описанным ниже способом.

Вычислительная система 60 минимизирует разницу между дорожками  
опорной и контрольной сейсмограмм, например, выполняя поиск минимума по  
25 методу наименьших квадратов следующей целевой функции:

$$2C = \sum_{i=1}^N \{m(t_i) - \{b(\tilde{t}_i) + [\psi^* \Delta R(\tilde{t}_i)]_i\}\}^2$$

где функция представлена суммой по всем точкам выборки ( $i =$  от 1 до  $N$ ) квадрата разности между амплитудными значениями для дорожки  $m(t_i)$  контрольной сейсмограммы и амплитудными значениями дорожки  $\{b(\tilde{t}_i) + [\psi^* \Delta R(\tilde{t}_i)]_i\}$  прогнозируемой контрольной сейсмограммы. Эта дорожка прогнозируемой контрольной сейсмограммы может генерироваться на основании дорожки опорной сейсмограммы, и дорожка прогнозируемой контрольной сейсмограммы может генерироваться на основе оценки изменений скорости. Точнее говоря, первый член дорожки прогнозируемой контрольной сейсмограммы,  $b(\tilde{t}_i)$ , представляет амплитудное значение дорожки опорной сейсмограммы в сдвинутом моменте  $\tilde{t}_i$ , времени, определяемым вычислительной системой 60 следующим образом:

$$\tilde{t}_i = t_i - dt \sum_{j=1}^i \gamma_j$$

где временной сдвиг представлен как интегральная функция изменений скорости от первой по времени выборки в получении данных дорожки опорной сейсмограммы,  $j = 1$ , до соответствующего момента  $i$  времени. В этом уравнении,  $\gamma_j$  обозначает изменение  $\frac{\Delta v}{v}$  скорости, а  $dt$  обозначает промежуток времени между соседними моментами выборки (т.е., интервал выборки, определяемый частотой выборки). Таким образом, когда вычислительная система 60 вычисляет временной сдвиг в данный момент времени, выдается новое значение времени для этого момента времени. При обычном способе добычи углеводородов, скорость замедляется от дорожки опорной сейсмограммы к дорожке контрольной сейсмограммы, поэтому временной сдвиг обычно положителен. Когда вычислительная система 60 сообщает временной сдвиг точке на дорожке опорной сейсмограммы, она может рассматриваться как сдвинутая по времени точка, а когда вычислительная система 60 сообщает временные сдвиги точкам дорожки опорной сейсмограммы, то такая дорожка называется сдвинутой по времени.

Второй член дорожки прогнозируемой контрольной сейсмограммы,  $[\psi^* \Delta R(\tilde{t}_i)]_i$ , соответствует изменению амплитуды, которое вычислительная система 60 выполняет для сдвинутой по времени дорожки опорной сейсмограммы во временной точке  $i$ . В соответствии с настоящими вариантами осуществления, вычислительная система 60 сдвигает во времени это амплитудное изменение так, чтобы изменения амплитуды учитывались надлежащим образом в сдвинутой во времени дорожке опорной сейсмограммы. В этом выражении,  $\psi$  обозначает оценку сейсмического импульса, например, импульса Рикера, используемого вычислительной системой 60 для оценки сейсмического импульса, вырабатываемого сейсмическим источником. Могут быть использованы и другие сейсмические импульсы, и различные хорошо известные способы оценки сейсмических импульсов. Было установлено, что в некоторых вариантах осуществления, для целевой функции приемлемы отклонения значения амплитуды и фазы сейсмического импульса в пределах 20% от истинного.

Вычислительная система 60 выполняет свертку сейсмического импульса  $\psi$  с  $R(\tilde{t}_i)$ , представляющего изменение локального коэффициента отражения, ассоциированное с моментом  $i$  времени сдвинутой по времени дорожки опорной сейсмограммы. В частности, в то время как дорожка опорной сейсмограммы была бы представлена сверткой коэффициента отражения с сейсмическим импульсом, в данном случае, изменение от опорной съемки к контрольной съемке представлено изменением в свертке коэффициента отражения с оценкой сейсмического импульса.

В вариантах осуществления, где вычислительная система 60 определяет, что изменение скорости является основной причиной изменения импеданса от опорной съемки к контрольной съемке, например, выполнением программы, хранящейся в памяти 66, вычислительная система 60 может рассматривать локальное изменение коэффициента отражения через изменение скорости следующим образом:

$$\Delta R_i |_{i+1 \leq N} = \frac{1}{2} (\gamma_{i+1} - \gamma_i)$$

где  $\Delta R_N = 0$ ,  $\gamma_{i+1}$  представляет изменение скорости в выборке в момент времени, следующий непосредственно за моментом  $i$  времени (вслед за завершением

интервала выборки), а  $\gamma_i$  является изменением скорости в момент  $i$  времени. Таким образом, изменение локального коэффициента отражения для момента  $i$  времени пропорционально его локальному изменению изменения скорости.

5 Ситуации, где изменения плотности идентифицируются вычислительной системой 60 как существенные, будут более подробно рассмотрены далее.

В соответствии с настоящими вариантами осуществления, вычислительная система 60 при выполнении процесса инверсии одной дорожки может, в некоторых обстоятельствах, учитывать изменения плотности, используя скалярный множитель, на основании предположения, что:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \approx \alpha \left( \frac{\Delta v}{v} \right)$$

10 где скалярный множитель  $\alpha$  может быть выбран в зависимости от процентной доли изменения плотности в изменении импеданса от опорной съемки к контрольной съемке. На основе упомянутого предположения, скалярный множитель  $\alpha$  вводится вычислительной системой 60 в целевую функцию посредством следующего уравнения:

$$\Delta R_i |_{i+1 \leq N} = \frac{1 + \alpha}{2} (\gamma_{i+1} - \gamma_i)$$

15 где  $\gamma$ , как и раньше, есть изменение скорости. Обстоятельства, когда использование скалярного множителя может быть уместным, включают случаи, где соотношение между изменением скорости и изменением плотности примерно линейно.

20 Таким образом, в одном или более вариантах осуществления вычислительной системы целевая функция может быть представлена только как функция переменного одного типа – изменения скорости. Соответственно, начальные операции, выполняемые вычислительной системой 60 как часть процесса инверсия одной дорожки на шаге 86, может включать получение начальной оценки изменений скорости (шаг 88). Начальные оценки могут быть  
25 сделаны, например, на основе ранее генерированных моделей (например, ранее генерированных моделей скорости), относящихся к подповерхностной зоне. Представленные варианты осуществления, однако, не ограничены только этими

способами оценки, и первоначальные оценки изменений скорости могут быть выполнены вычислительной системой 60 любым подходящим путем.

После того, как система 60 сгенерировала начальную оценку изменения скорости согласно шагу 88, вычислительная система 60 генерирует начальную дорожку прогнозируемой контрольной съемки, и вычисляет разницу  $2C$  (или ее вариации, например,  $C$ ) в соответствии с целевой функцией. В случае обнаружения того, что разница превышает порог сходимости, вычислительная система 60 итерационно вычисляет изменение скорости (шаг 90).

