



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК  
G01V 11/00 (2019.05)

(21)(22) Заявка: 2018143735, 10.12.2018

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
10.12.2018

Дата регистрации:  
15.01.2020

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 10.12.2018

(45) Опубликовано: 15.01.2020 Бюл. № 2

Адрес для переписки:

191002, Санкт-Петербург, ул. Большая  
Московская, 2, ОАО "НИПИИ  
"Ленметрогипротранс", Лебедеву М.О.

(72) Автор(ы):

Исаев Юрий Сергеевич (RU),  
Черников Александр Георгиевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Открытое акционерное общество  
"Научно-исследовательский,  
проектно-изыскательский институт  
"Ленметрогипротранс" (ОАО "НИПИИ  
"Ленметрогипротранс") (RU),  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки "Институт проблем  
комплексного освоения недр им. академика  
Н.В. Мельникова Российской академии наук"  
(ИПКОН РАН) (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: А.Г.Черников и др. Новый способ  
дистанционного прогнозирования инженерно-  
геологических характеристик сложных  
геодинамических объектов / Горный  
информационно-аналитический бюллетень  
(научно-технический журнал), 2010, N7,  
стр.177-187. Ю.С.Исаев, А.Г.Черников.  
Подповерхностное зондирование массива  
горных пород методом марковской  
гипсотомографии / (см. прод.)

(54) Способ 3D прогнозирования свойств и строения геологических объектов на основе компьютерного анализа марковских свойств поверхностных геолого-геофизических полей

(57) Реферат:

Изобретение относится к области геотомографического прогнозирования и может быть использовано для прогнозирования свойств и строения геологических объектов. Сущность: выполняют измерение и цифровую регистрацию абсолютных альтитуд рельефа и параметров геолого-геофизических полей участка исследуемой земной поверхности в координатах X, Y. По результатам измерений строят сомасштабные цифровые карты распределения значений геолого-геофизических полей на

поверхности объекта - грид-карты. С помощью алгоритма, основанного на теории конечных цепей Маркова, преобразуют грид-карты в послыйный глубинный 3D прогноз нелинейной изменчивости значений марковских характеристик одного или нескольких разнотипных геополей. Полученную в результате решения обратной задачи прогностическую нелинейную модель прогнозных глубинных оценок изменчивости марковских атрибутов геополей в подповерхностных отложениях

преобразуют методом геостатистической инверсии в прогнозные количественные оценки глубинных геолого-геофизических свойств исследуемого породного массива. Для этого используют априорные петрофизические модели исследуемой геологической формации, построенные с учетом плотности, скорости продольных или поперечных волн, естественной

радиоактивности, удельного электрического сопротивления и других свойств. Технический результат: повышение оперативности, эффективности и достоверности априорного марковского прогноза строения и свойств исследуемого породного массива. 2 з.п. ф-лы, 8 ил.

(56) (продолжение):

Науков прац УкрНДМ НАН України, 2011, №9, ч.2, стр.136-147. RU 2293361 C2, 10.02.2007.

RU 2711178 C1

RU 2711178 C1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC  
*G01V 11/00 (2019.05)*

(21)(22) Application: **2018143735, 10.12.2018**

(24) Effective date for property rights:  
**10.12.2018**

Registration date:  
**15.01.2020**

Priority:

(22) Date of filing: **10.12.2018**

(45) Date of publication: **15.01.2020 Bull. № 2**

Mail address:

**191002, Sankt-Peterburg, ul. Bolshaya  
Moskovskaya, 2, OAO "NIPPI  
"Lenmetroprotrans", Lebedevu M.O.**

(72) Inventor(s):

**Isaev Yuriy Sergeevich (RU),  
Chernikov Aleksandr Georgievich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Otkrytoe aktsionernoe obshchestvo  
"Nauchno-issledovatel'skij, proektno-izyskatel'skij  
institut "Lenmetroprotrans" (OAO "NIPPI  
"Lenmetroprotrans") (RU),  
Federalnoe gosudarstvennoe byudzhethnoe  
uchrezhdenie nauki "Institut problem  
kompleksnogo osvoeniya nedr im. akademika  
N.V. Melnikova Rossijskoj akademii nauk"  
(IPKON RAN) (RU)**

(54) **METHOD 3D FOR FORECASTING PROPERTIES AND STRUCTURE OF GEOLOGICAL OBJECTS  
BASED ON COMPUTER ANALYSIS OF THE SURFACE PROPERTIES OF SURFACE GEOLOGICAL AND  
GEOPHYSICAL FIELDS**

(57) Abstract:

FIELD: physics.

SUBSTANCE: invention relates to geotomographic prediction and can be used for prediction of properties and structure of geological objects. Summary: measurement and digital recording of absolute altitude of relief and parameters of geological and geophysical fields of the section of the investigated earth surface in X, Y coordinates are performed. Based on the measurement results, co-scale digital maps of distribution of values of geological and geophysical fields on the surface of the object – a grid-map are constructed. Using an algorithm based on finite Markov chain theory, grid maps are converted to layer-by-depth depth 3D forecast of non-linear variability of values of mark characteristics of one or several different-type geo-fields. Obtained as a result of solving inverse

problem forecasting non-linear model of predictive depth estimates of variability of mark attributes of geo-fields in subsurface deposits is converted by geostatistical inversion method in forecast quantitative assessments of deep geological and geophysical properties of investigated rock mass. For this purpose, a priori petrophysical models of the investigated geological formation are used, which are constructed taking into account density, velocity of longitudinal or transverse waves, natural radioactivity, specific electric resistance and other properties.

EFFECT: high efficiency, efficiency and reliability of a priori Markov prediction of the structure and properties of the rock mass under study.

3 cl, 8 dwg

RU 2 711 178 C1

RU 2 711 178 C1

Изобретение относится к области геотомографического прогнозирования - моделирования глубинного (подповерхностного) строения и свойств геологических формаций различного генезиса на основании исследования изменчивости значений геолого-геофизических (Г-Г) полей, измеренных контактно (например, в соответствии с СП-42.1330-2016) или с помощью средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Известны способы изучения глубинного строения Земли. Например, с помощью сейсмической томографии, по мнению сейсмологов и сейсмологов, могут быть получены наиболее точные и обширные сведения о структуре земной коры и верхней мантии. Однако, такие исследования, особенно методы взрывной сейсмологии, являются дорогостоящими, а сейсмологические методы распределены по площади неравномерно, в недостаточном объеме и не обладают достаточным разрешением для детального изучения глубинного строения различных геологических структур. В связи с этим, широко используются менее точные и детальные, но в то же время мобильные и дешевые методы геофизических исследований, основанные на изучении различных естественных физических полей Земли (гравитационного, геомагнитного, геоэлектрического, геотермического и других). Однако известные способы определения строения МГП по показаниям этих методов не универсальны и требуют для каждого метода создания оригинальной методики. Также следует отметить, что различные методы глубинных геофизических исследований существенно различаются по точности и детальности, а также, что немаловажно, по степени доступности исходного фактического материала (по различным причинам) для сторонних исследователей, что в значительной степени затрудняет комплексную геологическую интерпретацию результатов.

