



(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки
2023.07.25

(51) Int. Cl. G06K 9/00 (2022.01)
G06K 9/62 (2022.01)
G06V 10/44 (2022.01)

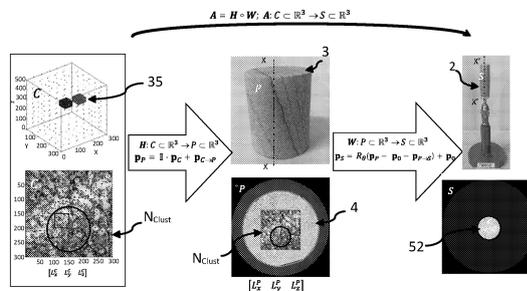
(22) Дата подачи заявки
2021.12.02

(54) ПРОЦЕСС ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОДОБРАЗЦА И СПОСОБ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦА ГОРНОЙ ПОРОДЫ

(31) 10202000029744
(32) 2020.12.03
(33) IT
(86) PCT/IB2021/061223
(87) WO 2022/118234 2022.06.09
(71) Заявитель:
ЭНИ С.П.А. (IT)

(72) Изобретатель:
Миарелли Марко (IT)
(74) Представитель:
Медведев В.Н. (RU)

(57) Описан процесс (1) для идентификации репрезентативного подобразца (2) образца (3) породы. Способ содержит: цифровое получение (10) при низком разрешении множества первых 2D изображений (N_{slice} , N_{e1}) или 3D изображений образца (3) породы и повторную композицию (12) упомянутого множества первых изображений (N_{slice} , N_{e1}) вдоль направления (I), представляющего цифровой образец (5, 18) упомянутого образца (3) породы; подразделение с объемным подразделением (30) упомянутого цифрового образца (5, 18), определяя множество трехмерных цифровых блоков (28), имеющих объем (V) по существу сходного значения; анализ каждого трехмерного цифрового блока (28) на основе множества ключевых точек или дескрипторов (6) текстуры, полученных при обработке (11) упомянутого множества первых изображений (N_{slice} , N_{e1}) на основе свойств или структур породы, и идентификацию двух или более однородных классов (33, 33a и 33b) трехмерных цифровых блоков (28), причем каждый однородный класс (33, 33a и 33b) определяет часть цифрового образца (34), имеющую трехмерные цифровые блоки (28), эквивалентные друг другу по техническим характеристикам породы; и выбор по меньшей мере одного репрезентативного блока (35) для каждого идентифицированного однородного класса (33, 33a и 33b), локализацию и извлечение (46) подобразца (2) из упомянутого образца (3) породы, причем упомянутый подобразец (2) содержит по меньшей мере один из упомянутых репрезентативных блоков (35) для каждого однородного класса (33, 33a и 33b). Также описан способ (100) для определения физических или петрофизических свойств образца (3) породы.



202391324 A1

A1 202391324

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

2420-577753EA/042

ПРОЦЕСС ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОДОБРАЗЦА И СПОСОБ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦА ГОРНОЙ ПОРОДЫ ОБЛАСТЬ ТЕХНИКИ

Настоящее изобретение относится к способу для идентификации по меньшей мере одного подобразца, представляющего образец породы.

Настоящее изобретение также относится к способу для определения физических или петрофизических свойств образца породы из упомянутого по меньшей мере одного репрезентативного подобразца.

ПРЕДШЕСТВУЮЩИЙ УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ

Как хорошо известно, горные породы имеют сложные неоднородные структуры широкодиапазонных масштабов. Поры, глина и органическое вещество, которые составляют горные породы, находятся в диапазоне пород размерами от нанометров до миллиметров.

Поэтому, для определения петрофизических и геологических свойств почв и/или залежей, образцы горных пород анализируются с использованием различных инструментов согласно различным методологиям. Исследуются такие характеристики, как пористость, относительная и абсолютная проницаемость, упругие свойства, геометрия пор и другие. Эти характеристики позволяют установить фундаментальную структуру образцов пород и соответствующую потокоемкость или транспортные свойства, таким образом, обеспечивая возможность экономной разведки соответствующих почв и/или залежей. Разведка такого рода позволяет идентифицировать характеристики почв и, таким образом, проследивать возможные залежи углеводородов или расширения существующих залежей. Конечно, другая оценка характеристик, анализируемых для такой разведки, позволяет распознавать залежи воды или других веществ и/или устанавливать другие свойства почвы, которые могут быть полезны в родственных областях, таких как оценка скорости потока почвы или вулканических оценок.

Один из инструментов и процесс, который стал стандартом для анализа образцов породы, обычно малых (миллиметровых) размеров, представляет собой метод DRP (цифровая физика породы), который использует двумерные или трехмерные цифровые изображения. DRP является предпочтительным цифровым методом во многих отношениях, но требует использования конкретного инструментария. В частности, необходимы мощные средства получения изображения (microCT, рентгеновские лучи) в микрометровом/нанометровом масштабах, а также мощные вычислительные средства для хранения, анализа и решающих вычислений с комплексными числовыми схемами.

Известны дополнительные лабораторные методы, которые, используя лабораторные измерения, анализируют пористость и проницаемость в образцах горной породы. Следует отметить, что лабораторные методы являются трудоемкими и дорогостоящими, и поэтому они обычно ограничены малыми образцами породы.

В частности, образцы пород, используемые для лабораторных анализов, имеют сантиметровые размеры и называются "пробками". Обычно, пробки представляют собой цилиндры из породы диаметром от 2,5 см до 3,8 см и длиной примерно от 2,5 см до 7,5 см. Пробки отбираются из кернов крупноразмерных или крупномасштабных образцов породы, также называемых объемом керна.

Будучи удовлетворительным во многих отношениях, анализ с использованием так называемых лабораторных методов пробок также имеет свои недостатки. Действительно, если пробки анализировались, или подобразцы, из которых они выводились, не являются достаточно репрезентативными для крупномасштабного образца, полученные результаты могут идентифицировать характеристики почвы, которые не соответствуют реальным условиям.

Также известны другие методы анализа, которые объединяют DRP с лабораторными методами, а также используют методы машинного обучения ML, которые, многопрофильным способом, позволяют создавать алгоритмы, способные обучаться из предыдущих данных, надлежащим образом сохраненных в базах данных.

Известна патентная заявка US2016/307312A1 (Sungkorn Radompon et al) относится к способу для определения текстуры геологического образца посредством многомасштабного формирования изображения для горных пород коллекторов.

Техническая проблема, лежащая в основе настоящего изобретения, состоит в том, чтобы выбрать подобразец породы, который позволяет аппроксимировать технические характеристики исходного образца породы простым и оптимальным образом с точки зрения как требуемого времени, так и оборудования, а также позволяет улучшить способ для определения петрофизических свойств образца породы с точки зрения как времени обработки, так и эффективности результатов, полученных со ссылкой на известный метод.

КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ СУЩНОСТИ ИЗОБРЕТЕНИЯ

Идея решения, лежащая в основе настоящего изобретения, состоит в том, чтобы распознавать совпадающие участки в образце породы и идентифицировать подобразец путем включения некоторых частей совпадающих участков.

На основе этой идеи решения, техническая задача решается процессом для идентификации по меньшей мере одного репрезентативного подобразца образца породы, который содержит:

- цифровое получение при низком разрешении множества первых 2D или 3D изображений образца породы, причем множество первых 2D или 3D изображений адаптировано для представления цифрового образца для образца породы;
- повторную композицию из множества первых 2D изображений или 3D изображений вдоль направления (T), получая упомянутый цифровой образец;
- подразделение с объемным подразделением упомянутого цифрового образца, определяя множество трехмерных цифровых блоков, имеющих объем по существу сходного значения;
- анализ каждого трехмерного цифрового блока на основе множества ключевых

точек или дескрипторов текстуры, полученных при обработке упомянутого множества первых 2D изображений или 3D изображений, на основе свойств или структур породы, и идентификацию двух или более однородных классов трехмерных цифровых блоков, причем каждый однородный класс определяет часть цифрового образца, имеющую трехмерные цифровые блоки, эквивалентные друг другу по техническим характеристикам породы;

- выбор по меньшей мере одного репрезентативного блока для каждого однородного класса, идентифицированного на упомянутом цифровом образце, локализацию и извлечение подобразца из упомянутого образца породы, причем упомянутый подобразец содержит по меньшей мере один из упомянутых репрезентативных блоков для каждого однородного класса.

Процесс также содержит:

- выполнение анализа породы из множества первых 2D изображений и определение множества первых обработанных 2D изображений, каждое из которых содержит множество ключевых точек или дескрипторов текстуры;

- цифровую обработку упомянутого множества первых обработанных 2D изображений на основе цифрового сходства в окрестности ключевых точек или дескрипторов текстуры и определение множества первых кластеризованных 2D изображений, причем упомянутые ключевые точки или дескрипторы текстуры подразделены по меньшей мере на две группы сходных точек;

- представление упомянутого образца породы с вторым цифровым образцом суперпозицией, в соответствии с направлением (T), упомянутого множества первых кластеризованных 2D изображений;

- выполнение объемного трехмерного подразделения второго цифрового образца, определяющего множество упомянутых 3D цифровых блоков.

Способ также содержит:

- статистическую обработку и подразделение упомянутых 3D цифровых блоков на основе плотности упомянутых ключевых точек или дескрипторов текстуры для определения упомянутых двух или более однородных классов упомянутых 3D цифровых блоков;

- извлечение посредством выбора упомянутых одного или более репрезентативных блоков из каждого из упомянутых двух или более однородных классов с использованием статистического анализа и/или способов фильтрации для скрининга упомянутых 3D цифровых блоков.

Процесс обеспечивает предварительную обработку, которая цифровым образом обрабатывает упомянутое множество первых 2D или 3D изображений и которая определяет для каждого первого 2D или 3D изображения соответствующее первое обработанное изображение, 2D или 3D; упомянутый анализ породы выполняется на упомянутом множестве первых обработанных 2D или 3D изображений таким образом, чтобы определять первые обработанные 2D или 3D изображения, содержащие ключевые точки

или дескрипторы текстуры и соответствующие интересующие области или интересующие объемы, окружающие упомянутые ключевые точки или дескрипторы текстуры, последующая группировка упомянутых ключевых точек или дескрипторов текстуры, на основе характеристик в упомянутых интересующих областях или интересующих объемах идентифицирует первые кластеризованные 2D изображения или 3D изображения.

Локализация обеспечивает отображение по меньшей мере одного репрезентативного блока на цифровую выборку, подразделенную на упомянутые однородные классы и идентифицирующую посредством аффинного преобразования упомянутый по меньшей мере один репрезентативный блок в упомянутом образце породы, чтобы идентифицировать упомянутый подобраец.

Преимущественно, значение (V_1) определяется статистическим анализом, посредством подходящей обработки и/или статистических алгоритмов, характеристик, идентифицированных упомянутыми сходными ключевыми точками или дескрипторами текстуры, включенными в упомянутые 3D цифровые блоки, и/или тем, что упомянутое значение (V_1) имеет минимальное значение объема ($V_{1\min}$), относящееся к предопределенной вычислительной точности.

