

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **037970**

(13) **B1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2021.06.17

(51) Int. Cl. **G01V 3/08** (2006.01)

(21) Номер заявки
201691388

(22) Дата подачи заявки
2014.01.08

(54) СПОСОБ ИНВЕРСИИ

(43) **2017.01.30**

(86) **PCT/EP2014/050247**

(87) **WO 2015/104052 2015.07.16**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
СТАТОЙЛ ПЕТРОЛЕУМ АС (NO)

(72) Изобретатель:
**Виик Торгейр, Дишлер Эйрик
Эверлани, Нордскаг Яннике Ирен,
Нгуен Анх Кьет (NO)**

(74) Представитель:
**Хмара М.В., Рыбаков В.М., Липатова
И.И., Новоселова С.В., Дощечкина
В.В., Пантелеев А.С., Ильмер Е.Г.,
Осипов К.В. (RU)**

(56) **US-A1-2011264421**

VANESSA BROWN ET AL.: "Seismically regularized controlled-source electromagnetic inversion", GEOPHYSICS, SOCIETY OF EXPLORATION GEOPHYSICISTS, US, vol. 77, no. 1, 1 January 2012 (2012-01-01), pages E57-E65, XP001573413, ISSN: 0016-8033, DOI: 10.1190/GE02011-0081.1 [retrieved on 2012-02-08] pages E57-E60

ABUBAKAR A. ET AL.: "2.5D forward and inverse modeling for interpreting low-frequency electromagnetic measurements", GEOPHYSICS, SOCIETY OF EXPLORATION GEOPHYSICISTS, US, vol. 73, no. 4, 1 July 2008 (2008-07-01), pages F165-F177, XP001514715, ISSN: 0016-8033, DOI: 10.1190/1.2937466 cited in the application the whole document

(57) Способ оценки электромагнитных параметров геологической структуры, содержащий следующее: обеспечивают данные электромагнитной разведки с управляемым источником (CSEM) о структуре, вычисляют численную модель, представляющую электромагнитные параметры структуры и генерирующую моделируемые данные CSEM, дискретизируют численную модель на основании предварительных знаний о структуре, определяют функционал для минимизации расстояния между указанными моделируемыми данными CSEM и указанными данными CSEM, причем функционал содержит член регуляризации, который зависит от предварительных знаний об указанной структуре.

B1

037970

037970

B1

Область техники

Настоящее изобретение относится к способам подповерхностных геологических исследований и к инверсии электромагнитных данных.

Уровень техники

Исследование подповерхностных геологических структур может осуществляться при помощи множества способов регистрации. Способы регистрации можно использовать для получения вывода о наличии углеводородов в пласте. Двумя примерами способов регистрации являются сейсмические способы и электромагнитные способы. Сейсмические способы основаны на регистрации упругих волн, распространяющихся в пласте. Электромагнитные способы основаны на регистрации электромагнитных волн, которые распространяются в пласте. Конкретным примером электромагнитного способа является регистрация данных морской электромагнитной разведки с управляемым источником (mCSEM). В этом способе судно буксирует в морской воде дипольный источник, который излучает изменяющееся во времени электромагнитное поле вглубь земли. Это поле распространяется в пласте и регистрируется множеством датчиков, размещенных на морском дне или также буксируемых за судном. После того как данные mCSEM были собраны датчиками, эти данные необходимо интерпретировать или инвертировать для извлечения из данных информации о пласте. Один из способов инвертирования данных состоит в использовании численной модели для создания набора моделируемых данных. Если модель идеально представляет пласт и распространение электромагнитного поля в пласте, то моделируемые данные будут идентичны измеренным данным. Оценку оптимальной модели можно сформулировать как задачу оптимизации, в которой расстояние между реальными данными и моделируемыми данными минимизировано. Однако задача инверсии представляет собой крайне неоднозначную задачу со многими возможными решениями, некорректную в адамаровом смысле. Это может привести к получению нефизических результатов инверсии и соответствующим трудностям при интерпретации. Для решения этой проблемы в задачу оптимизации может быть включен член регуляризации. В горизонтальное и вертикальное направления пласта может быть включен пространственно однородный параметр сглаживания.

В некоторых способах используется регуляризация Тихонова (Tikhonov, A.N. et al., 1977. Solutions of ill-posed problems; W.H. Winston and Sons.), при которой дополнительные штрафы включаются линейно в стоимостный функционал. Эти штрафы предназначены для усиления определенных свойств в инвертированном профиле удельных сопротивлений и сужения сути задачи. Такой подход был предпринят, например, в работе Жданова и др. (SEG technical Program Expanded Abstracts, 26, F65-F76). Однако этот член необходимо правильно взвешивать, чтобы регуляризирующая информация и информация в виде данных уравнивали друг друга. Иной подход был предпринят в работе Абубакара и др. (Geophysics, 73, F165-F177), где регуляризирующий член был включен мультипликативно в стоимостный функционал, тем самым, устраняя оценку компромисса между различными членами в стоимостном функционале. Однако при обоих подходах регуляризация является однородно сглаживающей, при этом сглаживающие операторы применяют в горизонтальном и вертикальном направлениях, тем самым, обеспечивая медленно изменяющийся профиль удельных сопротивлений в инвертированном результате.