Известен космосейсмофациальный способ построения блоковой модели геологического строения осадочного чехла (патент РФ №2386153, опубл. 10.04.2010 по классам МПК G01V 9/00, G01V 9/00, G01V 1/00, G01V 11/00). Изобретение относится к способам создания геологических моделей. В процессе дешифрирования аэрокосмоснимков выделяют линеаменты, анализируют их глубинное отражение на временных сейсмических разрезах, картируют систему вертикальных в разрезе прямолинейных субпараллельно ориентированных в субмеридиональном, субширотном, северно-западном и северо-восточном направлениях разрывно-флексурных нарушений, выделяют фации, обладающие коллекторскими свойствами, намечают границы структурных и неструктурных ловушек, наиболее благоприятных для заложения нефтегазопромысловых и эксплуатационных скважин. Технический результат: создание достоверной модели геологического строения осадочного чехла за счет более точного определения положения продуктивных пластов и более точного определения границ залежей углеводородов. Основным недостатком данного способа следует считать жесткую привязанность его к дорогостоящим сейсморазведочным работам, причем, достоверная привязка сейсмических данных к границам залежей углеводородов и, тем более, выделение фаций обладающих коллекторскими (гранулярными или трещинными) свойствами, требует наличия уже пробуренных и проинтерпретированных поисковых скважин на исследуемой, т.е. на уже опробованной площади.

Известен гравиметрический способ моделирования геологического пространства (патент РФ 2249237, опубл. 27.03.2005 по классу МГЖ G01V 7/00). Способ включает измерение силы тяжести на земной поверхности, построение карты аномалий силы тяжести, осреднение аномалий силы тяжести на плоскости XY в скользящем окне радиуса R, локализацию в геологическом пространстве XYZ гравитирующих неоднородностей. Осреднение на плоскости XY выполняют с серией последовательно увеличивающихся на постоянную величину  $\Delta R$  радиусов осреднения. На основании

зависимости между глубиной залегания  $Z$  гравитирующей неоднородности и радиусом осреднения  $R$  в границах исследуемой площади в заданном диапазоне глубин обособляют серию из  $N$  субпараллельных слоев мощностью  $\Delta Z$ , содержащих внутри себя информацию о фрагментах гравитирующих неоднородностей. Формируют соответствующую серию из  $N$  томографических срезов  $Z_i$ . Путем последовательного анализа срезов осуществляют послойное исследование внутренней структуры геологического пространства. На плоскости  $XZ$  задают сеть профилей, по которым строят соответствующую сеть гравиметрических разрезов путем проецирования информации о фрагментах гравитирующих неоднородностей с томографических срезов  $Z_i$  на плоскости  $XZ$  разрезов в точки, принадлежащие линиям пересечения плоскостей разрезов с плоскостями томографических срезов. Путем интерполяции в плоскостях разрезов получают распределение гравитирующих неоднородностей. Осуществляют их вещественно-структурную идентификацию. На основе непрерывной межпрофильной корреляции идентифицированных в смежных разрезах одноименных вещественно-структурных элементов формируют гравиметрическую объемную модель геологического пространства. К основным недостаткам способа следует отнести тот факт, что осреднение аномалий силы тяжести на плоскости  $XY$  в скользящем окне радиуса  $R$  приводит к существенной потере информации в заданном диапазоне в глубинных субпараллельных слоях  $\Delta Z$ , а результатом является усредненная модель гравитирующего подземного пространства, а не конкретные его геологические характеристики. К тому же в способе используется только гравиметрический метод, материалы которого (детального масштаба) зачастую, являются закрытыми для массового использования.

Наиболее близким аналогом к заявляемому изобретению является способ выявления внутренних неоднородностей земли по патенту РФ №2293361, опубл. 10.02.2007 по классу МПК G01V 1/28. Изобретение относится к области геолого-геофизических проблем, направленных на изучение строения массива горных пород. Способ заключается в обработке карты рельефа региона, измерении альтитуд рельефа по профилям и площадям наблюдений. Затем прогнозируют внутреннее строение массива горных пород и строят томограммы месторождений или горнотехнологических объектов. При этом результаты обработки карты рельефа региона и измеренные значения альтитуд рельефа представляют в виде полей изменчивости марковских свойств, соответствующих различным структурным этажам региона. Прогноз внутреннего строения массива горных пород осуществляют на основе виртуального зондирования изменчивости марковских характеристик его свойств, зарегистрированных на дневной поверхности, которое выполняют сопоставлением численных характеристик изменчивости марковских свойств, определенных путем имитации установок ( $AB \gg MN$ ), используемых при электромагнитном зондировании. Выявление внутренних неоднородностей осуществляют по томограммам месторождения, построенным по регулярным профилям, проведенным вкрест простирания основных тектонических структур. Технический результат: повышение эффективности и упрощение прогноза внутренних неоднородностей Земли. К недостаткам способа следует отнести возникновение искажений прогнозных значений глубин залегания, строения и свойств на периферийных (граничных) областях исследуемого планшета (горного массива), что связано с жесткой фиксацией пространственного положения стационарной матрицы переходных вероятностей (аналог общей глубинной точки), рассчитанной для окна  $AB$  и с которой сопоставляются текущие значения матриц переходных вероятностей, рассчитанных в окне  $MN$ , скользящем по профилям на дневной поверхности моделируемого горного массива. К тому же способ не предполагает осуществлять

томографическую детализацию наиболее интересных объектов внутри исследуемого массива.

Задачей заявляемого изобретения является создание способа автоматизированного глубинного прогноза свойств и строения исследуемого породного массива по материалам контактных и/или дистанционных методов регистрации потенциальных геолого-геофизических полей, на основе которых могут быть построены 3D томографические модели исследуемого породного массива, обеспечивающего оперативное подповерхностное, количественное прогнозирование свойств и геологического строения локальных геологических объектов различного генезиса и технологического предназначения, а также глубинных регионов Земли, в том числе материковой суши, отложений морских акваторий и шельфовых зон за счет вовлечения в автоматизированную обработку комплекса параметров, отражающих глубинные геодинамические процессы, сформировавшие регистрируемые Г-Г поля свойств.

