



(51) МПК
G01V 1/28 (2006.01)
G06F 17/50 (2006.01)
G06F 19/00 (2011.01)
E21B 43/26 (2006.01)

**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2015116807/28, 23.08.2013

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
 23.08.2013

Приоритет(ы):

(30) Конвенционный приоритет:
 05.10.2012 US 61/710,582;
 17.05.2013 US 13/896,792

(45) Опубликовано: 20.08.2016 Бюл. № 23

(56) Список документов, цитированных в отчете о
 поиске: WO 2011077227 A2 , 30.06.2011. US
 20110120702 A1 , 26.05.2011. WO 2012125558 A2
 , 20.09.2012. US 7848895 B2 , 07.12.2010 . US
 20110125476 A1, 26.05.2011.

(85) Дата начала рассмотрения заявки РСТ на
 национальной фазе: 05.05.2015

(86) Заявка РСТ:
 US 2013/056487 (23.08.2013)

(87) Публикация заявки РСТ:
 WO 2014/055170 (10.04.2014)

Адрес для переписки:
 129090, Москва, ул. Б. Спасская, 25, стр. 3, ООО
 "Юридическая фирма Городиский и Партнеры"

(72) Автор(ы):

**МА Цзяньфу (US),
 ЛИНЬ Ави (US),
 УОЛТЕРС Харолд Грэйсон (US)**

(73) Патентообладатель(и):

**ХЭЛЛИБЕРТОН ЭНЕРДЖИ СЕРВИСИЗ,
 ИНК. (US)**

RU 2 594 373 C1

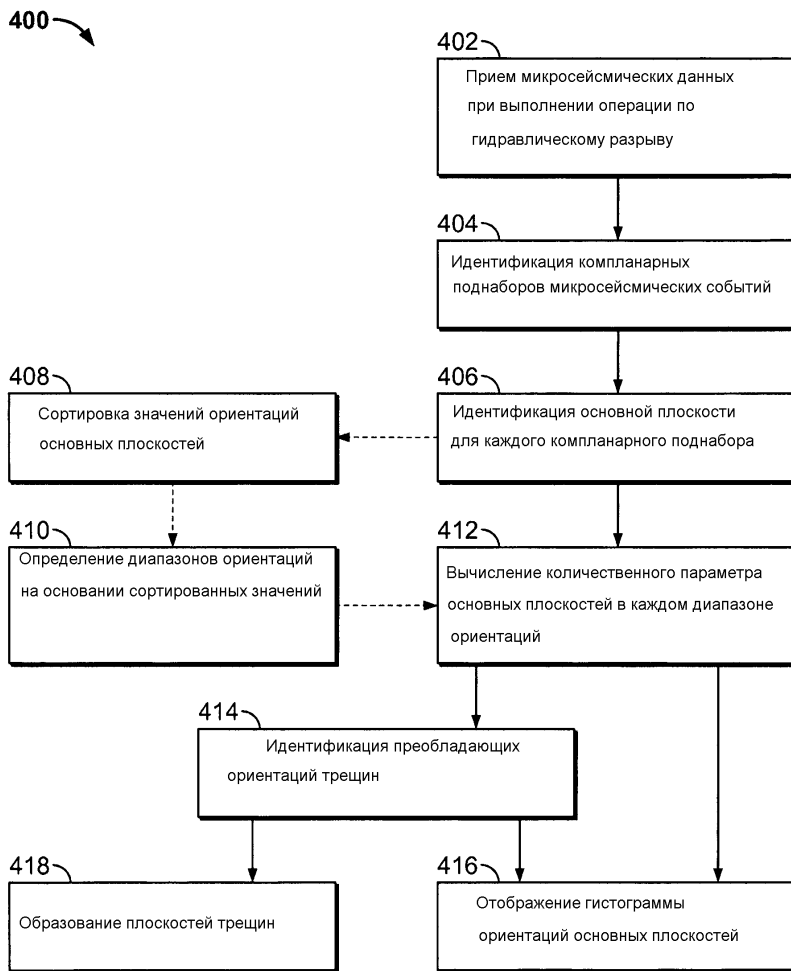
RU 2 594 373 C1

(54) ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРЕОБЛАДАЮЩИХ ОРИЕНТАЦИЙ ТРЕЩИН

(57) Реферат:

Изобретение относится к области геофизики и может быть использовано для идентификации свойств трещин в подземной зоне. Согласно некоторым аспектам ориентацию основной плоскости определяют для каждой из множества основных плоскостей. Основные плоскости определяют с помощью компланарных поднаборов данных о микросейсмических событиях при выполнении операции по гидравлическому разрыву подземной зоны. Вычисляют количественный параметр ориентаций основных плоскостей в каждом из множества

диапазонов. В некоторых осуществлениях гистограмму отображают для показа количественного параметра ориентаций основных плоскостей в каждом из диапазонов ориентаций. Преобладающую ориентацию трещины идентифицируют для подземной зоны на основании одного или нескольких идентифицированных количественных параметров. Технический результат - повышение точности получаемых данных. 3 н. и 17 з.п. ф-лы, 6 ил.



ФИГ.4



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.
G01V 1/28 (2006.01)
G06F 17/50 (2006.01)
G06F 19/00 (2011.01)
E21B 43/26 (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: **2015116807/28, 23.08.2013**
(24) Effective date for property rights:
23.08.2013
Priority:
(30) Convention priority:
05.10.2012 US 61/710,582;
17.05.2013 US 13/896,792
(45) Date of publication: **20.08.2016** Bull. № 23
(85) Commencement of national phase: **05.05.2015**
(86) PCT application:
US 2013/056487 (23.08.2013)
(87) PCT publication:
WO 2014/055170 (10.04.2014)
Mail address:
129090, Moskva, ul. B. Spasskaja, 25, str. 3, OOO
"JUrIdicheskaja firma Gorodiskij i Partnery"

(72) Inventor(s):
MA TSzyanfu (US),
LIN Avi (US),
UOLTERS KHarold Grejson (US)
(73) Proprietor(s):
KHELLIBERTON ENERDZHI SERVISIZ,
INK. (US)

(54) **IDENTIFICATION OF PREVAILING ORIENTATIONS OF CRACKS**

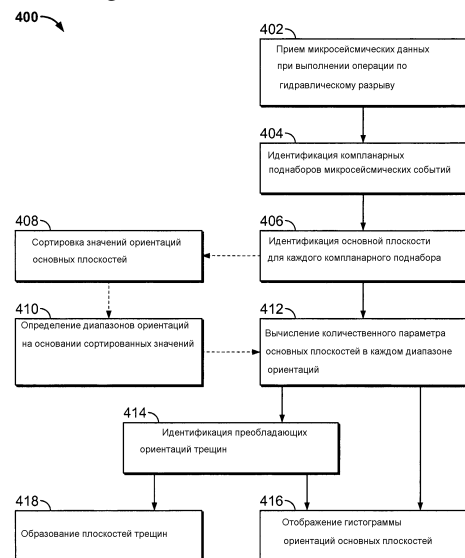
(57) Abstract:

FIELD: geophysics.

SUBSTANCE: invention relates to geophysics and can be used for identification of properties of fractures in underground area. According to certain aspects orientation of main plane is determined for each of plurality of basic planes. Basic planes are determined with help of coplanar subsets of microseismic events when performing operations of hydraulic fracturing of underground zone. Quantitative parameter of orientations of basic planes in each of plurality of bands is calculated. In some embodiments, histogram is displayed for displaying quantitative parameter orientations of basic planes in each of ranges of orientations. Prevailing orientation of fracture is identified for underground zone on basis of one or more identified quantitative parameters.

EFFECT: technical result is improved accuracy of obtained data.

20 cl, 6 dwg



ФИГ.4

C1
2
5
9
4
3
7
3
C1

RU
2
5
9
4
3
7
3
C1

ПЕРЕКРЕСТНАЯ ССЫЛКА НА РОДСТВЕННЫЕ ЗАЯВКИ

[0001] По этой заявке испрашивается преимущество приоритетов предварительной заявки №61/710582 на патент США под названием “Identifying dominant fracture orientations”, поданной 5 октября 2012 года и заявки №13/896792 на патент полезности США под названием “Identifying dominant fracture orientations”, поданной 17 мая 2013 года.

УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ

[0002] Это описание относится к идентификации преобладающих ориентаций трещин на основании микросейсмических данных. Микросейсмические данные часто регистрируют в связи с операциями по гидравлическому разрыву, выполняемыми относительно подземного пласта. Операции по гидравлическому разрыву обычно выполняют для создания искусственных трещин в подземном пласте и тем самым для повышения продуктивности подземного углеводородного пласта. Давления, создающиеся при выполнении операции по гидравлическому разрыву пласта, могут наводить низкоамплитудные и низкоэнергетические сейсмические события в подземном пласте, а события можно обнаруживать датчиками и собирать для анализа.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

[0003] Согласно общему аспекту преобладающие ориентации трещин в подземной зоне идентифицируют на основании микросейсмических данных.

[0004] Согласно некоторым аспектам ориентацию основной плоскости определяют для каждой из множества основных плоскостей. Основные плоскости определяются компланарными поднаборами или содержатся в компланарных поднаборах данных о микросейсмических событиях (например, о трех или большем количестве микросейсмических событий), собираемых при выполнении операции по гидравлическому разрыву подземной зоны (например, собираемых до, во время или после операций по гидравлическому разрыву). Вычисляют количественный параметр ориентаций основных плоскостей в каждом из множества диапазонов ориентаций (например, направлений). Преобладающую ориентацию трещины идентифицируют для подземной зоны на основании одного или нескольких идентифицированных количественных параметров.

[0005] Осуществления могут включать один или несколько нижеследующих признаков. Гистограмму (например, основанную на преобразованиях Хафа или других вычислениях) вычисляют и отображают; гистограмма показывает количественный параметр ориентаций основных плоскостей в каждом из диапазонов направлений. Идентифицированным количественным параметром ориентаций основных плоскостей может быть значение вероятности, статистическое значение, значение частоты, числовое значение или значение другого вида.

[0006] Дополнительно или в качестве варианта эти и другие осуществления могут включать в себя один или несколько нижеследующих признаков. Каждая ориентация основной плоскости включает в себя угол простирания и угол наклона для одной из основных плоскостей. Множество диапазонов ориентаций идентифицируют на основании ориентаций основных плоскостей. Множество диапазонов ориентаций идентифицируют путем сортировки углов простирания, идентификации кластеров сортированных углов простирания, сортировки углов падения, идентификации кластеров сортированных углов падения и определения диапазонов ориентаций на основании кластеров сортированных углов простирания и кластеров сортированных углов падения.

[0007] Дополнительно или в качестве варианта эти и другие осуществления могут включать в себя один или несколько нижеследующих признаков. Множество диапазонов

ориентаций представляют собой фиксированные значения, определяемые независимо от ориентаций основных плоскостей. Каждый компланарный поднабор микросейсмических событий идентифицируют на основании данных о микросейсмических событиях. Вычисляют нормальный вектор к основной плоскости, определяемой каждым компланарным поднабором. Ориентации основных плоскостей вычисляют на основании нормальных векторов.

[0008] Дополнительно или в качестве варианта эти и другие осуществления могут включать в себя один или несколько нижеследующих признаков. Идентификация преобладающей ориентации трещины включает в себя идентификацию множества преобладающих ориентаций трещин. Идентификация множества преобладающих ориентаций трещин включает в себя идентификацию диапазонов ориентаций, имеющих наибольшие количественные параметры плоскостей трещин. Идентифицируют кластер микросейсмических событий, связанных с каждой из преобладающих ориентаций трещин. Преобладающую плоскость трещины для каждой преобладающей ориентации трещины образуют на основании подбора (например, оптимального или иного) микросейсмических событий в кластере. Процесс подбора может быть основан на алгоритмах наименьших расстояний, алгоритмах максимального правдоподобия или любых других подходящих способах.

[0009] Подробности одного или нескольких осуществлений отражены на сопровождающих чертежах и в описании, приведенных ниже. Другие признаки, объекты и преимущества станут очевидными из описания и чертежей, а также из формулы изобретения.

ОПИСАНИЯ ЧЕРТЕЖЕЙ

На чертежах:

[0010] фиг. 1А - пример системы скважин; фиг. 1В - структурная схема примера вычислительной подсистемы 110 из фиг. 1А;

[0011] фиг. 2 - график, иллюстрирующий пример гистограммы;

[0012] фиг. 3А и 3В - диаграммы, иллюстрирующие пример ориентации плоскости трещины; и

[0013] фиг. 4 - блок-схема последовательности действий примера способа идентификации преобладающих ориентаций трещин.

[0014] На различных чертежах одинаковыми позициями обозначены аналогичные элементы.

ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ

[0015] Нижеследующие заявки на патенты США включены в настоящее раскрытие путем ссылки: (1) предварительная заявка №61/710582 на патент США под названием "Identifying dominant fracture orientations", поданная 5 октября 2012 года; (2) заявка на патент США №13/896400 под названием "Geometrical presentation of fracture planes", поданная 17 мая 2013 года; (3) заявка №13/896389 на патент США под названием "Analyzing microseismic data from a fracture treatment", поданная 17 мая 2013 года; (4) заявка №13/861986 на патент США под названием "Identifying orientation clusters from microseismic data", поданная 12 апреля 2013 года; (5) заявка №13/896394 на патент США под названием "Determining a confidence value for a fracture plane", поданная 17 мая 2013 года; (6) заявка №13/896406 на патент США под названием "Managing microseismic data for fracturing matching", поданная 17 мая 2013 года; (7) заявка №13/792772 на патент США под названием "Updating microseismic histogram data", поданная 11 марта 2013 года; (8) заявка №13/896425 на патент США под названием "Propagating fracture plane updates", поданная 17 мая 2013 года; (9) заявка №13/896617 на патент США под

названием “Identifying fracture planes from microseismic data”, поданная 17 мая 2013 года.

[0016] Согласно некоторым аспектам, которые описываются в этой заявке, параметры трещин, преобладающие ориентации трещин или другие данные идентифицируют на основании микросейсмических данных. В некоторых отдельных случаях данные этих и других видов динамически идентифицируют, например, в реальном времени в течение операции по гидравлическому разрыву или работы по гидравлическому разрыву. При многих применениях и в способах анализа необходима идентификация в реальном времени плоскостей трещин на основании микросейсмических событий, а индивидуальные плоскости трещин могут быть отображены для показа временной эволюции и геометрического сокращения, в том числе местоположения, распространения, роста, уменьшения или исчезновения плоскостей трещин. Такие функциональные возможности могут быть включены в системы управления, программное обеспечение, техническое обеспечение или инструментальные средства других видов, доступные для инженеров или операторов нефтегазовой отрасли, когда они анализируют потенциальные нефтегазовые месторождения, стимулируют трещины гидравлического разрыва и анализируют получающиеся сигналы. Такими инструментальными средствами может обеспечиваться надежный и непосредственный интерфейс для представления и визуализации динамических характеристик трещин гидравлического разрыва, который может облегчать анализ сложности трещин, структуры сетки трещин, перемещений блоков породы и геометрии коллектора. Такие инструментальные средства могут облегчать оценивание эффективности операции по гидравлическому разрыву, возрастающей, например, в результате усовершенствования, улучшения или оптимизации плотности трещин и длины и высоты траекторий. Такие усовершенствования при выполнении операции по гидравлическому разрыву, применяемые к коллектору, могут приводить к повышению добычи углеводородов или других ресурсов или продуктов из коллектора.

[0017] Операции по гидравлическому разрыву можно применять в любой подходящей подземной зоне. Операции по гидравлическому разрыву часто применяют для плотных пластов с низкой проницаемостью коллекторов, которые могут включать в себя обычные нефтегазоносные коллекторы с низкой проницаемостью, непрерывные бассейновые ресурсные зоны и сланцевые газовые коллекторы или пласты других видов. Гидравлическим разрывом можно создавать искусственные трещины в геологической среде, что может повышать добычу углеводородов из коллектора.

[0018] Во время применения операции по гидравлическому разрыву вследствие нагнетания жидкостей под высоким давлением могут изменяться напряжения, повышаться напряжения, изменяться ориентации напряжений, накапливаться напряжения сдвига и возникать другие эффекты в геологических подземных структурах. В некоторых отдельных случаях микросейсмические события связаны с трещинами гидравлического разрыва, создаваемыми при выполнении работ по гидравлическому разрыву. Акустическая энергия или звуки, связанные с напряжениями в породе, деформациями или гидравлическим разрывом, могут быть обнаружены и собраны с помощью датчиков. В некоторых отдельных случаях микросейсмические события имеют относительно низкую энергию (например, на каротажной диаграмме значение интенсивности или величина момента меньше трех), и некоторая неопределенность, или неточность, или погрешность измерения связана с местоположениями событий. Неопределенность может быть описана, например, вытянутым сфероидом, при этом максимальное правдоподобие соответствует центру сфероида и минимальное правдоподобие соответствует краю. Кроме того, в некоторых отдельных случаях

неопределенность момента (или интенсивности) сигнала, неопределенность отметки времени события или сочетание неопределенностей этих и других видов может возникать и может описываться аналогичными или другими способами.