Техническая задача также решается способом для определения физических или петрофизических свойств образца породы, который обеспечивает идентификацию и извлечение из упомянутого образца породы по меньшей мере одного подобраца с использованием процесса в соответствии с настоящим изобретением, причем упомянутый по меньшей мере один подобраец содержит по меньшей мере один репрезентативный блок для каждого из двух или более однородных классов трехмерных цифровых блоков, и цифровое получение, при высоком разрешении, множества третьих цифровых изображений упомянутого по меньшей мере одного подобраца в упомянутом по меньшей мере одном репрезентативном блоке и выполнение физического или петрофизического анализа упомянутого множества полученных третьих цифровых изображений для определения физических или петрофизических свойств образца породы, исходя из свойств по меньшей мере одного репрезентативного блока для каждого из упомянутых двух или более однородных классов.

Техническая задача решается также подобрацом, полученным из процесса в соответствии с настоящим изобретением, содержащим по меньшей мере два репрезентативных блока, имеющих по существу сходный объем.

Техническая задача решается также системой обработки данных по пункту 9 формулы изобретения и компьютерной программой по пункту 10 формулы изобретения.

Характеристики и преимущества процесса и способа в соответствии с изобретением поясняются в изложенном ниже описании варианта осуществления, приведенного в качестве неограничивающего примера со ссылкой на прилагаемые чертежи.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ

Со ссылкой на эти чертежи,

Фиг. 1 схематично иллюстрирует блок-схему процесса и способа в соответствии с

настоящим изобретением;

Фиг. 2-11 схематично иллюстрируют последовательность этапов в процессе на фиг. 1 в одном варианте осуществления;

Фиг. 12 схематично иллюстрирует идентификацию подобразца в соответствии с настоящим изобретением из цифрового образца;

Фиг. 13 схематично иллюстрирует исходный образец и подобразец, идентифицированный способом согласно настоящему изобретению;

Фиг. 14-17 схематично иллюстрируют определенные этапы и результаты теста, выполненного на образце породы процессом и способом в соответствии с настоящим изобретением.

ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ

Со ссылкой на фиг. 1, процесс идентификации подобразца 2, представляющего образец 3 породы, обозначен в целом ссылочной позицией 1. Подобразец 2 адаптирован для определения петрофизических свойств образца 3 породы.

В одном варианте осуществления, процесс 1 содержит первое сканирование 9 образца 3 горной породы для цифрового получения (сбора данных) 10 множества первых изображений N_{slice} , как проиллюстрировано на фиг. 2с. Множество первых изображений N_{slice} являются двумерными цифровыми изображениями, и первое сканирование 9 представляет собой тип низкого разрешения, сантиметрового масштаба. В данном случае, цифровое получение 10 имеет разрешение в диапазоне [15-40] μ -пиксела. Предпочтительно, первое сканирование 9 выполняется на всем образце 3 горной породы с использованием томографа, не показанного на чертежах.

Каждое из первых изображений N_{slice} , в двух измерениях, представляет соответствующий срез 4 образца 3 горной породы, высота которого, по существу, является одним пикселом, по меньшей мере в показательном и неограничивающем варианте осуществления.

Множество первых изображений N_{slice} адаптировано для представления цифрового образца 5 образца 3 породы, как, например, показано на фиг. 2f.

В наиболее общем варианте осуществления, способ 1 включает в себя подразделение цифрового образца 5 на два или более классов или однородных частей 33 трехмерных 3D цифровых блоков 28, как схематично показано на фиг. 8a-8с, 3D цифровые блоки 28 эквивалентны друг другу с точки зрения технических характеристик горных пород и содержат по существу сходный объем V значения $V1$.

Таким образом, процесс 1 включает в себя извлечение 46 подобразца 2, локализуя по меньшей мере один репрезентативный блок 35 породы для каждого идентифицированного однородного класса 33, как показано на фиг. 11, на которой были идентифицированы два однородных класса.

В одном варианте осуществления, проиллюстрированном на чертежах, предварительная обработка 11 множества первых изображений N_{slice} , на основе цифровых свойств, позволяет удалять шум, улучшить контраст и регулировать интенсивность

посредством определения для каждого первого изображения N_{slice} соответствующего обработанного первого изображения N_{el} . Предварительная обработка 11 выполняется с помощью программного обеспечения анализа и обработки. Такое программное обеспечение, в принципе, может быть обычного типа и известно специалисту в данной области техники. Результат обработки показан на фиг. 2e, в то время как фиг. 2d представляет обработанное изображение N_{el} на промежуточном этапе обработки, обработанное изображение N_{el} .

Предварительная обработка 11 может также включать в себя вырезание краев периметра упомянутого соответствующего среза 4, получая для каждого первого изображения N_{slice} , по существу, квадратную область, как проиллюстрировано на фиг. 4c.

Повторная композиция 12 упомянутых первых обработанных изображений N_{el} , наложенных в соответствии с директрисой T, позволяет получить цифровой образец 5, также называемый обрезанной цифровой пробкой керна (CDCP) образца 3 породы, как проиллюстрировано на фиг. 2f в перспективном представлении.

Цифровой образец 5 содержит некоторое количество пикселей, которое определяется посредством

$$L_x^C \times L_y^C \times L_z^C$$

Кроме того, рассматривая множество первых обработанных изображений N_{el} , цифровая выборка 05 может быть представлена выражением

$$\{M_{L_x^C \times L_y^C}\}_{i \in I}$$

при этом

$$I = \{1, \dots, N_{\text{slices}} = L_z^C\}$$

Каждое первое изображение N_{slice} и каждое соответствующее первое обработанное изображение N_{el} выделяют свойства породы: поры (пустоты) или порода (твердая фаза), составляющие каждый соответствующий срез 4. Таким образом, характеристики породы образца 3 породы представлены в упомянутом цифровом образце 5.

Затем выполняется анализ 15 принадлежности породы к определенному типу или анализ породы посредством цифрового анализа свойств упомянутых первых обработанных изображений N_{el} .

Анализ 15 породы определяет множество ключевых точек 6 на каждом первом обработанном изображении N_{el} и определяет соответствующие первые обработанные изображения N_{key} , как схематично показано на фиг. 3a и 3b. Ключевые точки 6 являются дескрипторами текстуры и определяются в переменном количестве для каждого первого обработанного изображения N_{key} .

С использованием программного обеспечения дополнительной обработки и редактирования, ключевые точки 6 обеспечивают возможность подразделения каждого первого обработанного изображения N_{key} на множество интересующих областей 7, как проиллюстрировано на фиг. 3c. Каждая интересующая область 7 позволяет идентифицировать структуру породы и/или свойства породы или характеристики в

области, окружающей каждую ключевую точку 6.

Посредством обработки и исследования каждого первого обработанного изображения N_{key} можно численно описать свойства структуры породы в интересующих областях 7. Такие свойства извлекаются и вычисляются из характеристик анализируемого цифрового изображения. Например, выполняется анализ соответственно определенных гистограмм (FO) и вычисление и анализ матрицы совместного появления уровня серого (GLCM). Как схематично показано на фиг. 3d, могут быть получены следующие значения: энергия GLCM, энтропия GLCM, контраст GLCM, корреляция GLCM, однородность GLCM, дисперсия GLCM, среднее значение FO, дисперсия FO, энтропия FO. Затем из этих значений можно получить цифровые свойства, ассоциированные с различными степенями пористости породы.

Дальнейшая цифровая обработка упомянутых первых обработанных изображений N_{key} посредством группировки или кластера 20 упомянутых ключевых точек 6 позволяет подразделить ключевые точки 6 на две или более групп 8 сходных точек, как проиллюстрировано на фиг. 4a и 4b. Группировка 20 выполняется на основе сходства цифровых свойств упомянутых первых обработанных изображений N_{key} в интересующих областях 7 в окрестности упомянутых ключевых точек 6. При группировании 20, каждое первое обработанное изображение N_{key} определяет первое кластеризованное изображение N_{Clust} .

Фактически, каждая группа сходных точек 8 создает связь между характеристиками структуры породы и интересующими областями 7, идентифицирующими классы изображений со сходными или родственными свойствами.

Число таких групп 8 сходных точек зависит, в общем, от неоднородности породы в упомянутых первых обработанных изображениях N_{key} .

Группировка 20, как для ее выполнения, так и для определения количества групп 8, использует контролируемые или неконтролируемые алгоритмы, которые, в соответствии с одним вариантом осуществления, могут также включать методологии машинного обучения. Анализ 15 породы и группировка 20, в качестве неограничивающего примера, могут использовать программное обеспечение, такое как инвариантное к масштабу преобразование признаков (SIFT).

Вторая повторная композиция 13 с наложением, в соответствии с директрисой T, первых обработанных изображений N_{key} обеспечивает представление образца 3 породы как обработанного цифрового образца 16 породы, показанного на фиг. 4a. В одном варианте осуществления, обработанный цифровой образец 16 породы описывается матрицей A типа:

$$\text{Матрица } A = (a_{l,k}) \in R^2$$

где k идентифицирует количество выбранных характеристик, в то время как значение l получают по формуле:

$$l = i + \sum_{j=1}^{p-1} N_{key}(j) \text{ где } i = 1, \dots, N_{key}(p) \text{ и } p = 1, \dots, N_{slices}$$

Третья повторная композиция 17 упомянутых первых кластеризованных

изображений N_{Clust} , в соответствии с директрисой T , позволяет определить второй цифровой образец 18 породы, схематично проиллюстрированный на фиг. 4b.

В проиллюстрированном варианте осуществления, ключевые точки b сгруппированы в четыре группы, 8a-8d, также называемые кластерами, как проиллюстрировано на фиг. 4b, 5b и 6.

Во втором цифровом образце 18 породы, каждая группа 8 идентифицирует родственные или соответствующие классы породы.

Преимущественно, процесс 1 обеспечивает объемное трехмерное подразделение 30 упомянутого второго цифрового образца 18 путем определения множества упомянутых 3D цифровых блоков 28, эквивалентных друг другу по объему V . Каждый 3D цифровой блок 28 содержит значение $V1$ объема для объема V .

Предпочтительно, значение $V1$ объема определяется статистическим анализом 25 посредством соответствующей обработки и/или статистических алгоритмов характеристик, идентифицированных упомянутыми группами 8a-8d сходных точек, включенных в упомянутые 3D цифровые блоки 28. В соответствии с альтернативным вариантом осуществления, значение $V1$ объема является предопределенным значением.

Естественно, каждый 3D цифровой блок 28 объема $V1$ содержит классы двух или более первых кластеризованных изображений N_{Clust} с различной плотностью ключевых точек b для каждой группы 8a-8d, как показано на фиг. 7.

Статистическая обработка 32 упомянутого множества 3D цифровых блоков 28 приводит к однородным классам 33 блоков. 3D цифровые блоки 28 каждого однородного класса 33 имеют, по существу, сходные плотности ключевых точек b и, таким образом, преимущественно, сходные свойства породы, т.е. сходные петрофизические свойства по меньшей мере в описанном варианте осуществления.

Данные свойств породы, как показано выше, из упомянутых 3D цифровых блоков 28 объема $V1$ могут быть упорядочены в матрице

$$\text{Матрица } B = (b_{n,p}) \in R^2$$

При этом:

$n=1, \dots, N_{\text{REV}}(p)$ представляет число блоков 28, которые составляют второй образец 18 породы;

p - количество признаков, которые могут назначаться или отыскиваться в каждом 3D цифровом блоке 28.