Технический результат - повышение оперативности, эффективности и достоверности априорного марковского глубинного прогноза строения и свойств исследуемого породного массива (без ограничений его латеральных и глубинных размеров).

Способ прогнозирования внутреннего строения и свойств геологических объектов, основанный на использовании марковского анализа геолого-геофизических полей различного типа и генезиса, включающий измерение и цифровую регистрацию в координатах X, Y участка исследуемой земной поверхности абсолютных высот рельефа и параметров геолого-геофизических полей, установленных регламентными геолого-геофизическими изысканиями, по полученным результатам измерений строят сомасштабные цифровые карты распределения значений полей на поверхности объекта - грид-карты, которые затем преобразуют с помощью алгоритма, основанного на теории конечных цепей Маркова, в послойный глубинный 3D прогноз нелинейной изменчивости значений марковских характеристик одного или нескольких разнотипных геополей, полученную в результате решения обратной задачи прогностическую нелинейную модель прогнозных глубинных оценок изменчивости марковских атрибутов геополей в подповерхностных отложениях преобразуют методом геостатистической инверсии в прогнозные количественные оценки глубинных геолого-геофизических свойств исследуемого породного массива, для чего используют априорные петрофизические модели исследуемой геологической формации.

При глубинном прогнозировании строения и свойств породного массива по параметрам геолого-геофизических полей может быть дополнительно использован «Бутстреп-метод».

Цифровая регистрация исследуемой земной поверхности абсолютных высот рельефа и параметров геолого-геофизических полей может быть осуществлена контактно или с помощью средств дистанционного зондирования Земли.

Априорные петрофизические модели исследуемого породного массива построены с учетом плотности, скорости продольных или поперечных волн, естественной радиоактивности, удельного электрического сопротивления и других свойств.

Способ предусматривает обработку результатов площадных наземных, подземных, подводных контактных и дистанционных измерений геологических, геофизических, геохимических, биохимических и пр. геополей с целью создания томографических 3D-моделей прогноза внутреннего строения и свойств горного массива - объекта исследований различных направлений геологической науки: ресурсных, инженерных, морских, сейсмологических, гидрологических и др., а также при оценке вероятных геотехнологических и геоэкологических рисков.

На исследуемой площади контактным или дистанционным способом осуществляют регистрацию (в координатах планшета) отметок альтитуд рельефа и значений, измеренных потенциальных геолого-геофизических полей (в соответствии с СП-42.1330-2016), для чего каждое Г-Г поле преобразуется в значения конечных марковских последовательностей, по которым осуществляют ретроспективный вероятностный прогноз изменчивости марковских значений свойств от поверхности на нижележащие подстилающие горизонты до заданной глубины для всего объема моделируемого подповерхностного пространства. На основе всей имеющейся входной априорной информации о глубинной изменчивости свойств массива (правило Хильта) и апостериорной прогнозной модели глубинной и локальной изменчивости их марковских свойств рассчитывается вероятностный прогноз петрофизических характеристик отложений и строятся глубинные томографические 3D-модели свойств. Строение исследуемого объекта определяется путем анализа изменчивости (сохранения, потери или смены знака пространственной корреляции) прогнозируемых значений свойств реперных горизонтов на горизонтальных слайсах и вертикальных томограммах структурных этажей региона.

Изобретение поясняется чертежами, где:

- на Фиг. 1 показан результат сочленения поверхностного рельефа по данным ДЗЗ с марковским вероятностным прогнозом подповерхностного строения МГП для проектируемого инженерно-геологического объекта;

- на Фиг. 2 представлена обобщенная математическая модель изменения глубины чувствительности «поля» марковских свойств в изотропной среде при различном числе его состояний ( $f$ ), рассчитанных на конечных последовательностях различной протяженности ( $L$ ) при длине шага в последовательности ( $\Delta L$ ). Эмпирические коэффициенты  $b, c$  - допускают корректировку глубинности (рассчитанной по формуле (3)) выполняемого марковского зондирования при наличии достоверно установленных глубинных маркеров (скважины, выработки и пр.);

- на Фиг. 3 представлена грид-модель расположения земной поверхности ( $S_0$ ), подповерхностных слоев  $S_1, S_2 \dots$  и матрица  $SN$  - «общая марковская глубинная точка» (ОМГТ);

- на Фиг. 4 представлена модель экстраполяционного прогноза изменчивости нормированных на удаленную глубинную поверхность марковских свойств.  $L=(3, 11, 21, 31)$  - рассчитанная глубина исследуемых горизонтов в единицах расстояния между узлами грида ( $L$ ).  $L(91)$  - ОМГТ;

- на Фиг. 5 представлена грид-номограмма для автоматизированного пересчета марковских атрибутов:  $H_{отн}$  - глубина зондирования ( $-Z$ ) и коэффициент корреляции ( $R_j$ ) в кажущиеся значения скорости распространения продольных волн  $V_{кр}$  (м/с);

- на Фиг. 6 представлена последовательность трансформаций вертикального поля марковских свойств вычисленного по профилю, проложенному на карте местности: а) рельеф местности с нанесенным профилем; б) визуализация изменчивости марковских свойств на различных расстояниях от дневной поверхности; в) поле изменчивости свойств ( $V_{кр}$ ) после процедур инверсии, их глубинной интерполяции и фильтрации; г) томограмма свойств массива, пересчитанная в координаты абсолютных гипсометрических отметок.

- на Фиг. 7 представлен прогноз изменчивости значений плотности (слева) и скорости (справа) в породном массиве и в зоне проходки тоннеля.

- на Фиг. 8 представлен прогноз изменчивости значений крепости по Протодяконову (слева) и угла внутреннего трения (справа) в породном массиве и в зоне проходки

тоннеля.

Поставленная задача решается за счет способа, включающего следующие операции.