[0019] Картирование микросейсмических событий можно использовать для определения геометрического положения места источника микросейсмических событий на основании обнаруживаемых продольных и поперечных волн. Из обнаруживаемых продольных и поперечных волн (например, р-волн и s-волн) можно получать дополнительную информацию о микросейсмических событиях, в том числе положение места источника, местоположение события и неопределенность измерения положения, время возникновения события, величину момента события, направление движения частиц и спектр излучения энергии, и возможно, другие параметры. Мониторинг микросейсмических событий можно осуществлять в реальном времени, и кроме того, в некоторых отдельных случаях события обрабатывают в реальном времени в течение операции по гидравлическому разрыву. В некоторых отдельных случаях после операции по гидравлическому разрыву микросейсмические события, возникающие в результате выполнения операции, собирают и совместно обрабатывают как «постданные».

[0020] Обработка данных о микросейсмических событиях, собираемых при выполнении операции по гидравлическому разрыву, может включать в себя сопоставление трещин (также называемое картированием трещин). В процессе сопоставления трещин можно идентифицировать плоскости трещин в любой зоне на основании микросейсмических событий, собранных из зоны. В некоторых примерах вычислительных алгоритмов для сопоставления трещин используются данные о микросейсмических событиях (например, местоположение событий, неопределенность измерения местоположений событий, величина момента событий и т.д.) для идентификации индивидуальных трещин, которые соответствуют собранному набору микросейсмических событий. Некоторые примеры вычислительных алгоритмов позволяют вычислять статистические свойства картин трещин. Статистические свойства могут включать в себя, например, ориентацию трещин, тренды ориентаций трещин, размер трещин (например, длину, высоту, площадь, поперечное сечение и т.д.), плотность трещин, сложность трещин, свойства сетки трещин и т.д. В некоторых вычислительных алгоритмах учитывается неопределенность местоположений событий путем использования реализаций местоположений микросейсмических событий. Например, альтернативные статистические реализации, связанные с методами Монте-Карло, могут использоваться при заданном распределении вероятностей относительно сфероидного распределения или распределения другого вида.

[0021] Обычно алгоритмы сопоставления трещин могут работать по данным в реальном времени, постданным или по любому сочетанию временных данных этих и других видов. Некоторые вычислительные алгоритмы сопоставления трещин работают только по постданным. Алгоритмы, работающие по постданным, можно использовать в случае, когда любой поднабор из нескольких поднаборов обрабатываемых микросейсмических данных собирают при выполнении операции по гидравлическому разрыву; такие алгоритмы могут обращаться (например, как к исходным данным) к полному поднабору обрабатываемых микросейсмических событий. В некоторых осуществлениях алгоритмы сопоставления трещин могут работать по данным в реальном времени. Такие алгоритмы можно использовать для автоматического сопоставления в реальном времени трещин в течение операции по гидравлическому разрыву. Алгоритмы, работающие по данным в реальном времени, можно использовать в течение операции по гидравлическому разрыву и такими алгоритмами можно

адаптировать или динамически обновлять модель ранее идентифицированных трещин для отражения вновь зарегистрированных микросейсмических событий. Например, одновременно с обнаружением и сбором микросейсмических событий с поля обработки для гидравлического разрыва алгоритм автоматического сопоставления в реальном времени трещин может реагировать на эти новые события путем динамической идентификации и получения плоскостей трещин в реальном времени из уже собранных микросейсмических событий. Некоторые вычислительные алгоритмы сопоставления трещин могут работать по сочетанию постданных и данных в реальном времени.

[0022] В некоторых случаях, когда новое микросейсмическое событие добавляется к существующему набору N событий, которые уже были собраны в реальном времени, N+1 событие можно рассматривать как постданные и обрабатывать, например, с помощью алгоритма, который может работать по постданным. В некоторых условиях нет достаточного времени для выполнения в полной мере в реальном времени алгоритма, работающего по постданным. В некоторых осуществлениях данные о новых событиях могут обрабатываться в должной мере на основании, например, характера поступающих в реальном времени событий, разнесения их во времени, геометрических местоположений, накопленных событий, которые не были полностью обработаны, или сочетания этих и других критериев.

[0023] В некоторых случаях алгоритмы отображения приспособливают для работы в условиях, которые возникают при обработке в реальном времени микросейсмических данных. Например, проблемы или ситуации нескольких видов могут возникать преимущественно в контексте реального времени. В некоторых отдельных случаях способы обработки в реальном времени можно приспособить для учета (или для снижения или исключения) низкой точности, которая иногда связана с трещинами, выделяемыми из наборов данных, не содержащих достаточного количества микросейсмических событий или не содержащих достаточного количества микросейсмических событий в определенных частях области. Некоторые способы обработки в реальном времени можно приспособить для формирования данных о трещинах, которые согласуются с данными о трещинах, получаемыми на основании способов обработки постданных. Например, при обработке одинаковых данных некоторыми способами обработки в реальном времени, описанными в этой заявке, получают результаты, которые статистически являются такими же, соответствующими статистическому критерию проверки гипотезы (статистическому T-критерию и F-критерию), как результаты, получаемые способами обработки постданных.

[0024] В некоторых случаях способы обработки в реальном времени можно без труда адаптировать (например, с точки зрения пользователя моментально) для представления пользователям данных об идентифицированных трещинах. Такие особенности могут позволить промышленным инженерам или операторам динамически получать информацию о геометрии трещин и при необходимости корректировать параметры операции по гидравлическому разрыву (например, для совершенствования, улучшения, оптимизации или же изменения операции). В некоторых отдельных случаях плоскости трещин динамически получают из микросейсмических данных и отображают в реальном времени для промышленных инженеров. Способы обработки в реальном времени могут иметь характеристику, обеспечивающую высокую скорость выполнения операций. В некоторых случаях характеристику можно улучшить с помощью технологии параллельных вычислений, технологии распределенных вычислений, способов параллельной поточной обработки, быстродействующих алгоритмов двоичного поиска или сочетания их, а также других технических и программных решений, которые

облегчают выполнение операций в реальном времени.

[0025] В некоторых осуществлениях технологией сопоставления трещин может непосредственно представляться информация о плоскостях трещин, связанных с трехмерными микросейсмическими событиями. В представляемых плоскостях трещин могут отображаться сетки трещин, которые имеют многочисленные ориентации и формируют сложные картины трещин. В некоторых случаях параметры трещин гидравлического разрыва получают из облака данных о микросейсмических событиях; такие параметры могут включать в себя, например, тренды ориентаций трещин, плотность трещин и сложность трещин. Информация о параметрах трещин может представляться промышленным инженерам или операторам, например, на табличном, числовом или графическом интерфейсе или интерфейсе, на котором сочетаются табличные, числовые и графические элементы. Графический интерфейс может быть представлен в реальном времени и может показывать в реальном времени динамические характеристики трещин гидравлического разрыва. В некоторых отдельных случаях это может помочь промышленным инженерам выполнять анализ сложности трещин, сетки трещин и геометрии коллектора или может помочь им лучше понять процесс протекания гидравлического разрыва.

[0026] В некоторых осуществлениях точные значения достоверности используют для количественного оценивания показателя достоверности плоскостей трещин, получаемых из микросейсмических данных. Точные значения достоверности можно использовать для классификации трещин по уровням достоверности. Например, три уровня достоверности (низкий уровень достоверности, средний уровень достоверности и высокий уровень достоверности) подходят для некоторых ситуаций, тогда как для иных ситуаций может подходить другое количество (например, два, четыре, пять и т.д.). Точное значение достоверности плоскости трещины можно вычислить на основании любых подходящих данных. В некоторых осуществлениях точное значение достоверности плоскости трещины вычисляют на основании местоположений микросейсмических событий и неопределенностей положений, величины моментов индивидуальных микросейсмических событий, расстояний между индивидуальными событиями и их опорной плоскостью трещин, количеством опорных событий, связанных с плоскостью трещины, и веса вариации ориентации трещины наряду с некоторыми другими.

[0027] Точные значения достоверности можно вычислять и плоскости трещин можно классифицировать в любой подходящий момент времени. В некоторых случаях точные значения достоверности вычисляют и плоскости трещин классифицируют в реальном времени в течение операции по гидравлическому разрыву. Плоскости трещин могут быть представлены пользователю в любой подходящий момент времени и в любом подходящем формате. В некоторых отдельных случаях плоскости трещин представляют в реальном времени графически на пользовательском интерфейсе в соответствии с точными значениями достоверности, в соответствии с точными уровнями достоверности или в соответствии с классификацией любого другого вида. В некоторых отдельных случаях пользователи могут выбирать индивидуальные группы или индивидуальные плоскости (например, с высокими уровнями достоверности) для наблюдения или анализа. Плоскости трещин могут быть представлены пользователю в алгебраическом формате, числовом формате, графическом формате или формате, являющемся сочетанием этих или других форматов.

[0028] В некоторых осуществлениях мониторинг микросейсмических событий выполняют в реальном времени в течение операции по гидравлическому разрыву.

Кроме того, при мониторинге событий их можно обрабатывать в реальном времени, их можно обрабатывать позднее в качестве постданных или их можно обрабатывать при использовании комбинированной обработки данных в реальном времени и постданных. События можно обрабатывать любым подходящим способом. В некоторых случаях события обрабатывают индивидуально в момент времени, в который их принимают, и в порядке, в котором их принимают. Например, состояние $S(M, N-1)$ системы можно использовать для представления M плоскостей, образованных при $N-1$ предшествующих событиях. Новое наступающее N -е событие может запускать систему $S(M, N-1)$. В некоторых случаях при приеме N -го события гистограмму или распределение диапазонов ориентаций образуют или обновляют. Например, гистограмму распределения вероятностей или гистограмму преобразования Хафа вырожденных плоскостей в области углов простирания или падения можно образовать для идентификации возможных преобладающих ориентаций, включенных в наборы трещин.

[0029] Основную плоскость можно образовать на основании поднабора микросейсмических событий. Например, любые три неколлинеарные точки в пространстве могут однозначно задавать основную плоскость. Основную плоскость, заданную тремя неколлинеарными микросейсмическими событиями, можно представить нормальным вектором к плоскости с компонентами (a, b, c) . Нормальный вектор (a, b, c) можно вычислить на основании пространственного положения трех событий. Ориентацию основной плоскости можно вычислить на основании нормального вектора. Например, падение θ или простирание φ могут иметь вид

$$\theta = \arctan \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{c}, \quad \varphi = \arctan \frac{b}{a}. \quad (1)$$

Угол θ падения плоскости трещины можно представить углом между плоскостью трещины и горизонтальной плоскостью (например, плоскостью xy). Угол φ простирания плоскости трещины можно представить углом между горизонтальной опорной осью (например, осью x) и горизонтальной линией, по которой плоскость трещины пересекает горизонтальную плоскость. Например, угол простирания можно задавать относительно севера или другого горизонтального опорного направления. Плоскость трещины можно определять другими параметрами, в том числе другими угловыми параметрами, а не углом простирания и углом падения.

[0030] В общем, N событий могут поддерживать $P=N(N-1)(N-2)/6$ основных плоскостей, определяемых углами простирания и падения. Гистограмму вероятности можно построить на основании углов ориентации. Гистограмма вероятности или улучшенная гистограмма преобразования Хафа может иметь подходящую конфигурацию, основанную на размере столбика гистограммы. Например, конфигурация гистограммы, фиксированный набор переменных и статический размер столбиков могут быть основаны на фиксированном размере столбиков и фиксированном количестве столбиков, естественном оптимальном размере столбиков в области углов простирания и падения или столбиков гистограммы других видов. Гистограмма может быть основана на любом подходящем количестве микросейсмических событий (например, десятках, сотнях, тысячах и т.д.) или любом подходящем диапазоне ориентаций. В некоторых случаях многочисленные дискретные столбики определяют для гистограммы, и каждый столбик представляет дискретный диапазон ориентаций. Количественный параметр основных плоскостей в каждом дискретном диапазоне можно вычислить на основании основных плоскостей. В некоторых случаях каждая ориентация основной плоскости попадает в

диапазон ориентаций, связанный с одним из столбиков. Например, в случае N микросейсмических событий каждую из P основных плоскостей можно приписать к столбику гистограммы и можно вычислить количественный параметр основных плоскостей, приписанных к каждому столбику. Вычисленный количественный параметр для каждого столбика может быть любым подходящим значением. Например, количественный параметр может быть ненормированным числом основных плоскостей, количественный параметр может быть нормированной вероятностью, частотой, или частью основных плоскостей, или количественный параметр может быть значением другого вида, которое пригодно для гистограммы. Гистограмму можно образовать для представления количественного параметра основных плоскостей, приписанных ко всем столбикам, или для представления количественных параметров основных плоскостей, приписанных к поднабору столбиков.

[0031] В некоторых примерах гистограмму представляют в виде трехмерной столбиковой диаграммы, трехмерной карты поверхности или другого подходящего графика в надлежащей системе координат. Пики на гистограммном графике могут показывать преобладающие ориентации трещин. Например, по одной оси гистограммы можно представлять углы простирания от 0° до 360° (или в другом диапазоне) и углы простирания можно подразделять на любое подходящее число столбиков; по другой оси гистограммы можно представлять углы падения от 60° до 90° (или в другом диапазоне) и углы падения можно подразделять на любое подходящее число столбиков, которые могут иметь одинаковые или различные размеры. Количественный параметр (например, вероятность) для каждого столбика можно представлять по третьей оси гистограммы. Результирующий график может иметь локальные максимумы (пики). Каждый локальный максимум (пик) может показывать соответствующий угол простирания и угол падения, которые отображают преобладающую ориентацию трещины. Например, локальный максимум гистограммы может показывать, что большее число основных плоскостей выровнены по направлению этой ориентации (или диапазону ориентаций), чем по направлению соседних ориентаций, и эти основные плоскости почти параллельны или по существу находятся на одном уровне.

[0032] Диапазон ориентаций, отображаемый каждым столбиком гистограммы, можно определить любым соответствующим способом. В некоторых случаях каждый столбик представляет заданный диапазон ориентаций. Например, можно использовать способ для неравномерно распределенных столбиков фиксированных размеров. В некоторых случаях диапазон или размер каждого столбика зависит от данных, представляемых гистограммой. Например, можно использовать способ для естественных оптимальных размеров столбиков. Например, можно использовать способ для адаптивных размеров столбиков. В некоторых отдельных случаях ориентации основных плоскостей сортируют, а кластеры сортированных ориентаций идентифицируют. Например, все простирания можно сортировать в порядке понижения или повышения и затем группировать в кластеры; аналогично, все значения падения можно сортировать в порядке понижения или повышения и затем группировать в кластеры. Кластеры можно связывать с двумерной сеткой и можно подсчитывать количество основных плоскостей в каждой ячейке сетки. В некоторых случаях этим способом можно динамически формировать адаптивные кластеры, что приводит к получению высокоточных значений для преобладающих ориентаций. Этот способ и связанные с ними детализации можно реализовать при вычислительной сложности $N^3 \log(N)$ и в рамках обычной сложности компьютерной памяти. В некоторых случаях размеры столбиков для простирания и падения фиксированы и каждую ячейку сетки размещения основной плоскости можно

точно определить с помощью соответствующего простираания и падения при вычислительной сложности N^3 .

[0033] Плоскости трещин, связанные с набором микросейсмических событий, можно получить на основании преобладающих ориентаций, включенных в гистограммные данные. Основные плоскости, для которых поддерживается преобладающая ориентация (θ, φ) , могут быть почти параллельными или же располагаться на одном уровне. Основные плоскости, расположенные на одном уровне, можно объединить друг с другом с образованием новой плоскости трещин с более сильной опорой (например, представляющей большее число микросейсмических событий). Любой подходящий способ можно использовать для объединения плоскостей трещин. В некоторых случаях для каждой преобладающей ориентации (θ, φ) образуют нормаль к вектору плоскости с составляющими $(\sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi, \cos \theta)$. В некоторых отдельных случаях результаты не чувствительны к местоположению плоскости и без потери общности плоскость можно принимать во внимание через посредство ее нормального вектора (например, приняв, что начало находится в плоскости). Плоскость можно описать как $x \sin \theta \cos \varphi + y \sin \theta \sin \varphi + z \cos \theta = 0$. Расстояние (с учетом знака) каждого события (x_0, y_0, z_0) от основной плоскости до образованной плоскости может быть представлено в виде $d = -(x_0 \sin \theta \cos \varphi + y_0 \sin \theta \sin \varphi + z_0 \cos \theta)$. В этом представлении события с противоположными знаками d расположены на противоположных сторонах плоскости.