Вычислительная система 60 может выполнять эту процедуру, пока разница  $C$  не окажется ниже заданного порога. При выполнении действий шагов 88 и 90, вычислительная система 60 может линеаризовать градиент, ассоциированный с целевой функцией, используя линейную интерполяцию для определения того, каким образом должны быть изменены изменения скорости. Эффективность линеаризованного градиента можно улучшить более частой выборкой (например, с интервалом 1 мс). При обнаружении, что целевая функция достигла значения  $C$ , равного установленному порогу или меньшего, можно считать, что вычислительная система 60 (выполняющая способ 80) получила "окончательную" оценку изменений скорости, означающую, что дальнейших итераций не требуется.

Вычислительная система 60 может вырабатывать некоторое количество различных выходных данных, используя изменения скорости, генерированные процессом инверсии одной дорожки на шаге 86, например, для определения возможных путей развития подповерхностной зоны. Например, вычислительная система 60 может использовать выходные данные изменений скорости для получения характеристик (на шаге 92) изменений в подповерхностной зоне, посредством построения 3D карты изменений скорости или скорости подповерхностной зоны, или путем обновления существующей модели скорости, импеданса, плотности или других моделей. Вычислительная система 60, например, вдобавок к системам, описанным на фиг. 2 и/или 3, может также использовать эти характеристики как часть процесса добычи (шаг 94).

На фиг. 6 представлена диаграмма 100 различных зависимостей, показывающих, каким образом для целевой функции, используемой вычислительной системой 60, может быть рассмотрено ее функционирование во

временной области. В частности, на диаграмме 100 показаны функции, представляющие собой графики величин разных типов в зависимости от времени, на которых отрицательные значения для каждой дорожки показаны направленными влево, а положительные значения для каждой дорожки показаны направленными вправо. На диаграмме 100, дорожка 102 опорной сейсмограммы и дорожка 104 контрольной сейсмограммы, соответствующей дорожке 102 опорной сейсмограммы, показаны в виде функций амплитуды (колебательных сигналов). Как было показано выше, дорожка 104 контрольной сейсмограммы соответствует дорожке 102 опорной сейсмограммы, поскольку дорожка 104 контрольной сейсмограммы была получена направлением сейсмического колебания через подповерхностную зону в той же точке земли, для которой была получена дорожка 102 опорной сейсмограммы.

Целевая функция, в основном, начинается с дорожки 102 опорной сейсмограммы как "исходной" дорожки. Функция 106 изменения скорости определяется (например, оценивается) вычислительной системой 60 либо как последовательность дискретных значений изменения скорости на основе ранее полученных моделей скорости, либо моделируется вычислительной системой 60 в виде функции (например, уравнения). В показанном на фиг. 6 примере, функция 106 изменения скорости аппроксимируется сигналом прямоугольной формы и в функции времени имеет вид  $\frac{\Delta v}{v}$ . Как видно из диаграммы на фиг. 6, поскольку дорожка 102 опорной сейсмограммы смещена в сторону (т.е., преобразована в сторону), имея сходство с дорожкой 102 контрольной сейсмограммы, функция 106 изменения скорости включает отрицательные значения изменения скорости, указывающие на то, что сейсмическое колебание, используемое для генерирования дорожки контрольной сейсмограммы, распространяется через подповерхностную зону с меньшей скоростью, чем сейсмическое колебание, используемое для генерирования дорожки опорной сейсмограммы.

Вычислительная система 60 генерирует функцию 108 временного сдвига посредством целевой функции, на основе оценки функции 106 изменения скорости. Более конкретно, вычислительная система 60 может генерировать функцию 108 временного сдвига как взвешенную сумму изменения скорости с периодичностью выборки. Как показано, временной сдвиг имеет тенденцию смещения со временем к положительным значениям, в результате чего моменты

времени дорожки 102 опорной сейсмограммы, наблюдаемые позже на промежутке экспозиции, сдвинуты так, что они оказываются как бы принятыми еще позднее. Результат наложения временного сдвига иллюстрируется сдвинутой по времени дорожкой 110 опорной сейсмограммы. В формуле целевой функции сдвинутая по времени дорожка 110 сейсмограммы обозначена как  $b(\tilde{t}_i)$ .

Как было показано выше, в основном предполагается наличие двух изменений, происходящих между дорожкой 102 опорной сейсмограммы и дорожкой 104 контрольной сейсмограммы – временной сдвиг (или изменение во времени распространения сейсмического колебания, используемого для построения сейсмограмм) и изменение амплитуды. Изменение амплитуды от опорной съемки к контрольной съемке, что в этом случае представляет собой оценку свертки сейсмического колебания с изменением коэффициента отражения, показано функцией 112 изменения амплитуды. Однако, с учетом диаграммы на фиг. 6, надо понимать, что если функция 112 изменения амплитуды используется для модификации сдвинутой по времени дорожки 110 опорной сейсмограммы, то возникнет рассогласование пикового значения 114 дорожки 110 с пиком 116 изменения амплитуды функции 112 изменения амплитуды. Это происходит, потому что пик 114 возникает при смещенном моменте 118 времени, в то время как пик 116 изменения амплитуды функции 112 изменения амплитуды не был сдвинут и соответствует несмещенному моменту 120 времени.

Как показано на фиг. 6, в соответствии с настоящими вариантами осуществления вычислительная система 60 применяет функцию 108 временного сдвига, через посредство целевой функции, к функции 112 изменения амплитуды для генерирования сдвинутой по времени функции 122 изменения амплитуды. Сообщение таким путем временного сдвига изменению амплитуды обеспечивает надлежащий учет изменения амплитуды в сдвинутой по времени дорожке 110 опорной сейсмограммы. Целевая функция представляет значения функции 122 сдвинутого по времени изменения амплитуды как  $[\psi^* \Delta R(\tilde{t}_i)]_i$ . В этом отношении, целевая функция объединяет сдвинутое по времени изменение 122 амплитуды и сдвинутую по времени дорожку 110 опорной сейсмограммы для получения прогнозируемой дорожки 124 контрольной сейсмограммы.

Следует заметить, что в то время как настоящее раскрытие преимущественно относится к сдвигу дорожки опорной сейсмограммы для

совмещения с соответствующей дорожкой контрольной сейсмограммы, настоящее раскрытие не обязательно ограничено только таким приемом. В частности, дорожка опорной сейсмограммы выбрана в качестве сдвигаемой дорожки главным образом потому, что опорный сейсмический объем обычно имеет продуктивный пласт с дном неглубокого залегания по сравнению с контрольным сейсмическим объемом. Действительно, было установлено, что линейная интерполяция подходит лучше для расчета градиента инверсии и выполнения инверсии, когда используется относительно высокая частота выборки (например, 1 мс), и когда временной сдвиг от изменения скорости сместит ниже дно продуктивного пласта.

