

(19)



Евразийское  
патентное  
ведомство

(21) 202293207

(13) A1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки  
2023.10.24

(51) Int. Cl. G01N 23/04 (2023.01)

(22) Дата подачи заявки  
2022.12.05

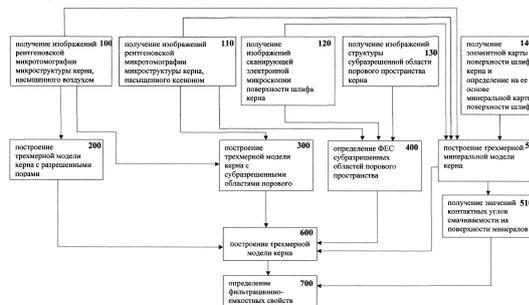
(54) СПОСОБ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ КЕРНА С ПОМОЩЬЮ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ И СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ НИЗКОПРОНИЦАЕМЫХ КОЛЛЕКТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ КЕРНА

(96) 2022000116 (RU) 2022.12.05  
(71) Заявитель:  
ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ  
ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ  
"ГАЗПРОМНЕФТЬ НАУЧНО-  
ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР" (RU)

(72) Изобретатель:  
Крутько Владислав Вадимович,  
Авдонин Александр Сергеевич,  
Алексеев Владислав Васильевич,  
Коротеев Дмитрий Анатольевич,  
Орлов Денис Михайлович (RU)

(74) Представитель:  
Чугункина Л.А. (RU)

(57) Группа изобретений относится к системам для исследования физических свойств горных пород и может быть применена при разработке нефтегазовых месторождений в горнодобывающей промышленности. Сущность группы изобретений заключается в том, что осуществляют этапы: получение изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры керна, насыщенного воздухом; получение изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры керна, насыщенного ксеноном; получение изображений сканирующей электронной микроскопии поверхности шлифа керна; получение изображений структуры субразрешенной области порового пространства керна; получение элементной карты поверхности шлифа керна; построение трехмерной модели керна с разрешенными порами; построение трехмерной модели керна с субразрешенными областями порового пространства; определение фильтрационно-емкостных свойств субразрешенных областей порового пространства; построение трехмерной минеральной модели керна; получение на основе трехмерной минеральной модели керна значений контактных углов смачиваемости на поверхности минералов; построение трехмерной модели керна путем объединения построенных ранее трехмерных моделей с фильтрационно-емкостными свойствами субразрешенных областей порового пространства.



A1

202293207

202293207

A1

**Способ построения цифровых моделей ядра с помощью глубокого обучения и способ определения фильтрационно-емкостные свойства низкопроницаемых коллекторов с использованием цифровых моделей ядра**

Группа изобретений относится к способам и системам для исследования физических свойств горных пород и используется при разработке нефтегазовых месторождений в горнодобывающей промышленности.

Известен компьютерно-реализуемый способ построения трехмерной модели ядра, при выполнении которого посредством компьютерного томографа получают изображения микротомографии ядра, посредством электронного микроскопа со сфокусированным ионным пучком получают изображения структуры субразрешенной области ядра, а посредством метода энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии получают изображения минеральной карты ядра, вводят полученные изображения в процессор и посредством применения в процессоре алгоритма машинного обучения объединяют изображения и создают трехмерную модель ядра [WO2017039475A1, дата публикации: 09.03.2017 г. МПК: G01N 23/083, G06T 19/00].

Недостатком способа является низкая информативность создаваемой трехмерной модели ядра из-за того, что набор изображений, полученных микротомографом и обрабатываемых алгоритмом машинного обучения, не содержит информации о субразрешенных порах ядра. Вследствие этого исключается возможность наполнения трехмерной модели ядра информацией о субразрешенных поровых областях, а также значениями параметров фильтрационно-емкостных свойств этих областей, что в свою очередь делает невозможным отображение на модели однофазных и многофазных течений, а также идентификации на модели низкопроницаемых коллекторов и получения данных о значениях их параметров фильтрационно-емкостных свойств.