[0034] В некоторых случаях микросейсмические события группируют в кластеры на основании их расстояния от образованных плоскостей трещин. Например, кластер событий может содержать группу событий, ближайших к образованной плоскости трещины. Сам по себе каждый кластер микросейсмических событий может поддерживать конкретную плоскость трещины. Размер кластера соотносится с числом событий, которые содержит кластер. В некоторых случаях вводимыми пользователем данными или другими программными данными можно задавать минимальное число событий в поддерживаемом кластере. Минимальный размер кластера может зависеть от числа микросейсмических событий в данных. В некоторых отдельных случаях минимальный размер кластера должен быть больше трех или равен трем. Например, кластеры, имеющие размер, превышающий минимальный размер кластера или равный ему, можно считать легитимными плоскостями трещин. Алгоритм подгонки можно применить для определения местоположения и значений неопределенности местоположения событий в каждом кластере для нахождения соответствующих плоскостей трещин. В некоторых осуществлениях для процесса создания кластеров можно использовать адаптивный способ. В некоторых случаях (оптимальный) набор кластеров можно получать путем неравномерного группирования в каждом из двух направлений (например, по углам простираания и падения) ориентации основной плоскости.

[0035] Любой подходящий способ можно использовать для идентификации плоскости трещины на основании набора микросейсмических событий. В некоторых случаях используют подбор методом хи-квадрат. С учетом K наблюдаемых микросейсмических событий местоположения можно представить как (x_i, y_i, z_i) , а неопределенности измерений можно представить как $(\sigma_{ix}, \sigma_{iy}, \sigma_{iz})$, где $1 \leq i \leq K$. Параметры модели $z = ax + by + c$ плоскости можно вычислить, например, путем минимизации оценочной функции хи-квадрат

$$\chi^2(a, b, c) = \sum_{i=1}^K \frac{(z_i - ax_i - by_i - c)^2}{\sigma_{i,z}^2 + a^2 \sigma_{i,x}^2 + b^2 \sigma_{i,y}^2}. \quad (2)$$

Оценочную функцию хи-квадрат можно решить любым подходящим способом. В некоторых отдельных случаях решение можно получить путем нахождения решений трех уравнений в частных производных $\chi^2(a, b, c)$ относительно переменных, где каждую частную производную приводят к нулю. В некоторых отдельных случаях отсутствует

5 аналитическое решение для этих нелинейных уравнений. Численные методы (например, метод Ньютона, метод Ньютона-Рафсона, метод сопряженных градиентов или другой метод) можно применять, чтобы находить решение для параметров a , b и c , и при этом могут быть вычислены углы простирания и падения (например, при использовании

10 уравнения (1), приведенного выше). Преобладающая ориентация плоскости трещины, вычисленная на основании микросейсмических событий, может быть такой же, как преобладающая ориентация трещины, идентифицированная по гистограмме, или может несколько отличаться от нее. Дополнительный или другой способ можно использовать для нахождения решений для коэффициентов плоскости, например, путем минимизации

15 максимального абсолютного значения i -го вклада $\frac{(z_i - ax_i - by_i - c)}{\sqrt{\sigma_{i,z}^2 + a^2\sigma_{i,x}^2 + b^2\sigma_{i,y}^2}}$ или любой другой подходящей метрики.

[0036] В некоторых осуществлениях с помощью алгоритма выполняют итерацию относительно всех возможных преобладающих ориентаций для распространения на

20 все возможные плоскости трещин. В некоторых случаях с помощью алгоритма выполняют итерацию относительно выбранного поднабора возможных преобладающих ориентаций. При итерациях плоскости могут сходиться. Некоторые плоскости могут точно совпадать друг с другом, а некоторые могут находиться близко друг к другу. Например, две плоскости могут считаться находящимися близко друг к другу, когда

25 среднее расстояние одной плоскости от другой плоскости меньше заданного порога. Пороговое расстояние может задаваться, например, как контрольный параметр. Пороговое расстояние может задаваться, например, адаптивно во время процесса итерации. С помощью алгоритма можно объединять друг с другом близкие плоскости и опорные события одной плоскости можно связывать с опорными событиями другой,

30 полученной объединением плоскости (плоскостей). С помощью алгоритма объединения можно определять некоторые события, которые были связаны с двумя объединяемыми плоскостями, не связанными с полученной объединением плоскостью. Например, применительно к ситуации реального времени при некоторых относительных количествах новых несвязанных событий процесс объединения может быть перенесен

35 на последующие этапы алгоритма или на позднее время.

[0037] В некоторых случаях ограничения накладывают на плоскости трещин, идентифицированные на основании микросейсмических данных. Например, в некоторых случаях невязка расстояний событий должна быть меньше, чем заданное допустимое

40 расстояние. Допустимое расстояние можно задавать, например, в качестве контрольного параметра. В некоторых отдельных случаях идентифицированные плоскости трещин необходимо надлежащим образом вычислять, чтобы обозначать (максимальный заданный) конечный размер трещин. Границу усеченных плоскостей можно вычислять на основании положения опорных событий и неопределенности измерения местоположения события. Новые конечно-размерные плоскости трещин могут быть

45 объединены с уже идентифицированными плоскостями трещин при соблюдении условий конечного размера.

[0038] В некоторых отдельных случаях новое N -ое микросейсмическое событие связывают с плоскостями трещин, уже идентифицированными на основании

предшествующих N-1 микросейсмических событий. При связывании нового события с существующей трещиной алгоритм можно использовать для обновления существующей трещины. Например, обновление трещины может изменить геометрию, местоположение, ориентацию или другие параметры трещины. При выборе одной из ранее

5 идентифицированных плоскостей трещин можно вычислить расстояние плоскости трещины от нового события. Если расстояние меньше контрольного параметра расстояния или равно ему, новое событие может быть добавлено к опорному набору событий для плоскости трещины. Если расстояние больше контрольного параметра расстояния, другие ранее идентифицированные плоскости трещин можно выбирать

10 (например, итерационно или рекурсивно) до тех пор, пока не будет обнаружена плоскость в пределах порогового расстояния. После того как новое событие для плоскости трещины добавлено к опорному набору, можно оценить и при необходимости можно повторно вычислить новые значения простирания и падения (например, при использовании хи-квадрат метода подбора или другого статистического или

15 детерминистского метода) для плоскости трещины. Обычно повторное вычисление параметров трещины приводит к ограниченному изменению ориентации вследствие условного регулирования расстояния.

[0039] В некоторых случаях, когда новое микросейсмическое событие связывают с плоскостью трещины, один или несколько параметров (например, невязку расстояния,

20 площадь и т.д.) можно модифицировать или оптимизировать. Невязка g расстояния плоскости может обозначать среднее расстояние от опорных событий до плоскости. Если невязка расстояния меньше заданного остаточного допуска T , новое событие можно выделить в относящийся к нему набор событий для плоскости. В некоторых случаях дополнительный процесс, с помощью которого другие связанные события из

25 опорного набора выбирают из перечня, начинают и завершают, когда невязка g расстояния попадает в пределы заданного T . В некоторых отдельных случаях выбранное событие необходимо для связи его с другой плоскостью трещины (например, с соседней плоскостью). Если для выбранного события не находят подходящую плоскость, это событие можно отправить в корзину несвязанных (как например, в случае, когда новое

30 наступающее событие не может быть ассоциировано ни с какой из существующих плоскостей). Если для выбранного события находят подходящую плоскость, то выбранное событие можно рассматривать как новое событие для этой плоскости. Приведенный выше алгоритм можно повторять и завершать, например, когда уровень достоверности новой плоскости (обусловленной новым событием) несильно изменяется

35 относительно предшествующего уровня достоверности (например, изменение находится в пределах пороговых значений), или в соответствии с любым другим подходящим критерием завершения. Площадь плоскости трещины может отображать размер плоскости трещины. Эксперимент показывает, что новое событие обычно приводит к распространению плоскости трещины по длине, росту по высоте или к тому и другому.

40 Поэтому вычислительные процессы могут быть ограничены условием неубывающей площади, в результате чего новая площадь плоскости должна вырастать до большей величины по сравнению с площадью исходной плоскости (в отличие от сокращения) или оставаться прежней, когда новое событие добавляют к плоскости.

[0040] Ориентацию плоскости трещины можно выразить в зависимости от угла или

45 любой из его тригонометрических функций. В некоторых отдельных случаях ориентация плоскости трещины может включать в себя две независимые составляющие, при этом каждая может отображать угол плоскости трещины. Например, нормальный вектор, углы простирания и падения или другие подходящие параметры можно использовать

для отображения ориентации плоскости трещины. Изменение ориентации плоскости трещины (или другие изменения плоскости трещины) может приводить к перемещению некоторых связанных опорных событий из перечня связанных событий в перечень несвязанных событий на основании их расстояний от обновленной плоскости трещины.

5 Дополнительно или в качестве варианта изменение ориентации плоскости трещины может приводить к приписыванию некоторых ранее не связанных событий к плоскости трещины на основании близости их к обновленной плоскости трещины. В дополнение к этому некоторые события, связанные с близкими плоскостями, также могут быть связаны с текущей плоскостью. Если новое событие связывают с двумя плоскостями трещин, плоскости трещин могут пересекаться. В некоторых случаях пересекающиеся плоскости могут быть объединены. Если новое событие не принадлежит ни к какой существующей плоскости трещины, его можно определить в перечень несвязанных событий.

[0041] В любой точке N накопленных микросейсмических событий можно считать поднабором из набора конечных постданных о событиях. В таких случаях гистограмма или распределение ориентаций, основанное на первых N событиях, может отличаться от гистограммы или распределения ориентаций, образованного на основании конечных постданных. Некоторые плоскости трещин, полученные на основании N микросейсмических событий, могут не быть точными, и эта неточность может снижаться по мере приращения времени или по мере накопления большего количества событий. Например, точность и достоверность могут быть ниже в начальный момент времени, когда обнаруживаемые плоскости трещин связаны с микросейсмическими событиями, расположенными близко к стволу скважины. Такие данные могут указывать на плоскости трещин, которые расположены почти параллельно стволу скважины, даже если эти плоскости не представляют реальных трещин.

[0042] Точную достоверность трещины можно использовать как меру определенности, связанной с плоскостями трещин, идентифицируемыми на основании микросейсмических данных. В некоторых случаях точную достоверность идентифицируют в реальном времени в течение операции по гидравлическому разрыву. Точную достоверность можно определять на основании любых подходящих данных при использовании любых подходящих вычислений. В некоторых случаях на точное значение достоверности плоскости трещины влияет количество микросейсмических событий, связанных с плоскостью трещины. Например, точное значение достоверности можно масштабировать (например, линейно, нелинейно, экспоненциально, полиномиально и т.д.) относительно количества микросейсмических событий в соответствии с функцией. Ряд микросейсмических событий, связанных с плоскостью трещины, можно включать (например, как вес, экспоненту и т.д.) в уравнение для вычисления точной достоверности. В некоторых отдельных случаях плоскость трещины имеет повышенное значение достоверности, когда плоскость трещины поддерживается большим количеством точек микросейсмических данных (или пониженное значение достоверности, когда плоскость трещины поддерживается меньшим количеством точек микросейсмических данных).

[0043] В некоторых случаях на точное значение достоверности плоскости трещины влияет неопределенность местоположений микросейсмических событий, связанных с плоскостью трещины. Например, точное значение достоверности можно масштабировать (например, линейно, нелинейно, экспоненциально, полиномиально и т.д.) относительно неопределенности местоположения микросейсмического события в соответствии с функцией. Неопределенность местоположения микросейсмического события можно включать (например, как вес, экспоненту или любую спадающую

функцию расстояния и т.д.) в уравнение для вычисления точной достоверности. В некоторых отдельных случаях плоскость трещины имеет повышенное значение достоверности, когда плоскость трещины поддерживается точками микросейсмических данных, имеющими низкую неопределенность (или пониженное значение достоверности, когда плоскость трещины поддерживается точками микросейсмических данных, имеющими повышенную неопределенность).

[0044] В некоторых случаях на точное значение достоверности плоскости трещины влияет величина момента микросейсмических событий, связанных с плоскостью трещины. Например, точное значение достоверности можно масштабировать (например, линейно, нелинейно, экспоненциально, полиномиально и т.д.) относительно величины момента микросейсмического события в соответствии с функцией. Величину момента микросейсмического события можно включить (например, как вес, экспоненту и т.д.) в уравнение для вычисления точной достоверности. Величина момента микросейсмического события может обозначать энергию и интенсивность (иногда пропорциональную квадрату амплитуды) события. Например, величина момента микросейсмического события может быть значением энергии или интенсивности по логарифмической шкале или значением иного вида, представляющим интенсивность энергии. В некоторых отдельных случаях плоскость трещины имеет повышенное значение достоверности, когда плоскость трещины поддерживается точками микросейсмических данных, имеющими повышенную интенсивность (или пониженное значение достоверности, когда плоскость трещины поддерживается точками микросейсмических данных, имеющими пониженную интенсивность).

[0045] В некоторых случаях на точное значение достоверности плоскости трещины влияет расстояние между плоскостью трещины и микросейсмическими событиями, связанными с плоскостью трещины. Например, точное значение достоверности можно масштабировать (например, линейно, нелинейно, экспоненциально, полиномиально и т.д.) относительно среднего расстояния между плоскостью трещины и микросейсмическими событиями, поддерживающими плоскость трещины. Среднее расстояние можно включить (например, как вес, экспоненту и т.д.) в уравнение для вычисления точной достоверности. В некоторых отдельных случаях плоскость трещины имеет повышенное значение достоверности, когда плоскость трещины поддерживается точками микросейсмических данных, которые в среднем находятся ближе к плоскости трещины (или пониженное значение достоверности, когда плоскость трещины поддерживается точками микросейсмических данных, которые в среднем находятся дальше от плоскости трещины).

[0046] В некоторых случаях на точное значение достоверности плоскости трещины влияет ориентация плоскости трещины относительно тренда преобладающей ориентации в наборе микросейсмических данных. Например, точное значение достоверности можно масштабировать (например, линейно, нелинейно, экспоненциально, полиномиально и т.д.) относительно угловой разности между ориентацией плоскости трещины и трендом преобладающей ориентации в микросейсмических данных. Углы ориентации могут включать в себя простирание, падение или любое релевантное сочетание (например, пространственный угол в трех измерениях). Ориентацию можно включить (например, как вес, экспоненту и т.д.) в уравнение для вычисления точной достоверности. Набор микросейсмических данных может иметь один тренд преобладающей ориентации или он может иметь многочисленные тренды преобладающей ориентации. Тренды преобладающей ориентации можно разделить, например, на первичные, вторичные и т.д. В некоторых отдельных случаях плоскость трещины имеет повышенное значение

достоверности, когда плоскость трещины согласована с трендом преобладающей ориентации в наборе микросейсмических данных (или пониженное значение достоверности, когда плоскость трещины отклоняется от тренда преобладающей ориентации в наборе микросейсмических данных).

5 [0047] Весовое значение, называемое «весом вариации ориентации трещины», может представлять собой угловую разность между ориентацией плоскости трещины и трендом преобладающей ориентации в микросейсмических данных. Вес вариации ориентации трещины может быть скалярной величиной, которая максимальна, когда плоскость трещины согласована с трендом преобладающей ориентации. Вес вариации ориентации трещины может быть минимальным при ориентациях трещин, которые максимально отстоят от тренда преобладающей ориентации трещин. Например, когда имеется единственный тренд преобладающей ориентации трещин, вес вариации ориентации трещины может быть нулевым для трещин, которые перпендикулярны (или нормальны) к преобладающей ориентации трещин. Согласно еще одному примеру, когда имеются 10 многочисленные тренды преобладающей ориентации трещин, вес вариации ориентации трещины может быть нулевым для трещин, имеющих ориентации между преобладающими ориентациями трещин. Вес вариации ориентации трещины может быть отношением вычисленной ориентации плоскости и ориентации, отраженной согласно однородному случаю.

20 [0048] В некоторых случаях, когда имеются многочисленные тренды преобладающей ориентации трещин, вес вариации ориентации трещины имеет одинаковое максимальное значение для каждого тренда преобладающей ориентации трещин. В некоторых случаях, когда имеются многочисленные преобладающие ориентации трещин, вес вариации ориентации трещины имеет другое локальное максимальное значение для каждой преобладающей ориентации трещин. Например, вес вариации ориентации трещины может быть 1,0 для трещин, которые параллельны первому тренду преобладающей ориентации трещин, 0,8 для трещин, которые параллельны второму тренду преобладающей ориентации трещин, и 0,7 для трещин, которые параллельны третьему тренду преобладающей ориентации трещин. Вес вариации ориентации трещины может снижаться до локальных минимумов между трендами преобладающих ориентаций трещин. Например, вес вариации ориентации трещины между каждой соседней парой преобладающих ориентаций трещин может определять локальный минимум на полпути между преобладающими ориентациями трещин или в другой точке между преобладающими ориентациями трещин.