Как показано выше, вычислительная система 60 может использовать оценку изменений скорости, полученную методом инверсии одной дорожки разными способами. В частном примере, вычислительная система 60 может применить оценку изменения скорости к скоростной модели подповерхностного пространства для опорной съемки для выработки оценочной или "обновленной" скоростной модели подповерхностного пространства для контрольной съемки. Кроме того, следует заметить, что методы инверсии одной дорожки, реализуемые вычислительной системой 60, могут быть использованы не только в случаях, когда временные сдвиги малы (например, менее 2 интервалов выборки), но также и тогда, когда временные сдвиги относительно велики (например, 2 или более интервалов квантования). Действительно, в случаях, когда временные сдвиги относительно велики, считается, что для вычислительной системы 60 становится более важным применять временной сдвиг к изменению амплитуды, в дополнение к применению временного сдвига к исходной дорожке (например, опорной дорожке сейсмограммы).

Фиг. 7А-7В, в частности, иллюстрируют точность описанного метода инверсии одной дорожки для случаев, где временной сдвиг относительно невелик. На фиг. 7А представлена истинная модель изменения 150 скорости, происходящего между моделью скорости синтезированной опорной съемки и моделью скорости синтезированной контрольной съемки подповерхностной зоны, где по горизонтальной оси отложено положение вдоль сейсмического массива, а по вертикальной оси отложено время. Истинная модель изменения 150 скорости отражает фактическую (т.е., наземные контрольные данные) величину

изменения скорости между моделями скорости синтезированной опорной съемки и синтезированной контрольной съемки (т.е., величину изменения скорости, вызванного между синтезированной опорной съемкой и синтезированной контрольной съемкой).

5 Модели скорости были генерированы с использованием системы ввода-вывода данных Системы Словаря Данных (DDS – от англ. data dictionary system), предлагаемой компанией BP America Inc. Такие модели могут называться "2D синтетика". Истинная модель изменения 150 скорости включает относительно  
10 постоянные изменения скорости, представленные лентообразной формой. С левой стороны ленточной формы изменения скорости составляют относительно постоянные -5%, а с правой стороны ленточной формы изменения скорости составляют относительно постоянные +5%.

На фиг. 7Б представлены необработанные выходные данные 152 инверсии  
15 процесса инверсии одной дорожки в одном или более из описанных здесь вариантов осуществления. В частности, на фиг. 7Б необработанные выходные данные процесса инверсии одной дорожки, описанные, например, со ссылкой на шаг 86 на фиг. 5, приложены к синтезированной опорной съемке и синтезированной контрольной съемке, для вычисления изменений скорости между синтезированными опорной и контрольной съемками. Видно, что  
20 необработанные выходные данные 152 инверсии, без дальнейшей обработки в целом согласуются с истинной моделью изменения скорости 150. Точность настоящих вариантов осуществления можно дополнительно оценить по изображению на фиг. 7В, где показаны упорядоченные выходные данные 154 инверсии после регуляризации необработанных выходных данных 152 инверсии.  
25 Как показано на фиг. 7В, после удаления искажений регуляризацией моделированные изменения скорости еще лучше соответствуют истинной модели изменения 150 скорости.

На фиг. 8А и 8Б показаны модели изменения скорости для опорной и контрольной синтетики, генерированных по аналогии с тем, как описано  
30 применительно к фиг. 7А-7В. В частности, на фиг. 8А и 8Б обеспечивается визуальное сравнение результатов инверсии в случае, когда изменение амплитуды целевой функции (соответствующей несдвинутым выходным данным 160 инверсии, показанным на фиг. 8А) не подвергнуто временному сдвигу, и в

случае, когда изменение амплитуды целевой функции (соответствующей сдвинутым выходным данным 162 инверсии, показанным на фиг. 8Б) получило временной сдвиг. Видно, что если временной сдвиг от опорной к контрольной съемке относительно велик (например, 2 или более интервалов выборки), в  
5 модель вносится значительная ошибка, когда временной сдвиг не сообщается изменению амплитуды. Обе модели показаны без регуляризации, и было установлено, что сдвинутые выходные данные 162 инверсии имеют по времени ту же толщину продуктивного пласта, что и фактическая модель.

Как было показано выше, в некоторых вариантах осуществления может быть  
10 сделано допущение, что для целей процесса инверсии одной дорожки в соответствии с настоящим раскрытием, изменение плотности является пренебрежимо малым, поскольку главным изменением в продуктивном пласте от опорной съемки к контрольной съемке является изменение скорости. В качестве  
15 одного примера, если, в результате добычи углеводородов, из раствора выходит относительно небольшое количество газа, то преимущественно изменение будет касаться скорости. Однако в других случаях, заметный эффект дают изменения плотности. Действительно, в настоящее время установлено, что процентная  
ошибка в оценке изменения импеданса увеличивается экспоненциально с  
процентным вкладом изменения плотности в изменение импеданса.

20 Соответственно, как было показано выше, вычислительная система 60 может учитывать изменения плотности, используя скалярный множитель  $\alpha$ , который может быть выбран в зависимости от процентного вклада изменения плотности в  
изменение импеданса при переходе от опорной съемки к контрольной съемке. Условия, при которых может быть применен этот скалярный множитель,  
25 включают ситуации, когда соотношение между изменением скорости и изменением плотности носит примерно линейный характер.

На фиг. 9 приведена диаграмма 170, представляющая пример того, каким  
образом материалы в продуктивном пласте могут влиять на изменения плотности  
и скорости, и их соотношение, для конкретного продуктивного пласта. Как  
30 показано на фиг. 9, существует ряд сценариев, представленных в рамке сверху диаграммы, которые служат примерами процессов, которые могут происходить между моментами времени, когда выполняются опорная и контрольная съемки. В частности, приведенные в рамке варианты включают первый сценарий 172,

второй сценарий 174, третий сценарий 176, четвертый сценарий 178, пятый сценарий 180, шестой сценарий 182, седьмой сценарий 184, и восьмой сценарий 186. Эти сценарии сопровождаются примерами значений насыщения воды, нефти и/или газа (соответственно,  $S_w$ ,  $S_o$  и  $S_g$ ). Следует заметить, что на диаграмме 170 на фиг. 9 предполагается, что давление остается сравнительно постоянным.

Выделенные на диаграмме 170 четыре сектора разделены в соответствии с наличием газа и нагнетанием воды или газа. В частности, по наличию газа в продуктивном пласте, первая линия 188 тренда соответствует отсутствию газа в продуктивном пласте, а вторая линия 190 тренда соответствует наличию газа в продуктивном пласте. Первая и вторая линии 188, 190 тренда соответствуют положительным значениям изменения скорости и отрицательным значениям изменения скорости, соответственно. Что касается нагнетания текучей среды в продуктивный пласт, третья линия 192 тренда соответствует нагнетанию воды в продуктивный пласт, а четвертая линия 194 тренда соответствует нагнетанию газа в продуктивный пласт. Третья и четвертая линии 192, 194 тренда соответствуют положительным значениям изменений плотности и отрицательным значениям изменений плотности, соответственно.