Проводят измерение и цифровую регистрацию (контактно или дистанционно) в координатах X,Y на участке исследуемой земной поверхности значений отметок абсолютных высот рельефа ( $Z_{x,y}$ ) и результатов измерений в соответствии с СП-42.1330-2016 исследуемых потенциальных или приведенных к потенциальному виду геолого-геофизических полей/поля ( $P_{x,y}$ ). По результатам измерений ( $Z_{x,y}$ ) и ( $P_{x,y}$ ) строятся равномасштабные цифровые карты рельефа и распределения значений Г-Г полей на поверхности объекта - Грид-карты, с расстоянием между узлами решетки (грида), удовлетворяющим требованиям к детальности латерального и глубинного прогноза. Грид-карты измеренных значений Г-Г полей преобразуются с помощью алгоритма (математической основой которого является теория конечных цепей Маркова), обеспечивающего последовательный (послойный) глубинный 3D прогноз изменчивости значений марковских характеристик Г-Г полей. Полученная в результате решения обратной задачи, прогностическая нелинейная модель глубинных оценок марковских характеристик Г-Г полей (атрибутов) подповерхностных отложений преобразуется в прогнозные количественные оценки глубинных геолого-геофизических свойств исследуемого горного массива. Преобразования измеренных величин поверхностных полей в прогноз значений свойств выполняются путем инверсии вычисленных стохастических глубинных марковских атрибутов в прогнозные модели количественных оценок значений конкретных свойств, основываясь на реальных скважинных и/или адаптированных к геологии объекта справочных данных этих свойств. Результатом проведенных преобразований являются кубы свойств исследуемой формации (Фиг. 5, 6).

Способ реализуется следующим образом:

1. Контакттно или дистанционно осуществляют измерение и регистрацию геолого-геофизических полей на земной поверхности, выполняют их обработку, получая электронные, в виде регулярных сеток грид-карты - равномасштабные (для всех параметров) и, желательно, ориентированные (по одной из координат, например, X) вкрест простирания основных структур, проявляющихся в распределении значений Г-Г полей и/или альтитудах рельефа на поверхности исследуемого объекта. В результате получают карты поверхности Г-Г полей различного генезиса, обладающих марковским свойством (марковостью) - т.е. свойством, у которого условное распределение вероятностей состояний, измеренных в узлах грид-сетки на дневной поверхности, определяет дальнейшее априорное предсказание вероятностных состояний в узлах последовательности с глубиной от дневной поверхности.

2. Поскольку технология обработки данных рассчитана на использование потенциальных Г-Г полей осуществляется приведение их замеренных значений к каноническому виду - путем дифференцирования. Так, векторное поле A является потенциальным, если его можно представить в виде градиента некоторого скалярного поля  $\phi$ :  $A = \text{grad}\phi$ . Само скалярное поле  $\phi$  при этом является потенциалом векторного поля A, соответственно, векторное поле A является потенциальным, если координаты вектора A можно представить в виде частных производных некоторого скалярного поля  $\phi$ .

Для поверхностных дифференциальных полей это (Математический энциклопедический словарь, 1988 г.):

$$A_{x,y} = \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \frac{\partial \varphi}{\partial y}$$

Практически пересчет грид-карты векторного поля  $A$  осуществляется вкост

производной функции  $f^d(x)$ :

$$f'(x) = \frac{f(x+h) - f(x)}{h} \quad (1)$$

3. По результатам проведенного математического моделирования (см. патент РФ №2293361) установлено, что в способе марковской томографии глубина зондируемого горизонта  $H$  определяется, в основном, тремя факторами - количеством узлов в исследуемой марковской последовательности - ( $L$ ), шагом наблюдения - расстоянием между узлами грида ( $\Delta L$ ), числом определенных на шкале свойств состояний ( $f$ ) и описываются уравнением (2):

$$H = \frac{0.666x(L-2)}{(f+0.333)} \times \Delta L \quad (2)$$

Номограмма, рассчитанная по формуле (2), приведена на фигуре 2.

4) Исходя из обобщенной марковской модели глубинной томографии (формула (2) и Фиг. 2), порядок подготовки исходных данных включает обработку электронных карт региона (рельефа и Г-Г полей): выбор рабочих систем координат - градусная или метрическая, установление границ исследуемого объекта -  $X_{\min-\max}$  и  $Y_{\min-\max}$ , максимальная глубина проектируемого прогноза ( $Z_{\max}$ ). Выбор оптимальных параметров марковских характеристик для приведенного к потенциальному виду исходного Г-Г поля: конечное (возможное) число марковских состояний в последовательности ( $f$ ), шаг дискретизации ( $\Delta L$ ), минимальная и максимальная длина марковской последовательности: ( $L_{\min}$ ) - определяет глубину верхнего прогнозируемого слоя и ( $L_{\max}$ ) - нижнего слоя.

5) Формой описания конечной цепи Маркова является матрица переходных вероятностей  $\|P_{ij}\|$  (3). Она является средством сжатого описания последовательности состояний элементов марковской цепи, т.е. она показывает вероятности переходов системы из текущего состояния в любое другое из всех определенных на исследуемом объекте возможных состояний ( $f$ ). (Дж. Харбух, Г. Бонем-Картер. Науки о земле. Том 57. Моделирование на ЭВМ в геологии. М. Мир 1974 г. 318 с.):

$$\|P_{ij}\| = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{pmatrix} \quad (3);$$

Если просканировать окном шириной  $L=3$  (а это минимальная длина цепи Маркова) профиль, проложенный через узлы поверхностного грид-файла, а значения измеренного потенциального поля трансформировать в матрицу  $\|P_{ij}\|$ , соотнеся ее с координатами узла в центре окна, и затем, переместив цепь на один узел, рассчитать следующую

матрицу, и т.д., повторяя эту операцию последовательно для всех узлов на профиле, получаем подмножество матриц первого подповерхностного горизонта, глубина которого определяется уравнением (2) и графиком на фиг. 2. С увеличением количество точек (узлов) в поверхностных цепях Маркова (L), при постоянстве величин  $\Delta L$  и  $f$  возрастает глубина предсказательного проникновения в массив и, в результате, удается вероятностно охарактеризовать полученную прогнозную информацию в виде множества матриц  $\|P_{ij}\|$ , т.е. совокупность данных о латеральной и глубинной изменчивости марковских свойств исследуемого объекта.

б) С целью компактного представления для оперативной интерпретации прогнозных данных использован метод снижения размерности, т.е. переход от обработки многомерных матричных данных к корреляционной оценке сопоставляемых прогнозных значений. Для этого применен метод «виртуальной, общей глубинной точки» (аналогично идее широкоизвестного в сейсморазведке метода общей глубинной точки - МОГТ). Рассчитывается, согласно описанию в п. 5 дополнительный удаленный глубинный слой для  $3L_{\max}$ , т.е. его проекция на глубину, трехкратно превышающую рассчитанную глубину последнего прогнозируемого слоя (Фиг. 3).