35 [0049] На точный параметр достоверности может влиять неопределенность местоположения опорного микросейсмического события, величина момента опорного микросейсмического события, расстояние между опорными микросейсмическими событиями и плоскостью трещины, количество опорных событий, связанных с плоскостью, вес вариации ориентации трещины, другие значения или любое 40 соответствующее сочетание одного или нескольких из указанных. В некоторых общих моделях достоверность повышается по мере возрастания величины момента, и по мере возрастания вариации ориентации, и по мере возрастания количества опорных событий и повышения точности определения местоположения их, и по мере возрастания вариации веса как функции расстояния. Эти факторы можно использовать в качестве входных 45 данных при задании веса в уравнении для точной достоверности. Например, в некоторых моделях веса являются линейными или нелинейными функциями этих факторов, и вес вариации ориентации трещины может представлять собой больший вес, влияющий на достоверность плоскости. В некоторых примерах точную достоверность вычисляют

как:

Достоверность = (вес вариации ориентации трещины) \square *

$\sum_{i=1}^{\text{количество событий}}$ ((вес неопределенности местоположения)*

5 (вес величины момента)*(вес вариации расстояния)). (3)

Для вычисления достоверности можно использовать другие уравнения или алгоритмы.

[0050] Идентифицированные плоскости трещин можно разделить по уровням достоверности на основании точных значений достоверности плоскостей трещин. В некоторых отдельных случаях используют три уровня: низкий уровень достоверности, 10 средний уровень достоверности и высокий уровень достоверности. Можно использовать любое подходящее количество уровней достоверности. В некоторых примерах при добавлении нового события к опорному набору, связанному с существующей плоскостью трещины, соответствующий параметр достоверности трещины может возрасть, что может вызывать повышение уровня достоверности от текущего значения 15 до значения, превышающего единицу, если это значение существует. В другом примере в случае отклонения ориентации трещины от трендов ориентации, имеющих в постданных о микросейсмических событиях, по мере постепенного накопления микросейсмических событий может создаваться снижение достоверности трещины, в основном в соответствии с весом вариации ориентации трещины, в связи с чем уровень 20 достоверности плоскости понижается до низкого, если таковой существует. Это особенно применимо к трещинам, образующимся в начальный момент операции по гидравлическому разрыву; это также применимо к трещинам других видов в иных ситуациях.

[0051] Пользователям (например, промышленным инженерам, инженерам- 25 эксплуатационникам, интерпретаторам и другим) могут предоставляться графические изображения плоскостей трещин, идентифицированных на основании микросейсмических данных. В некоторых случаях графическое изображение позволяет пользователю визуализировать в реальном времени идентифицированные плоскости на графических панелях с представлением уровней достоверности. Например, три графические панели 30 могут использоваться для представления по отдельности плоскостей трещин с низким уровнем достоверности, средним уровнем достоверности и высоким уровнем достоверности. В некоторых случаях плоскости трещин с низким уровнем достоверности создаются в начальные моменты времени операции по гидравлическому разрыву. В некоторых случаях плоскости трещин с повышенным уровнем достоверности 35 распространяются с течением времени в направлении, почти перпендикулярном к стволу скважины. Поскольку новые микросейсмические события постепенно накапливаются с течением времени, графическое изображение можно обновлять, чтобы дать пользователю возможность динамически наблюдать связь плоскостей трещин между уровнями достоверности, связанными с графическими панелями.

[0052] Группы уровней достоверности можно представлять в виде графиков 40 плоскостей трещин или группы уровней достоверности можно представлять в другом формате. Группы уровней достоверности можно представлять алгебраически, например, путем показа алгебраических параметров (например, параметров для уравнения плоскости) плоскостей трещин в каждой группе. Группы уровней достоверности можно 45 представлять в числовом виде, например, путем показа числовых параметров (например, простирания, падения, площади и т.д.) плоскостей трещин в каждой группе. Группы уровней достоверности можно представлять в табличной форме, например, путем отображения таблицы алгебраических параметров или числовых параметров плоскостей

трещин в каждой группе. Кроме того, плоскость трещины можно представлять графически в трехмерном пространстве, двумерном пространстве или ином пространстве. Например, плоскость трещины можно представлять в системе прямолинейных координат (например, координат x, y, z), в полярной системе координат (например, координат r, θ, φ) или в иной системе координат. В некоторых примерах плоскость трещины может быть представлена как линия на пересечении плоскости трещины с другой плоскостью (например, линия в плоскости xy , линия в плоскости xz , линия в плоскости yz или линия в произвольной плоскости или на поверхности).

[0053] В некоторых отдельных случаях графическое изображение позволяет пользователям проследить и визуализировать пространственную и временную эволюцию конкретных плоскостей трещин, включая образование их, распространение и рост. Например, пользователь может наблюдать стадии пространственной и временной эволюции конкретной плоскости трещины, такие как, например, первоначальная идентификация плоскости трещины на основании трех микросейсмических событий, новое событие, которое изменяет ориентацию плоскости, новое событие, которое вызывает рост площади плоскости (например, по вертикали, по горизонтали или в обоих направлениях), или другие стадии эволюции плоскости трещины.

Пространственная и временная эволюция плоскостей трещин может представлять пути распространения жидкостей для гидравлического разрыва и пропантов в скелет горной породы. Визуализация динамики плоскостей трещин может помочь пользователям лучше понять процесс гидравлического разрыва, более точно выполнить анализ сложности трещины, оценить эффективность гидравлического разрыва или улучшить обработку скважины.

[0054] Хотя в этой заявке описываются примеры, включающие данные о микросейсмических событиях, способы и системы, описываемые в этой заявке, можно применять к данным других видов. Например, способы и системы, описываемые в этой заявке, можно использовать для обработки наборов данных, включающих элементы данных, которые не связаны с микросейсмическими событиями, которые могут включать в себя физические данные других видов, связанные с подземной зоной. Согласно некоторым аспектам в этой заявке предложена концепция обработки больших объемов данных, и концепцию можно приспособить для различных применений, которые конкретно не описаны в этой заявке. Например, способы и системы, описываемые в этой заявке, можно использовать для анализа пространственных координат, данных об ориентациях или информации других видов, собираемой с любого источника. Например, можно собирать образцы грунта или породы (например, во время бурения) и определять концентрацию заданного соединения (например, определенной соли) как функцию местоположения. Это может помочь геофизикам и операторам оценивать геологические слои в породе.

[0055] На фиг. 1А показано в качестве примера схематическое представление системы 100 скважин с вычислительной подсистемой 110. Приведенная для примера система 100 скважин включает в себя обрабатываемую скважину 102 и наблюдательную скважину 104. Наблюдательная скважина 104 может быть расположена на удалении от обрабатываемой скважины 102, вблизи обрабатываемой скважины 102 или на любом подходящем месте. Система 100 скважин может включать в себя одну или несколько дополнительных обрабатываемых скважин, наблюдательных скважин или скважин других типов. Вычислительная подсистема 110 может включать в себя одно или несколько вычислительных устройств или систем, расположенных возле обрабатываемой скважины 102, возле наблюдательной скважины 104 или на других

местах. Вычислительная подсистема 110 или любые ее компоненты могут располагаться на расстоянии от других компонентов, показанных на фиг. 1А. Например, вычислительная подсистема 110 может располагаться в центре обработки данных, в вычислительном оборудовании или на другом подходящем месте. Система 100 скважин может включать в себя дополнительные или другие элементы, а элементы системы скважин могут быть скомпонованы так, как показано на фиг. 1А, или в любой другой подходящей конфигурации.

[0056] Показанная для примера обрабатываемая скважина 102 представляет собой буровую скважину 101 в подземной зоне 121 ниже поверхности 106. Подземная зона 121 может включать в себя одну породную формацию или часть породной формации или подземная зона 121 может включать больше одной породной формации. В примере, показанном на фиг. 1А, подземная зона 121 включает в себя различные подземные слои 122. Подземные слои 122 могут определяться геологическими или другими свойствами подземной зоны 121. Например, каждый из подземных слоев 122 может соответствовать конкретной литологии, конкретному содержанию флюиду, конкретному профилю напряжения или давления или любой другой подходящей характеристике. В некоторых отдельных случаях один или несколько подземных слоев 122 могут быть флюидным коллектором, который содержит углеводороды или флюиды других видов. Подземная зона 121 может включать в себя любую подходящую породную формацию. Например, один или несколько подземных слоев 122 могут включать в себя песчаник, карбонатные материалы, глинистый сланец, уголь, аргиллит, гранит или другие материалы.

[0057] Показанная для примера обрабатываемая скважина 102 включает в себя подсистему 120 нагнетательной обработки, которая включает в себя инструментальные автомобили 116, автомобильные насосные установки 114 и другое оборудование. Подсистему 120 нагнетательной обработки можно применять для нагнетательной обработки подземной зоны 121 через буровую скважину 101. Нагнетательная обработка может быть операцией по гидравлическому разрыву, при которой образуются трещины в подземной зоне 121. Например, при нагнетательной обработке могут инициироваться, распространяться или открываться трещины в одном или нескольких подземных слоях 122. Операция по гидравлическому разрыву может включать в себя тестовую операцию по гидравлическому мини-разрыву, операцию по гидравлическому регулярному или полному разрыву, последующую операцию по гидравлическому разрыву, операцию по повторному гидравлическому разрыву, конечную операцию по гидравлическому разрыву или операцию по гидравлическому разрыву другого вида.

[0058] При выполнении операции по гидравлическому разрыву обрабатываемую жидкость можно нагнетать в подземную зону 121 при любых подходящих давлениях жидкости и расходах жидкости. Жидкости можно нагнетать под давлением выше или ниже давления инициирования трещин, выше или ниже давления закрытия трещин или при любом подходящем сочетании этих и других давлений жидкости. Давление инициирования трещин в пласте является минимальным давлением нагнетания жидкости, при котором могут инициироваться или распространяться искусственные трещины в пласте. При выполнении операции по гидравлическому разрыву искусственные трещины в пласте могут или могут не инициироваться и распространяться. Давление закрытия трещин в пласте является минимальным давлением жидкости, при котором существующие трещины в подземном пласте могут расширяться. При выполнении операции по гидравлическому разрыву природные или искусственные трещины в пласте могут или могут не расширяться.

[0059] Операцию по гидравлическому разрыву можно выполнять с помощью любой подходящей системы при использовании любого подходящего способа. Автомобильные насосные установки 114 могут включать в себя мобильные транспортные средства, стационарные установки, салазки, шланги, трубы, приемники для жидкости или резервуары, насосы, клапаны или другие подходящие конструкции и оборудование. В некоторых случаях автомобильные насосные установки 114 соединены с рабочей колонной, расположенной в буровой скважине 101. Во время работы автомобильные насосные установки 114 могут закачивать жидкость через рабочую колонну и в подземную зону 121. Закачиваемая жидкость может включать в себя жидкость разрыва, пропанты, промывочную жидкость, добавки или другие материалы.

[0060] Операцию по гидравлическому разрыву можно выполнять в одном месте нагнетания жидкости или в многочисленных местах нагнетания жидкости в подземной зоне, а жидкость можно нагнетать в течение одного периода времени или в течение многочисленных различных периодов времени. В некоторых отдельных случаях при выполнении операции по гидравлическому разрыву можно использовать многочисленные различные места нагнетания жидкости в одной буровой скважине, многочисленные места нагнетания жидкости в многочисленных различных буровых скважинах или на местах в любом подходящем сочетании. Кроме того, при выполнении операции по гидравлическому разрыву жидкость можно нагнетать через буровые скважины любого подходящего типа, такие как, например, вертикальные буровые скважины, наклонные буровые скважины, горизонтальные буровые скважины, криволинейные буровые скважины или любая подходящая комбинация этих и других скважин.

[0061] Операция по гидравлическому разрыву может регулироваться любой подходящей системой при использовании любого подходящего способа. Инструментальные автомобили 116 могут включать в себя мобильные транспортные средства, стационарные установки или другие подходящие структуры. Инструментальные автомобили 116 могут включать в себя систему регулирования нагнетания, которая выполняет мониторинг и регулирует операцию по гидравлическому разрыву, выполняемую подсистемой 120 нагнетательной обработки. В некоторых осуществлениях система регулирования нагнетания может находиться в соединении с другим оборудованием для мониторинга и регулирования операции по гидравлическому разрыву. Например, инструментальные автомобили 116 могут находиться в соединении с автомобильной насосной установкой 114, подземными инструментами и оборудованием для мониторинга.

[0062] Операция по гидравлическому разрыву, а также другие работы и природные явления могут создавать микросейсмические события в подземной зоне 121, а микросейсмические данные можно собирать из подземной зоны 121. Например, микросейсмические данные можно собирать с помощью одного или нескольких датчиков 112, связанных с наблюдательной скважиной 104, или микросейсмические данные можно собирать с помощью систем других видов. Микросейсмическая информация, обнаруживаемая в системе 100 скважин, может включать в себя акустические сигналы, образующиеся при природных явлениях, акустические сигналы, связанные с операцией по гидравлическому разрыву, выполняемой на протяжении обрабатываемой скважины 102, или сигналы других видов. Например, датчики 112 могут обнаруживать акустические сигналы, создаваемые сползаниями горной породы, перемещениями горной породы, растрескиваниями горной породы или другими событиями в подземной зоне 121. В некоторых отдельных случаях индивидуальные микросейсмические события можно

определять на основании микросейсмических данных.

[0063] Микросейсмические события в подземной зоне 121 могут возникать, например, вдоль или вблизи наведенных трещин гидравлического разрыва. Микросейсмические события могут быть связаны с уже существующими природными трещинами или
5 плоскостями трещин гидравлического разрыва, создаваемых работами по гидравлическому разрыву. В некоторых условиях осадконакопления большая часть обнаруживаемых микросейсмических событий связана с растрескиванием горных пород вследствие сдвига/сползания. Такие события могут или могут не соответствовать
10 наведенным растяжением трещинам гидравлического разрыва, который имеют значительную ширину. На ориентацию трещины может влиять режим напряжения, наличие систем трещин, которые были образованы в различные моменты времени в прошлом (например, при такой же или другой ориентации напряжения). В некоторых
15 осуществлениях более старые трещины могут стать зацементированными на протяжении геологического времени и могут сохраняться в геологической среде в виде плоскостей ослабления в породах.

[0064] Наблюдательная скважина 104, показанная на фиг. 1А, представляет собой буровую скважину 111 в подземной области ниже поверхности 106. Наблюдательная скважина 104 включает в себя датчики 112 и другое оборудование, которое можно
20 использовать для обнаружения микросейсмической информации. Датчики 112 могут включать в себя геофоны или аппаратуру прослушивания других видов. В системе 100 скважин датчики 112 могут быть расположены на различных местах. На фиг. 1А датчики 112 показаны установленными на поверхности 106 и ниже поверхности 106 в буровой
25 скважине 111. В дополнение к этому или в качестве варианта датчики могут быть расположены на других местах выше или ниже поверхности 106, на других местах в буровой скважине 111 или в другой буровой скважине. Наблюдательная скважина 104 может включать в себя дополнительное оборудование (например, рабочую колонну,
30 пакеры, обсадную колонну или другое оборудование), не показанное на фиг. 1А. В некоторых осуществлениях микросейсмические данные обнаруживаются датчиками, установленными в обрабатываемой скважине 102 или на поверхности, при этом наблюдательная скважина не используется.

[0065] В некоторых случаях вся вычислительная подсистема 110 или часть ее может содержаться в техническом командном центре на месте расположения скважин, на
удаленном месте в центре по управлению в реальном времени операциями, в другом
35 подходящем месте или в ряде этих мест. Система 100 скважин и вычислительная подсистема 110 могут включать в себя любую подходящую связную инфраструктуру или иметь доступ к ней. Например, система 100 скважин может включать в себя
многочисленные отдельные линии связи или сеть взаимно соединенных линий связи. Линии связи могут включать в себя проводные или беспроводные системы связи. Например, датчики 112 могут быть связаны с инструментальными автомобилями 116
40 или вычислительной подсистемой 110 по проводным или беспроводным линиям или сетям, или инструментальные автомобили 116 могут быть связаны с вычислительной подсистемой 110 по проводным или беспроводным линиям или сетям. Линии связи могут включать в себя общую сеть передачи данных, частную сеть передачи данных,
спутниковые линии, выделенные каналы связи, телекоммуникационные линии или
45 любое подходящее сочетание этих и других линий связи.