Сущность изобретения

Согласно первому аспекту настоящего изобретения предлагается способ оценки электромагнитных параметров геологической структуры, содержащий следующее: обеспечивают данные электромагнитной разведки с управляемым источником (CSEM) о структуре, вычисляют численную модель, представляющую электромагнитные параметры структуры и генерирующую моделируемые данные CSEM, дискретизируют численную модель на основании предварительных знаний о структуре, определяют функционал для минимизации расстояния между указанными моделируемыми данными CSEM и указанными данными CSEM, причем функционал содержит член регуляризации, который зависит от предварительных знаний об указанной структуре.

Электромагнитные параметры могут представлять собой удельную проводимость геологической структуры во множестве точек (областей) структуры. Член регуляризации может иметь силу, которая зависит от точки структуры и может содержать множество весов, соответствующих множеству геологических точек, причем некоторые из точек определяются с большей достоверностью, чем другие точки, и при этом точкам, определяемым с большей достоверностью, могут быть присвоены большие веса, чем точкам с меньшей достоверностью.

Член регуляризации может содержать множество весов, соответствующих множеству геологических точек, причем веса, присвоенные точкам с проходящими через них горизонтами, меньше, чем веса, присвоенные точкам без проходящих через них горизонтов. Предварительные знания могут включать в себя данные сейсморазведки.

Согласно второму аспекту настоящего изобретения предлагается способ оценки электромагнитных параметров геологической структуры, содержащий следующие шаги: обеспечивают данные электромагнитной разведки с управляемым источником (CSEM) о структуре, вычисляют численную модель, представляющую параметры структуры и генерирующую моделируемые данные CSEM, дискретизируют численную модель на основании предварительных знаний о структуре, определяют функционал для минимизации расстояния между указанными моделируемыми данными CSEM и указанными данными

CSEM, причем функционал содержит члены, обеспечивающие корреляцию соседних геологических точек в зависимости от предварительных знаний об указанной структуре.

Шаг коррелирования может зависеть от наличия структурного градиента, оцениваемого на основании предварительных знаний об указанной структуре. Способ может дополнительно включать в себя определение первого пространственного направления в касательной плоскости указанной структуры и второго пространственного направления, перпендикулярного касательной плоскости указанной структуры. Соседним точкам в первом пространственном направлении может быть присвоена высокая степень корреляции, а соседним точкам во втором пространственном направлении может быть присвоена низкая степень корреляции.

Предварительные знания могут включать в себя данные сейсморазведки. Электромагнитные параметры могут представлять собой удельную проводимость геологической структуры во множестве точек структуры. Первое и второе пространственные направления могут быть выбраны в соответствии с указанным шагом дискретизации численной модели.

Согласно третьему аспекту настоящего изобретения предлагается компьютерное устройство, содержащее приемник для приема данных электромагнитной разведки с управляемым источником (CSEM) о геологической структуре; процессор, выполненный с возможностью реализации способа в соответствии с первым или вторым аспектом изобретения.

Согласно четвертому аспекту настоящего изобретения предлагается компьютерная программа, содержащая энергонезависимый машиночитаемый код, который при выполнении на компьютерном устройстве обуславливает работу компьютерного устройства в качестве компьютерного устройства в соответствии с третьим аспектом изобретения.

Согласно пятому аспекту настоящего изобретения предлагается компьютерный программный продукт, содержащий энергонезависимый машиночитаемый носитель и компьютерную программу в соответствии с четвертым аспектом изобретения, причем компьютерная программа сохранена на долговременном машиночитаемом носителе.

Краткое описание чертежей

Некоторые варианты осуществления изобретения будут теперь раскрыты только в качестве примера со ссылкой на прилагаемые чертежи, на которых

- на фиг. 1 изображена дискретизация модели;
- на фиг. 2 изображен выход фильтра хаоса сейсмических сигналов;
- на фиг. 3 изображена функция β , используемая для описания относительной силы регуляризации;
- на фиг. 4 изображен пример регуляризации;
- на фиг. 5 изображена истинная модель в синтетическом примере;
- на фиг. 6 изображена начальная модель в синтетическом примере;
- на фиг. 7 изображен пример сглаживающей регуляризации;
- на фиг. 8 изображена относительная разность между результатом сглаживающей регуляризации и истинной моделью в синтетическом примере;
- на фиг. 9 изображен результат структурной регуляризации в синтетическом примере;
- на фиг. 10 изображена относительная разность между результатом структурной регуляризации и истинной моделью в синтетическом примере;
- на фиг. 11 изображена начальная модель полупространства, применяемая при инверсии;
- на фиг. 12 изображены результаты инверсии с использованием сглаживающей регуляризации. Верхняя панель - вертикальное удельное сопротивление, нижняя панель - горизонтальное удельное сопротивление;
- на фиг. 13 изображены результаты инверсии с использованием структурной сглаживающей регуляризации. Верхняя панель - вертикальное удельное сопротивление, нижняя панель - горизонтальное удельное сопротивление;
- на фиг. 14 показана блок-схема способа оценки;
- на фиг. 15 показана блок-схема способа оценки;
- на фиг. 16 показано схематическое изображение компьютера.