Из уровня техники известен способ определения межзерновой эффективной пористости горных пород в трехмерных моделях по патенту РФ № 2777714 (дата публикации: 08.08.2022, МПК: G01N 23/046, G01N 15/08). Способ определения межзерновой эффективной пористости горных пород в трехмерных моделях включает получение трехмерного томографического изображения ядра с помощью метода рентгеновской томографии и вычисление эффективной пористости ядра. После томографирования производят реконструкцию объемной модели образца с фильтрацией

путем усреднения вокселей, обработку полученной объемной модели пор путем бинаризации с помощью трешхолдинга, при которой границу между породой и порами проводят по гистограмме распределения рентгеновской плотности и таким образом, чтобы она располагалась близко к минимуму между двумя модами, характеризующими пору и породу; создают путем бинаризации с помощью трешхолдинга модель всего объема образца для всего диапазона гистограммы образца; ограничивают полученную модель пор и модель всего объема образца внутри фигур одинаковых размеров и измеряют оба ограниченных объема, после чего вычисляют коэффициент пористости образца.

Недостатком данного способа и системы, реализующей данный способ, является отсутствие использования комплекса изображений, в том числе изображений, полученных с помощью рентгеновской микротомографии, микроструктуры зерна, насыщенного ксеноном, взаимной их обработки, что снижает точность определения структуры и свойств зерна.

Технический результат, на достижение которого направлена группа изобретений, заключается в повышении точности трехмерной модели зерна, включающей субразрешенные поровые каналы и их параметры, а также в повышении точности определения фильтрационно-емкостных свойств образца зерна, полученных на основе его трехмерной модели, и в точности определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов, из которых получен исследуемый керн.

Технический результат достигается за счет того, что реализуется способ определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов, включающий:

- получение изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры зерна, насыщенного воздухом, которые содержат контуры разрешенных пор зерна;
- получение изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры зерна, насыщенного ксеноном, которые содержат контуры субразрешенных областей порового пространства зерна;
- получение изображений сканирующей электронной микроскопии поверхности шлифа зерна;
- получение изображений структуры субразрешенной области порового пространства зерна;
- получение элементной карты поверхности шлифа зерна и получение на ее основе минеральной карты поверхности шлифа зерна;

- построение трехмерной модели зерна с разрешенными порами путем обработки изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры зерна, насыщенного воздухом;

- построение трехмерной модели зерна с субразрешенными областями порового пространства путем объединения трехмерной модели зерна с разрешенными порами и изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры зерна, насыщенного ксеноном, которые содержат контуры субразрешенных областей порового пространства;

- определение фильтрационно-емкостных свойств субразрешенных областей порового пространства с помощью обработки изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры зерна, насыщенного ксеноном, изображений сканирующей электронной микроскопии поверхности шлифа зерна и изображений структуры субразрешенной области порового пространства зерна;

- построение трехмерной минеральной модели зерна путем объединения изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры зерна, насыщенного воздухом, изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры зерна, изображений сканирующей электронной микроскопии поверхности шлифа зерна, минеральной карты поверхности шлифа зерна;

- получение на основе трехмерной минеральной модели зерна значений контактных углов смачиваемости на поверхности минералов;

- построение трехмерной модели зерна путем объединения построенных ранее трехмерных моделей с фильтрационно-емкостными свойствами субразрешенных областей порового пространства;

- определение фильтрационно-емкостных свойств зерна на основе трехмерной модели зерна, фильтрационно-емкостных свойств субразрешенных областей порового пространства зерна и значений контактных углов смачиваемости на поверхностях минералов.