[0066] Вычислительная подсистема 110 может анализировать микросейсмические данные, собираемые в системе 100 скважин. Например, вычислительная подсистема 110 может анализировать данные о микросейсмических событиях при выполнении

операции по гидравлическому разрыву подземной зоны 121. Микросейсмические данные при выполнении операции по гидравлическому разрыву могут включать в себя данные, собираемые до, во время или после нагнетания жидкости. Вычислительная подсистема 110 может принимать микросейсмические данные в любое подходящее время. В
 5 некоторых отдельных случаях вычислительная подсистема 110 принимает микросейсмические данные в реальном времени (или по существу в реальном времени) в течение операции по гидравлическому разрыву. Например, микросейсмические данные могут передаваться к вычислительной подсистеме 110 сразу же при обнаружении датчиками 112. В некоторых отдельных случаях вычислительная подсистема 110
 10 принимает некоторые или все микросейсмические данные после завершения операции по гидравлическому разрыву. Вычислительная подсистема 110 может принимать микросейсмические данные в любом подходящем формате. Например, вычислительная подсистема 110 может принимать микросейсмические данные в формате, создаваемом микросейсмическими датчиками или детекторами, или вычислительная подсистема 110
 15 может принимать микросейсмические данные после форматирования, пакетирования или другой обработки микросейсмических данных. Вычислительная подсистема 110 может принимать микросейсмические данные с помощью любого подходящего средства. Например, вычислительная подсистема 110 может принимать микросейсмические данные по проводной или беспроводной линии связи, по проводной или беспроводной
 20 сети или с одного или нескольких дисков или других материальных носителей информации.

[0067] Вычислительную подсистему 110 можно использовать для построения гистограммы на основании микросейсмических событий. Гистограмму можно использовать, например, для идентификации преобладающих ориентаций трещин в
 25 подземной зоне 121. На фиг. 2 показан пример гистограммы. Преобладающие ориентации трещин можно идентифицировать, например, на основании локальных максимумов в гистограммных данных. Преобладающие ориентации трещин могут соответствовать ориентациям семейств трещин в подземной зоне 121. В некоторых случаях микросейсмические данные, соответствующие каждой преобладающей
 30 ориентации трещин, используют для образования одной или нескольких плоскостей трещин.

[0068] Некоторые из способов и операций, описываемых в этой заявке, можно реализовать с помощью вычислительной подсистемы, сконфигурированной для обеспечения описываемых функциональных возможностей. В различных вариантах
 35 осуществления вычислительное устройство может включать в себя устройства любых различных видов, в том числе, но без ограничения ими, системы персональных компьютеров, настольные компьютеры, портативные компьютеры, ноутбуки, мэйнфреймы, карманные компьютеры, рабочие станции, графические планшеты, серверы приложений, устройства хранения данных или вычислительное или электронное
 40 устройство любого вида.

[0069] На фиг. 1В представлена структурная схема приведенной в качестве примера вычислительной подсистемы 110 из фиг. 1А. Приведенная в качестве примера вычислительная подсистема 110 может быть расположена возле или вблизи одной или
 45 нескольких скважин из системы 100 скважин или на удаленном месте. Вся вычислительная подсистема 110 или часть ее может работать независимо от системы 100 скважин или независимо от любых других компонентов, показанных на фиг. 1А. Приведенная в качестве примера вычислительная подсистема 110 включает в себя процессор 160, память 150 и контроллер 170 ввода-вывода, соединенные шиной 165.

Память может включать в себя, например, оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), устройство хранения данных (например, постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) с возможностью перезаписи или другие), жесткий диск или носитель данных другого вида. Вычислительную подсистему 110 можно предварительно запрограммировать или ее можно запрограммировать (и перепрограммировать) путем загрузки программы из другого источника (например, с компакт-диска, доступного только для чтения, с другого вычислительного устройства по сети передачи данных или иным образом). Контроллер 170 ввода-вывода соединен с устройствами ввода-вывода (например, с монитором 175, мышью, клавиатурой или другими устройствами ввода-вывода) и с линией 180 связи. Устройства ввода-вывода принимают и передают данные в аналоговой или цифровой форме по линиям связи, таким как линия последовательной передачи данных, беспроводная линия (например, инфракрасная, радиочастотная или другие), линия параллельной передачи данных или линия другого вида.

[0070] Линия 180 связи может включать в себя канал связи любого вида, соединитель, сеть передачи данных или другую линию. Например, линия 180 связи может включать в себя беспроводную или проводную сеть, локальную вычислительную сеть (ЛВС), глобальную сеть (ГС), частную сеть, сеть общего пользования (такую как Интернет), сеть Wi-Fi, сеть, которая включает в себя линию спутниковой связи, или сеть передачи данных другого вида.

[0071] В памяти 150 могут сохраняться команды (например, компьютерный код), связанные с операционной системой, компьютерные прикладные программы и другие ресурсы. Кроме того, в памяти 150 могут сохраняться данные прикладных программ и объекты данных, которые могут интерпретироваться одной или несколькими прикладными программами или виртуальными машинами, работающими на основе вычислительной подсистемы 110. Как показано на фиг. 1В, приведенная в качестве примера память 150 включает в себя микросейсмические данные 151, геологические данные 152, данные 154 о трещинах, другие данные 155 и прикладные программы 156. В некоторых осуществлениях память вычислительного устройства включает в себя дополнительную или другую информацию.

[0072] Микросейсмические данные 151 могут включать в себя информацию о местоположениях микросейсмиков в подземной зоне. Например, микросейсмические данные могут включать в себя информацию, основанную на акустических данных, обнаруженных в наблюдательной скважине 104, на поверхности 106, в обрабатываемой скважине 102 или на других местах. Микросейсмические данные 151 могут включать в себя информацию, собираемую датчиками 112. В некоторых случаях микросейсмические данные 151 объединяют с другими данными, переформатированными или иным образом обработанными. Данные о микросейсмических событиях могут включать в себя любую подходящую информацию, относящуюся к микросейсмическим событиям (местоположения, величины, неопределенности, моменты времени и т.д.). Данные о микросейсмических событиях могут включать в себя данные, собираемые при выполнении одной или нескольких операций по гидравлическому разрыву, которые могут включать в себя данные, собранные до, во время и после нагнетания жидкости.

[0073] Геологические данные 152 могут включать в себя информацию о геологических свойствах подземной зоны 121. Например, геологические данные 152 могут включать в себя информацию о подземных слоях 122, информацию о буровых скважинах 101, 111 или информацию о других атрибутах подземной зоны 121. В некоторых случаях геологические данные 152 включают в себя информацию о литологии, содержании флюида, профиле напряжения, профиле давления, пространственной протяженности

или других атрибутах одной или нескольких породных формаций в подземной зоне. Геологические данные 152 могут включать в себя информацию, собираемую из каротажных диаграмм, образцов породы, обнажений, микросейсмического изображения или других источников данных.

5 [0074] Данные 154 о трещинах могут включать в себя информацию о плоскостях трещин в подземной зоне. По данным 154 о трещинах можно идентифицировать местоположения, размеры, формы и другие свойства трещин в модели подземной зоны. Данные 154 о трещинах могут включать в себя информацию о природных трещинах, гидравлически наведенных трещинах или о разрыве любого другого вида в подземной
10 зоне 121. Данные 154 о трещинах могут включать в себя плоскости трещин, вычисленные по микросейсмическим данным 151. Для каждой плоскости трещины данные 154 о трещинах могут включать в себя информацию (например, об угле простирания, угле падения и т.д.), идентифицирующую ориентацию трещины, информацию, идентифицирующую форму (например, кривизну, апертуру и т.д.) трещины, информацию,
15 идентифицирующую границы трещины, или любую другую подходящую информацию.

[0075] Прикладные программы 156 могут включать в себя программные приложения, командные файлы, программы, функции, выполняемые файлы или другие модули, которые интерпретируются или выполняются процессором 160. Такие прикладные программы могут включать в себя машиночитаемые команды на выполнение одной
20 или нескольких операций, представленных на фиг. 4. Прикладные программы 156 могут включать в себя машиночитаемые команды на образование пользовательского интерфейса или графика, такого как, например, гистограмма, представленная на фиг. 2. Прикладные программы 156 могут получать входные данные, такие как микросейсмические данные, геологические данные или входные данные других видов,
25 из памяти 150, из другого локального источника или из одного или нескольких удаленных источников (например, по линии 180 связи). Прикладные программы 156 могут формировать выходные данные и сохранять выходные данные в памяти 150, на другом локальном носителе или в одном или нескольких удаленных устройствах (например, путем передачи выходных данных по линии 180 связи).

30 [0076] Процессор 160 может исполнять команды, например, для формирования выходных данных на основании входных данных. Например, процессор 160 может прогонять прикладные программы 156 путем выполнения или интерпретации программного обеспечения, командных файлов, программ, функций, выполняемых файлов или других модулей, содержащихся в прикладных программах 156. Процессор
35 160 может выполнять одну или несколько операций, представленных на фиг. 4, или формировать гистограмму, показанную на фиг. 2. Входные данные, принимаемые процессором 160, или выходные данные, формируемые процессором 160, могут включать в себя любые из микросейсмических данных 151, геологических данных 152, данных 154 о трещинах или других данных 155.

40 [0077] На фиг. 2 представлен график, показывающий приведенную в качестве примера гистограмму 200. Приведенная в качестве примера гистограмма 200, показанная на фиг. 2, является графическим представлением распределения основных ориентаций плоскостей, идентифицированных по набору микросейсмических данных. Гистограмму можно составлять на основании данных других видов, а гистограмма может отображать
45 информацию другого вида.

[0078] Приведенная в качестве примера гистограмма 200, показанная на фиг. 2, включает в себя график поверхности 206, отображающей вероятности ориентаций плоскостей трещин. В некоторых отдельных случаях гистограмма включает в себя

график другого вида. Например, на гистограмме можно отображать такую же или подобную информацию, как на столбчатом графике, топографическом графике или графике другого вида. В примере, показанном на фиг. 2, каждая ориентация плоскости трещины представлена двумя переменными, углом простирания и углом падения.

5 Гистограмму можно использовать для отображения распределения количественных параметров по одной переменной, двум переменным, трем переменным или большему количеству переменных.

[0079] Поверхность 206, показанная на фиг. 2, изображена в пространственной системе координат. Некоторые гистограммы изображают в двух измерениях (например, 10 в случае распределения по одной переменной), трех измерениях (например, в случае распределения по двум переменным) или четырех измерениях (например, в случае распределения по двум переменным в динамике во времени). В примере, показанном на фиг. 2, пространственная система координат представлена вертикальной осью 204a и двумя горизонтальными осями 204b и 204c. По горизонтальной оси 204b представлен 15 диапазон углов падения и по горизонтальной оси 204c представлен диапазон углов простирания (в единицах градусов). По вертикальной оси 204a представлен диапазон вероятностей.

[0080] Параметры гистограммы 200 можно количественно оценивать, например, путем образования столбиков, каждый из которых представляет отдельный диапазон 20 ориентаций. Диапазоны ориентаций могут быть прилегающими, неперекрывающимися диапазонами для одной или нескольких переменных ориентации. Например, столбик может представлять диапазон углов простирания или диапазон углов падения. На гистограмме 200, показанной на фиг. 2, каждый из столбиков гистограммы соответствует пересечению поддиапазонов вдоль горизонтальных осей 240b и 204c.

25 [0081] Дополнительные параметры гистограммы 200 можно количественно оценивать, например, путем вычисления количественного параметра ориентаций трещин, относящегося к каждому столбику. На гистограмме 200, показанной на фиг. 2, количественный параметр для каждого столбика представлен уровнем поверхности 206 для каждого из диапазонов ориентаций, представленных на графике.

30 Количественные параметры, представленные на фиг. 2, являются нормированными значениями вероятности. Обычно количественный параметр для каждого столбика на гистограмме может быть нормированным количественным параметром или ненормированным количественным параметром. Например, количественный параметр плоскостей трещин для каждого столбика может быть значением вероятности, значением 35 частоты, значением целого числа или значением другого вида.

[0082] Количественный параметр плоскостей трещин для каждого столбика гистограммы можно определить, например, приписыванием каждой плоскости трещины к столбику, подсчетом количеством плоскостей трещин, имеющих ориентацию в пределах диапазона, представленного каждым столбиком, или сочетанием этих и других 40 способов. В некоторых случаях плоскости трещин являются основными плоскостями, ограниченными точками микросейсмических данных, и каждая из основных плоскостей определяет ориентацию, соответствующую одному из столбиков.

[0083] Приведенная для примера гистограмма 200 представляет распределение вероятностей основных плоскостей, связанных со 180 микросейсмическими событиями. 45 В этом примере каждый столбик отображает поддиапазон значений простирания в пределах диапазона простирания, показанного на гистограмме 200 (от 0° до 360°), и поддиапазон значений падения в пределах диапазона падения, показанного на гистограмме 200 (от 60° до 90°). На карте 206 поверхности имеются несколько локальных

максимумов (пиков), пять из которых на фиг. 2 помечены как 208a, 208b, 208c, 208d и 208e.

[0084] Пики на гистограмме 200 представляют столбики, связанные с более значительными количественными параметрами, чем окружающие столбики. Столбики, представленные пиками, соответствуют набору плоскостей трещин, имеющих одинаковые или параллельные ориентации. В некоторых отдельных случаях каждый локальный максимум (или пик) на гистограмме можно считать соответствующим тренду преобладающей (то есть, главной) ориентации. Тренд ориентации можно считать преобладающей ориентацией трещины, например, когда больше основных плоскостей совмещены по этому направлению, чем по соседним или ближайшим направлениям. Преобладающая ориентация трещины может отражать статистически значимый количественный параметр основных плоскостей, которые параллельны, по существу параллельны или находятся на одной поверхности.

[0085] Пример, показанный на фиг. 2, представляет собой гистограмму, основанную на двух угловых параметрах каждой основной плоскости (то есть, на углах простирания и падения). Гистограмма может быть основана на других параметрах основных плоскостей. Например, третий параметр каждой основной плоскости может быть включен в гистограммные данные. Третьим параметром может быть, например расстояние d основной плоскости от начала. Гистограмму можно образовать для зависящих от расстояния параметров, зависящих от ориентации параметров или для сочетания этих параметров. Для некоторых примеров гистограмму можно образовать для значений $d \cdot \tan(\theta)$ и $d \cdot \tan(\varphi)$, для каждой основной плоскости, на основании расстояния d каждой основной плоскости от начала, угла φ простирания каждой основной плоскости и угла θ падения каждой основной плоскости. В некоторых случаях двумерную диаграмму можно образовать на основании любых двух независимых переменных, таких как, например $\tan(\theta)$, $\tan(\varphi)$, угол φ простирания, угол θ падения или другие. Гистограмма может иметь подходящую конфигурацию, основанную на размере столбиков. Например, гистограмма может быть гистограммой со столбиками фиксированного размера, гистограммой со столбиками естественного размера или гистограммой другого вида. В некоторых отдельных случаях для данного набора микросейсмических событий может существовать оптимальная (неравномерная) гистограмма, которая лучше всего показывает ориентации плоскостей трещин.

[0086] На фигурах 3A и 3B представлены диаграммы, показывающие пример ориентации плоскости трещины. На фиг. 3A показана диаграмма 300a основной плоскости 310, определенной тремя неколлинеарными микросейсмическими событиями 306a, 306b и 306c. На фиг. 3B показана диаграмма 300b нормального вектора 308 для основной плоскости 310, показанной на фиг. 3A. На фигурах 3A и 3B вертикальной осью 304a представлена координата z , горизонтальной осью 304b представлена координата x и горизонтальной осью 304c представлена координата y . Диаграммы 300a и 300b показаны в системе прямолинейных координат; можно использовать системы координат других видов (например, сферические, эллиптические и т.д.).

[0087] Как показано на фиг. 3A, основная плоскость 310 представляет собой двумерную поверхность, которая продолжается в пространственной системе ху-координат. Нормальный вектор 308 показывает ориентацию основной плоскости 310. Нормальный вектор может быть единичным вектором (вектором, имеющим единичную длину) или нормальный вектор может иметь неединичную длину.

[0088] Как показано на фиг. 3B, нормальный вектор 308 имеет компоненты (a,b,c) вектора. Компоненты (a,b,c) вектора можно вычислить, например, на основании

положений микросейсмических событий 306а, 306b и 306с, на основании параметров основной плоскости 310 или на основании другой информации. На диаграмме 300b компонент x нормального вектора 308 представлен как длина a вдоль оси x, компонент y нормального вектора 308 представлен как длина b вдоль оси y и компонент z нормального вектора 308 представлен как длина c вдоль оси z. (В показанном примере у-компонент b имеет отрицательное значение, и это означает, что у-компонент нормального вектора 308 направлен противоположно относительно выбранного по умолчанию положительного направления горизонтальной оси 304с).