Подробное раскрытие изобретения

Авторы изобретения пришли к заключению, что недостатком схем сглаживающей регуляризации является то, что они не представляют геометрию геологической среды. Сглаживающая регуляризация и, например, регуляризация с минимальной вертикальной опорой (Жданов и др.) не учитывают априорную геологическую информацию, которая может быть доступна, например, из сейсмических данных. В настоящей заявке раскрыт подход к структурной сглаживающей регуляризации Тихонова, который определяет направленность и относительную силу регуляризации по сейсмическим данным. Регуляризация по-прежнему сохраняет сглаживающий характер, но действует преимущественно вдоль слоев пород и слоистого разреза, т.е. стратиграфического разреза. Авторы изобретения пришли к заключению, что изменения электрических параметров представляют собой структурно-конформные изменения упругих параметров. Это использование предварительных знаний позволяет улучшить интерпретацию данных mCSEM, поскольку результат более непосредственно сопоставим с сейсмическими данными.

В настоящем документе раскрыт способ, который включает в себя по меньшей мере два из следующих трех шагов: во-первых, параметры инверсии рассчитаны на то, чтобы соответствовать данным, представляющим стратиграфические поверхности в геологической среде. Этот шаг позволяет дискретизации модели представлять геометрию, наблюдаемую по сейсмическим данным. Дискретизация достигается посредством деления модели на регулярные интервалы по горизонтали, но не по вертикали. Вертикальный интервал между каждой стратиграфической поверхностью делят на заданное количество подслоев. Таким образом, в тех случаях, когда толщина слоя велика, ячейки инверсии задают большими, а когда стратиграфические поверхности приближаются друг к другу, ячейки инверсии задают меньшими. В качестве примера данных, представляющих стратиграфические поверхности, могут использоваться горизонты, которые являются границами раздела, указывающими на конкретное положение в стратиграфической последовательности. Горизонты могут относиться к границам между стратиграфическими единицами или к маркерам в пределах этих единиц.

Во-вторых, пространственно изменяющуюся относительную силу регуляризации определяют по атрибуту сейсмического хаоса. В точках с низким уровнем шума или небольшой неопределенностью в сейсмических данных, например, вдоль отражающих горизонтов и однородных пакетов, члену регуляризации присваивается большой вес, чтобы обеспечить сглаженный профиль. В точках с более высоким уровнем шума или относительно большой неопределенностью в сейсмических данных соответственно присваивается небольшой вес, чтобы обеспечить возможность большего количества вариаций. Может использоваться любой атрибут с аналогичными свойствами.

В-третьих, направление сглаживания определяют при помощи дискретизации модели, описанной на первом шаге. Структура, полученная по предшествующим геофизическим данным, используется для описания в каждой пространственной точке двух новых направлений: вдоль и перпендикулярно направлению падения. Сильная зависимость между соседними точками вдоль направления падения и слабая зависимость между соседними точками перпендикулярно направлению падения могут быть усилены. Сглаживание теперь действует, главным образом, вдоль каждого подслоя, который специально следует стратиграфическому разрезу.

Например, алгоритм инверсии описан следующим образом. В примере иллюстрируется 2-мерная модель, однако этот пример можно также обобщить на 3-мерную модель. Задача инверсии данных электромагнитного способа представляет собой задачу оптимизации: найти удельную проводимость σ , которая минимизирует функционал (уравнение 1)

$$\epsilon(\sigma) = \|W(d - F(\sigma))\|_2^2 + \lambda^2 \epsilon^{\text{reg}}(g(\sigma))$$

В этом функционале $g(\sigma)$ представляет собой инъективную функцию для $\sigma > 0$. Эти функции обычно выбирают для выполнения уточнений в конкретных диапазонах, более удобных для алгоритма оптимизации, или для решения проблем масштаба параметров, например $g = \sigma$, $g = \log \sigma$, $g = \sigma^{1/2}$. Кроме того, $\lambda^2 > 0$ представляет собой параметр регуляризации, который управляет компромиссом между соответствием данных и регуляризатором, а ϵ^{reg} представляет собой регуляризирующий член для усиления конкретных свойств в решении. Данные собраны в векторе d , а F обозначает оператор прямого моделирования. Веса W данных выбирают в соответствии с работой Мортон и др. (CSEM data uncertainty analysis for 3D inversion: SEG, 724-728).

Если используется сглаживающая регуляризация, то член регуляризации в уравнении 1 может быть выбран в виде (уравнение 2)

$$\epsilon^{\text{reg}}(g(\sigma)) = \beta \left(\left\| \alpha_x \frac{\partial}{\partial x} g(\sigma) \right\|_p^p + \left\| \alpha_z \frac{\partial}{\partial z} g(\sigma) \right\|_p^p \right)$$

В уравнении 2 α_x , α_z , $\beta \in \mathbb{R}$ и $\|\cdot\|_p$, $p \in \mathbb{N}$ обозначают общую p -норму. Например, $\alpha_x \geq \alpha_z$, что усиливает плоскостность.

Стоимостный функционал, определенный в уравнении 1, может быть минимизирован итерационно с использованием алгоритма Гаусса-Ньютона. После того как направление поиска найдено посредством решения уравнений, может быть выполнен линейный поиск с возвратом для улучшения сходимости.