Объединение изображений микроструктуры зерна, насыщенного воздухом, обеспечивает возможность построения трехмерной модели зерна с открытыми порами. Объединение изображений микроструктуры зерна, насыщенного воздухом, и изображений микроструктуры зерна, насыщенного ксеноном, обеспечивает возможность построения трехмерной модели зерна с субразрешенными порами. После объединения изображений из полученной модели посредством алгоритма машинного обучения могут быть извлечены следующие характеристики: среднее и стандартное отклонение интенсивностей в каждом фрагменте изображения; максимальное и минимальное значения интенсивностей в каждом фрагменте изображения; наличие и размер кластеров (групп) вокселей с близкими

значениями интенсивностей; результаты свертки изображений в каждом фрагменте изображения в соответствии с используемой сверточной функцией.

Объединение изображений субразрешенных областей ядра обеспечивает возможность построения трехмерной модели субразрешенной областей порового пространства ядра, обеспечивая дополнительное наполнение трехмерной модели ядра значениями параметров фильтрационно-емкостных свойств субразрешенных областей ядра, такими как значения пористости, проницаемости, фазовой проницаемости и капиллярной кривой, что повышает информативность построенной трехмерной модели ядра. Этот процесс обеспечивается за счет определения корреляции между пористостью и проницаемостью отдельных вокселей трехмерной модели ядра.

Объединение изображений микроструктуры ядра, в том числе микроструктуры ядра, насыщенного ксеноном, изображений поверхности ядра и минеральной карты поверхности ядра обеспечивает возможность построения трехмерной минеральной модели ядра, обеспечивая дополнительное наполнение трехмерной модели ядра информацией о минеральном составе стенок разрешенных и субразрешенных пор, и определения значений контактных углов для различных флюидов на поверхности минералов (смачиваемости). При этом объединение этих изображений могут осуществлять с использованием нейронной сети глубокого обучения (UNet+inceptionv3 или UNet+efficientnetb4), решающей задачу семантической сегментации и предсказания минеральных классов на основе изображения поверхности ядра и изображения, проанализированного методом минералогического анализа, что также дополнительно повышает информативность построенной трехмерной модели ядра. В качестве обучающей выборки для нейросети глубокого обучения могут использовать изображения микроструктуры ядра, насыщенного воздухом и ксеноном, изображение поверхности ядра и минеральную карту поверхности ядра, определенную с применением метода минералогического анализа. При этом могут оценивать объемное распределение минералов только тех пикселей скелета породы, которые примыкают к пикселям, формирующим открытые и субразрешенные поры.

Группа изобретений характеризуется ранее неизвестной из уровня техники совокупностью существенных признаков, отличающейся тем, что вводят изображения микроструктуры ядра, насыщенного ксеноном, а при объединении изображений и построении трехмерной модели ядра дополнительно выделяют области субразрешенных пор, а также определяют значения параметров фильтрационно-емкостных свойств областей субразрешенных пор, наполняют трехмерную модель ядра значениями параметров фильтрационно-емкостных свойств областей субразрешенных пор.

Такой подход, за счет повышенной яркости вокселей на реконструированном томографическом изображении относительно яркости вокселей скелета горной породы, позволяет сегментировать воксели «твердой» компоненты на скелет породы и области субразрешенной пористости, содержащие даже небольшой объем ксенона, тем самым визуализировать субразрешенные поры, неразрешенные при томографии керна, насыщенного воздухом.

Совокупно с изображениями микроструктуры керна такой подход позволяет определить корреляцию между пористостью и проницаемостью и наполнить области субразрешенной пористости значениями параметров фильтрационно-емкостных свойств, что позволяет определить посредством трехмерной модели керна значения параметров фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов.

Благодаря этому обеспечивается достижение технического результата, заключающегося в повышении точности трехмерной модели керна в отношении субразрешенных поровых каналов и их параметров, а также в повышении точности определения фильтрационно-емкостных свойств образца керна, полученных на основе его трехмерной модели, и в точности определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов, из которых получен исследуемый керн.