[0089] Ориентацию основной плоскости 310 можно вычислить на основании нормального вектора 308, самих микросейсмических событий, параметров основной плоскости 310, других данных или любого сочетания их. Например, падение θ и простирание φ основной плоскости 310 можно вычислить на основании нормального вектора 308 в соответствии с уравнениями

$$\theta = \arctan \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{c}, \quad \varphi = \arctan \frac{b}{a}. \quad (1)$$

В некоторых случаях в вычислительных способах можно учитывать и надлежащим образом регулировать чувствительность этих уравнений в экстремальных ситуациях, например, когда параметр a или c является очень небольшим.

[0090] В некоторых случаях ориентацию одной или нескольких основных плоскостей можно использовать в качестве входных данных для формирования гистограммных данных. Например, гистограмму ориентаций основных плоскостей можно образовать из набора основных плоскостей. В некоторых случаях гистограммные данные образуют путем приписывания каждой основной плоскости к столбику гистограммы на основании ориентации (θ , φ) основной плоскости и вычисления количественного параметра основных плоскостей, связанного с каждым столбиком. В некоторых случаях гистограмму отображают, или же гистограммные данные могут использоваться или обрабатываться без отображения гистограммы.

[0091] На фиг. 4 представлена блок-схема последовательности действий приведенного в качестве примера способа 400 идентификации преобладающих ориентаций трещин. Некоторые или все действия способа 400 могут быть реализованы одним или несколькими вычислительными устройствами. В некоторых осуществлениях способ 400 может включать в себя в меньшем количестве дополнительные или другие действия, выполняемые в том же самом или другом порядке. Кроме того, одно или несколько отдельных действий или поднаборов действий способа 400 могут выполняться обособленно или в других ситуациях. Выходные данные, формируемые при выполнении способа 400, в том числе выходные данные, формируемые при выполнении промежуточных действий, могут включать в себя сохраненную, отображенную, напечатанную, отправленную, переданную или обработанную информацию.

[0092] В некоторых осуществлениях некоторые или все действия способа 400 выполняют в реальном времени в течение операции по гидравлическому разрыву. Например, действие можно выполнять в реальном времени путем выполнения действия без значительной задержки в ответ на прием данных (например, с датчика или системы мониторинга). Действие можно выполнять в реальном времени, например, путем выполнения действия в течение мониторинга дополнительных микросейсмических данных при операции по гидравлическому разрыву. При выполнении некоторых действий в реальном времени можно принимать входные данные и формировать выходные данные в течение операции по гидравлическому разрыву; в некоторых

отдельных случаях выходные данные становятся доступными для пользователя в пределах заданного интервала времени, что позволяет пользователю реагировать на выходные данные, например, корректировать операцию по гидравлическому разрыву.

5 [0093] В некоторых случаях некоторые или все действия способа 400 выполняют динамически в течение операции по гидравлическому разрыву. Действие можно
10 выполнять динамически, например, путем итерационного или неоднократного выполнения действия на основании дополнительных входных данных, когда входные данные становятся доступными. В некоторых отдельных случаях динамические действия выполняют в ответ на прием данных для нового микросейсмического события (или в
15 ответ на прием данных для определенного количества микросейсмических событий и т.д.).

[0094] На этапе 402 принимают микросейсмические данные при выполнении операции по гидравлическому разрыву. Например, микросейсмические данные можно принимать
15 из памяти, с удаленного устройства или другого источника. Данные о микросейсмических событиях могут включать в себя информацию о местах измерений многочисленных микросейсмических событий, информацию об измеряемой магнитуде каждого микросейсмического события, информацию о неопределенности, связанной с
20 каждым микросейсмическим событием, информацию о времени, связанном с каждым микросейсмическим событием, и т.д. Данные о микросейсмических событиях могут включать в себя микросейсмические данные, собираемые в наблюдательной скважине, обрабатываемой скважине, на поверхности или на других местах в системе скважин. Микросейсмические данные при выполнении операции по гидравлическому разрыву могут включать в себя данные о микросейсмических событиях, обнаруженные до, во
25 время или после выполнения операции по гидравлическому разрыву. Например, в некоторых отдельных случаях микросейсмический мониторинг начинают до выполнения операции по гидравлическому разрыву, заканчивают после выполнения операции по гидравлическому разрыву.

[0095] На этапе 404 идентифицируют компланарные поднаборы микросейсмических событий. Компланарный поднабор микросейсмических событий может включать в
30 себя три микросейсмических события или больше трех микросейсмических событий. Например, каждый поднабор может быть триплетом мест микросейсмических событий. В некоторых случаях компланарные поднаборы идентифицируют путем идентификации всех триплетов в наборе данных о микросейсмических событиях. Например, в случае N мест микросейсмических событий можно идентифицировать $N(N-1)(N-2)/6$ триплетов.
35 В некоторых случаях не все триплеты идентифицируют как поднаборы. Например, некоторые триплеты (например, коллинеарные или по существу коллинеарные триплеты) могут быть исключены.

[0096] На этапе 406 основную плоскость идентифицируют для каждого компланарного поднабора микросейсмических событий. Например, основную плоскость
40 можно идентифицировать путем вычисления параметров основной плоскости на основании триплета мест микросейсмических событий. В некоторых случаях плоскость можно определить тремя параметрами a, b и c из модели основной плоскости. Эти параметры можно вычислить на основании координат x, y и z трех неколлинеарных точек в поднаборе, например, путем решения системы линейных уравнений для трех
45 параметров. Например, параметры плоскости, определяемые тремя неколлинеарными событиями (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) и (x_3, y_3, z_3) , можно вычислить на основании решения следующей системы уравнений:

$$ax+by+c+d=0,$$

$$5 \quad a = \begin{bmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \end{bmatrix},$$

$$10 \quad b = \begin{bmatrix} x_1 & 1 & z_1 \\ x_2 & 1 & z_2 \\ x_3 & 1 & z_3 \end{bmatrix},$$

$$15 \quad c = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{bmatrix},$$

$$15 \quad d = - \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{bmatrix}.$$

20 [0097] На этапе 408 вычисляют количественный параметр основных плоскостей в каждом из множества диапазонов ориентаций. Диапазоны ориентаций могут соответствовать столбикам гистограммы. В некоторых случаях диапазоны ориентаций совместно охватывают полный диапазон ориентаций основных плоскостей, а каждый индивидуальный диапазон ориентаций соответствует телесному углу в трехмерном пространстве. Телесный угол может задаваться, например, диапазоном углов падения и диапазоном углов простираия или угловыми диапазонами, основанными на сочетаниях угла простираия и угла падения.

30 [0098] Количественный параметр основных плоскостей в каждом диапазоне ориентаций можно вычислить, например, путем идентификации ориентации каждой основной плоскости и определения, в каком диапазоне ориентаций находится ориентация основной плоскости. В некоторых случаях нормальные векторы вычисляют для всех основных плоскостей, а ориентации основных плоскостей вычисляют на основании ориентаций нормальных векторов. В некоторых случаях каждая ориентация основной плоскости включает в себя угол простираия и угол падения для одной из основных плоскостей. Например, ориентации основных плоскостей можно вычислить при использовании уравнения 1, приведенного выше. Другие способы можно использовать для вычисления ориентации основной плоскости.

40 [0099] В некоторых осуществлениях диапазоны ориентаций представляют собой заранее вычисленные значения. Например, диапазоны ориентаций могут быть определены независимо от ориентаций основных плоскостей. В некоторых осуществлениях диапазоны ориентаций определяют на основании ориентаций основных плоскостей, идентифицированных на этапе 406. Например, как показано на фиг. 4, на этапе 408 можно выполнить сортировку значений ориентаций основных плоскостей, а диапазоны ориентаций можно идентифицировать на этапе 410 на основании сортированных значений ориентаций основных плоскостей (например, при использовании какой-нибудь методологии кластеризации, схем ближайшего соседа и т.д.).

45 [0100] В некоторых отдельных случаях диапазоны ориентаций идентифицируют на основании кластеризованных наборов сортированных значений ориентаций. Например,

диапазоны ориентаций можно идентифицировать путем сортировки углов простирания, идентификации кластеров сортированных углов простирания, сортировки углов падения, идентификации кластеров сортированных углов падения и определения диапазонов ориентаций на основании кластеров сортированных углов простирания и кластеров сортированных углов падения. Примеры способов идентификации диапазонов ориентаций описаны в предварительной заявке №61/710582 на патент США, поданной 5 октября 2012 года.

[0101] На этапе 412 вычисляют количественный параметр основных плоскостей в каждом диапазоне ориентаций. Количественным параметром ориентаций основных плоскостей может быть значение вероятности, значение частоты, целое число плоскостей или значение другого вида. Например, количественным параметром основных плоскостей в заданном диапазоне ориентаций может быть число основных плоскостей, имеющих ориентацию основной плоскости в заданном диапазоне ориентаций. Согласно другому примеру количественным параметром основных плоскостей в заданном диапазоне ориентаций может быть число основных плоскостей, имеющих ориентацию основной плоскости в заданном диапазоне ориентаций, деленное на общее число идентифицированных основных плоскостей. Количественные параметры можно нормировать так, например, чтобы количественные параметры суммировались до одного (или другого нормирующего значения). Примеры способов идентификации количественных параметров описаны в предварительной заявке №61/710582 на патент США, поданной 5 октября 2012 года.

[0102] На этапе 414 преобладающие ориентации трещин идентифицируют на основании количественных параметров, вычисленных на этапе 412. Преобладающие ориентации трещин можно идентифицировать, например, как диапазоны ориентации, имеющие локальные более высокие максимумы ориентаций основных плоскостей. В некоторых отдельных случаях преобладающие ориентации трещин идентифицируют на основании локальных максимумов в гистограммных данных, образованных на основании количественных параметров. Можно идентифицировать одну преобладающую ориентацию трещины или можно идентифицировать многочисленные преобладающие ориентации трещин. В некоторых отдельных случаях преобладающую ориентацию трещины идентифицируют на основании высоты, ширины и других параметров пика в гистограммных данных. Преобладающую ориентацию трещины можно идентифицировать как центральную точку диапазона ориентаций, преобладающую ориентацию трещины можно вычислить как среднюю ориентацию основных плоскостей в диапазоне ориентаций или преобладающую ориентацию трещины можно вычислить другим способом. В некоторых отдельных случаях уровень достоверности может быть приписан к пику гистограммных данных. Уровень достоверности может показывать, в какой мере определенность связана с пиком. Уровень достоверности можно задавать, например, пропорционально количеству данных, вводимых в конкретный столбик гистограммы, который поддерживает пик, или другими подходящими способами.

[0103] Преобладающая ориентация трещины, идентифицированная на основании количественных параметров, вычисленных на этапе 412, может представлять ориентацию физических трещин в подземной зоне. В некоторых породных формациях трещины обычно образуют наборы (или семейства), имеющие параллельные или подобные ориентации. Некоторые пласты включают в себя многочисленные наборы трещин. Например, пласт может включать первый набор трещин, имеющих первичную ориентацию, которая может быть обусловлена направлением максимального

напряжения. Пласт может также включать в себя второй набор трещин, имеющих вторичную ориентацию, которая отличается от первичной ориентации. Вторичная ориентация может быть отклонена от первичной ориентации, например, на угол 90° или другой угол. В некоторых случаях каждая из преобладающих ориентаций трещин
5 соответствует ориентации набора трещин в подземной зоне.

[0104] В некоторых отдельных случаях преобладающую ориентацию трещин идентифицируют в соответствии с алгоритмом или способом, которым можно найти любую предпочтительную ориентацию, например, на основании физических свойств или любой другой информации. С помощью алгоритма можно идентифицировать,
10 насколько строго данные указывают на преобладание этой ориентации (например, на основании значения достоверности между 0 и 1), и с учетом момента образования различных трендов первичной ориентации эту информацию можно использовать в алгоритме.

[0105] На этапе 416 отображают гистограмму значений ориентаций основных
15 плоскостей. Гистограмма показывает количественный параметр ориентаций основной плоскости в каждом из диапазонов ориентаций. Пример гистограммы показан на фиг. 2. Количественные параметры можно отображать в другом формате или в виде гистограммы другого вида. Гистограмму можно изображать, например, в двух измерениях или трех измерениях. В некоторых случаях гистограмму изображают в виде
20 непрерывной линии или поверхности, в виде группы дискретных символических знаков (как, например, в столбиковой диаграмме), в виде топографических областей или в виде графического представления другого вида. В дополнение к представлению гистограммы или в качестве варианта к представлению гистограммы можно отображать значения ориентации основной плоскости в виде числовых значений, алгебраических
25 значений, числовых таблиц или в другом формате.

[0106] На этапе 418 образуют плоскости трещин. Плоскости трещин можно образовать, например, на основании точек микросейсмических данных и преобладающих ориентаций трещин, идентифицированных на этапе 414. В некоторых случаях идентифицируют кластер микросейсмических событий, связанных с каждой из
30 преобладающих ориентаций трещин, и плоскость трещины образуют на основании каждого кластера. В некоторых отдельных случаях плоскости трещин идентифицируют на основании местоположений и других параметров измеренных микросейсмических событий. Например, плоскость трещины можно образовать путем подбора индивидуальных кластеров микросейсмических событий к плоскости. Для образования
35 плоскости трещины можно использовать другие способы. Примеры способов образования плоскостей трещин на основании микросейсмических данных описаны в предварительной заявке №61/710582 на патент США, поданной 5 октября 2012 года.

[0107] В некоторых отдельных случаях в алгоритм можно вводить внешние входные данные (например, от пользователя, из других физических рассмотрений и т.д.). Внешние
40 входные данные могут включать в себя информацию, такую как, например, «вероятно, данная ориентация должна быть первичной ориентацией» (поэтому имеет заданный признак достоверности), «менее вероятно, что данная ориентация имеет плоскости в этом направлении» (поэтому имеет очень небольшой или даже нулевой уровень достоверности). Входные данные этих видов могут изменять вычисление плоскостей,
45 содержащихся в наборе микросейсмических данных, для отражения этих параметров.

[0108] В некоторых отдельных случаях гистограмму отображают в реальном времени в течение операции по гидравлическому разрыву, и гистограмму можно динамически обновлять при обнаружении дополнительных микросейсмических событий. Например,

всякий раз при приеме нового микросейсмического события можно идентифицировать дополнительные основные плоскости и соответственно можно обновлять количественный параметр основных плоскостей в каждом диапазоне ориентаций. В некоторых случаях диапазоны ориентаций также динамически обновляют при приеме микросейсмических данных. Примеры способов обновления гистограммы на основании дополнительных микросейсмических данных описаны в предварительной заявке №61/710582 на патент США, поданной 5 октября 2012 года.

[0109] В некоторых случаях плоскости трещин обновляют в реальном времени, например, в ответ на сбор микросейсмических данных. Примеры способов обновления плоскостей трещин на основании микросейсмических данных описаны в предварительной заявке №61/710582 на патент США, поданной 5 октября 2012 года. В некоторых случаях уровень достоверности для каждой плоскости трещины можно изменять (например, повышать, понижать) на основании новых микросейсмических данных. В некоторых отдельных случаях можно образовывать новую плоскость трещин или ранее образованную плоскость трещины можно исключать на основании новых микросейсмических данных.

[0110] Некоторые варианты осуществления предмета изобретения и действий, рассмотренных в этом описании, могут быть реализованы цифровыми электронными схемами или компьютерным программным обеспечением, микропрограммными средствами или аппаратным обеспечением, в том числе структурами, раскрытыми в этом описании, и их структурными эквивалентами или сочетанием их. Некоторые варианты осуществления предмета изобретения, рассмотренные в этой заявке, могут быть реализованы в виде одной или нескольких компьютерных программ, то есть, в виде одного или нескольких модулей команд к компьютерной программе, закодированных на носителе данных компьютера, предназначенных для исполнения аппаратурой обработки данных или для управления работой аппаратурой обработки. Носитель данных компьютера может быть выполнен как или включен в считываемое компьютером устройство хранения данных, считываемую компьютером плату памяти, матрицу или устройство памяти с произвольным или последовательным доступом или сочетание их. Кроме того, хотя носитель данных компьютера не является распространяющимся сигналом, носитель данных компьютера может быть источником или получателем команд к компьютерной программе, кодированных в искусственно образованном распространяющемся сигнале. Кроме того, носитель данных компьютера может быть выполнен как или включен в один или несколько отдельных физических компонентов носителей (например, таких как многочисленные компакт-диски, диски или другие устройства хранения данных).

[0111] Термин «аппаратура обработки данных» охватывает аппаратуру всех видов, устройства и машины для обработки данных, в том числе, например, программируемый процессор, компьютер, систему на кристалле или многочисленные перечисленные средства, или сочетания их. Аппаратура может включать в себя специализированные логические схемы, например вентиляющую матрицу, программируемую пользователем (ВМПП), или интегральную схему прикладной ориентации (ИСПО). Кроме того, в дополнение к техническому обеспечению аппаратура может включать в себя код, который создает среду выполнения для текущей компьютерной программы, то есть, код, который образует микропрограммные средства процессора, стек протоколов, систему управления базой данных, операционную систему, межплатформную среду выполнения, виртуальную машину или сочетание одного или нескольких их. Аппаратурой и средой выполнения могут реализовываться многие различные вычислительные модельные

инфраструктуры, такие как веб-службы, распределенные вычислительные и сетевые вычислительные инфраструктуры.