В настоящем документе показано, как задают структурную регуляризацию при помощи примера полевых данных, для которых будут также показаны результаты инверсии. Мы предполагаем, что сейсмические данные, отображенные по глубине, доступны наряду с интерпретированными горизонтами.

Модель сначала дискретизируют. Для получения структурно регуляризованных результатов инверсии выбирают подходящее представление модели. Модель поэтому дискретизируют с образованием ячеек инверсии, каждая из которых обладает постоянной удельной проводимостью в соответствии с интерпретированными горизонтами. Модель дискретизируют с образованием N_x регулярных интервалов с фиксированной длиной в горизонтальном направлении, но с возможностью изменяться в вертикальном направлении. На каждом вертикальном профиле вертикальный интервал между каждым горизонтом делят на заданное количество ячеек инверсии. Таким образом, когда расстояние между горизонтами велико, ширина ячеек возрастает, а когда горизонты приближаются друг к другу, ячейки становятся меньше. При этом создаются подслои между горизонтами, которые следуют структуре, и особенность дискрети-

зации состоит в том, что каждый горизонтальный участок имеет одинаковое количество ячеек N_z сетки по вертикали. Когда горизонты чрезмерно сближаются так, что ячейки инверсии становятся меньше, чем размер моделирующей сетки, их удаляют из сетки для инверсии. Это удаление оправдано, поскольку они становятся слишком маленькими для разрешения данных mCSEM на выбранной моделирующей сетке. Пример дискретизации модели показан на фиг. 1. Вертикальная ось указывает глубину, а горизонтальная ось указывает расстояние по горизонтали.

Пространственно изменяющуюся относительную силу регуляризации β определяют по атрибуту сейсмического хаоса. Теперь $\beta: R^n \rightarrow R$, а не $\beta \in R$, где n представляет собой размер модели удельных сопротивлений. Для каждого образца в сейсмическом кубе она связана с числом $0 \leq c \leq 1$, которое описывает локальное хаотическое поведение. Здесь $c=0$ не является хаосом или неопределенностью, тогда как $c=1$ представляет собой полный хаос. Выход этого фильтра показан на фиг. 2.

Выход фильтра хаоса затем отображают на пространственно изменяющуюся функцию β в соответствии с

$$\beta = K e^{-5c^2}$$

где K управляет абсолютным уровнем. Множитель -5 в экспоненте был выбран непосредственно и признан в качестве обеспечивающего хорошее разделение между высокими и низкими значениями. Кроме того, необходимо иметь $\beta > 0$ для сохранения невырожденных уравнений. Таким образом, β имеет также порог снизу. Было также принято во внимание, что связывание низких значений β на ячейках сетки, пересекаемых горизонтами, имеет положительное воздействие на оценку и способствует усилению контраста в этих точках. Наконец, для сглаживания был применен гауссовский фильтр скользящего среднего.

Небольшая величина β означает, что, как мы предполагаем, хаотическое сейсмическое поведение влечет за собой менее плавное изменение удельной проводимости. С другой стороны, при небольшом хаосе в сейсмических данных мы предполагаем более сглаженный профиль удельных сопротивлений. Окончательный вид функции β показан на фиг. 3. Здесь приведен конкретный пример построения β , однако авторы изобретения пришли к заключению, что существует много различных способов построения β , таких, что высокие значения β присваиваются точкам с низким уровнем хаоса, а низкие значения β присваиваются точкам с высоким уровнем хаоса.

Альтернативно, пространственно изменяющиеся веса β , присвоенные точкам, могут быть выбраны таким образом, чтобы веса с горизонтами, проходящими через них, были меньше, чем веса, присвоенные точкам без горизонтов, проходящих через них.

Член регуляризации в уравнении 1 также может быть модифицирован. Эта модификация может присваиваться в дополнение к пространственно изменяющейся относительной силе регуляризации или вместо пространственно изменяющейся относительной силы.

Новый член регуляризации определяется как (уравнение 3)

$$\epsilon^{\text{reg}}(g_2(\sigma)) = \beta \left(\left\| \alpha_{x'} \frac{\partial}{\partial x'} g_2(\sigma) \right\|_p^p + \left\| \alpha_{z'} \frac{\partial}{\partial z'} g_2(\sigma) \right\|_p^p \right)$$

В уравнении 3 x' и z' представляют собой новые горизонтальное и вертикальное направления, задаваемые в соответствии с новой дискретизацией модели. Различие с уравнением 2 заключается в том, что в уравнении 3 сглаживание в горизонтальном и вертикальном направлениях взаимосвязано с тем, чтобы определять направление, и в том, что веса изменяются пространственным способом, согласованным с сейсмической информацией. Направление сглаживания определяют, например, по сейсмическим горизонтам. Точки сетки на горизонтах заданы направлением наклона горизонта. Направление, связанное с точкой сетки посередине между горизонтами, интерполируют между тангенсами углов наклона горизонтов, расположенных непосредственно выше и ниже. Для некоторых применений может оказаться удобным использовать только тангенс угла наклона горизонта, расположенного выше, тогда как в других случаях - только тангенс горизонта, расположенного ниже. Однако, чтобы обеспечить плавно изменяющееся направление, по умолчанию применяется линейная интерполяция относительно расстояния по вертикали. Определение нового горизонтального и вертикального направлений в уравнении 3 устанавливает корреляцию между соседними геологическими точками в зависимости от наличия структурного градиента, оцениваемого на основании предварительных знаний об указанной структуре.