Технический результат достигается за счет того, что реализуется способ построения трехмерной модели керна, включающий способ построения трехмерной модели керна, включающий

- получение изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры керна, насыщенного воздухом, которые содержат контуры разрешенных пор керна;
- получение изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры керна, насыщенного ксеноном, которые содержат контуры субразрешенных областей порового пространства керна;
- получение изображений сканирующей электронной микроскопии поверхности шлифа керна;
- получение изображений структуры субразрешенной области порового пространства керна;
- получение элементной карты поверхности шлифа керна и получение на ее основе минеральной карты поверхности шлифа керна;
- построение трехмерной модели керна с разрешенными порами путем обработки изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры керна, насыщенного воздухом;

- построение трехмерной модели зерна с субразрешенными областями порового пространства путем объединения трехмерной модели зерна с разрешенными порами и изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры зерна, насыщенного ксеноном, которые содержат контуры субразрешенных областей порового пространства;

- определение фильтрационно-емкостных свойств субразрешенных областей порового пространства с помощью обработки изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры зерна, насыщенного ксеноном, изображений сканирующей электронной микроскопии поверхности шлифа зерна и изображений структуры субразрешенной области порового пространства зерна;

- построение трехмерной минеральной модели зерна путем объединения изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры зерна, насыщенного воздухом, изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры зерна, изображений сканирующей электронной микроскопии поверхности шлифа зерна, минеральной карты поверхности шлифа зерна;

- получение на основе трехмерной минеральной модели зерна значений контактных углов смачиваемости на поверхности минералов;

- построение трехмерной модели зерна путем объединения построенных ранее трехмерных моделей с фильтрационно-емкостными свойствами субразрешенных областей порового пространства.

Технический результат достигается за счет того, что реализуется система определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов, включающая по крайней мере один процессор, оперативную память и машиночитаемые инструкции для выполнения способа определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов.

Технический результат достигается за счет того, что реализуется система построения трехмерной модели зерна, включающая по крайней мере один процессор, оперативную память и машиночитаемые инструкции для выполнения способа построения трехмерной модели зерна.

Технический результат достигается за счет того, что используется машиночитаемый носитель для определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов, содержащий машинные инструкции способа определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов.

Технический результат достигается за счет того, что используется машиночитаемый носитель для построения трехмерной модели зерна, содержащий машинные инструкции способа построения трехмерной модели зерна.

Группа изобретений обладает ранее неизвестной из уровня техники совокупностью существенных признаков, что свидетельствует о ее соответствии критерию патентоспособности «новизна».

Из уровня техники известен способ построения трехмерной модели керна, при выполнении которого посредством компьютерного томографа получают изображения микроструктуры керна, насыщенного воздухом, объединяют эти изображения и создают трехмерную модель керна, на которой выделен твердый скелет породы.

Однако из уровня техники не известен подход, при котором дополнительно вводят изображения микроструктуры керна, насыщенного ксеноном и, объединяя их, создают трехмерную модель керна, дополнительно к твердому скелету породы, выделяет области ее субразреженных пор и позволяющую при объединении полученных изображений с изображениями структуры субразреженной области керна определить значения параметров фильтрационно-емкостных свойств.

Существенные признаки группы изобретений не только не известны из уровня техники, но и обеспечивают достижение неочевидного технического эффекта, который заключается в возможности идентификации на полученной трехмерной модели керна фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов.

Ввиду этого группа изобретений соответствует критерию патентоспособности «изобретательский уровень».

Изобретения из группы изобретений связаны между собой и образуют единый изобретательский замысел, что свидетельствует о соответствии группы изобретений критерию патентоспособности «единство изобретения».

Существуют варианты реализации способов, в которых получение изображений структуры субразреженной области порового пространства керна осуществляют с помощью электронного микроскопа путем сопутствующего травления сфокусированным ионным пучком.