В проиллюстрированном варианте осуществления, посредством выполнения одного или более способов контролируемого машинного обучения на матрице B , 3D цифровые блоки 28 подразделяются путем определения двух однородных классов 33a и 33b, как проиллюстрировано на фиг. 8c. В соответствии с предпочтительным, но не ограничивающим вариантом осуществления, статистическая обработка 32 включает использование метода Kmean (Arthur D, Vissilvitskii S (2007) K-means++: the advantages of careful seeding. Proc of the Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms 8: 1027-

1035, DOI 10.1145/1283383.1283494).

При реализации процесса 1, плотность ключевых точек δ в каждом 3D цифровом блоке 28 объема V_1 используется в качестве одного из статистических параметров для определения количества однородных классов 33.

Кроме того, каждый 3D цифровой блок 28 должен иметь по меньшей мере предопределенное минимальное значение M_{\min} объема V_1 , необходимое для вычислительной точности, относящейся к среднему количеству. В соответствии с одним вариантом осуществления, 3D цифровой блок 28 имеет так называемые размерности REV для минимального значения M_{\min} объема V_1 .

В неограничивающем примере, размер блока REV может находиться в диапазоне 0,5-1,7 мм³, предпочтительно 1 мм³, или получен в соответствии со статьей Mostaghimi et al. (2012-Computations of absolute permeability on micro-ct images; *Mathematical Geosciences* 45, DOI 10.1007/s11004-012-9431-4). Альтернативно, эти размерности могут быть получены в соответствии со статьей Al-Raoush R. and Papadopoulos A. (2010-Representative elementary volume analysis of porous media using X-ray computed tomography. *Powder Technology* 200:69-77, DOI 10.1016/j.powtec.2010.02.011) или Nordahl K. and Ringrose P (2008-Identifying the representative elementary volume for permeability in heterolithic deposits using numerical rock models. *Mathematical Geosciences* 40:753-771).

Образец 3 породы затем представляется как третий образец 34 породы, подразделенный на однородные классы 33 эквивалентных блоков, надлежащим образом перемежающиеся друг с другом, как проиллюстрировано на фиг. 8А-8с.

В примере, показанном в промежуточном кадре на фиг. 8, третий образец 34 породы имеет два однородных класса 33а и 33б эквивалентных блоков.

В одном варианте осуществления, можно оценить качество трехмерного 30 объемного подразделения и статистической обработки 32 с использованием силуэтных (контурных) графов (Rousseeuw PJ, 1987- Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics* 20:53-65, DOI [https://doi.org/10.1016/03777-0427\(87\)90125-7](https://doi.org/10.1016/03777-0427(87)90125-7)) и визуальным сравнением, как показано схематично на фиг. 9.

Далее, процесс 1 включает в себя выбор 40 одного или более репрезентативных блоков 35 из каждого идентифицированного однородного класса, 33а и 33б.

В одном варианте осуществления, выбор 40 предусматривает извлечение упомянутых репрезентативных блоков 35 также с использованием статистических методологий и/или соответствующих способов фильтрации для дальнейшего скрининга упомянутых 3D цифровых блоков 28, позволяя улучшить идентификацию.

В показательном и неограничительном варианте осуществления, выбор 40 использует метод IOR итеративного удаления выбросов, проиллюстрированный схематично на фиг. 10. На фиг. 10, сплошная/прерывистая черная линия представляет среднее/дисперсию сходимости алгоритма, и показаны графы для двух однородных классов 33а и 33б.

В одном варианте осуществления, можно использовать метод IOR, разработанный в "Python script" и описанный, например, в документах Clewlow L. and Strickland C. (2000-Energy derivatives: Pricing and risk management) и/или Parrinello CM et al (2016-Interactive Outlier Removal: A method for Identifying Outliers in Laboratory Recalibration Studies. Clinical Chemistry 62(7):966-972 DOI 10.1373/clinchem. 2016. 255216).

По существу, метод IOR или аналоги обеспечивают скрининг 41 упомянутых 3D цифровых блоков 28, эквивалентных в упомянутых однородных классах 33а и 33б, для определения третьего подвергаемого скринингу образца 34' породы.

В соответствии с одним вариантом осуществления, выбор 40 с использованием метода IOR включает в себя последовательно:

1) измерение среднего значения и стандартного отклонения ключевых точек 6, кластеризованных в каждом эквивалентном блоке 28, принадлежащих однородному классу 33;

2) удаление всех эквивалентных блоков 28, имеющих плотность ключевых точек 6 больше, чем среднее значение плюс двукратное значение стандартного отклонения;

3) повторение измерения и удаления до достижения сходимости, которая определяет группу кандидатов 42.

Затем одна или более групп кандидатов 35 выбираются из одного или более репрезентативных блоков 42 путем применения дополнительных алгоритмов и/или на основе физических ограничений, связанных с размером исходного образца 3 породы и/или связанных с методологией разбиения исходного образца 3 породы, как схематично проиллюстрировано на фиг. 11.

Таким образом, выполняется отображение 45, локализуя репрезентативные блоки 35 из группы кандидатов 42 в упомянутом третьем образце 34А породы. Подходящее извлечение 46 позволяет извлекать подобразец 2 из образца 3 породы, содержащий один или более репрезентативных блоков 35 для каждой группы кандидатов 42.

С помощью аффинного преобразования, включающего в себя линейное перемещение и поворотное перемещение, как проиллюстрировано на фиг. 12, возможно отображать 45 подобразец 2 с местоположением одного или более репрезентативных блоков 35 для каждого однородного класса, 33а и 33б.

В одном варианте осуществления, аффинное преобразование образца 3 породы может быть описано посредством:

$$\mathbf{A} = \mathbf{H} \circ \mathbf{W}; \mathbf{A} : \mathbf{C} \subset \mathbf{R}^3 \rightarrow \mathbf{S} \subset \mathbf{R}^3$$

что, по существу, является результатом комбинации линейного преобразования

$$\mathbf{H} : \mathbf{C} \subset \mathbf{R}^3 \rightarrow \mathbf{P} \subset \mathbf{R}^3$$

для преобразования координат из третьего образца 34 породы в образец 3 породы согласно уравнению:

$$\mathbf{H}(\mathbf{p}_C) = \mathbf{p}_P = \mathbf{T}_v(\mathbf{p}_C)$$

и затем поворотного перемещения для преобразования координат из образца 3

породы в подобраец 2 согласно уравнению:

$$\mathbf{W}(\mathbf{p}_P) = \mathbf{p}_S = \mathbf{R}_\Theta(\mathbf{p}_P - \mathbf{p}_U - \mathbf{p}_{P \rightarrow S}) - \mathbf{p}_0$$

при этом

$\mathbf{p}_c = (x_c, Y_c, z_c)$ представляет координаты точек в системе отсчета относительно третьего образца 34 породы,

$\mathbf{p}_s = (x_p, Y_p, z_p)$ представляет координаты точек в системе отсчета относительно образца 3 породы,

\mathbf{T}_v представляет собой матрицу перемещения компонента

$$\mathbf{v} = (0.5 \times (L_x^P - L_x^C) - 1, 0.5 \times (L_y^P - L_y^C) - 1, 0.5(L_z^P - L_z^C) - 1),$$

$\mathbf{P}_s = (x_s, y_s, z_s)$ представляет координаты точек в системе отсчета относительно подобраца 2,

$\mathbf{p}_U = (L_x^P/2, L_y^P/2, L_z^P/2)$ представляет координаты точки начала координат поворота в системе отсчета относительно образца 3 породы,

$\mathbf{p}_{P \rightarrow S} = (x_{P \rightarrow S}, y_{P \rightarrow S}, z_{P \rightarrow S})$ - векторное преобразование от вектора P в вектор S,

Θ представляет угол поворота,

\mathbf{R}_Θ - обратная матрица стандартного поворота.

В одном варианте осуществления, система координат может быть получена способом, описанным в Sok R. et al. (2010-Pore scale characterization of carbonates at multiple scales: Integration of micro-ct, bsem, and fibsem. *Petrophysics* 51) путем соотношения пикселей изображений, определяющих третий образец 34 породы, с координатами точек в образце 3 породы. В частности, способ использует предопределенные базовые точки, которые локализуют известные точки в образце 3 породы, как схематично иллюстрируется на фиг. 12.

В одном варианте осуществления, репрезентативные блоки 35 предпочтительно выбраны, по существу, близко друг к другу из-за требований, связанных с операцией разрезания образца 3 породы. Цилиндр, содержащий или соответствующий упомянутому подобрацу 2, может быть идентифицирован осью X', по существу параллельной оси X образца 3 породы, как проиллюстрировано на фиг. 12.

Извлечение 46 подобраца 2 является инвазивной операцией для образца 3 породы, который разрезается и затем разрушается. Как понятно специалисту в данной области техники, процесс 1 может идентифицировать два или более подобраца 2 образца 3 породы, в зависимости от размера образца 3 породы и требуемого типа анализа.

Процесс 1, как описано, обеспечивает разделение образца 3 породы на однородные классы или однородные классы 33 блоков, которые эквивалентны друг другу с точки зрения технических характеристик породы, и извлечение подобраца 2 путем локализации одного или более репрезентативных блоков 35 породы для каждого идентифицированного однородного класса 33. Было обнаружено, что процесс 1 в соответствии с настоящим изобретением существенно и значительно сокращает время обработки для идентификации

и извлечения подобразца, адаптированного для определения петрофизических свойств образца 3 породы.

В соответствии с дополнительным аспектом настоящей заявки, далее описан способ для определения петрофизических свойств 100 образца 3 породы.

Способ включает в себя извлечение подобразца 2 в соответствии с процессом 1, описанным выше, при этом частям и классам, имеющим ту же самую структуру и функцию, будут присвоены те же самые ссылочные позиции.

Второе цифровое сканирование 51 подобразца 2 обеспечивает возможность цифрового получения (сбора данных) 55 высокого разрешения из множества вторых цифровых изображений 52 на упомянутых репрезентативных блоках 35. В данном случае, цифровое получение 55 имеет разрешение в диапазоне [1,5-2,5] м-пиксела. Цифровое получение 55 выполняется посредством целенаправленного микро-томографического исследования на упомянутых репрезентативных образцах 35 для каждого однородного класса 33.

Затем, петрофизический анализ 57 породы из множества вторых цифровых изображений 52 позволяет идентифицировать петрофизические свойства каждого репрезентативного образца 35.

Таким образом, петрофизические свойства, идентифицированные в упомянутых репрезентативных блоках 35, расширяются 58 на множество 3D цифровых блоков 28 в соответствии с соответствующим однородным классом, 33a и 33b, третьего образца 34 породы.

В одном варианте осуществления может выполняться петрофизический анализ 57 подобразца 2 с использованием так называемого решающего устройства CFD-типа, которое характеризует детали флюидного потока микрометрического масштаба выбранных образцов, путем построения вычислительной сетки из 3D микрометрических изображений (3D микро-СТ изображений), как, например, описано в Blunt M. et al (2013-Pore-scale imaging and modelling. *Advances in Water Resources* 51:197-216, DOI 10.1016/j.advwatres.2012.03.003) и Mostaghimi et al. (2012).

Для определения петрофизических свойств, присутствие микропористых зон играет важную роль в определении связности между порами и, таким образом, в определении итоговой проницаемости. Таким образом, посредством неограничивающего указания для определения микропористости, например, в присутствии пористых структур с размерами пор меньше, чем размер вокселей изображения, петрофизический анализ 57 подобразца 2 может выполняться посредством алгоритма, описанного в Verri et al. (2017-Development of a digital rock physics workflow for the analysis of sandstones and tight rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 156:790-800, DOI <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.06.053>).