Для первого, второго, третьего и четвертого сценариев 172, 174, 176, 186, плотность увеличивается по мере подачи воды, и изменение скорости имеет отрицательный знак, поскольку изменения импеданса в основном определены изменением плотности. В частности, модуль  $K$  объемной упругости текучей среды, в основном определяется модулем объемной упругости газа, и скорость  $V_p$  р-волны связана с модулем объемной упругости текучей среды следующим уравнением:

$$V_p = \left( \frac{K}{\rho} \right)^{0.5}$$

где  $K$  обычно не изменяется сколько-нибудь заметно, но поскольку плотность  $\rho$  увеличивается, скорость  $V_p$  текучей среды будет падать. Скорость  $V_p$  в породе будет также сокращаться соответственно, при этом снижение  $V_p$  приводит к отрицательному значению изменения скорости.

На фиг. 10 приведен пример результатов инверсии, полученных целевой функцией, когда изменение плотности является причиной 60% изменений

импеданса. В частности, на левой диаграмме представлена совокупность результатов 200 первой инверсии, показывающая, что когда вычислительная система 60 не использует скалярный множитель  $\alpha$  для учета изменений плотности, существует очевидная ошибка как в изменении скорости, так и во временном сдвиге, полученными целевой функцией. Однако когда вычислительная система 60 присваивает подходящее значение скалярному множителю  $\alpha$ , в данном примере равное 1,5, получаются, очевидно, более точные результаты инверсии изменения скорости и временного сдвига, как это показано на совокупности 202 результатов второй инверсии.

5

10 С учетом сказанного, 4D процессы совместной инверсии, выполняемые вычислительной системой 60, могут считаться "адаптивным" методом, вводящим возможность регулирования скалярного параметра для учета изменения степени изменения плотности без введения дополнительной переменной в целевую функцию. Примеры значений для скалярного множителя приведены ниже в

15 Таблице 1.

15

В соответствии с вариантом осуществления согласно Таблице 1, три области графика взаимозависимости значений изменения  $(dv/v)$  скорости и изменения  $(dp/\rho)$  плотности, например графика, показанного на фиг. 9, разделены поровну в зависимости от угла. Значения параметра альфа, соответствующие углам менее 180 градусов, предполагаются для использования в базе значений для инверсии. Отмечается, что некоторые из значений являются резко выделяющимися. Например, значения для 90 градусов и 270 градусов являются нереальными, а значение для 180 градусов соответствует пренебрежимо малому вкладу от изменения плотности.

20

25

<b>Таблица 1. Примеры значений для <math>\alpha</math></b>			
<b>Угол (Градусов)</b>	<b><math>d\rho/\rho</math></b>	<b><math>dv/v</math></b>	<b><math>\alpha</math></b>
0	0	1	0,00
10	0,173648175	0,984807754	0,18
20	0,342020138	0,939692623	0,36
30	0,499999992	0,866025408	0,58
40	0,642787601	0,766044451	0,84
50	0,766044434	0,642787621	1,19
60	0,866025395	0,500000015	1,73
70	0,939692614	0,342020163	2,75
80	0,984807749	0,173648201	5,67
90	1	2,67949E-08	
100	0,984807758	-0,173648148	-5,67
110	0,939692632	-0,342020113	-2,75
120	0,866025422	-0,499999969	-1,73
130	0,766044468	-0,64278758	-1,19
140	0,642787642	-0,766044416	-0,84
150	0,500000039	-0,866025381	-0,58
160	0,342020188	-0,939692604	-0,36
170	0,173648228	-0,984807744	-0,18
180	5,35898E-08	-1	0,00
190	-0,173648122	-0,984807763	0,18
200	-0,342020087	-0,939692641	0,36
210	-0,499999946	-0,866025435	0,58
220	-0,64278756	-0,766044485	0,84
230	-0,766044399	-0,642787662	1,19
240	-0,866025368	-0,500000062	1,73
250	-0,939692595	-0,342020213	2,75
260	-0,98480774	-0,173648254	5,67
270	-1	-8,03847E-08	

Описанные выше конкретные варианты осуществления были представлены в качестве примера, и следует понимать, что эти варианты осуществления могут подвергаться различным модификациям и реализации в других формах. Также следует понимать, что формула изобретения не предполагает ограничения этими конкретными раскрытыми формами, но, напротив, должна охватывать все модификации, эквиваленты и альтернативы, находящиеся в пределах существа и области защиты настоящего раскрытия.

Представленные и заявленные здесь способы относятся и применимы к материальным объектам и конкретным примерам практического характера, которые очевидно усовершенствуют техническую область и, по этой причине, не являются абстрактными, нематериальными или сугубо теоретическими. Кроме того, если приложенная в конце настоящего описания формула изобретения содержит один или более элементов, обозначенных как "средства для [выполнения] [функции]" или "шаг для [выполнения] [функции]", предполагается, что такие элементы должны восприниматься согласно Статье 35 Свода Законов США пар. 112(f). Однако, для любых пунктов формулы, содержащих элементы, обозначенные любым другим образом, предполагается, что такие элементы не должны интерпретироваться согласно Статье 35 Свода Законов США пар. 112(f).

## ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ оценки изменений в углеводородном продуктивном пласте, при осуществлении которого:

5            принимают дорожку опорной сейсмограммы опорной сейсмической съемки и дорожку контрольной сейсмограммы контрольной сейсмической съемки, ассоциированные с углеводородным продуктивным пластом и полученные в соответствующие различные моменты времени воздействием сейсмическим колебанием примерно в одном и том же месте на земле, направленным по  
10            соответствующим путям распространения сейсмического колебания через породу в соответствующие различные моменты времени;

             генерируют прогнозируемую дорожку контрольной сейсмограммы на основе дорожки опорной сейсмограммы, причем при генерировании прогнозируемой контрольной сейсмограммы из дорожки опорной  
15            сейсмограммы:

             сообщают дорожке опорной сейсмограммы временной сдвиг, полученный из оценки изменений скорости, возникающих между дорожкой опорной сейсмограммы и дорожкой контрольной сейсмограммы, причем оценка изменений скорости связана с вариациями скорости распространения  
20            сейсмического колебания через углеводородный продуктивный пласт;

             компенсируют изменения амплитуды между дорожкой опорной сейсмограммы и дорожкой контрольной сейсмограммы, при этом изменениям амплитуды сообщают временной сдвиг; и

             минимизируют, до достижения заданной сходимости, различие между  
25            прогнозируемой дорожкой контрольной сейсмограммы и дорожкой контрольной сейсмограммы итеративной оценкой изменений скорости, для получения окончательной оценки изменений скорости; и

             вырабатывают, на основании по меньшей мере окончательной оценки изменений скорости, карту изменений скорости, показывающую изменения  
30            геологических характеристик углеводородного продуктивного пласта между опорной сейсмической съемкой и контрольной сейсмической съемкой.