[0112] Компьютерная программа (также известная как программа, программное обеспечение, программное приложение, программа командного процессора или код) может быть написана на программируемом языке любого вида, в том числе на транслируемом или интерпретируемом языке, декларативном или процедурном языке. Компьютерная программа может, но необязательно, соответствовать файлу в файловой системе. Программа может сохраняться в части файла, который содержит другие программы или данные (например, одну или несколько программ командного процессора, сохраняемых в документе на языке разметки), в одном файле, специально предназначенном для текущей программы, или в многочисленных согласованных файлах (например, файлах, в которых сохраняются один или несколько модулей, подпрограмм или частей кода). Компьютерная программа может быть размещена для выполнения на одном компьютере или на многочисленных компьютерах, которые расположены на одном месте или распределены по многочисленным местам и взаимно соединены с помощью сети связи.

[0113] Некоторые способы и логические потоки, рассмотренные в этом описании, могут выполняться одним или несколькими программируемыми процессорами, выполняющими одну или несколько компьютерных программ для выполнения действий над входными данными и формирования выходных данных. Кроме того, способы и логические потоки могут выполняться, а аппаратура также может быть реализована, специализированными логическими схемами, например, вентиляционной матрицей, программируемой пользователем (ВМПП), или интегральной схемой прикладной ориентации (ИСПО).

[0114] Процессоры, пригодные для выполнения компьютерной программы включают в себя, например, микропроцессоры общего применения и специализированные, а также процессоры цифрового компьютера любого вида. Обычно процессор принимает команды и данные с постоянного запоминающего устройства или оперативного запоминающего устройства или с обоих. Компьютер включает в себя процессор для выполнения действий в соответствии с командами и одно или несколько запоминающих устройств для сохранения команд и данных. Кроме того, компьютер может включать в себя одно или несколько массовых запоминающих устройств, например магнитных, магнитооптических дисков или оптических дисков, для приема данных или передачи данных или может быть функционально связан с ними. Однако компьютер необязательно имеет такие устройства. Устройства, пригодные для сохранения команд к компьютерной программе и данных включают в себя энергонезависимую память, носители данных и запоминающие устройства любых видов, в том числе, например, полупроводниковые запоминающие устройства (например, программируемое постоянное запоминающее устройство, электрически стираемую программируемую постоянную память, флэш-память и другие), магнитные диски (например, внутренние жесткие диски, съемные диски и другие), магнитооптические диски, компакт-диски, доступные только для чтения, и цифровые универсальные диски, доступные только для чтения. Процессор и память могут реализованы с помощью специализированных логических схем или включены в них.

[0115] Для обеспечения взаимодействия с пользователем действия могут выполняться на компьютере, имеющем дисплейное устройство (например, монитор или дисплейное устройство другого вида) для отображения информации пользователю, и клавиатуру и указательное устройство (например, мышь, трекбол, планшет, чувствительный к

прикосновению экран или указательное устройство другого вида), с помощью которого пользователь может осуществлять ввод в компьютер. Кроме того, для взаимодействия с пользователем можно использовать устройства других видов; например, обратная связь к пользователю может быть сенсорной обратной связью любого вида, например визуальной обратной связью, звуковой обратной связью или тактильной обратной связью; а входные данные от пользователя могут приниматься в любой форме, в том числе в виде акустических, речевых или тактильных входных данных. Кроме того, взаимодействие пользователя с компьютером может заключаться в пересылке документов на устройство, которое использует пользователь, или приеме документов с этого устройства, пересылке веб-страниц на веб-браузер клиентского устройства пользователя в ответ на запрос, принимаемый с веб-браузера.

[0116] Клиент и сервер обычно удалены друг от друга и обычно взаимодействуют по сети связи. Примеры сетей связи включают в себя локальную вычислительную сеть (ЛВС) и глобальную сеть (ГС), интернет (например, Интернет), сеть, содержащую спутниковую линию связи, и одноранговые сети (например, специализированные одноранговые сети). Взаимодействие клиента и сервера возникает с помощью компьютерных программ, выполняемых на соответствующих компьютерах и имеющих связь клиент-сервер друг с другом.

[0117] Согласно некоторым аспектам, которые описаны в этой заявке, преобладающие ориентации, заключенные в наборах трещин, связанных с микросейсмическими событиями, можно динамически идентифицировать во время операции по гидравлическому разрыву. Например, плоскости трещин можно получать в реальном времени на основании микросейсмических событий, собираемых с месторождения. Плоскости трещин можно идентифицировать на основании информации о микросейсмических событиях, включающей местоположения событий, неопределенности измерений местоположений событий, величины моментов события, моменты времени возникновения событий и др. В каждый момент времени данные могут быть связаны с ранее вычисленными основными плоскостями, в том числе с микросейсмическим опорным набором событий.

[0118] Согласно некоторым аспектам, которые описаны в этой заявке, гистограмму вероятности или распределение основных плоскостей можно построить на основании собранных микросейсмических событий и гистограмму или распределение можно использовать для получения преобладающих ориентаций трещин. В некоторых отдельных случаях построение гистограммы или распределения может быть итеративным в том смысле, что при следующей итерации могут отображаться пики гистограммы или распределения с лучшим разрешением (например, благодаря использованию более подходящих размеров столбиков гистограммы или любого другого подходящего способа). В некоторых отдельных случаях от итерации к итерации количество столбиков в каждой из составляющих ориентации, а также группирование могут изменяться, улучшаться, оптимизироваться или же обновляться. Трещины, выбираемые вдоль преобладающих ориентаций, в некоторых отдельных случаях могут в реальном времени обеспечивать оптимальное соответствие с микросейсмическими событиями. Гистограмма или распределение и преобладающие ориентации могут иметь заметную чувствительность к новому наступающему микросейсмическому событию. В связи с этим некоторые плоскости, идентифицированные во время сопоставления микросейсмических данных, могут не быть точными по сравнению с результатами, основанными на последующих микросейсмических событиях.

[0119] Согласно некоторым аспектам, которые описаны в этой заявке, точный

параметр достоверности может давать меру точности идентифицируемых в реальном времени плоскостей. Факторы, влияющие на точную достоверность плоскостей, могут включать в себя собственные свойства событий, зависимость между опорными событиями и плоскостью и вес, отражающий тренды ориентаций трещин в данных о последующих микросейсмических событиях. В некоторых отдельных случаях плоскости трещин в конце операции по гидравлическому разрыву, имеющие высокую достоверность, которые были идентифицированы в реальном времени, сопоставляют с плоскостями трещин, полученными на основании данных о последующих событиях.

[0120] Согласно некоторым аспектам некоторые или все признаки, описанные в этой заявке, можно объединять или реализовывать отдельно в одной или нескольких программах из системы программного обеспечения для автоматического в реальном времени картирования трещин. Программное обеспечение может быть реализовано в виде компьютерного программного продукта, установленной прикладной программы, прикладной программы клиент-сервер, прикладной программы Интернета или программного обеспечения любого другого подходящего типа. В некоторых случаях программа автоматического в реальном времени картирования трещин может динамически в реальном времени показывать пользователям пространственную и временную эволюцию идентифицируемых плоскостей трещин по мере постепенного накопления микросейсмических трещин. Например, динамика может включать в себя образование новых трещин, распространение и рост существующих трещин или другие динамические характеристики. В некоторых случаях программа автоматического в реальном времени картирования трещин может обеспечивать пользователям возможность наблюдения идентифицируемых в реальном времени плоскостей трещин при многих уровнях достоверности. В некоторых отдельных случаях пользователи могут наблюдать пространственную и временную эволюцию трещин с высоким уровнем достоверности, которые могут иметь преобладающие тренды в полных данных о микросейсмических событиях. В некоторых случаях программа автоматического в реальном времени картирования трещин может оценивать точную достоверность трещин, например, для оценивания определенности идентифицированных плоскостей трещин. Например, точные значения достоверности могут помогать пользователем лучше понимать и анализировать изменения гистограммы вероятности или распределения ориентаций, которое может непрерывно изменяться с накоплением в реальном времени микросейсмических событий. В некоторых случаях программа автоматического в реальном времени картирования трещин может давать результаты, которые согласуются с картированием трещин по постданным. Например, в конце операции по гидравлическому разрыву результаты, полученные с помощью программы автоматического в реальном времени картирования, могут быть статистически согласованными с результатами, получаемыми с помощью программы автоматического картирования трещин по постданным, работающей по те же самым данным. Такие характерные особенности могут позволить промышленным инженерам, операторам и интерпретаторам динамически визуализировать и контролировать пространственную и временную эволюцию трещин гидравлического разрыва, чтобы анализировать сложность трещин и геометрию коллектора, чтобы оценивать эффективность операции по гидравлическому разрыву и улучшать эксплуатационные характеристики скважин.

[0121] Хотя это описание содержит многие подробности, они не должны толковаться как ограничивающие заявленный объем, а как описания признаков, характерных для конкретных примеров. Кроме того, могут быть объединены некоторые признаки, которые рассмотрены в этом описании применительно к отдельным осуществлениям.

И наоборот, различные признаки, которые описаны применительно к одному осуществлению, также могут быть реализованы в многочисленных вариантах осуществления отдельно или в любой подходящей подкомбинации.

5 [0122] Описаны несколько вариантов осуществления. Тем не менее должно быть понятно, что могут быть сделаны различные модификации. В соответствии с этим другие варианты осуществления находятся в объеме нижеследующей формулы изобретения.

Формула изобретения

10 1. Реализуемый компьютером способ идентификации преобладающих ориентаций трещин в подземной зоне, при этом способ содержит:

определение ориентации основной плоскости для каждой из множества основных плоскостей, определяемых данными о микросейсмических событиях, при этом данные о микросейсмических событиях связаны с операцией по гидравлическому разрыву
15 подземной зоны, основные плоскости определены компланарными поднаборами микросейсмических событий;

вычисление с помощью аппаратуры обработки данных количественного параметра ориентаций основных плоскостей в каждом из множества диапазонов ориентаций; и
идентификацию преобладающей ориентации трещины для подземной зоны на
20 основании одного или нескольких идентифицированных количественных параметров.

2. Способ по п. 1, дополнительно содержащий отображение гистограммы ориентаций основных плоскостей, в котором гистограмма показывает количественный параметр ориентаций основных плоскостей в каждом из диапазонов ориентаций.

3. Способ по п. 1, в котором идентифицированный количественный параметр
25 ориентаций основных плоскостей включает в себя значение вероятности.

4. Способ по п. 1, в котором каждая ориентация основной плоскости включает в себя угол простирания и угол падения для одной из основных плоскостей.

5. Способ по п. 4, дополнительно содержащий идентификацию множества диапазонов ориентаций на основании ориентаций основных плоскостей путем:

30 сортировки углов простирания;

идентификации кластеров сортированных углов простирания;

сортировки углов падения;

идентификации кластеров сортированных углов падения; и

35 определения диапазонов ориентаций на основании кластеров сортированных углов простирания и кластеров сортированных углов падения.

6. Способ по п. 1, в котором множество диапазонов ориентаций представляют собой фиксированные значения, определяемые независимо от ориентаций базовых плоскостей.

7. Способ по п. 1, дополнительно содержащий:

40 идентификацию каждого компланарного поднабора микросейсмических событий на основании данных о микросейсмических событиях; и

вычисление нормального вектора к основной плоскости, определяемой каждым компланарным поднабором, при этом ориентации основных плоскостей вычисляют на основании нормальных векторов.

8. Способ по п. 1, в котором идентификация преобладающей ориентации трещины
45 включает в себя идентификацию множества преобладающих ориентаций трещин, а идентификация множества преобладающих ориентаций трещин включает в себя идентификацию диапазонов ориентаций, соответствующих локальным максимумам на гистограмме ориентаций основных плоскостей.

9. Способ по п. 1, в котором идентификация преобладающей ориентации трещины включает в себя идентификацию множества преобладающих ориентаций трещин, а способ дополнительно содержит:

5 идентификацию кластера микросейсмических событий, связанных с каждой из преобладающих ориентаций трещин; и

образование преобладающей плоскости трещины для каждой преобладающей ориентации трещины на основании подбора соответствующего кластера микросейсмических событий.

10. Нетранзиторный считываемый компьютером носитель, кодированный командами, которые при исполнении аппаратурой обработки данных выполняют действия, содержащие:

15 определение ориентации основной плоскости для каждой из множества основных плоскостей, определяемых данными о микросейсмических событиях, при этом данные о микросейсмических событиях связаны с операцией по гидравлическому разрыву подземной зоны, основные плоскости определены компланарными поднаборами микросейсмических событий;

вычисление количественного параметра ориентаций основных плоскостей в каждом из множества диапазонов ориентаций; и

20 идентификацию преобладающей ориентации трещины для подземной зоны на основании одного или нескольких идентифицированных количественных параметров.

11. Считываемый компьютером носитель по п. 10, на котором действия дополнительно содержат отображение двумерной гистограммы ориентаций основных плоскостей, при этом гистограмма показывает количественный параметр ориентаций основных плоскостей в каждом из диапазонов ориентаций.

25 12. Считываемый компьютером носитель по п. 10, на котором каждая ориентация основной плоскости включает в себя угол простирания и угол наклона для одной из основных плоскостей, а действия также содержат идентификацию множества диапазонов ориентаций на основании ориентаций основных плоскостей путем:

сортировки углов простирания;

30 идентификации кластеров сортированных углов простирания;

сортировки углов падения;

идентификации кластеров сортированных углов падения; и

определения диапазонов ориентаций на основании кластеров сортированных углов простирания и кластеров сортированных углов падения.

35 13. Считываемый компьютером носитель по п. 10, на котором множество диапазонов ориентаций представляют собой фиксированные значения, определяемые независимо от ориентаций основных плоскостей.

14. Считываемый компьютером носитель по п. 10, на котором действия дополнительно содержат:

40 идентификацию каждого компланарного поднабора микросейсмических событий на основании данных о микросейсмических событиях; и

вычисление нормального вектора для основной плоскости, определяемой каждым компланарным поднабором, при этом ориентации основных плоскостей вычисляются на основании нормальных векторов.

45 15. Считываемый компьютером носитель по п. 10, на котором идентификация преобладающей ориентации трещины включает в себя идентификацию множества преобладающих ориентаций трещин, а

действия дополнительно содержат:

идентификацию кластера микросейсмических событий, связанных с каждой из преобладающих ориентаций трещин; и

образование преобладающей плоскости трещины для каждой преобладающей ориентации трещины на основании подбора соответствующего кластера микросейсмических событий.

16. Система идентификации преобладающих ориентаций трещин в подземной зоне, содержащая:

считываемый компьютером носитель, на котором сохраняются данные о микросейсмических событиях, связанные с операцией по гидравлическому разрыву подземной зоны; и

аппаратуру обработки данных, способную выполнять определение ориентации основной плоскости для каждой из множества основных плоскостей, определяемых данными о микросейсмических событиях, при этом основные плоскости определены компланарными поднаборами микросейсмических событий;

вычисление количественного параметра ориентаций основных плоскостей в каждом из множества диапазонов ориентаций; и

идентификацию преобладающей ориентации трещины для подземной зоны на основании одного или нескольких идентифицированных количественных параметров.

17. Система по п. 16, дополнительно содержащая дисплейное устройство, способное выполнять отображение гистограммы ориентаций основных плоскостей, при этом гистограмма показывает количественный параметр ориентаций основных плоскостей в каждом из диапазонов ориентаций.