Кроме того, эффект микропористости в репрезентативном блоке 35, в котором пористые области могут быть включены в поровое пространство, моделируется уравнениями, которые исходят из сохранения массы и импульса и описывают гидродинамические свойства с повышенным гидродинамическим сопротивлением. Эти

уравнения представляют собой:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = \rho \mathbf{g} - \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{R} \quad (4)$$

При этом:

\mathbf{u} - скорость флюида,

ρ - плотность флюида,

μ - кинематическая вязкость флюида,

\mathbf{g} - ускорение силы тяжести,

∇ представляет дифференциальный оператор набла,

\mathbf{R} - элемент источника удельного сопротивления, вычисленный как средний уровень серого, соответствующий вокселям изображения в микропористых областях, идентифицированных в упомянутом множестве третьих цифровых изображений 52 с высоким разрешением.

В соответствии с другими вариантами осуществления, петрофизический анализ 57 может потребовать субъективных оценок упомянутых вторых цифровых изображений 52.

В одном варианте осуществления, моделируемый глобальный анализ 59 потока применяется ко второму образцу 34 породы. В соответствии с гидродинамическим подходом, для каждой изотермической фазы, при установившемся состоянии несжимаемого ньютоновского флюида, учитывается сохранение массы и импульса, и, таким образом, флюид, протекающий через пористую массу, описывается уравнениями Дарси:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (5)$$

$$\mathbf{u} = -\frac{K}{\mu} (\nabla P - \rho \mathbf{g}) \quad (6)$$

При этом:

\mathbf{u} - скорость флюида,

ρ - плотность флюида,

P - давление,

μ - кинематическая вязкость флюида,

\mathbf{g} - ускорение силы тяжести,

∇ представляет дифференциальный оператор набла.

При моделированном глобальном анализе 59 потока можно определить петрофизические свойства образца 2 породы.

Настоящее изобретение также относится к системе обработки данных, содержащей томограф, сконфигурированный, чтобы выполнять первое цифровое сканирование 9, с низким разрешением, на образце 3 породы путем определения множества первых изображений N_{slice} . Система дополнительно содержит процессор, сконфигурированный,

чтобы получать упомянутое множество первых изображений N_{slice} и выполнять процесс 1 для идентификации подобразца 2, представляющего образец 3 породы, как описано выше.

Кроме того, система содержит дополнительный томограф, сконфигурированный, чтобы выполнять второе цифровое сканирование 51 с высоким разрешением подобразца 2 образца 3 породы. Упомянутый процессор или дополнительный процессор сконфигурирован, чтобы выполнять способ 100 для определения петрофизических свойств образца 3 породы, как описано выше.

Кроме того, настоящее изобретение содержит компьютерную программу, имеющую инструкции, причем, при исполнении программы компьютером, компьютер выполняет процесс идентификации репрезентативного подобразца 2 образца 3 породы, как описано выше. Такая программа дополнительно содержит инструкции, такие, что, при исполнении программы компьютером, компьютер выполняет способ 100 для определения петрофизических свойств образца 3 породы, как изложено выше.

Преимущественно, процесс для определения подобразца, способ для определения петрофизических или физических свойств образца породы, система и программа, как описано, позволяют сравнивать петрофизические или физические свойства в DRP-масштабе с лабораторным масштабом быстрым и оптимальным образом, как с точки зрения времени обработки, так и с точки зрения требуемого оборудования, как это ясно специалисту в данной области техники.

С помощью исходного томографического исследования с низким разрешением, области разнородных образцов идентифицируются, направляя выбор однородных классов образцов породы.

Второе томографическое исследование с высоким разрешением позволяет оценить абсолютную проницаемость образца породы из петрофизических или физических свойств, измеренных в отдельных репрезентативных образцах.

В варианте процесса 1 и способа в соответствии с настоящим изобретением, множество первых изображений N_{slice} , полученных из образца 3 породы, представляют собой трехмерные или 3D изображения, которые непосредственно определяют множество 3D цифровых блоков.

Таким образом, определенные 3D цифровые блоки 28 эквивалентны друг другу с точки зрения технических характеристик породы и содержат, по существу, сходный объем V значения $V1$.

Процесс 1 выполняется, как описано выше для 2D изображений, делая необходимые модификации и используя соответствующую обработку и программное обеспечение для 3D анализа изображений.

Выполненные испытания

Было возможно оценить качество описанных процесса и способа в некоторых тестах с использованием образца 3 породы, называемого Z207, показанного на фиг. 14, и подобразца 2, полученного посредством процесса 1, описанного выше.

Было возможно сравнить смоделированный анализ 59 потока на третьем образце 34

породы, не показанном на чертежах, полученном из z207, с реальным анализом потока 58. Z207 имеет диаметр 38 мм и высоту 50 мм с размерами вокселей $(L_x^p \times L_x^p \times L_x^p) = (1004 \times 1024 \times 1014)$. z207 состоит из неоднородной карбонатной породы с некоторыми фрагментами ископаемого. Фиг. 15 показывает некоторые первые изображения N_{slice} Z207, и предварительная обработка обеспечивает первые обработанные изображения N_{el} размеров $(L_x^p \times L_x^p \times L_x^p) = (400 \times 400 \times 600)$. С помощью анализа 15 породы, примененного к 600 обработанным изображениям N_{el} по отдельности, среднее количество ключевых точек \bar{n} составило приблизительно 1400 на одно изображение. Для того чтобы получить хорошее представление характеристик породы, группировка 20 обеспечивает шесть различных групп 8a-8f сходных точек. Фиг. 16 показывает анализ, с силуэтными графами, для шести различных групп. При комбинации энтропии FO и среднего FO можно оценить тона пикселей в интересующих областях 7, которые окружают каждую ключевую точку \bar{n} каждого изображения. Кластеризованное изображение N_{Clust} показано на фиг. 17. Трехмерное объемное подразделение 30 разделяет второй образец 18 породы, определяя 12000 3D цифровых блоков 28 с объемом V_1 вокселей $(20 \times 20 \times 20)$, соответствующих $(1,19 \times 1,19)$ мм. Анализ упомянутых 3D цифровых блоков 28, с использованием соответствующих алгоритмов, определил два однородных класса, 33a и 33b, для Z207.

Выбор 40 и локализация репрезентативных блоков 35 иллюстрируется на фиг. 17a-b.

Подобразец 2 диаметром 5 мм и длиной 50 мм был получен путем извлечения, как иллюстрируется на фиг. 14.

Таким образом, согласно способу определения петрофизических свойств, получение подобразца 2 высокого разрешения позволяет получить множество третьих изображений 52, из которых могут быть определены петрофизические свойства Z207.

Анализ 59 смоделированного потока использует обычные методологии, такие как гидродинамические методы, например, Durlofsky L (2005-Upscaling and gridding of fine scale geological models for flow simulation. Paper presented at the International Forum on Reservoir Simulation Iles Borromees, Stresa, Italy, June 20-24).

Анализ 59 смоделированного потока выполнялся для равномерной фиксированной скорости на входе и пути, протекающего вдоль продольного направления третьего образца 34 породы, разделенного на два однородных класса, 33a и 33b.

Смоделированный анализ сравнивался с анализом реального потока, выполняемым на образце Z207 породы в Z-направлении, по существу, перпендикулярном опорной плоскости Z207. Абсолютные значения проницаемости, определенные с помощью анализа 59 смоделированного потока, сравнимы со значениями, полученными в лаборатории при анализе 58 реального потока, подтверждая качество процесса и способа, как описано.

Было возможно обнаружить, что процесс, описанный для идентификации репрезентативного подобразца образца породы, достиг предварительно определенных целей. В частности, специалист в данной области техники может видеть, как описанные процесс, способ и система позволяют осуществлять сравнение между цифровыми и

экспериментальными данными, обеспечивая возможность получения петрофизических или физических свойств в одном и том же масштабе.

Также было обнаружено, что процесс, способ и система также пригодны для использования в присутствии образцов породы, которые являются несовершенными из-за неплотностей и/или трещин.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Процесс (1) для идентификации подобразца (2), представляющего образец (3) породы, который содержит

- цифровое получение (10) при низком разрешении множества первых 2D изображений (N_{slice} , N_{el}) или 3D изображений упомянутого образца (3) породы, причем упомянутое множество первых изображений (N_{slice} , N_{el}) или 3D изображений адаптировано, чтобы представлять цифровой образец (5, 18) упомянутого образца (3) породы;

отличающийся тем, что он содержит:

- повторную композицию (12) множества первых 2D изображений (N_{slice} , N_{el}) или 3D изображений вдоль направления (T), получая упомянутый цифровой образец (5, 18);

- подразделение с объемным подразделением (30) упомянутого цифрового образца (5, 18), определяя множество трехмерных цифровых блоков (28), имеющих объем (V) по существу сходного значения;

- анализ каждого трехмерного цифрового блока (28) на основе множества ключевых точек или дескрипторов (6) текстуры, полученных при обработке (11) упомянутого множества первых 2D изображений (N_{slice} , N_{el}) или 3D изображений на основе свойств или структур породы, и идентификацию двух или более однородных классов (33, 33a и 33b) трехмерных цифровых блоков (28), причем каждый однородный класс (33, 33a и 33b) определяет часть цифрового образца (34), имеющую трехмерные цифровые блоки (28), эквивалентные друг другу по техническим характеристикам породы;

- выбор по меньшей мере одного репрезентативного блока (35) для каждого однородного класса (33, 33a и 33b), идентифицированного в упомянутом цифровом образце (34), локализацию и извлечение (46) подобразца (2) из упомянутого образца (3) породы, причем упомянутый подобразец (2) содержит по меньшей мере один из упомянутых репрезентативных блоков (35) для каждого однородного класса (33, 33a и 33b).

2. Процесс (1) по п. 1, отличающийся тем, что он содержит:

- выполнение анализа (15) породы упомянутого множества первых 2D изображений (N_{slice} , N_{el}) и определение множества первых обработанных 2D изображений (N_{key}), каждое из которых содержит множество ключевых точек или дескрипторов (6) текстуры;

- цифровую обработку упомянутого множества первых обработанных 2D изображений (N_{key}) на основе цифрового сходства в окрестности упомянутых ключевых точек или дескрипторов (6) текстуры и определение множества первых кластеризованных 2D изображений (N_{Clust}), причем упомянутые ключевые точки или дескрипторы (6) текстуры подразделены по меньшей мере на две группы (8, 8a и 8b) сходных точек;

- представление упомянутого образца (3) породы со вторым цифровым образцом (18) суперпозицией, в соответствии с направлением T , упомянутого множества первых кластеризованных 2D изображений (N_{Clust});

- выполнение объемного трехмерного подразделения (30) упомянутого второго цифрового образца (18), определяющего множество упомянутых 3D цифровых блоков (28).

3. Процесс по п. 1 или 2, отличающийся:

- статистической обработкой (32) и подразделением упомянутых 3D цифровых блоков на основе плотности упомянутых ключевых точек или дескрипторов (6) текстуры для определения упомянутых двух или более однородных классов (33, 33a и 33b) упомянутых 3D цифровых блоков (28);

- извлечением посредством выбора (40) упомянутого одного или более репрезентативных блоков (35) из каждого из упомянутых двух или более однородных классов (33, 33a и 33b) с использованием статистического анализа и/или способов фильтрации для скрининга упомянутых 3D цифровых блоков (28).