Производную для модели удельной проводимости σ далее определяют с дискретизацией на сетке для инверсии, оцениваемой в точках i_x, i_z сетки как

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x'} g_2(\sigma(i_x, i_z)) &= \frac{g_2(\sigma(ip_x(i_x, i_z), ip_z(i_x, i_z))) - g_2(\sigma(i_x, i_z))}{\Delta x'}, \\ \frac{\partial}{\partial z'} g_2(\sigma(i_x, i_z)) &= \frac{g_2(\sigma(iq_x(i_x, i_z), iq_z(i_x, i_z))) - g_2(\sigma(i_x, i_z))}{\Delta z'}, \end{aligned}$$

где ip_x, ip_z, iq_x, iq_z представляют собой индексные массивы с размерностью $N_x \times N_z$, описывающие, относительно какой ячейки сетки для инверсии должна производиться регуляризация, а $\Delta x'$ и $\Delta z'$ пред-

ставляют собой размеры ячейки в новой дискретизации модели. Индексные массивы ip_x , ip_z теперь определяют новое горизонтальное направление в пределах подслоя, заданного дискретизацией модели, а iq_x , iq_z выполняют то же самое в отношении нового вертикального направления. Эти массивы должны учитывать, что некоторые из этих ячеек могут исчезать при чрезмерном сближении горизонтов и вновь появляться при их повторном расхождении. В таких ситуациях индексирование не относится к непосредственному соседу ячейки в подслое. Пример регуляризации для данной ячейки показан на фиг. 4.

Заметим, что если выбрать регулярную сетку для инверсии и определить элемент (ix, iz) в индексных массивах как

$$ip_x(ix, iz) = ix + 1,$$

$$ip_z(ix, iz) = iz,$$

$$iq_x(ix, iz) = ix,$$

$$iq_z(ix, iz) = iz + 1,$$

то мы получим сглаживающую регуляризацию в уравнении 2, аппроксимируемую при помощи правых разностей. Сглаживающая регуляризация представляет собой специальный случай более общей стратегии индексации.

Далее представлен результат вычисления, основанный на конкретных вариантах осуществления, рассмотренных выше. Используемая нами синтетическая модель представлена на фиг. 5. Она состоит из полого наклоненного морского дна, колеблющейся границы раздела и прямой наклонной границы раздела. Самый верхний подповерхностный слой является изотропным с удельным сопротивлением $R_h=R_v=1$ Ом·м. Следующие два слоя являются анизотропными с горизонтальными и вертикальными удельными сопротивлениями $R_h=2$ Ом·м и $R_v=6$ Ом·м и $R_h=10$ Ом·м и $R_v=20$ Ом·м соответственно. Вода выбрана изотропной с $R_h=R_v=0,3125$ Ом·м. На глубине приблизительно 1000 м ниже морской поверхности расположен изотропный коллектор 50 Ом·м. Эта модель обеспечивает возможность испытания схемы регуляризации как на плоских, так и на криволинейных границах раздела, проверку ее взаимодействия с тонкими резисторами и сравнение с традиционной регуляризацией.

Входные данные представляют собой электрические поля вдоль линии наблюдения, зарегистрированные на 10 приемниках, разделенных интервалами 1 км. На каждом приемнике использовались удаления в диапазоне 2-10 км при шумовом пороге 10^{-15} В/Ам² и с добавлением 5% гауссовского шума. Высота источника возбуждения составляла 30 м над уровнем морского дна, при этом использовались частоты 0,25; 0,5; 1 Гц. Для данного примера $\alpha_x=1$, $\alpha_z=0,03$, $p=1$ и $g(\sigma)=\sqrt{\sigma}$. Сила λ^2 регуляризации уменьшалась на 5% при каждой итерации до тех пор, пока среднеквадратичная невязка, нормализованная относительно добавленного шума, не опускалась ниже 1. Начальная модель была выбрана в виде изотропной модели полупространства 2 Ом·м, показанной на фиг. 6. Данный пример представляет собой синтетический пример.

На фиг. 7 показан результат инверсии при сглаживающей регуляризации, тогда как на фиг. 8 показана относительная разность между результатом инверсии на фиг. 7 и истинной моделью на фиг. 5. Соответствующие графики для структурной регуляризации показаны на фиг. 9 и 10. Сравнивая результаты инверсии на фиг. 7 и 9 заметим, что, хотя сглаживающая регуляризация способна воспроизводить основные тенденции, в результате структурной регуляризации получают более резкие границы раздела. Кроме того, особенно на самой глубокой границе раздела, горизонтальное сглаживание при регуляризации ухудшает результат. Среднеквадратичная невязка для сглаживающей регуляризации была равна 4,9%, тогда как для структурной регуляризации она составляет 5,0%. Кроме того, регуляризация помещает резистор немного неправильно по глубине. Все результаты соотносят данные с уровнем неопределенности.

При сравнении изображений относительной разности фиг. 8 и 9 эффект регуляризатора еще более ярко выражен. Обратив внимание на колеблющуюся границу раздела на фиг. 8, заметим, что ошибки сопровождают горизонтальное направление сглаживания, тогда как на фиг. 10 они сопровождают границу раздела. Кроме того, ошибки, как правило, меньше при структурной регуляризации. Это обусловлено тем, что априорная информация о границах раздела является правильной, тем самым, обеспечивая более точное изображение истинной модели.