18. Система по п. 16, в которой каждая ориентация основной плоскости включает в себя угол простирания и угол падения для одной из основных плоскостей, а аппаратура обработки данных дополнительно способна выполнять идентификацию множества диапазонов ориентаций на основании ориентаций основных плоскостей путем:

сортировки углов простирания;

идентификации кластеров сортированных углов простирания;

сортировки углов падения;

идентификации кластеров сортированных углов падения; и

определения диапазонов ориентаций на основании кластеров

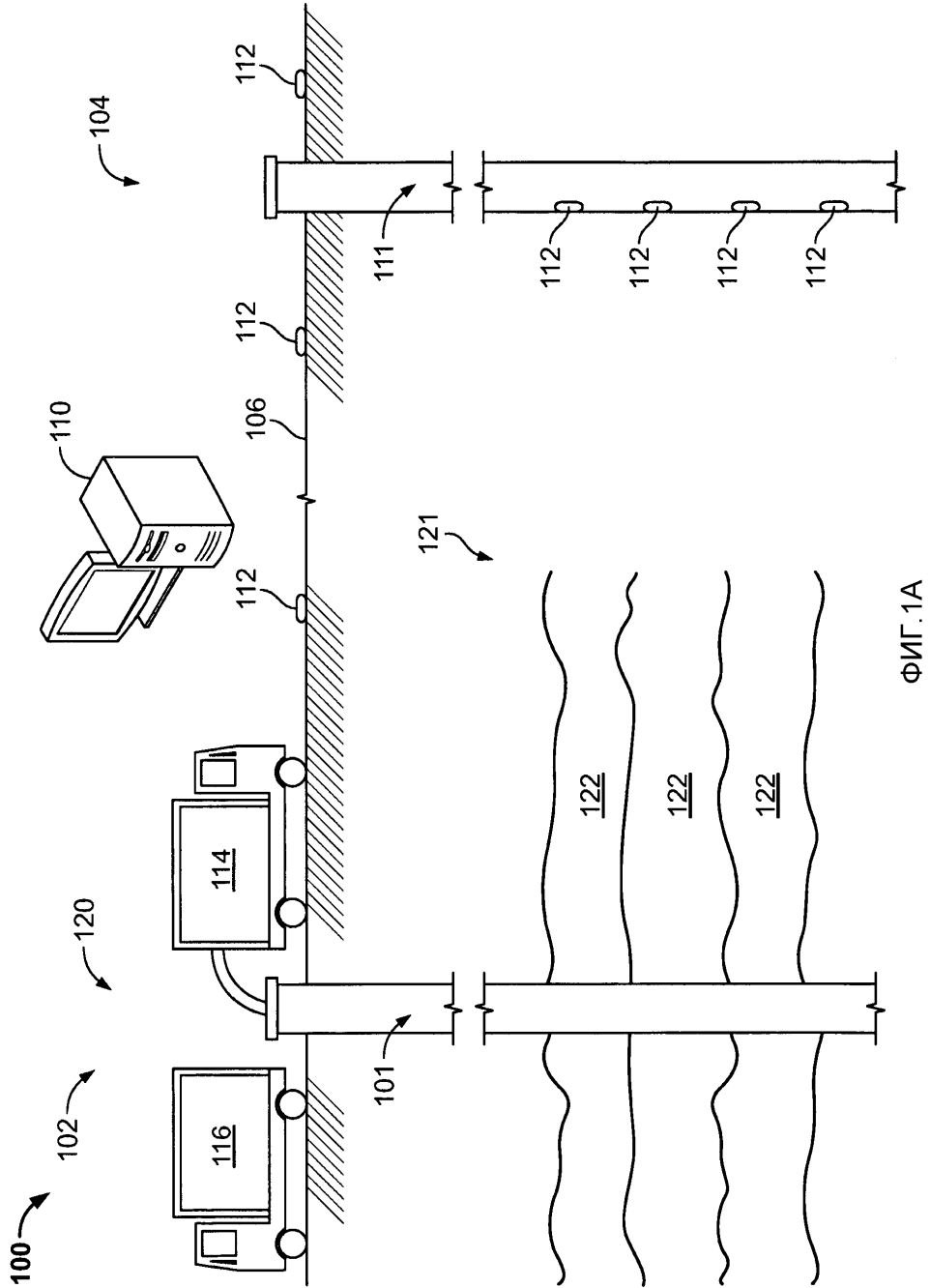
сортированных углов простирания и кластеров сортированных углов падения.

19. Система по п. 16, в которой множество диапазонов ориентаций представляют собой фиксированные значения, определяемые независимо от ориентаций основных плоскостей.

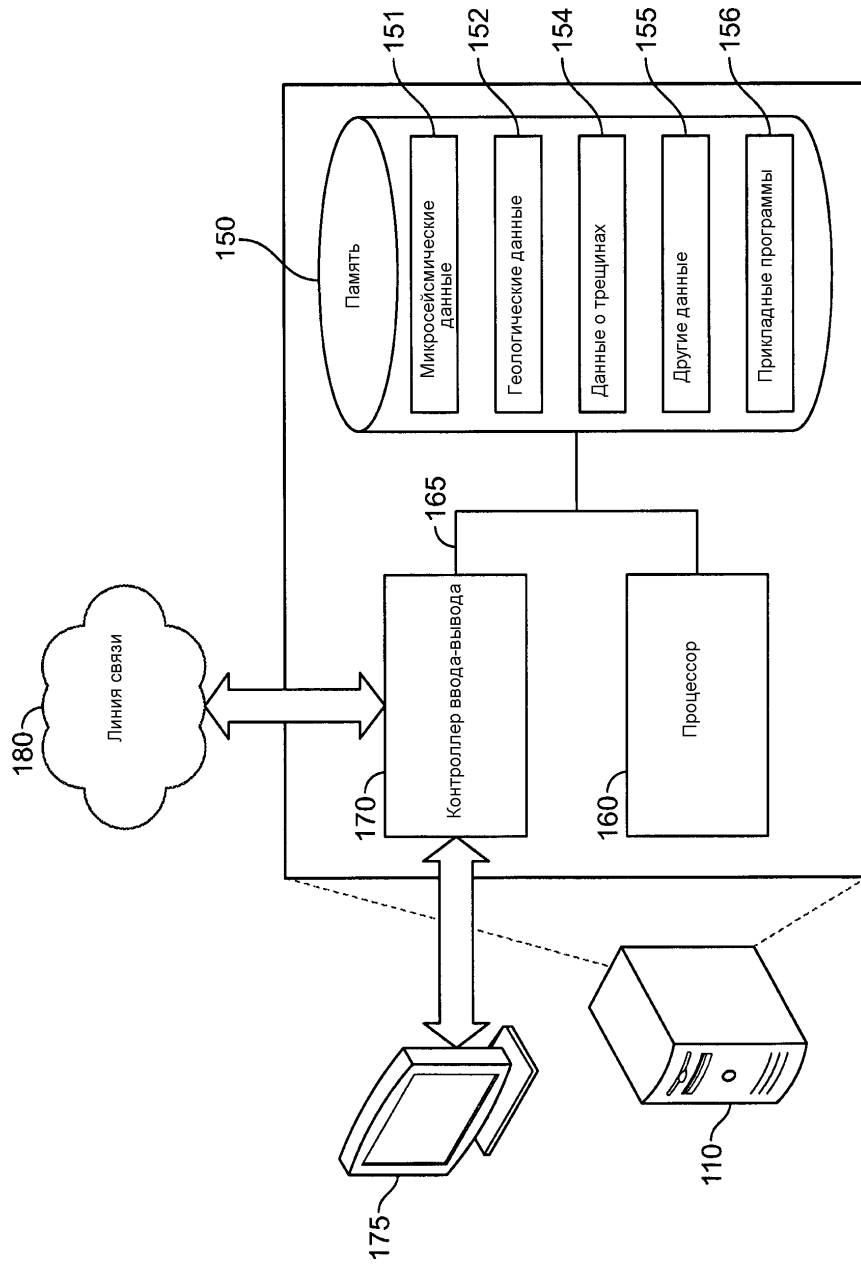
20 Система по п. 16, в которой аппаратура обработки данных дополнительно способна выполнять

идентификацию каждого компланарного поднабора микросейсмических событий на основании данных о микросейсмических событиях; и

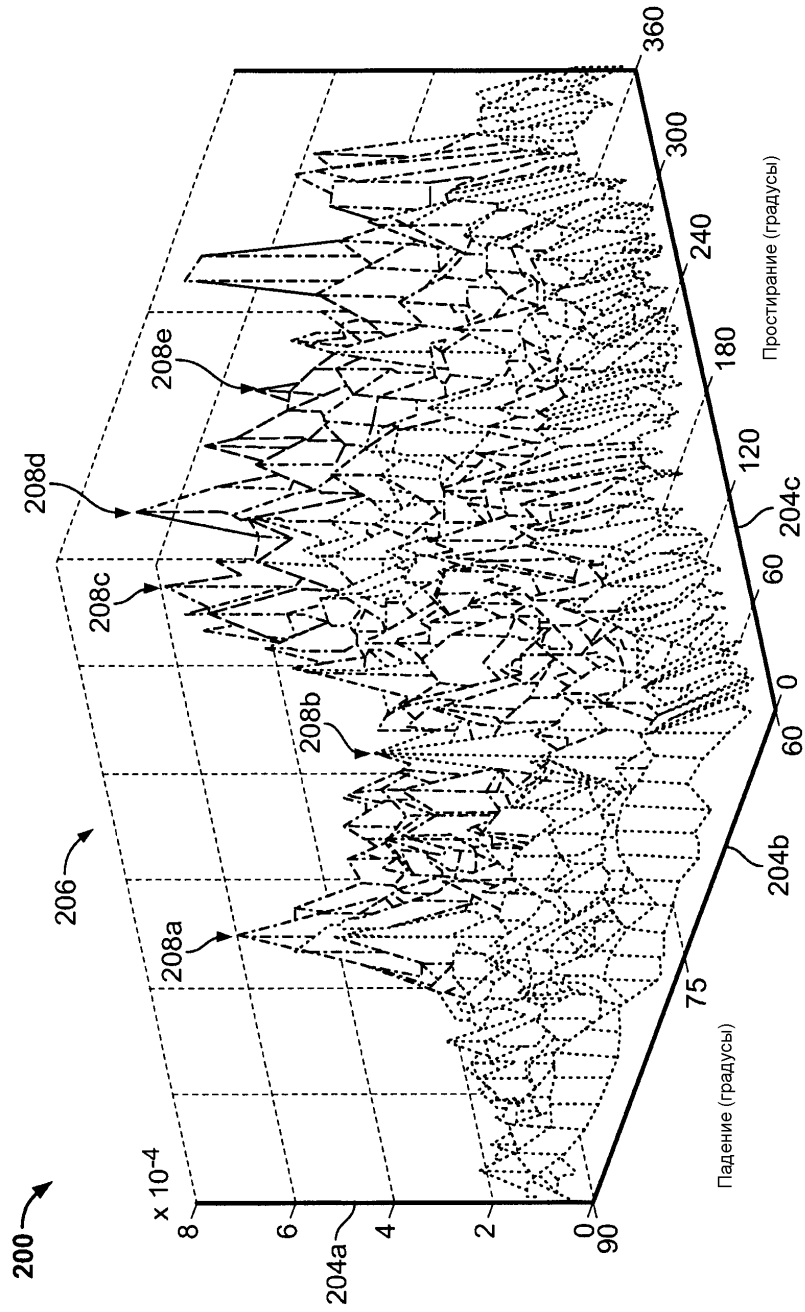
вычисление нормального вектора для основной плоскости, определяемой каждым компланарным поднабором, при этом ориентации основных плоскостей вычисляются на основании нормальных векторов.



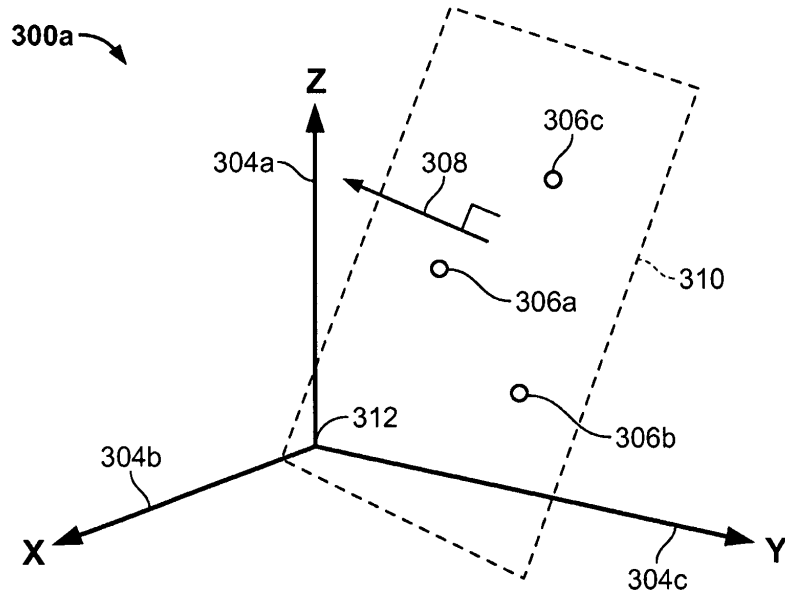
ФИГ. 1А



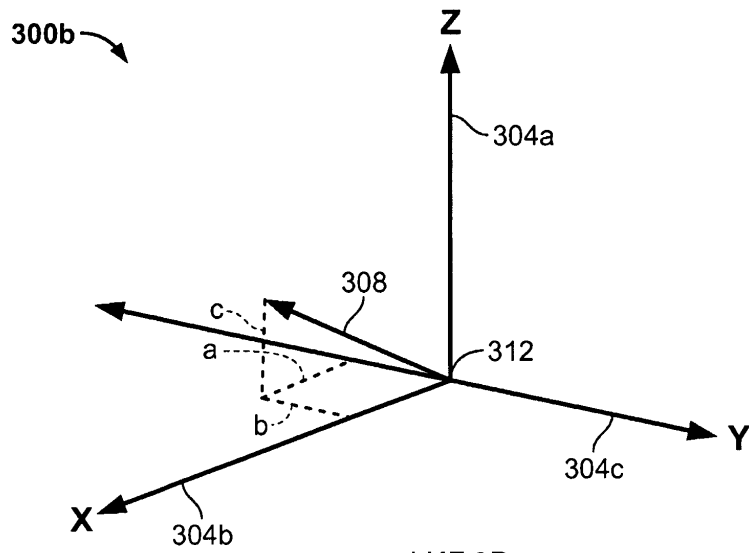
ФИГ.1В



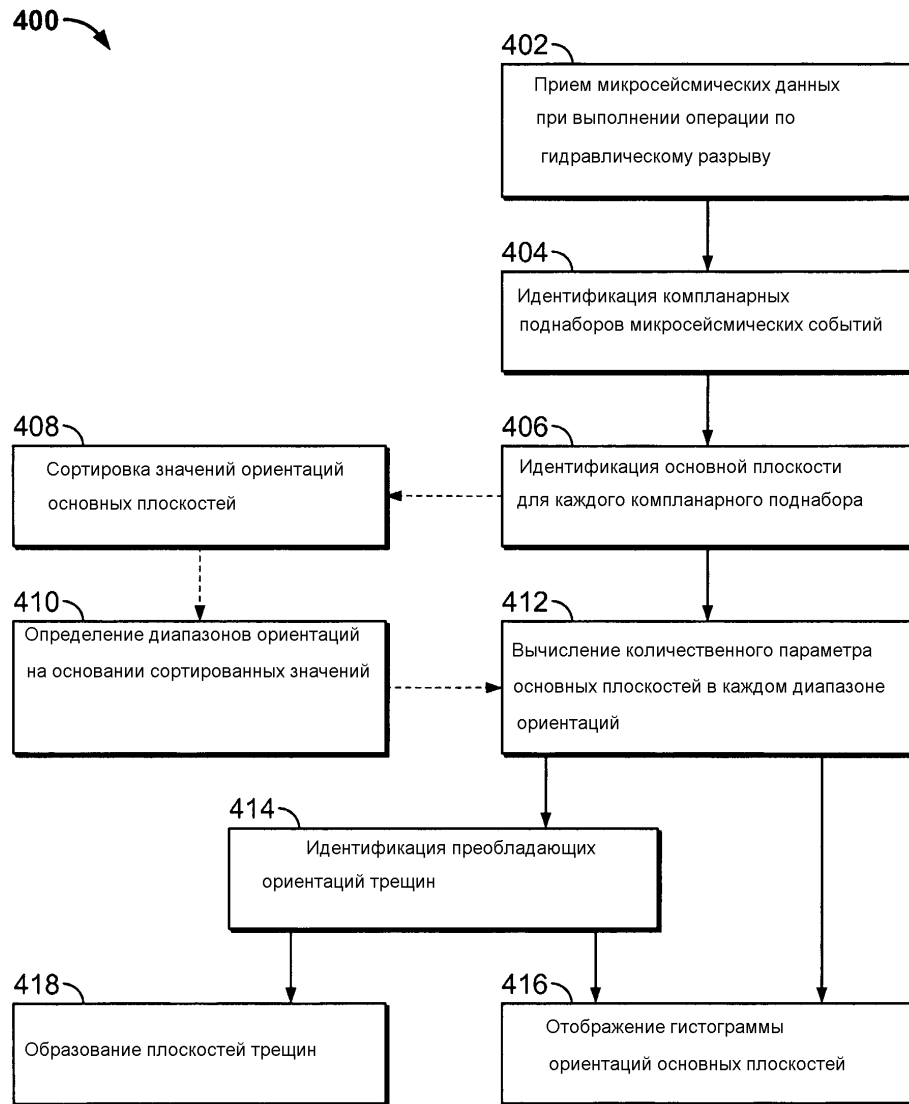
ФИГ.2



ФИГ.3А



ФИГ.3В



ФИГ.4