Для удаленного глубинного слоя (SN) рассчитывается единая матрица условных переходных вероятностей с числом состояний ( $f$ ), строго соответствующим числу состояний всей рассчитываемой томографической модели, и с матрицей (SN) сравниваются последовательно матрицы каждого из узлов решеток всех последовательно залегающих слоев от верхнего ( $S_{\min}$ ) до конечного ( $S_{\max}$ ). Для сравнения матриц предпочтительно использовать коэффициент линейной корреляции Пирсона, который в компактной форме отражает контрастность значений марковости в узлах решеток (формула 5):

$$R_i = \frac{\sum_{i=1}^n ((x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad 5)$$

На Фиг. 4 представлен пример горизонтальных слайсов (грид-поверхностей), образованных прогнозными матрицами переходных вероятностей в узлах подповерхностных слоев 3D модели объекта, пересчитанными в значения коэффициентов линейной корреляции в сопоставлении с удаленной матрицей - «общей марковской глубинной точки (ОМГТ)» при  $L=91$ .

Полученные в результате выполненных преобразований Г-Г полей параметры обеспечивают расчет компактных числовых оценок марковских атрибутов (коэффициентов корреляции относительно ОМГТ), т.е. вертикальную и послойную изменчивость марковских свойств в массиве - «куб марковости». Однотипность оценок для потенциальных полей различного генезиса, достигается разбиением значений полей на одинаковое число состояний ( $f$ ), и постоянством величины шага ( $\Delta L$ ).

7) Переход от марковских атрибутов к глубинной модели свойств породного массива осуществляется методом марковской геостатической инверсии. Марковская инверсия - это вычислительный процесс, в котором на основе рассчитанных марковских матриц переходных вероятностей, описанных в пункте б и некоторой априорной информации о плотностной и/или акустической модели среды прогнозируются различные свойства пород в объеме массива. Марковская геостатическая инверсия позволяет оптимизировать модель прогнозируемых свойств геологической формации, адекватно

априорным петрофизическим данным и соответствовать нелинейным геолого-геофизическим ограничениям, налагаемыми марковскими преобразованиями.

Теоретически, свойства инверсии базируются на представлении Марковской модели среды в виде свертки множества сигналов (матриц переходных вероятностей) в компактный сигнал  $R_j$  (коэффициент контрастности среды по  $j$ -тому Г-Г полю) рассчитанный по формуле (5). Геостатистическая инверсия позволяет комплексировать имеющиеся по участку разрозненные геологические, геофизические, физико-механические (ФМС) данные со структурированными данными марковской томографии и получить нелинейные оценки свойств в точках, равномерно распределенных на весь объем прогнозируемого пространства. Минимальный комплекс рассчитанных атрибутов марковского глубинного анализа для прогноза ФМС - глубина слоя от поверхности ( $H_{отн}$ ) и  $R_j$  - коэффициент корреляции (контрастности) матриц переходной вероятности каждого узла в оцениваемом слое с ОМГС. В качестве исходных для инвертирования параметров лучшим представляется кажущаяся скорость продольных упругих колебаний  $V_{кр}$  (на Фиг. 5 представлена в виде грид-номограммы для автоматизированного пересчета марковских атрибутов в значения скорости). Для расчета этой грид-номограммы использованы данные моделирования петрофизических свойств терригенных отложений угольных бассейнов России (Гречухин В.В. Петрофизика угленосных формаций. 1990).

8) Расчет 3D глубинной модели свойств - пример скорости  $V_{кр}$  (Фиг. 5), осуществляется в следующей последовательности: 1 - создание трехмерной сетки; 2 - пересчет и осреднение марковских атрибутов (на ячейки трехмерной сетки); 3 - пересчет марковских атрибутов в ячейках в значения  $V_{кр}$  плоско-параллельной 3D модели (Куб свойств); 4 - Трансформация куба свойств, путем пересчета относительных глубин трехмерной сетки в модель абсолютных гипсометрических отметок, т.е. преобразование в 3D модель свойств и строения геологического объекта. На Фиг. 6 изображены (в формате 2D) последовательно основные этапы прогнозирования глубинного строения массива от обработки данных потенциальный Г-Г полей к прогнозу объемного распределения марковского поля и его статистической обработки до получения геолого-структурной томограммы свойств.

Для наглядности обработка продемонстрирована на вертикальном профиле, обозначенном на гипсометрической схеме а), фиг. 6. Реально, в автоматизированную обработку одновременно включается весь массив данных. Приведенные, как примеры, графики промежуточных результатов специально не визуализируются, а на выходе системы предлагаются томограммы состава, свойств, и строения для их дальнейшей обработки и интерпретации.

Если при глубинном прогнозировании используют свыше одного геолого-геофизического поля (многомерная связь), то для повышения качества прогноза можно применить «Бутстреп-метод» (Эфрон Б., 1988), суть которого заключается в том, что при многомерном прогнозировании часть совокупности данных случайным образом изымается из исходной выборки и оставшаяся часть используется для построения модели системы. Исключенная из выборки группа используется для оценки точности рассчитанной модели и снова включается в исходную выборку. Затем следующая группа данных случайным образом исключается из обучающей выборки. Повторяется построение модели и ее оценка на исключенных данных. Процесс происходит до тех пор, пока все данные не будут использованы как для создания модели, так и для оценки ее точности, которая принимается как математическое ожидание среднего и среднеквадратического значения серии независимых, относительно каждой серии

параметров, оценок. Использование бутстреп-оценки позволяет оперативно осуществить оптимизацию параметров модели путем подбора состава и структуры переменных и принять за оптимальные установочные параметры, при которых бутстреп-погрешность окажется минимальной. Таким образом, использование нетрадиционных статистических процедур позволяет получить оценку точности модели без деления выборки на две части - обучающую и контрольную, что обеспечивает экономное использование априорных данных, с большим трудом получаемых в процессе исследований, оптимизирует параметры исследуемой системной модели и формализует процесс автоматизации принятия решения.

На Фиг. 7 и 8 показаны примеры томограмм строения и свойств инженерно-геологического объекта с проектируемым в нем транспортным тоннелем. Под томограммами приведены схемы распределения количественных оценок прогнозных значений физико-механических свойств (ФМС), полученных способом марковской томографии.