2. Способ по п. 1, в котором при компенсировании изменений амплитуды между дорожкой опорной сейсмограммы и дорожкой контрольной сейсмограммы применяют к каждой точке выборки дорожки опорной сейсмограммы, которой был сообщен временной сдвиг, оценку свертки сейсмического импульса со сдвинутым по времени локальным изменением коэффициента отражения.

3. Способ по п. 2, в котором сдвинутое по времени локальное изменение коэффициента отражения соответствует, для каждой точки выборки, разнице в изменении скорости между соответствующей точкой выборки и соседней точкой выборки на дорожке опорной сейсмограммы.

4. Способ по п. 3, в котором соседней точкой выборки является точка выборки, сделанной через один интервал выборки от соответствующей точки выборки.

5. Способ по п. 4, в котором выборку дорожки опорной сейсмограммы и дорожки контрольной сейсмограммы выполняют с интервалом выборки 1 миллисекунду (мс) или менее.

6. Способ по п. 3, в котором при генерировании дорожки прогнозируемой контрольной сейсмограммы на основе каждой дорожки опорной сейсмограммы, присваивают скалярный множитель локальному изменению коэффициента отражения на основе предполагаемого линейного соотношения изменения плотности между дорожкой опорной сейсмограммы и дорожкой контрольной сейсмограммы, и изменения скорости при изменениях текучей среды в углеводородном продуктивном пласте.

7. Способ по п. 6, в котором при присвоении скалярного множителя определяют значение скалярного множителя, пропорциональное процентной доле изменения импеданса между дорожкой опорной сейсмограммы и дорожкой контрольной сейсмограммы, вызванного изменением плотности.

8. Способ по п. 1, в котором вычисляют временной сдвиг в виде взвешенной суммы изменения скорости, причем взвешенное суммирование выполняется по точкам выборки дорожки опорной сейсмограммы от первой точки выборки дорожки опорной сейсмограммы к соответствующей точке выборки дорожки опорной сейсмограммы, для которой вычисляется временной сдвиг.

9. Способ по п. 1, в котором при минимизации, до достижения заданной сходимости, различия между прогнозируемой дорожкой контрольной сейсмограммы и дорожкой контрольной сейсмограммы, минимизируют по меньшей мере различие по методу наименьших квадратов между дорожкой прогнозируемой контрольной сейсмограммы и дорожкой контрольной сейсмограммы.

10. Способ по п. 1, в котором выполняют оценку изменения скорости в соответствии с уравнением:

$$\gamma = \frac{\Delta v}{v}$$

где  $\Delta v$  представляет собой разницу скорости в точке выборки дорожки опорной сейсмограммы и скорости в соответствующей точке выборки дорожки контрольной сейсмограммы, а  $v$  представляет скорость в точке выборки дорожки опорной сейсмограммы.

11. Способ выполнения инверсии одной дорожки для определения, по меньшей мере отчасти, изменений в подповерхностной зоне, с использованием дорожки опорной сейсмограммы и дорожки контрольной сейсмограммы подповерхностной зоны, полученных в разные соответствующие моменты времени воздействием сейсмических колебаний приблизительно в одном месте земли, когда дорожка опорной сейсмограммы и дорожка контрольной сейсмограммы представляют геологические характеристики подповерхностной зоны в разные соответствующие моменты времени, и каждая точка дорожки опорной сейсмограммы и дорожки контрольной сейсмограммы ассоциированы с

соответствующей скоростью сейсмического колебания, а при осуществлении способа:

генерируют прогнозируемую дорожку контрольной сейсмограммы на основе дорожки опорной сейсмограммы посредством процесса, в ходе которого:

5 сообщают дорожке опорной сейсмограммы временной сдвиг, полученный из оценки изменений скорости, возникающих между дорожкой опорной сейсмограммы и дорожкой контрольной сейсмограммы;

10 компенсируют изменения амплитуды между дорожкой опорной сейсмограммы и дорожкой контрольной сейсмограммы, причем временной сдвиг сообщается изменениям амплитуды; и

минимизируют, до достижения заданной сходимости, различие между прогнозируемой дорожкой контрольной сейсмограммы и дорожкой контрольной сейсмограммы итеративной оценкой изменений скорости, для получения окончательной оценки изменений скорости; и

15 определяют изменения по меньшей мере части подповерхностной зоны, используя окончательную оценку изменений скорости.

12. Способ по п. 11, в котором при сообщении временного сдвига дорожке опорной сейсмограммы сообщают временной сдвиг в соответствии со  
20 следующим уравнением:

$$\tilde{t}_i = t_i - dt \sum_{j=1}^i \gamma_j$$

где  $\tilde{t}_i$  обозначает временной сдвиг для точки  $i$  на дорожке опорной сейсмограммы,  $t_i$  обозначает момент времени, соответствующий точке  $i$  выборки на дорожке опорной сейсмограммы,  $dt$  обозначает интервал выборки, используемый при выборке дорожки опорной сейсмограммы, и  $\sum_{j=1}^i \gamma_j$   
25 обозначает накопленное изменение скорости от первоначальной точки  $j$  выборки дорожки опорной сейсмограммы до точки  $i$  выборки.

13. Способ по п. 11, в котором при осуществлении компенсирования изменений амплитуды между дорожкой опорной сейсмограммы и дорожкой  
30 контрольной сейсмограммы изменяют сдвинутую по времени амплитуду в

соответствии со следующим выражением:

$$b(\tilde{t}_i) + [\psi^* \Delta R(\tilde{t}_i)]_i$$

где  $b(\tilde{t}_i)$  обозначает амплитуду для сдвинутой по времени точки  $i$  дорожки опорной сейсмограммы,  $\psi$  обозначает оценку сейсмического импульса, и  $\Delta R(\tilde{t}_i)$  обозначает изменение коэффициента отражения между сдвинутой по времени точкой  $i$  дорожки опорной сейсмограммы и соседней сдвинутой по времени точкой дорожки опорной сейсмограммы.

14. Способ по п. 13, в котором при генерировании прогнозируемой дорожки контрольной сейсмограммы на основе дорожки опорной сейсмограммы дополнительно присваивают скалярный множитель изменению коэффициента отражения на основе предполагаемого линейного соотношения изменения плотности между дорожкой опорной сейсмограммы и дорожкой контрольной сейсмограммы, и изменения скорости при изменениях текучей среды в подповерхностной зоне.

15. Способ по п. 14, в котором величина скалярного множителя пропорциональна процентной доле изменения импеданса между дорожкой опорной сейсмограммы и дорожкой контрольной сейсмограммы, вызванного изменением плотности.

16. Способ по п. 11, в котором при определении изменений по меньшей мере части подповерхностного продуктивного пласта использованием окончательной оценки изменений скорости обновляют по меньшей мере часть карты скоростей подповерхностного продуктивного пласта, используя окончательную оценку изменений скорости.