Другой пример представлен для реальных результатов CSEM-исследования. Для этого примера мы выбрали $\alpha_x=1$, $\alpha_z=0,1$, $p=1$ и $g(\sigma)=\sqrt{\sigma}$. Линия состоит из 9 приемников, при этом горизонтальный дипольный источник излучения буксировали приблизительно на высоте 30 м над уровнем морского дна, а инверсия выполнялась с использованием частот 0,2 и 0,4 Гц. Начальная модель была анизотропной моделью полупространства, показанной на фиг. 11. Инверсии выполнялись до тех пор, пока алгоритм с возвратом уже не позволял находить лучшее соответствие данных. Сила λ^2 регуляризации уменьшалась на 5% при каждой итерации до тех пор, пока среднеквадратичная невязка, нормализованная относительно предполагаемой неопределенности измерения, не опускалась ниже 1.

На фиг. 12 показаны результаты регуляризации с использованием данных вдоль линии наблюдения. Мы замечаем явную аномалию на глубине приблизительно 1800 м. Центр аномалии немного смещен от

вершины структуры и сильно размазан в поперечном направлении. Трудно сказать, связано ли это с более высоким удельным сопротивлением во всем пакете, более локализованной аномалией удельного сопротивления или тем и другим. Кроме того, в нижних частях разреза изменения удельного сопротивления пересекают интерпретированные горизонты. Среднеквадратичная невязка для инверсии составляет 2,8%, ниже предполагаемого уровня неопределенности данных, составляющего 4-5%.

На фиг. 13 нами показан результат структурной регуляризации при помощи данных по электрическим полям вдоль линии наблюдения. Теперь мы видим, что главная аномалия разделена на три аномалии, каждая из которых имеет более высокое удельное сопротивление, чем раньше. Это указывает на то, что имеет место не возросшее удельное сопротивление во всем слое, но, скорее, локализованные аномалии. Это находится в соответствии с интерпретацией по сейсмическим данным. Эффект регуляризации ясно проявляется в том, что теперь инвертированный профиль удельного сопротивления следует геометрии, обусловленной сейсмическими горизонтами. Среднеквадратичная невязка для инверсии составляет 3,2%.

На фиг. 14 схематически изображен рассмотренный выше способ оценки электромагнитных параметров геологической структуры, содержащий следующие шаги: обеспечивают данные электромагнитной разведки с управляемым источником (CSEM) о структуре (S1), вычисляют численную модель, представляющую электромагнитные параметры структуры и генерирующую моделируемые данные CSEM (S2), дискретизируют численную модель на основании предварительных знаний о структуре (S3) и минимизируют стоимостную функцию (S4) при помощи члена регуляризации, который зависит от предварительных знаний о структуре.

На фиг. 15 схематически изображен рассмотренный выше способ оценки электромагнитных параметров геологической структуры, содержащий следующие шаги: обеспечивают данные электромагнитной разведки с управляемым источником (CSEM) о структуре (S21), вычисляют численную модель, представляющую электромагнитные параметры структуры и генерирующую моделируемые данные CSEM (S22), дискретизируют численную модель на основании предварительных знаний о структуре (S23) и минимизируют стоимостную функцию (S24), содержащую члены, устанавливающие корреляцию между соседними геологическими точками в зависимости от предварительных знаний об указанной структуре.

На фиг. 16 схематически изображено в виде блок-схемы компьютерное устройство (15), которое выполнено с возможностью реализации раскрытого выше способа. Компьютерное устройство оснащено процессором (16) и приемником (17) для приема данных электромагнитной разведки с управляемым источником (CSEM) о геологической структуре. Исходя из принятых данных и модели процессор выполняет оценку параметров геологической структуры. Передатчик (18) предусмотрен для обеспечения вывода оцениваемых параметров.

Также может быть предусмотрен долговременный машиночитаемый носитель данных в виде запоминающего устройства (19), которое может использоваться для хранения данных. Оно может использоваться для хранения компьютерной программы (20), которая при выполнении процессором обуславливает работу компьютерного устройства в соответствии с вышеприведенным описанием.

Хотя настоящее изобретение раскрыто на примере предпочтительных вариантов осуществления, изложенных выше, следует понимать, что эти варианты осуществления являются лишь иллюстративными, и что формула изобретения не ограничена этими вариантами. Специалисты в данной области техники смогут внести модификации и применить альтернативные варианты с учетом данного описания, которые рассматриваются в качестве входящих в объем притязаний формулы изобретения. Каждый признак, раскрытый или проиллюстрированный в настоящем описании, может быть включен в изобретение самостоятельно или в любой соответствующей комбинации с любым другим признаком, раскрытым или проиллюстрированным в нем.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ электромагнитной разведки, включающий определение электромагнитных параметров геологической структуры, включающий этапы, на которых

получают данные электромагнитной разведки с управляемым источником (CSEM) о геологической структуре от группы датчиков, размещенных на морском дне или буксируемых за судном,

вычисляют численную модель этой структуры, представляющую электромагнитные параметры структуры и генерирующую моделируемые данные CSEM,