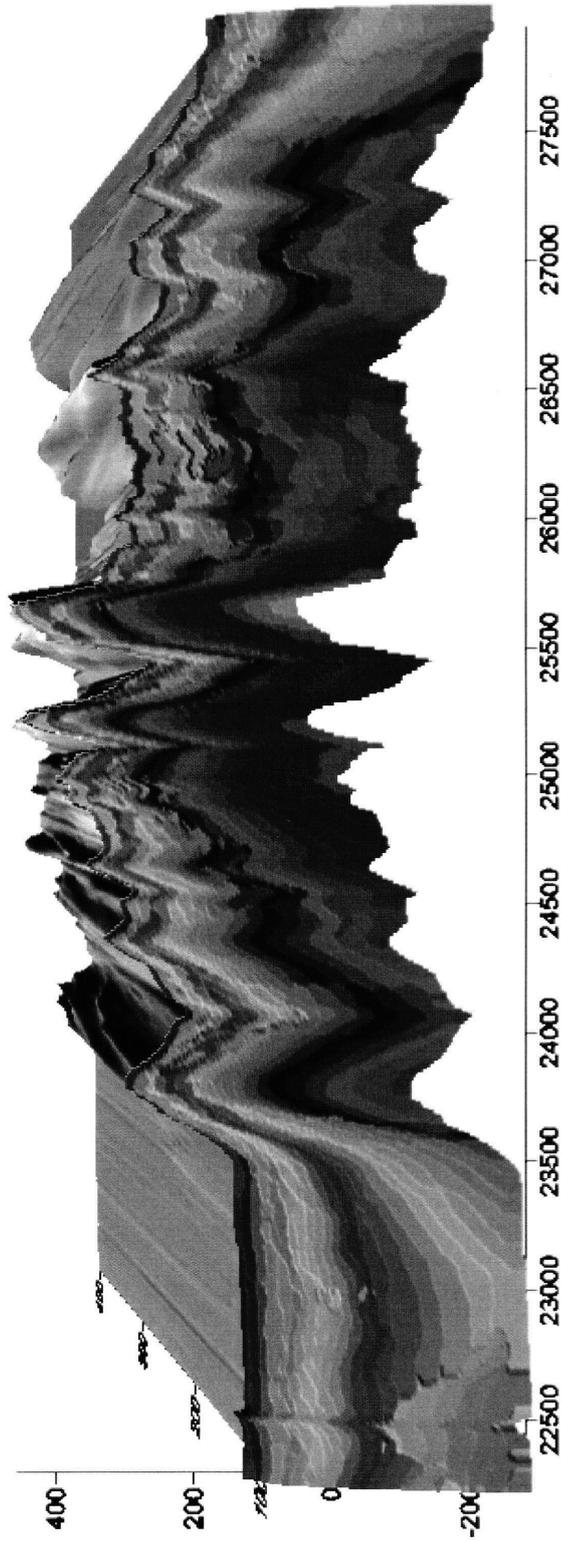
#### (57) Формула изобретения

1. Способ прогнозирования внутреннего строения и свойств геологических объектов, основанный на использовании марковского анализа геолого-геофизических полей различного типа и генезиса, включающий измерение и цифровую регистрацию в координатах X, Y участка исследуемой земной поверхности абсолютных альтитуд рельефа и параметров геолого-геофизических полей, установленных регламентными геолого-геофизическими изысканиями, по полученным результатам измерений строят сомасштабные цифровые карты распределения значений полей на поверхности объекта - грид-карты, которые затем преобразуют с помощью алгоритма, основанного на теории конечных цепей Маркова, в послойный глубинный 3D прогноз нелинейной изменчивости значений марковских характеристик одного или нескольких разнотипных геополей, полученную в результате решения обратной задачи прогностическую нелинейную модель прогнозных глубинных оценок изменчивости марковских атрибутов геополей в подповерхностных отложениях преобразуют методом геостатистической инверсии в прогнозные количественные оценки глубинных геолого-геофизических свойств исследуемого породного массива, для чего используют априорные петрофизические модели исследуемой геологической формации, построенные с учетом плотности, скорости продольных или поперечных волн, естественной радиоактивности, удельного электрического сопротивления и других свойств.

2. Способ по п. 1, отличающийся тем, что цифровую регистрацию исследуемой земной поверхности абсолютных альтитуд рельефа и параметров геолого-геофизических полей осуществляют контактно или с помощью средств дистанционного зондирования Земли.

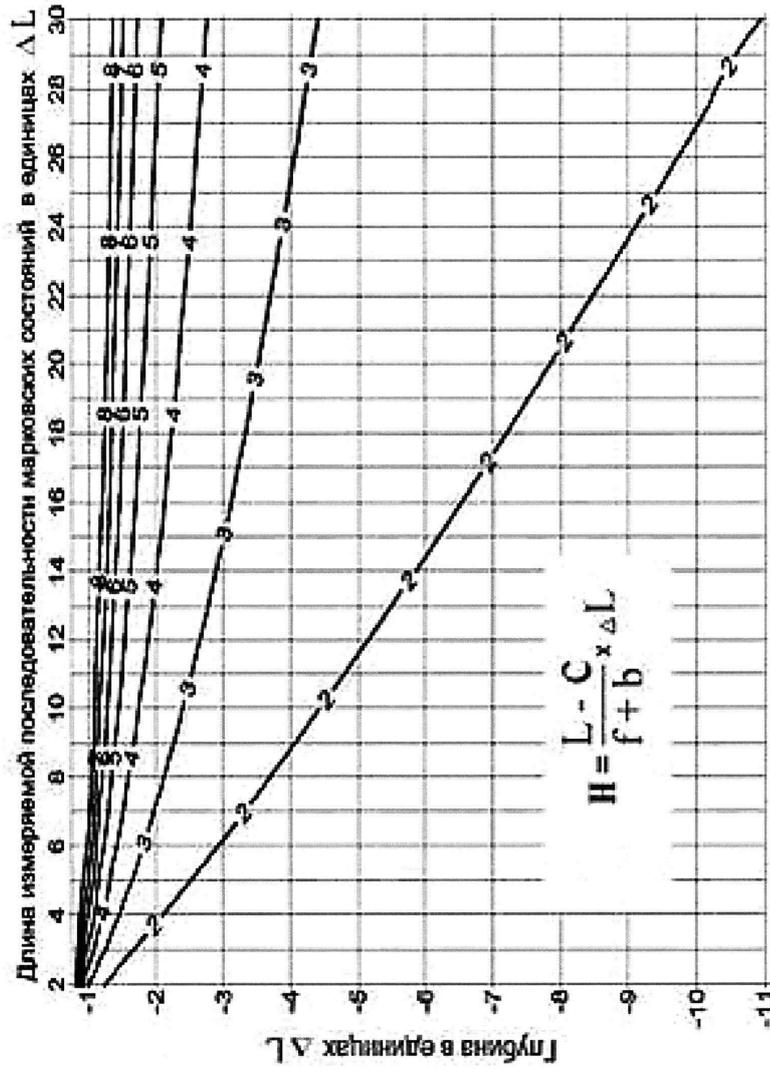
3. Способ по п. 1 или 2, отличающийся тем, что при глубинном прогнозировании строения и свойств породного массива по параметрам геолого-геофизических полей дополнительно применяют «Бутстреп-метод».