Существуют варианты реализации способов, в которых получение изображений структуры субразреженной области порового пространства керна осуществляют с помощью машинного обучения на основе изображений сканирующей электронной микроскопии поверхности шлифа керна.

Существуют варианты реализации способов, в которых значения контактных углов смачиваемости на поверхности минералов получают с использованием значений межфазного натяжения для флюидных систем, состоящих из нефти и воды или нефти и газа или воды и газа или нефти, воды и газа.

После построения трехмерной минеральной модели керна возможно задание каждому минералу соответствующих значений контактных углов для систем «нефть-вода-минерал», «нефть-газ-минерал», «вода-газ-минерал», «нефть-вода-газ-минерал» на основе, например, справочных данных, прямых лабораторных измерений или молекулярного моделирования.

Существуют варианты реализации способов, в которых изображения рентгеновской микротомографии микроструктуры керна, насыщенного воздухом, получают с помощью рентгеновской микро- или нано- томографии.

Существуют варианты реализации способов, в которых изображения рентгеновской микротомографии микроструктуры керна, насыщенного ксеноном, получают с помощью рентгеновской микро- или нано- томографии.

Существуют варианты реализации способов, в которых в котором изображения рентгеновской микротомографии микроструктуры керна, насыщенного ксеноном, получают с разрешением от 0,5 до 100 мкм и динамическим диапазоном интенсивностей от 8 до 32 бит.

Получение изображений микроструктуры керна, в том числе микроструктуры керна, насыщенного ксеноном, может быть осуществлено средством томографического исследования микроструктуры керна, обеспечивающим метод компьютерной томографии, таким, как рентгеновская микро- (нано-) томография, рентгенофлуоресцентная микротомография, нейтронная микротомография, синхротронное рентгеновское излучение и др. Для дополнительного повышения информативности построенной трехмерной модели керна изображения микроструктуры керна, насыщенного ксеноном, могут быть получены пространственным разрешением от 0,5 до 100 мкм и динамическим диапазоном интенсивностей от 8 до 32 бит.

Существуют варианты реализации способов, в которых определение минеральной карты поверхности шлифа керна дополнительно осуществляется с помощью минералогического анализа изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры керна, насыщенного воздухом.

Существуют варианты реализации способов, в которых размер субразрешенной области порового пространства не превышает 3 мкм.

Существуют варианты реализации способов, в которых разрешенными порами являются поры, размером более 1 мкм.

Существуют варианты реализации способов, в которых разрешенными порами являются поры, размер которых больше пространственного разрешения, полученного с помощью рентгеновской томографии. В настоящее время максимальное разрешение может

быть получено до 0,5 мкм. В этом случае разрешенными порами будут считаться поры размером более 0,5 мкм.

Существуют варианты реализации способов, в которых субразрешенные области порового пространства зерна содержат поры, размером менее 1 мкм.

Существуют варианты реализации способов, в которых для получения изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры зерна, насыщенного ксеноном, выбирают область зерна с повышенной концентрацией ксенона.

Существуют варианты реализации способов, в которых получение изображений сканирующей электронной микроскопии поверхности шлифа зерна осуществляют с верхней, нижней или срединной поверхности шлифа.

Получение изображений структуры субразрешенной области и поверхности зерна может быть осуществлено с поверхности его верхнего или нижнего или срединного шлифа средством электронной микроскопии, таким, как сканирующий электронный микроскоп, конфокальный рамановский микроскоп, трансмиссионный электронный микроскоп, обеспечивающими функции энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, ионного травления сфокусированным ионным пучком, электронно-зондового микроанализа и др. Для дополнительного повышения качества построенной модели наиболее предпочтительной для получения изображений структуры субразрешенной области выбирают субразрешенную область, в которой наблюдают повышенную концентрацию ксенона в скелете породы на изображениях микроструктуры зерна, насыщенного ксеноном.