4. Процесс по п. 3, отличающийся обеспечением предварительной обработки (11), которая цифровым образом обрабатывает упомянутое множество первых 2D изображений (N_{slice}) или 3D изображений и которая определяет для каждого первого 2D изображения (N_{slice}) или 3D изображения соответствующее первое обработанное 2D изображение (N_{el}) или обработанное 3D изображение, причем упомянутый анализ (15) породы выполняется на упомянутом множестве первых обработанных 2D изображений (N_{el}) или обработанных 3D изображений для определения первых обработанных 2D изображений (N_{key}) или обработанных 3D изображений, содержащих упомянутые ключевые точки или дескрипторы (6) текстуры и соответствующие интересующие области или интересующие объемы (7), окружающие упомянутые ключевые точки или дескрипторы (6) текстуры, последующая группировка (20) упомянутых ключевых точек или дескрипторов (6) текстуры, на основе характеристик в упомянутых интересующих областях или интересующих объемах (7), идентифицирует первые кластеризованные 2D изображения (N_{Clust}) или кластеризованные 3D изображения.

5. Процесс по п. 1, отличающийся тем, что локализация содержит отображение (45) упомянутого по меньшей мере одного репрезентативного блока (35) на цифровой образец (34, 34'), подразделенный на упомянутые однородные классы (33, 33a и 33b), и идентификацию посредством аффинного преобразования упомянутого по меньшей мере одного репрезентативного блока (45) в упомянутом образце (3) породы, чтобы идентифицировать упомянутый подобраец (2).

6. Процесс по п. 1, отличающийся тем, что упомянутое значение ($V1$) определяется при помощи статистического анализа (25), посредством подходящей обработки и/или статистических алгоритмов, характеристик, идентифицированных упомянутыми сходными ключевыми точками или дескрипторами (6) текстуры, включенными в упомянутые 3D цифровые блоки (28), и/или тем, что упомянутое значение ($V1$) имеет минимальное значение объема ($V1_{\text{min}}$), связанное с предопределенной вычислительной точностью.

7. Способ (100) для определения физических или петрофизических свойств образца (3) породы, отличающийся:

- идентификацией и извлечением из упомянутого образца (3) породы по меньшей мере одного подобраца (2), используя один или более из пп. 1-6, причем упомянутый по меньшей мере один подобраец (2) содержит по меньшей мере один репрезентативный блок (35) для каждого из двух или более однородных классов (33, 33a и 33b) трехмерных

цифровых блоков (28);

- цифровым получением (55), с высоким разрешением, множества третьих цифровых изображений (52) упомянутого по меньшей мере одного подобразца (2) в упомянутом по меньшей мере одном репрезентативном блоке (35);

- выполнением физического или петрофизического анализа (57) упомянутого множества полученных третьих цифровых изображений (52) для определения физических или петрофизических свойств упомянутого образца (3) породы, исходя из свойств упомянутого по меньшей мере одного репрезентативного блока (35) для каждого из упомянутых двух или более однородных классов (33).

8. Подобразец (2), полученный из процесса в соответствии с одним или более из пп. 1-6, отличающийся тем, что содержит по меньшей мере два репрезентативных блока (35), причем упомянутые по меньшей мере два репрезентативных блока (35) имеют объем (V) по существу сходного значения.

9. Система обработки данных, отличающаяся тем, что содержит

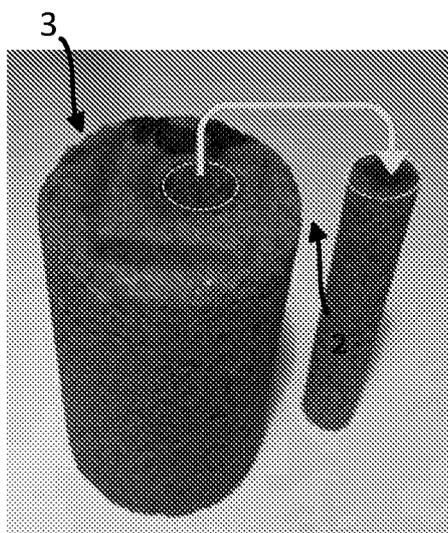
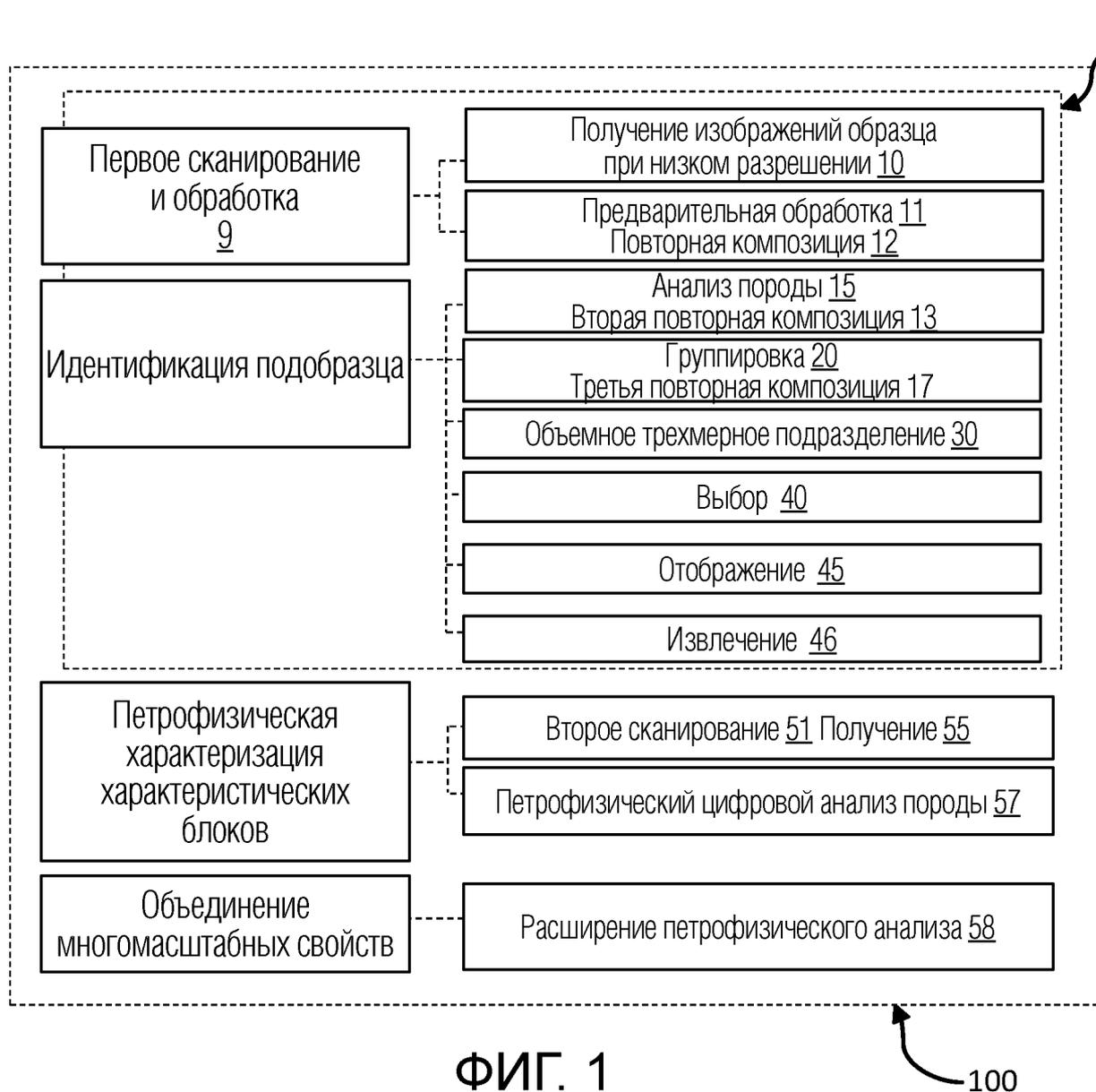
- томограф, сконфигурированный, чтобы выполнять первое цифровое сканирование (9) с низким разрешением на образце (3) породы, определяя множество первых 2D изображений (N_{slice}) или 3D изображений, и

- процессор, сконфигурированный, чтобы получать упомянутое множество первых 2D изображений (N_{slice}) или 3D изображений и исполнять процесс (1) для идентификации подобразца (2), представляющего упомянутый образец (3) породы, в соответствии с одним или более из пп. 1-6, и/или содержит:

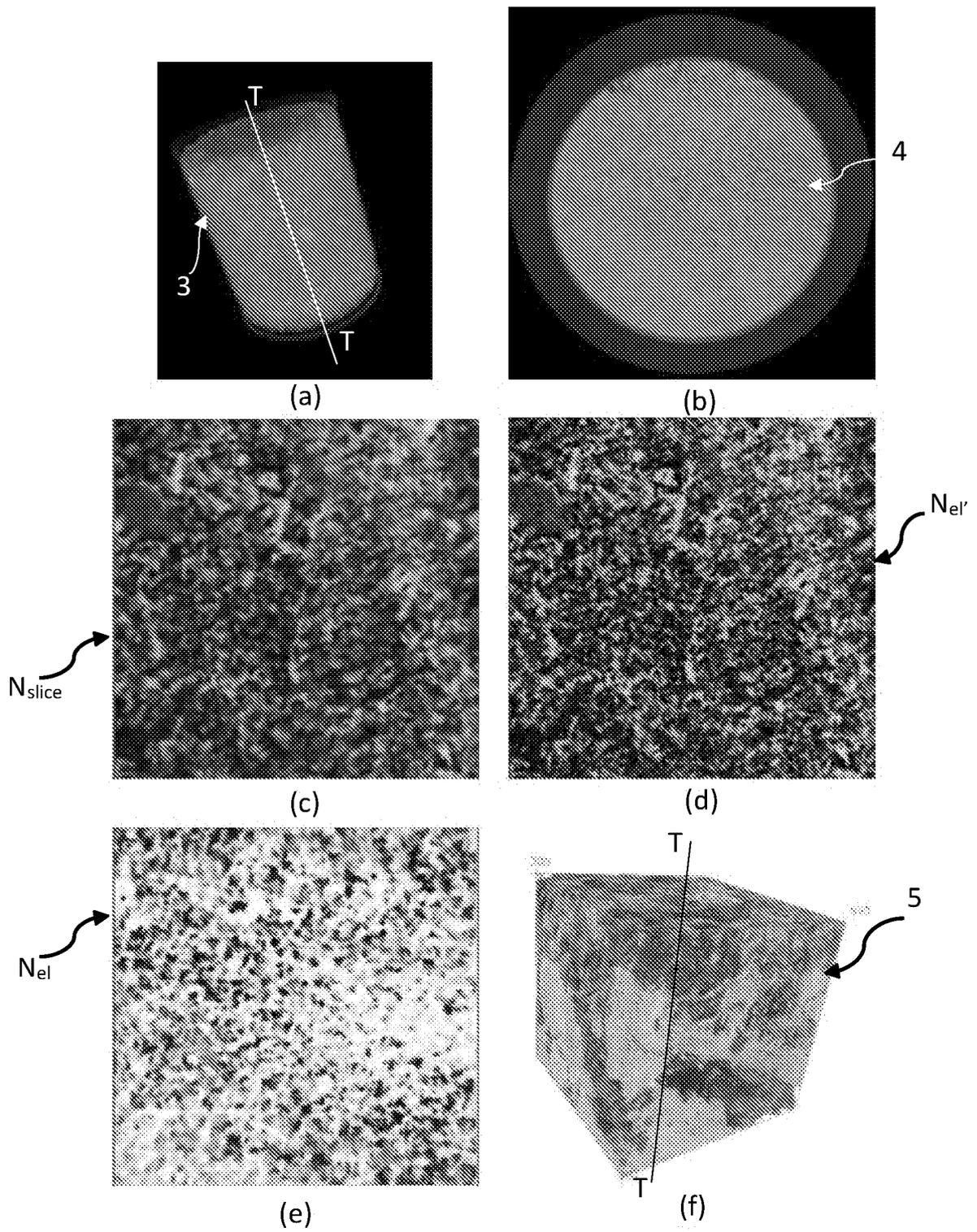
- дополнительный томограф, сконфигурированный, чтобы исполнять второе цифровое сканирование (51) с высоким разрешением подобразца (2), определяя множество третьих 2D изображений (52) или 3D изображений, и

- дополнительный процессор или упомянутый процессор, сконфигурированный, чтобы исполнять способ для определения физических или петрофизических свойств образца (3) породы в соответствии с п. 7.