1

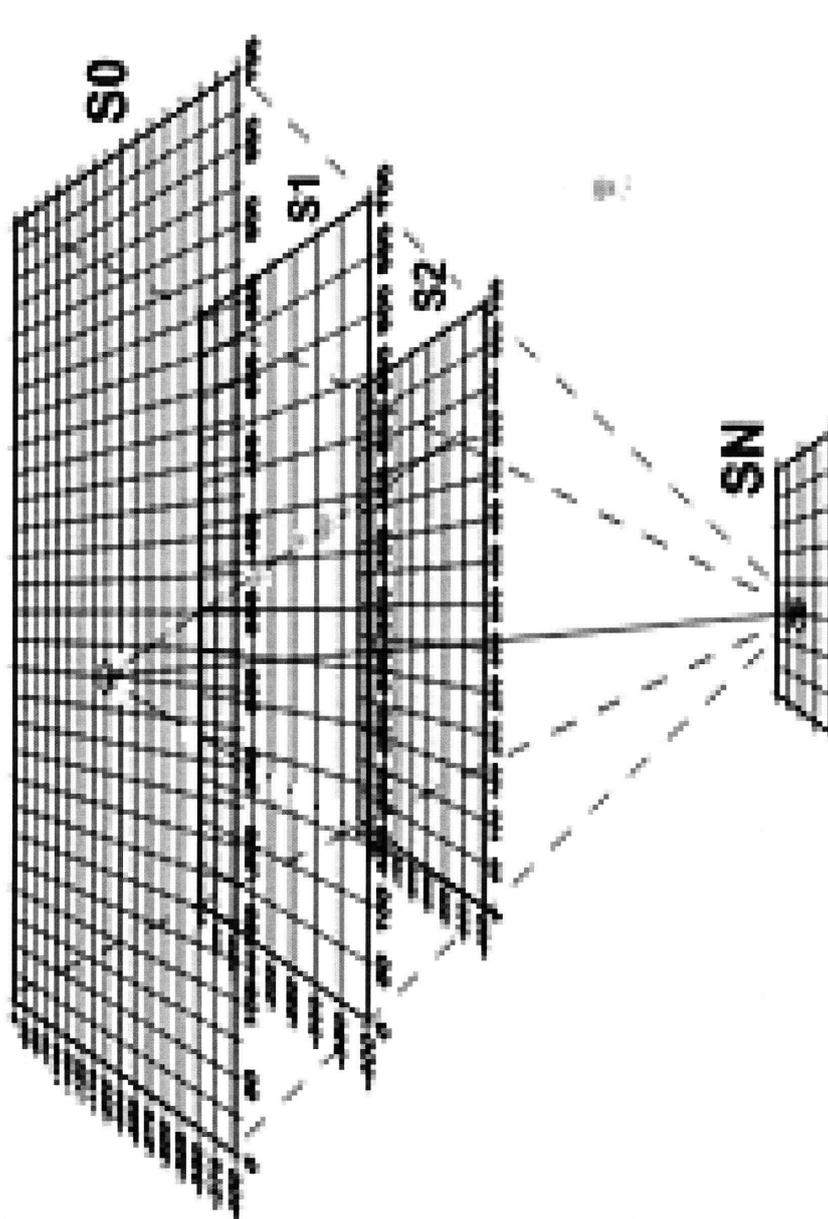


Фиг. 1

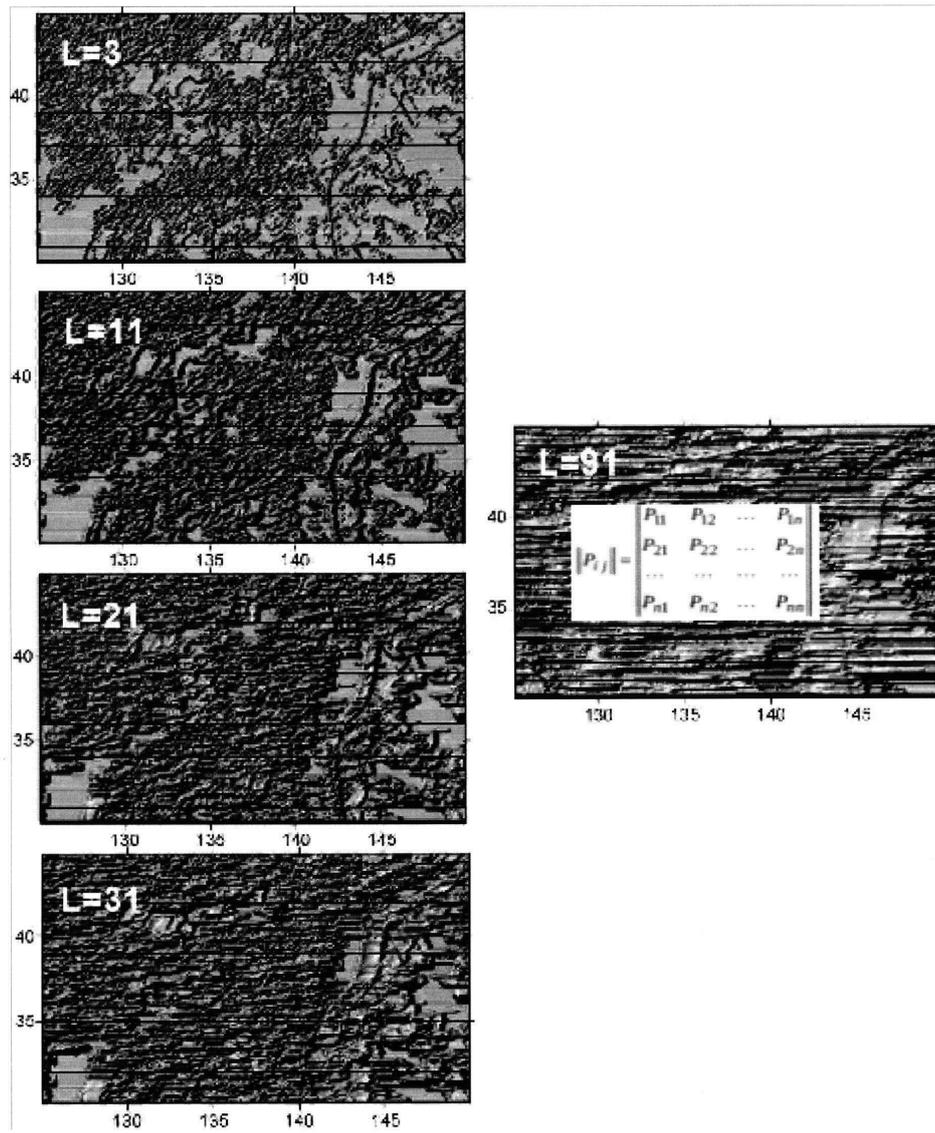
2



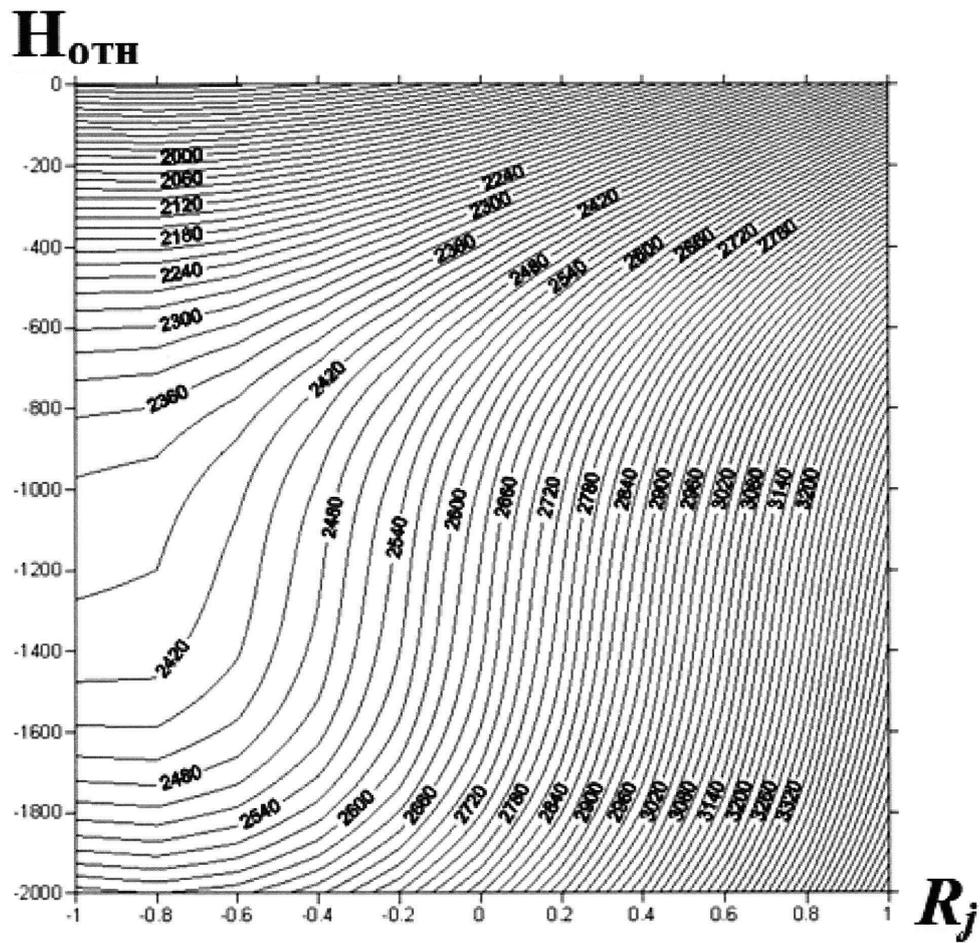