17. Энергонезависимая материальная машиночитаемая среда хранения данных, содержащая команды, при исполнении которых компьютером, выполняется инверсия одной дорожки для определения, по меньшей мере отчасти, изменений в подповерхностной зоне, и которые включают команды для: приема дорожки опорной сейсмограммы и дорожки контрольной сейсмограммы, ассоциированных с углеводородным продуктивным пластом и

полученных в соответствующие различные моменты времени воздействием сейсмическим колебанием приблизительно в том же месте на земле, направленным по соответствующим путям распространения сейсмического колебания через породу в соответствующие различные моменты времени;

5 генерирования прогнозируемой дорожки контрольной сейсмограммы на основе дорожки опорной сейсмограммы посредством процедуры, в которой:

сообщают дорожке опорной сейсмограммы временной сдвиг, полученный из оценки изменений скорости, возникающих между дорожкой опорной сейсмограммы и дорожкой контрольной сейсмограммы;

10 компенсируют изменения амплитуды между дорожкой опорной сейсмограммы и дорожкой контрольной сейсмограммы, причем временной сдвиг сообщают изменениям амплитуды; и

минимизируют, до достижения заданной сходимости, различие между прогнозируемой дорожкой контрольной сейсмограммы и дорожкой контрольной сейсмограммы итеративной оценкой изменений скорости, для получения

15 окончательной оценки изменений скорости; и

определения изменений по меньшей мере части углеводородного продуктивного пласта с использованием окончательной оценки изменений скорости.

20

18. Энергонезависимая материальная машиночитаемая среда хранения данных по п. 17, причем компенсирование изменений амплитуды между дорожкой опорной сейсмограммы и дорожкой контрольной сейсмограммы включает применение к сдвинутой по времени дорожке опорной сейсмограммы

25 оценки сейсмического свертки сейсмического импульса с сдвинутым по времени изменением коэффициента отражения.

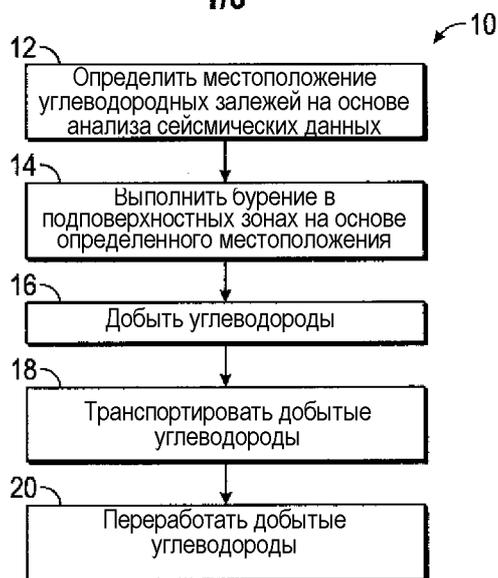
19. Энергонезависимая материальная машиночитаемая среда хранения данных по п. 18, причем компенсирование изменений амплитуды между

30 дорожкой опорной сейсмограммы и дорожкой контрольной сейсмограммы включает присваивание скалярного множителя к сдвинутому по времени изменению коэффициента отражения на основе линейного соотношения изменения плотности между дорожкой опорной сейсмограммы и дорожкой

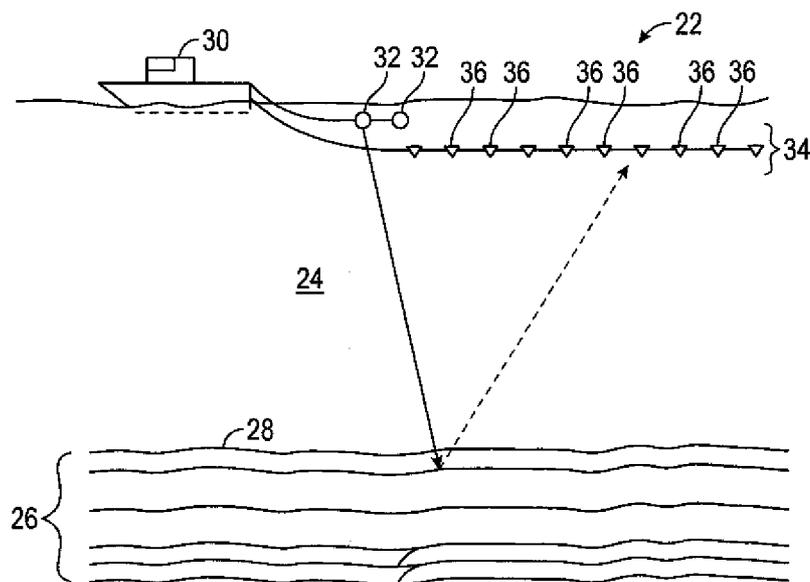
контрольной сейсмограммы, и изменения скорости при изменениях текучей среды в подповерхностной зоне.

5 20. Энергонезависимая материальная машиночитаемая среда хранения данных по п. 18, в которой команды для определения изменений в по меньшей мере части углеводородного продуктивного пласта, использующие окончательную оценку изменений скорости содержат команды на обновление по меньшей мере части карты скоростей в углеводородном продуктивном пласте.