Существует вариант реализации способа, в котором фильтрационно-емкостными свойствами субразрешенных областей порового пространства зерна являются значения пористости, проницаемости, капиллярной кривой, фазовой проницаемости для флюидных систем, состоящих из нефти и воды или нефти и газа, или воды и газа, или нефти, воды и газа.

Кроме того, значения пористости могут быть получены в результате обработки изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры зерна, насыщенного ксеноном. При это другие фильтрационно-емкостные свойства могут быть получены в результате обработки изображений структуры субразрешенной области порового пространства зерна.

Существуют варианты реализации способов, в которых дополнительно осуществляют обработку полученных изображений, которая включает снижение уровня шума.

Существуют варианты реализации способов, в которых дополнительно осуществляют обработку полученных изображений, которая включает нормализацию.

Существуют варианты реализации способов, в которых дополнительно осуществляют обработку минеральной карты поверхности шлифа зерна, которая включает выявление и объединение классов минералов в группы и удаление единичных минералов.

Дополнительно для повышения информативности построенной модели перед объединением изображений могут осуществлять их обработку. Обработка изображений может включать в себя удаление артефактов (неоднородности интенсивности вдоль одного или нескольких направлений, полосы, кольца, рябь и пр.), или снижение уровня шума, или нормализацию и др. При этом в отношении минеральной карты зерна обработка может включать в себя объединение классов минералов в группы таким образом, чтобы наименее распространенная группа минералов занимала не менее 10% изображения, или удаление ложных единичных минералов, или проведение экспертного анализа качества определения минерального состава с точки зрения наличия минералов не характерных для анализируемой горной породы или объединение минералов в группы классов, которые плохо различаются алгоритмом машинного обучения ввиду близкого нахождения в пространстве.

Изображения поверхности зерна анализируют методом минералогического анализа, такого, как например методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии или другими методами, что обеспечивает возможность получения минеральной карты зерна, включающей данные о минералах, входящих в состав зерна.

Существуют варианты реализации способов, в которых объединение классов минералов в группы осуществляют таким образом, чтобы наименее распространенная группа минералов занимает не менее 10% изображения.

Существуют варианты реализации способов, в которых построение трехмерных моделей осуществляют с применением алгоритма машинного обучения.

Существуют варианты реализации способов, в которых в качестве алгоритма машинного обучения используют сверточную нейронную сеть.

Дополнительно для повышения информативности построенной модели зерна перед объединением изображений могут осуществлять их обработку. Обработка изображений может включать в себя удаление артефактов (неоднородности интенсивности вдоль одного или нескольких направлений, полосы, кольца, рябь и пр.), или снижение уровня шума, или нормализацию и др. При этом в отношении минеральной карты зерна обработка может включать в себя объединение классов минералов в группы таким образом, чтобы наименее распространенная группа минералов занимала не менее 10% изображения, или удаление ложных единичных минералов, или проведение экспертного анализа качества определения минерального состава с точки зрения наличия минералов не характерных для

анализируемой горной породы или объединение минералов в группы классов, которые плохо различаются алгоритмом машинного обучения ввиду близкого нахождения в пространстве.

Перед объединением изображений могут осуществлять подготовку обучающей выборки. Ее могут осуществлять за счет регистрации изображений микроструктуры и поверхности зерна, приводя их к одному масштабу в единой системе координат так, чтобы одна и та же структура имела одинаковое положение в пространстве. В качестве алгоритма машинного обучения могут использовать любую известную сверточную нейронную сеть.

Группа изобретений поясняется следующими фигурами.

Фиг.1 — Схема построения трехмерной модели зерна и определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов.

Фиг.2 — Изображение рентгеновской микротомографии микроструктуры зерна, насыщенного воздухом.

Фиг.3 – Изображение сканирующей электронной микроскопии поверхности шлифа зерна.

Фиг. 4 – Изображение структуры субразрешенной области порового пространства зерна.

Фиг.5 – Выделенные шесть зон съемки зерна.