Фиг. 2



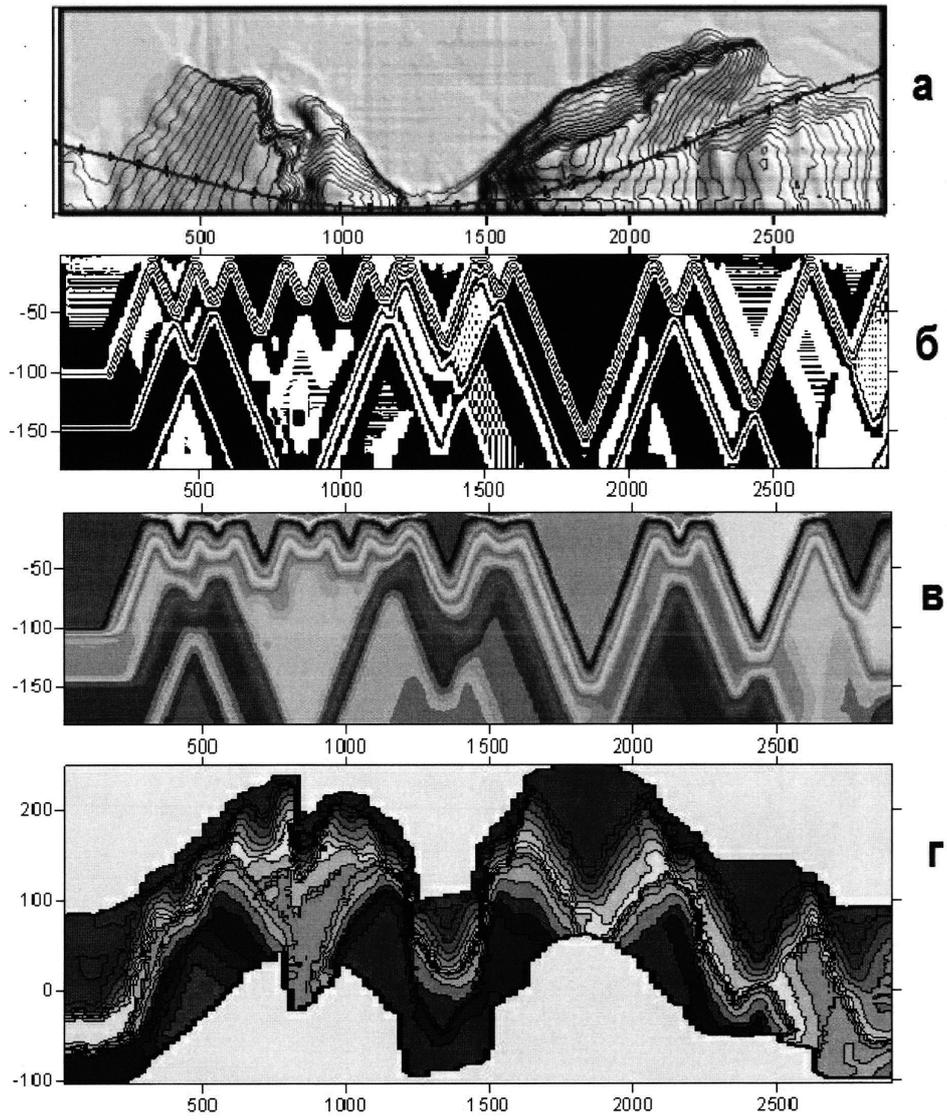
Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6