пространственно дискретизируют численную модель на основании предварительных знаний о стратиграфических горизонтах структуры путем деления модели на регулярные интервалы по горизонтали, а также путем деления вертикального интервала между каждым стратиграфическим горизонтом на заданное количество подслоев,

определяют первое пространственное направление в касательной плоскости указанной структуры и второе пространственное направление, перпендикулярное касательной плоскости указанной структуры, причем эти первое и второе пространственные направления выбирают в соответствии с указанным ша-

гом дискретизации численной модели,

определяют функционал для определения расстояния между моделируемыми данными CSEM и указанными полученными данными CSEM, причем указанный функционал содержит члены, обеспечивающие корреляцию соседних геологических точек в зависимости от пространственно дискретизированной модели, вследствие чего соседним точкам в первом пространственном направлении присваивают высокую степень корреляции, а соседним точкам во втором пространственном направлении присваивают низкую степень корреляции,

используют алгоритм инверсии, использующий функционал, определенный на предыдущем этапе, для получения оценочной уточненной модели, представляющей электромагнитные параметры геологической структуры,

и делают вывод о наличии углеводородов в пласте геологической структуры на основании указанных электромагнитных параметров.

2. Способ по п.1, в котором указанная корреляция зависит от наличия структурного градиента, оцениваемого на основании предварительных знаний об указанной структуре.

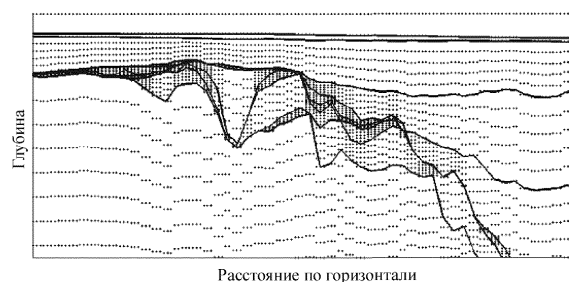
3. Способ по п.1 или 2, в котором указанные предварительные знания включают в себя данные сейсморазведки.

4. Способ по п.1, в котором электромагнитные параметры представляют собой удельную проводимость геологической структуры во множестве точек структуры.

5. Компьютерное устройство, содержащее приемник для приема данных электромагнитной разведки с управляемым источником (CSEM) о геологической структуре;

процессор, выполненный с возможностью осуществления действий способа по любому из пп.1-4.

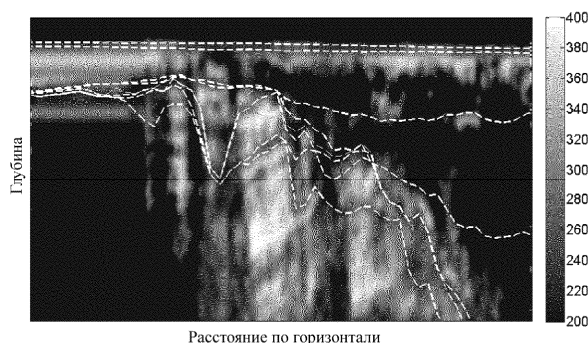
6. Машиночитаемый носитель данных, содержащий компьютерную программу, содержащую энергонезависимый машиночитаемый код, который при выполнении на компьютерном устройстве обеспечивает осуществление действий способа по любому из пп.1-4.