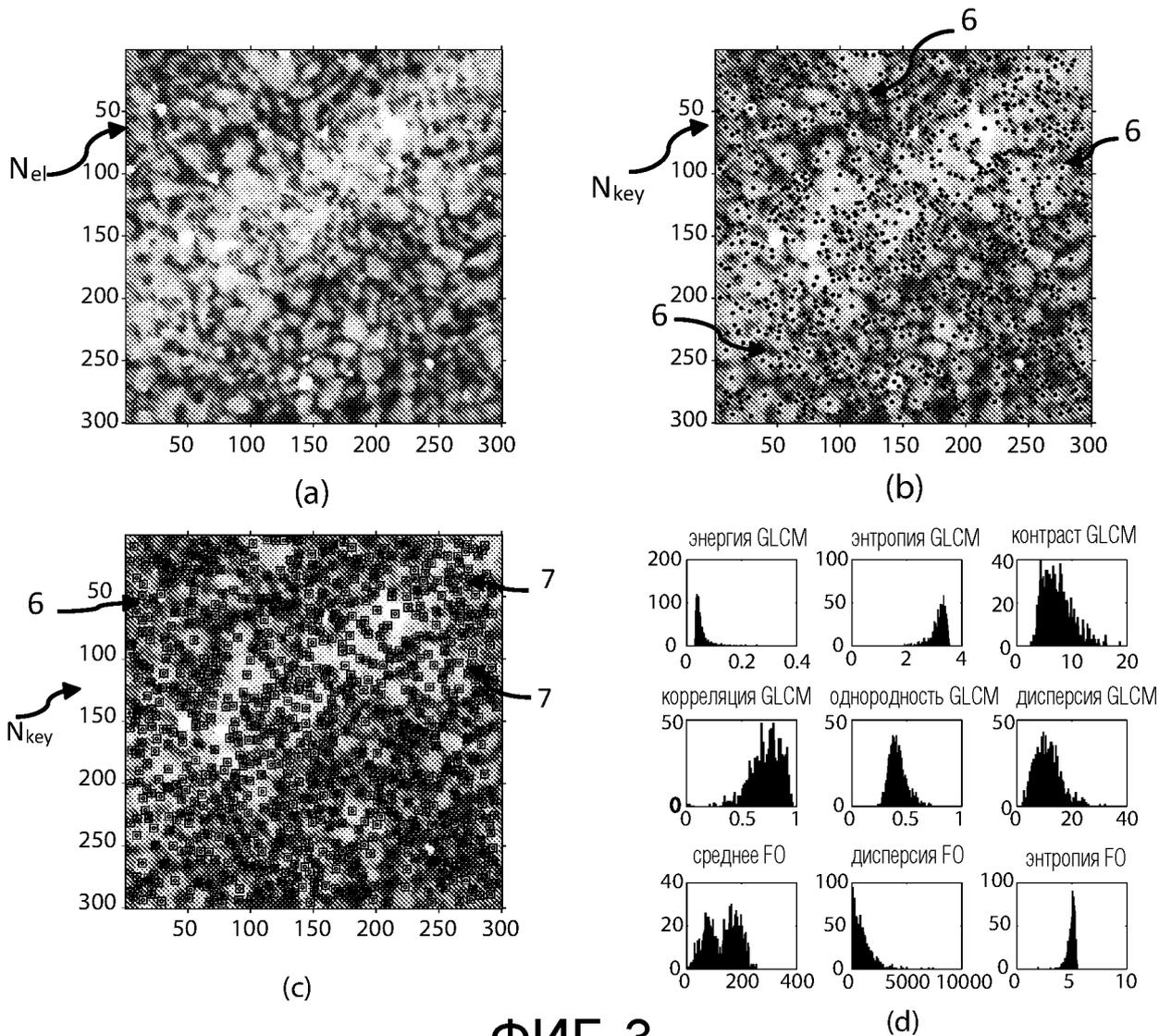
10. Компьютерная программа, отличающаяся тем, что содержит инструкции, причем, при исполнении программы компьютером, компьютер исполняет процесс в соответствии с одним или более из пп. 1-6 и/или исполняет способ в соответствии с п. 7.