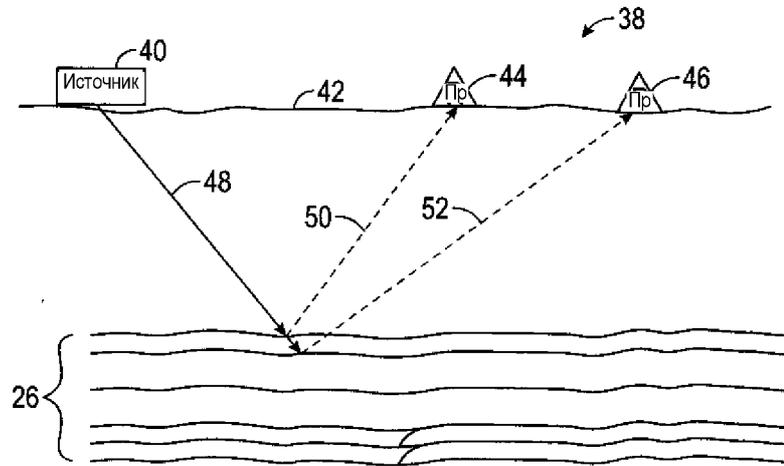
1/8



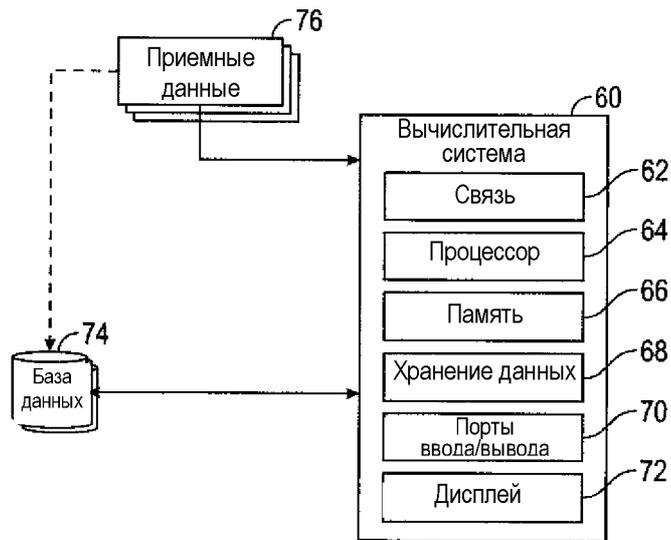
Фиг. 1



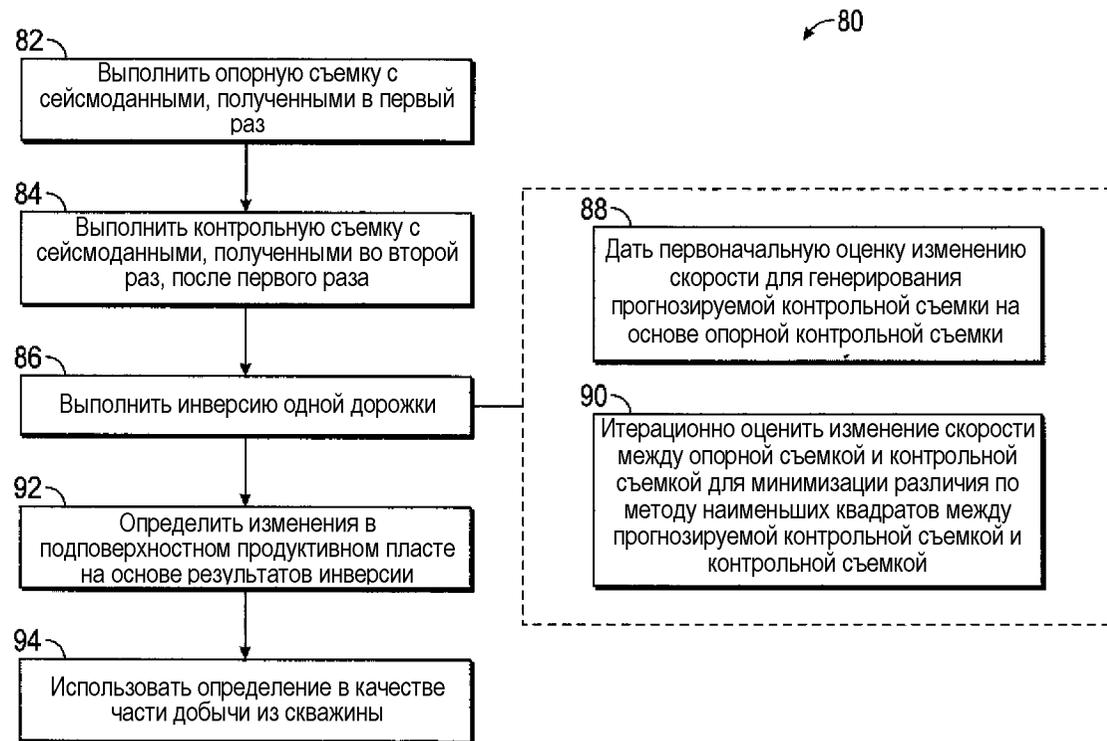
Фиг. 2



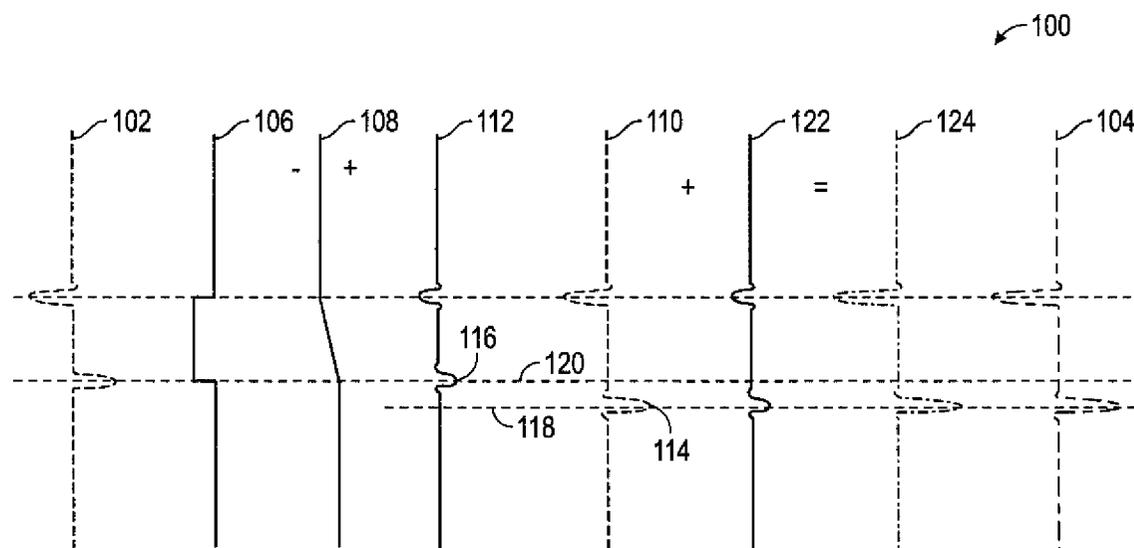
Фиг. 3



Фиг. 4

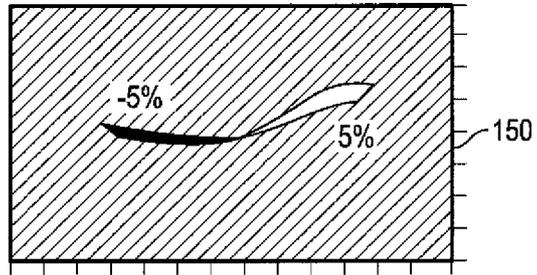


Фиг. 5

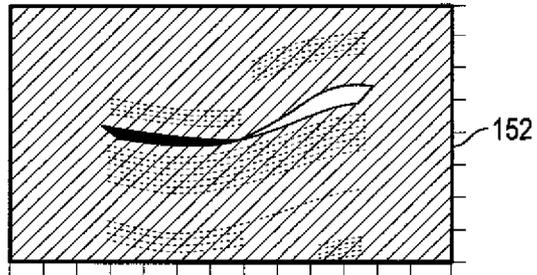


Фиг. 6

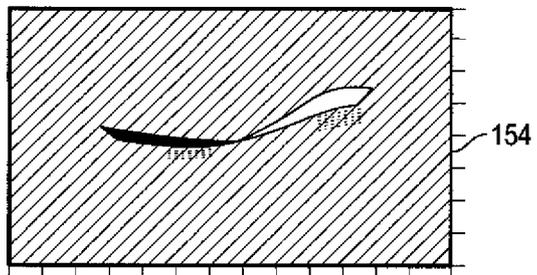
5/8



Фиг. 7А

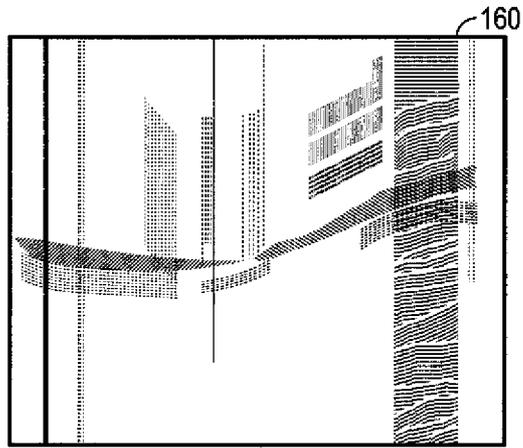


Фиг. 7Б

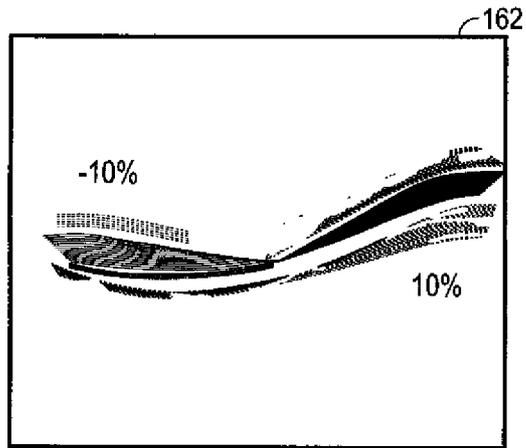


Фиг. 7В

6/8

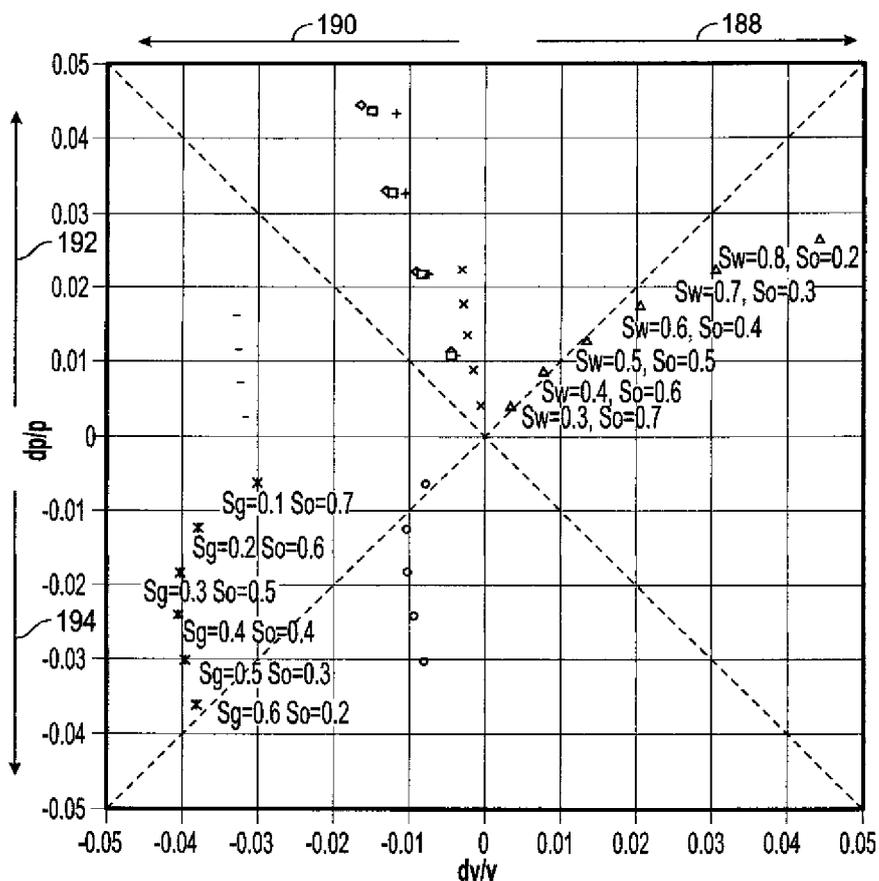


Фиг. 8А