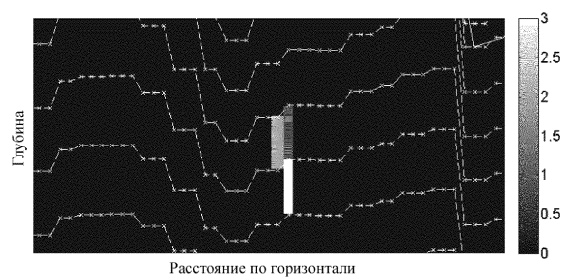
Фиг. 1



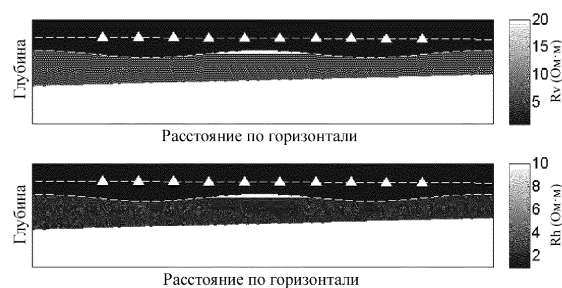
Фиг. 2



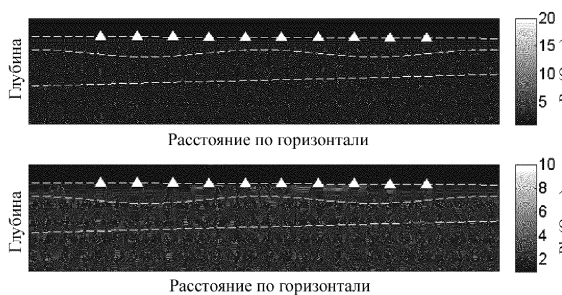
Фиг. 3



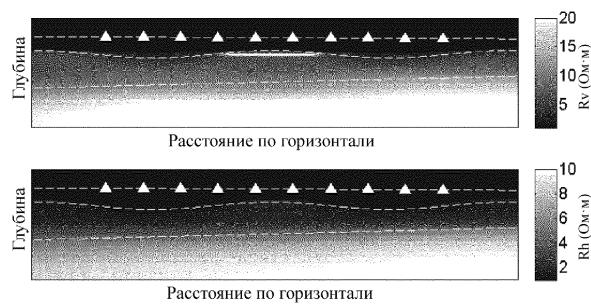
Фиг. 4



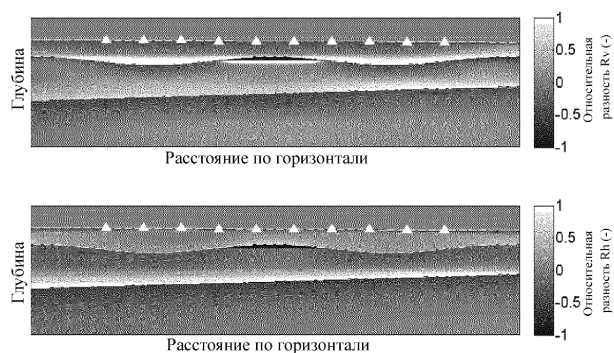
Фиг. 5



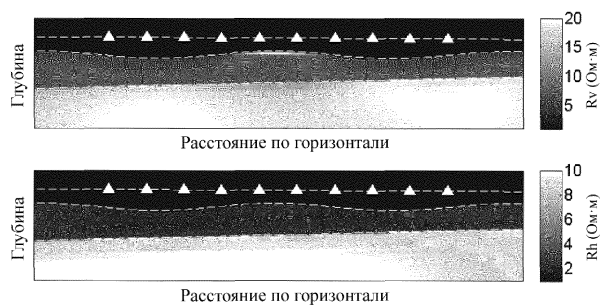
Фиг. 6



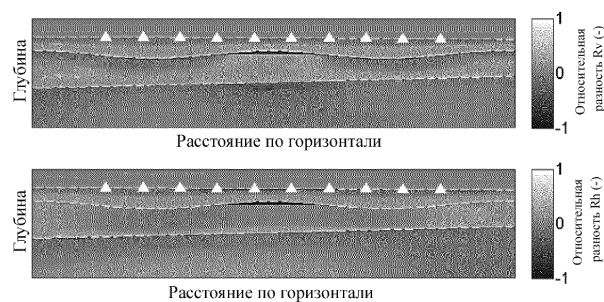
Фиг. 7



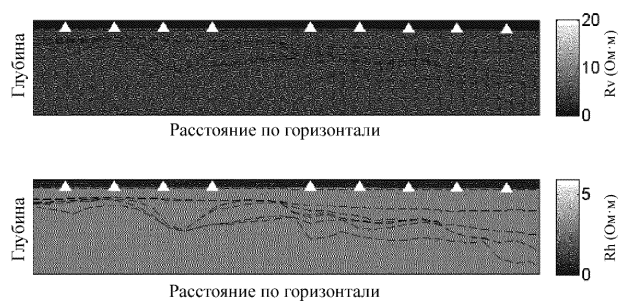
Фиг. 8



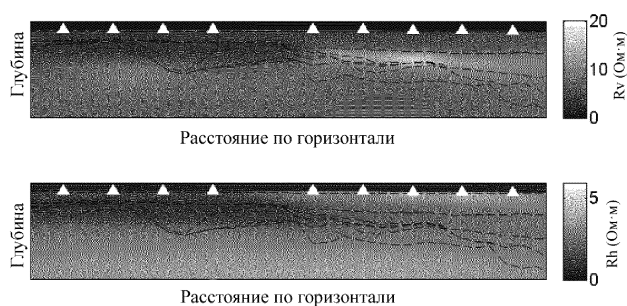
Фиг. 9



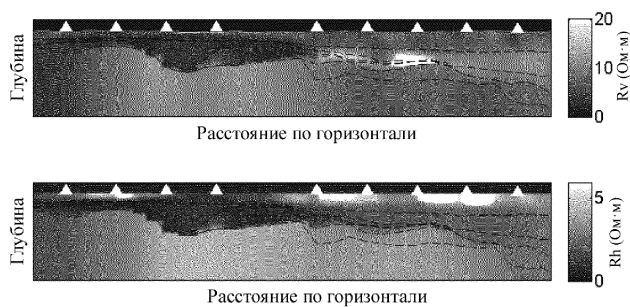
Фиг. 10



Фиг. 11



Фиг. 12



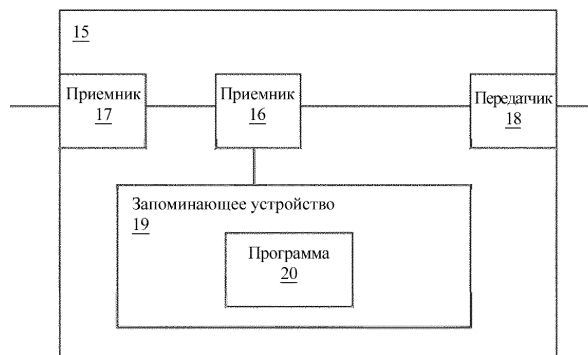
Фиг. 13



Фиг. 14



Фиг. 15



Фиг. 16