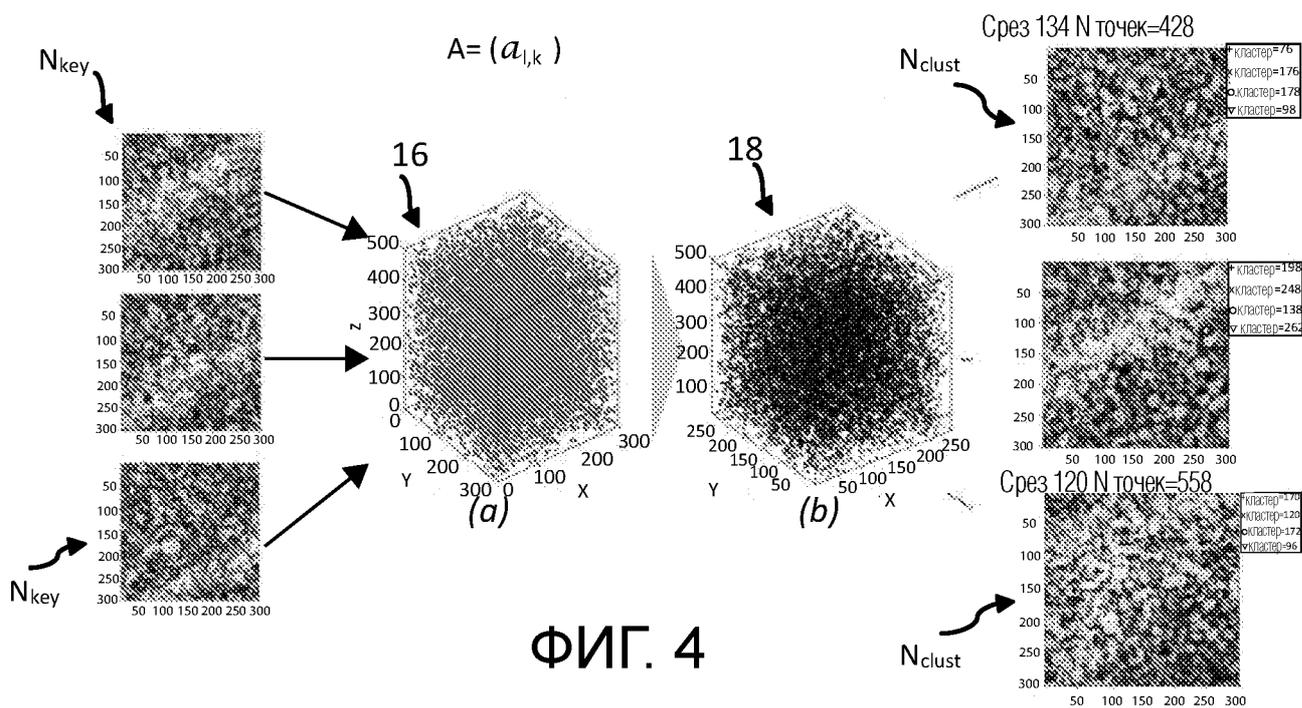
ФИГ. 13



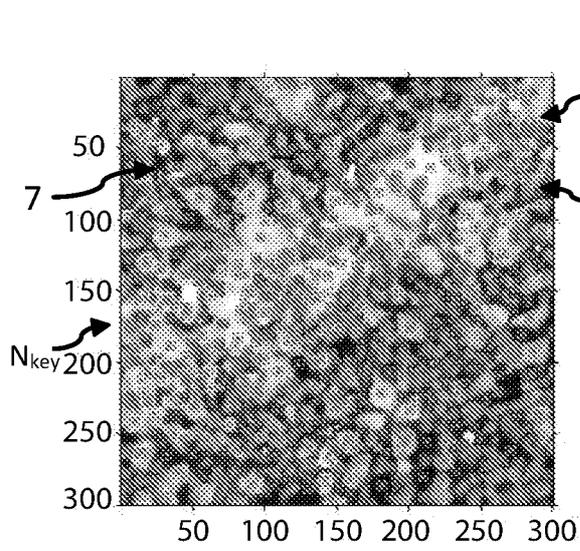
ФИГ. 2



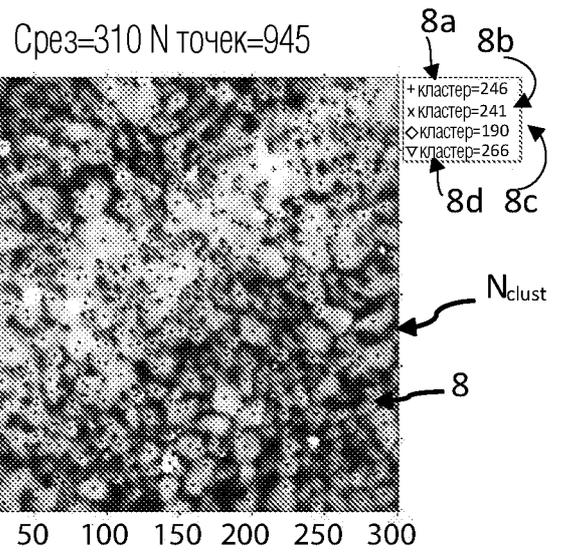
ФИГ. 3



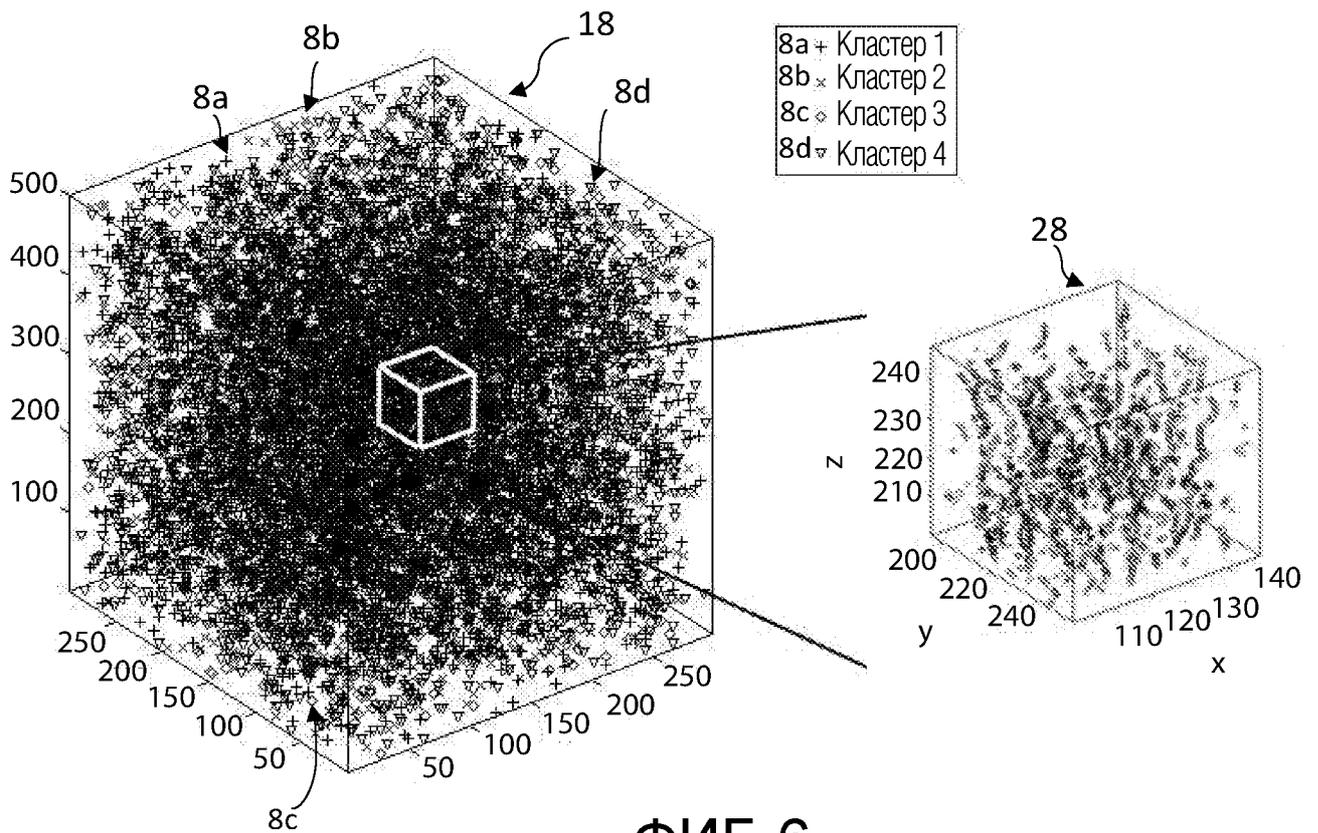
ФИГ. 4



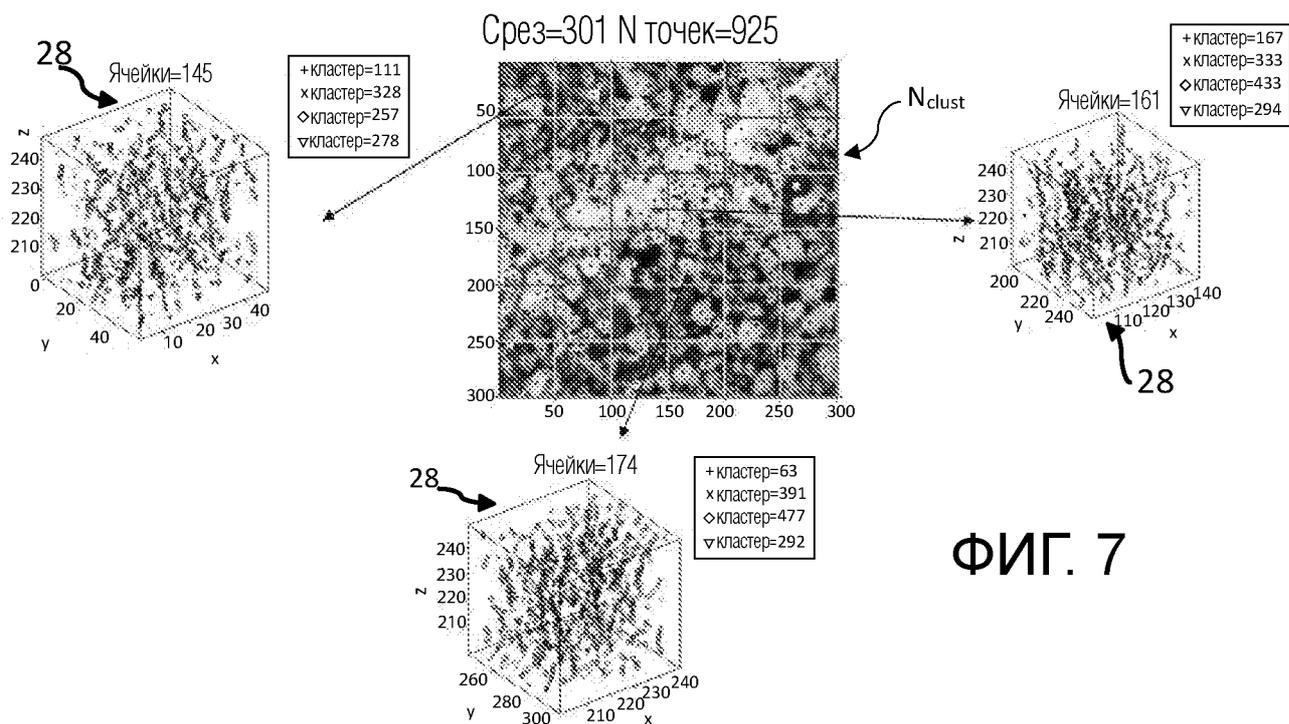
ФИГ. 5А



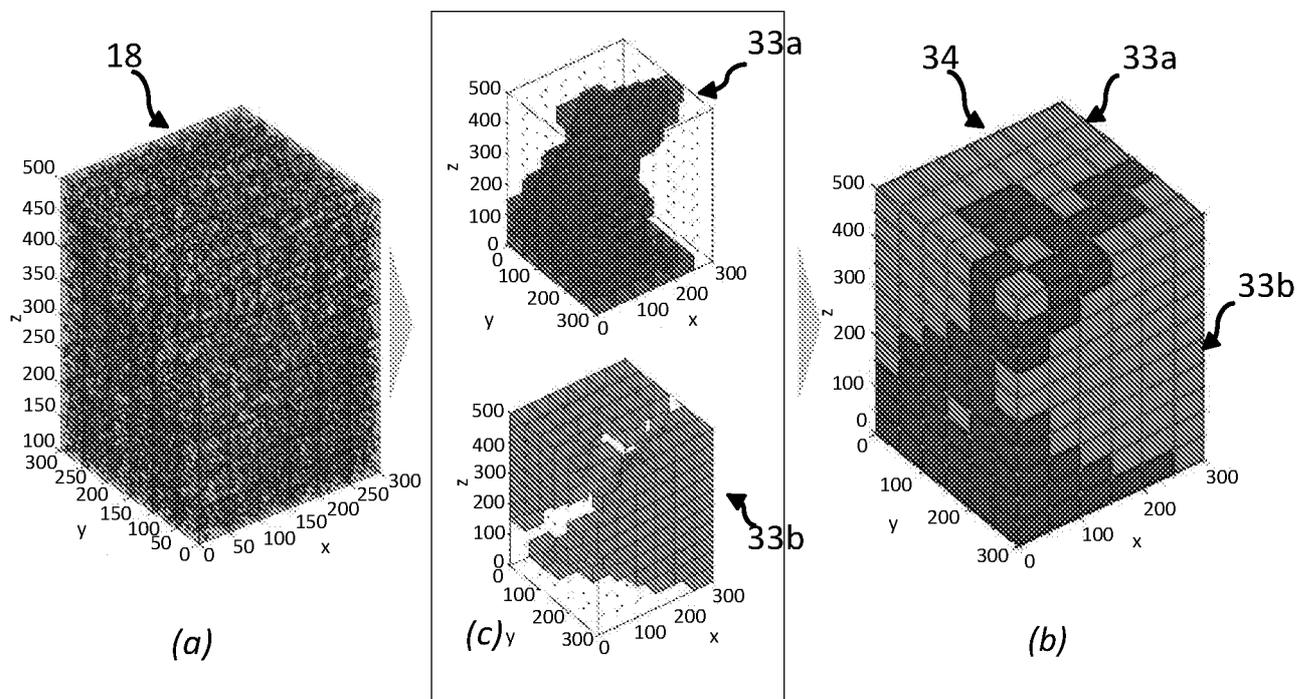
ФИГ. 5В



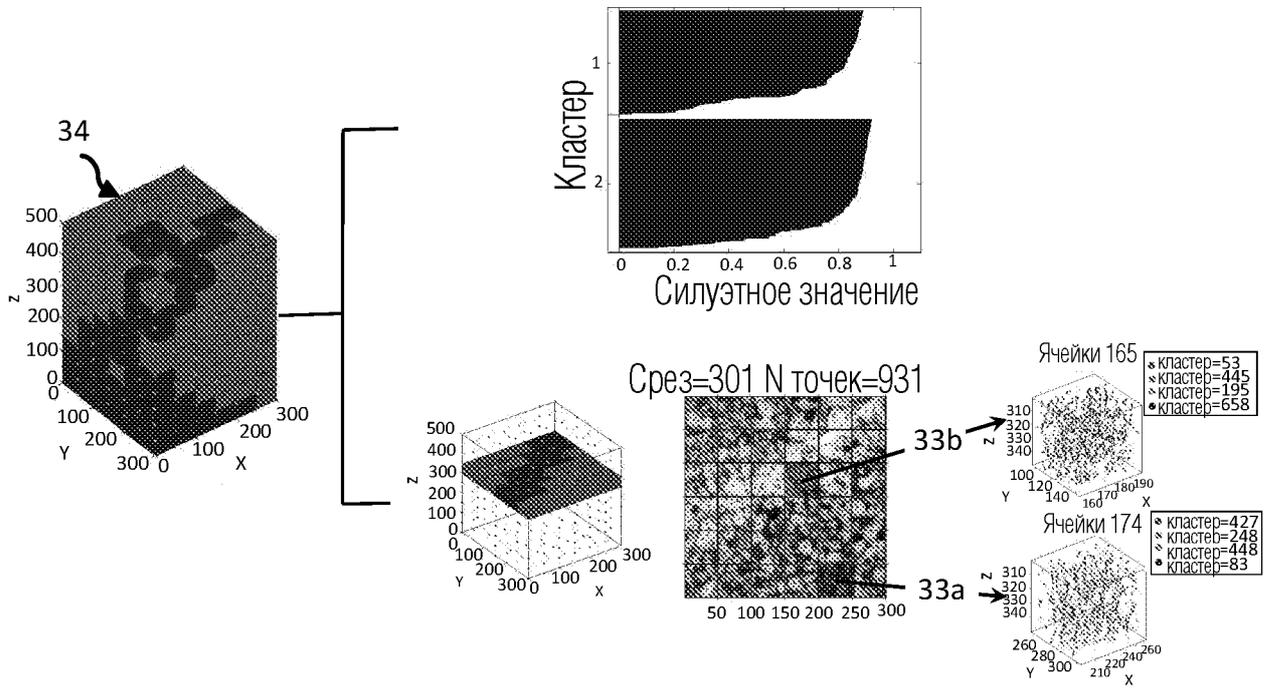
ФИГ. 6