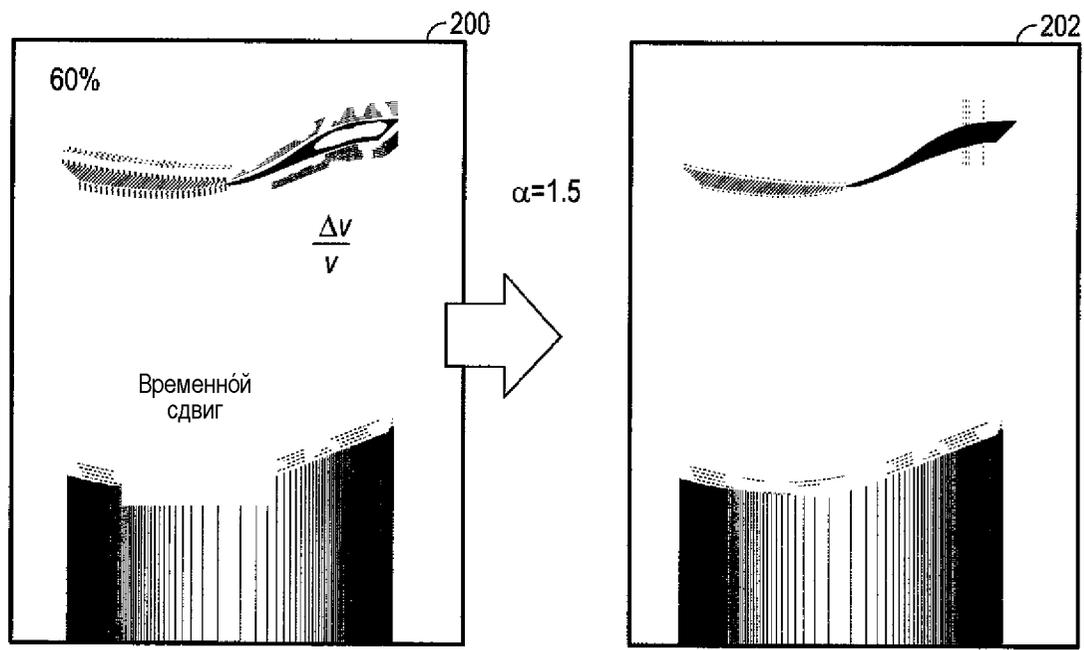


Фиг. 8Б

- 172 —  $\diamond$  Вода замещает газ,  $Sw=0.1, So=0$
- 174 —  $\square$  Вода замещает газ,  $Sw=0.1, So=0.1$
- 176 —  $+$  Вода замещает газ,  $Sw=0.1, So=0.2$
- 178 —  $\triangle$  Вода замещает нефть,  $Sw=0.2, Sg=0$
- 180 —  $\times$  Газ замещает нефть,  $Sw=0.2, Sg=0$
- 182 —  $\diamond$  Газ замещает нефть,  $Sw=0.2, Sg=0.1$
- 184 —  $-$  Вода замещает нефть с 10% газа, выходящего вначале из раствора,  $Sw=0.2$
- 186 —  $\times$  Вода замещает нефть,  $Sw=0.2, Sg=0.1$



Фиг. 9



Фиг. 10