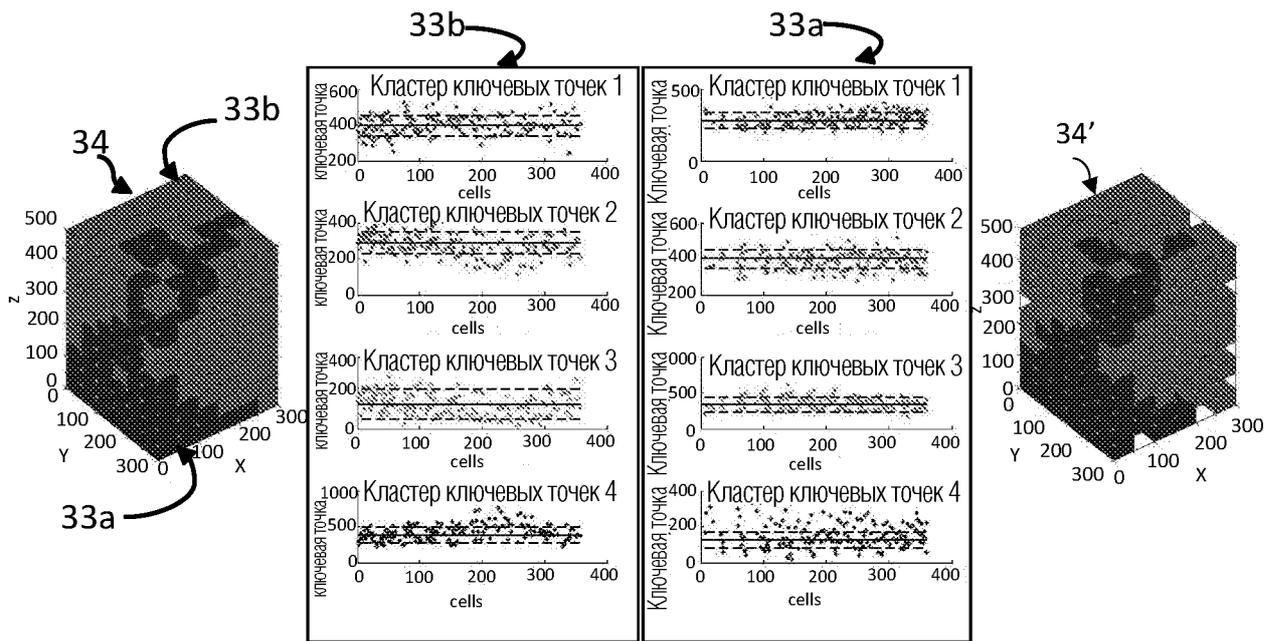
ФИГ. 7



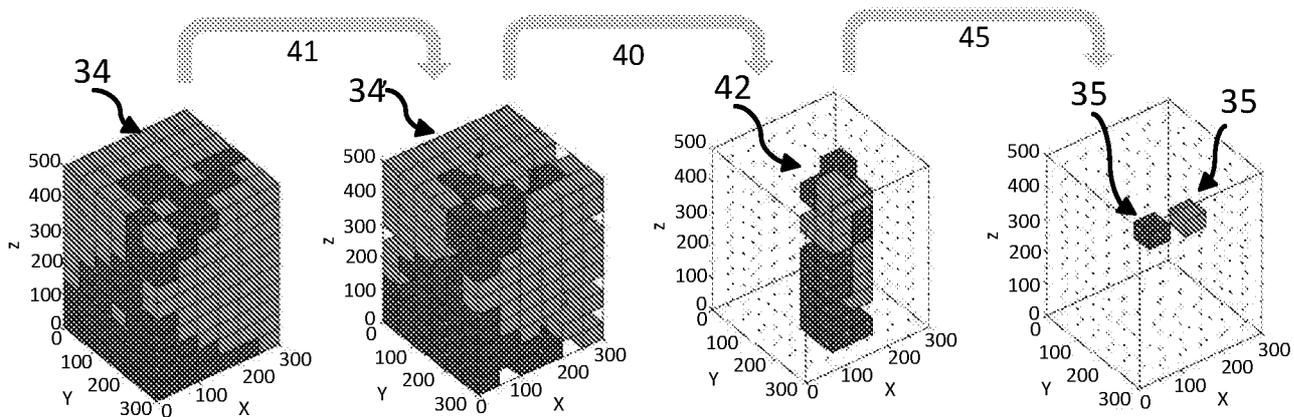
ФИГ. 8



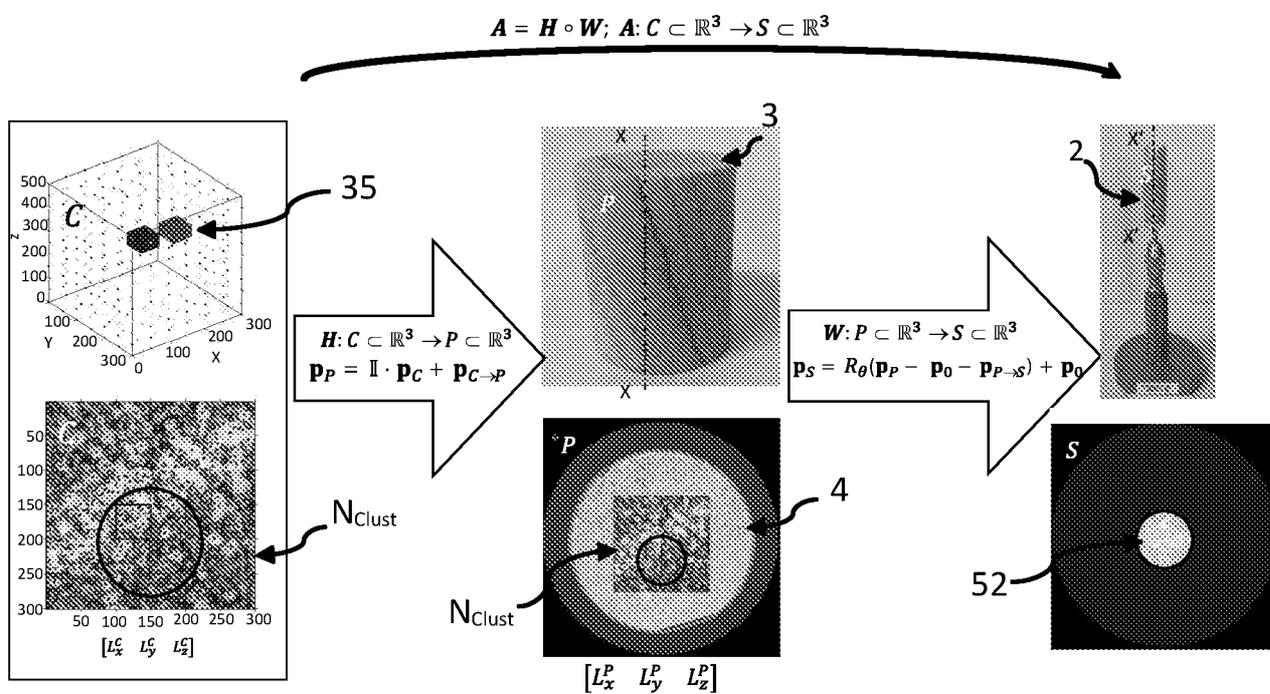
ФИГ. 9



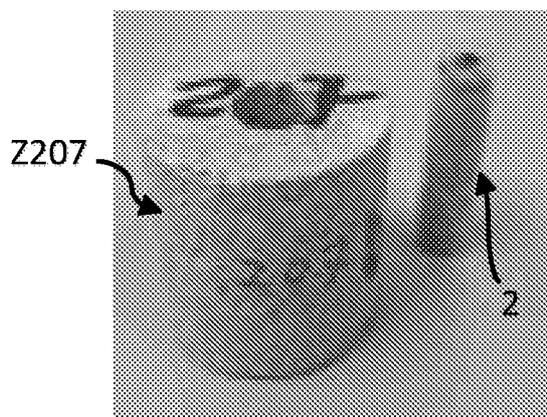
ФИГ. 10



ФИГ. 11



ФИГ. 12

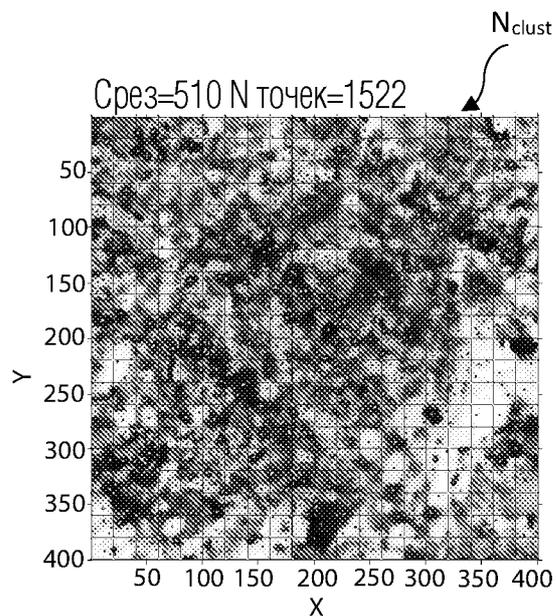


ФИГ. 14



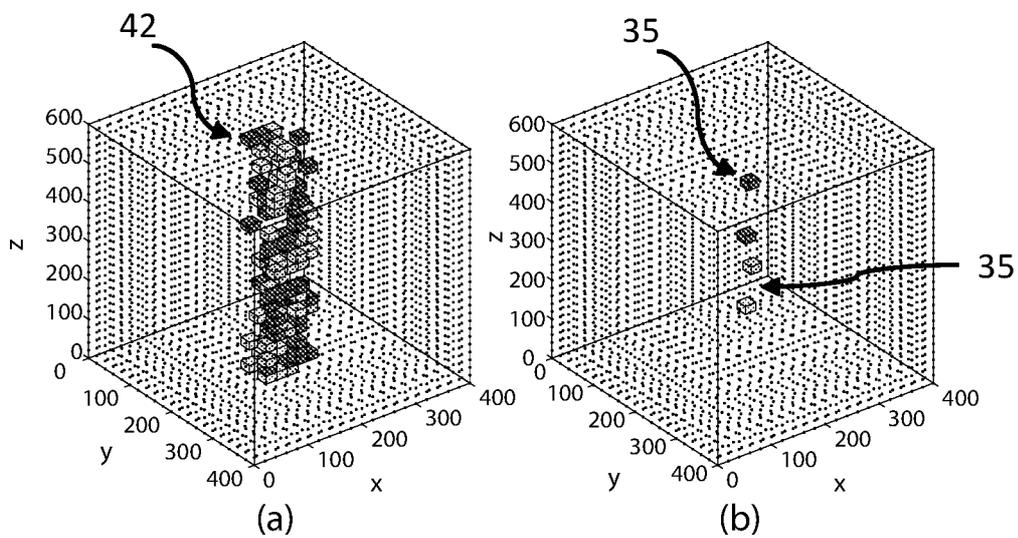
(a)

ФИГ. 15



(b)

ФИГ. 16



(a)

(b)

ФИГ. 17