Фиг. 6 – Минеральная карта поверхности шлифа зерна для выделенных шести зон съемки.

Фиг. 7 – Гистограмма распределения вокселей по интенсивностям для пор в субразрешенных областях зерна (светло-серым цветом).

Фиг. 8 – Гистограмма распределения вокселей по пористостям для пор в субразрешенных областях зерна.

Фиг.9 — Трехмерная модель зерна с субразрешенными областями порового пространств.

Фиг.10 — Трехмерная модель субразрешенных областей порового пространства.

Фиг.11 — Значения параметров ФЕС шести выделенных зон зерна.

Фиг.12 — Сравнение корреляционных значений параметров ФЕС для шести выделенных зон зерна (субразрешенных областей).

Фиг.13 — Трехмерная минеральная модель зерна.

Фиг.14 — Диаграмма распределения минералов в стенках поровых каналов зерна.

Фиг.15 — Минеральный состав субразрешенных шести областей (зон) зерна.

Фиг.16 — Трехмерная модель зерна, на которой выделены субразрешенные поры, определены параметры ФЕС субразрешенных пор, а также минеральный состав стенок субразрешенных пор.

Фиг.17 — Функциональная схема системы для построения трехмерной модели зерна.

Способ определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов (фиг. 1) включает следующие этапы:

- получение изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры зерна, насыщенного воздухом, которые содержат контуры разрешенных пор зерна (100);

- получение изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры зерна, насыщенного ксеноном, которые содержат контуры субразрешенных областей порового пространства зерна (110);

- получение изображений сканирующей электронной микроскопии поверхности шлифа зерна (120);

- получение изображений структуры субразрешенной области порового пространства зерна (130);

- получение элементной карты поверхности шлифа зерна и получение на ее основе минеральной карты поверхности шлифа зерна (140);

- построение трехмерной модели зерна с разрешенными порами путем обработки изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры зерна, насыщенного воздухом (200);

- построение трехмерной модели зерна с субразрешенными областями порового пространства путем объединения трехмерной модели зерна с разрешенными порами и изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры зерна, насыщенного ксеноном, которые содержат контуры субразрешенных областей порового пространства (300);

- определение фильтрационно-емкостных свойств субразрешенных областей порового пространства с помощью обработки изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры зерна, насыщенного ксеноном, изображений сканирующей электронной микроскопии поверхности шлифа зерна и изображений структуры субразрешенной области порового пространства зерна (400);

- построение трехмерной минеральной модели зерна путем объединения изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры зерна, насыщенного воздухом, изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры зерна,

изображений сканирующей электронной микроскопии поверхности шлифа зерна, минеральной карты поверхности шлифа зерна (500);

- получение на основе трехмерной минеральной модели зерна значений контактных углов смачиваемости на поверхности минералов (510);

- построение трехмерной модели зерна путем объединения построенных ранее трехмерных моделей с фильтрационно-емкостными свойствами субразрешенных областей порового пространства (600);

- определение фильтрационно-емкостных свойств зерна на основе трехмерной модели зерна, фильтрационно-емкостных свойств субразрешенных областей порового пространства зерна и значений контактных углов смачиваемости на поверхностях минералов (700).

Для иллюстрации возможности реализации и более полного понимания сути группы изобретений ниже представлен вариант ее осуществления, который может быть любым образом изменен или дополнен, при этом настоящая группа изобретений ни в коем случае не ограничивается представленным вариантом.

Способ определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов и способ построения трехмерной модели зерна и реализуют следующим образом (фиг. 1).

Сначала осуществляют получение изображений зерна.

Для этого, на этапе 100 посредством компьютерного микротомографа (КМТ) 19 получают изображение микроструктуры зерна, насыщенного воздухом (фиг. 2). Для этого зерно закрепляют в рентгенопрозрачном зернодержателе и осуществляют его сканирование.

После этого, на этапе 110 без изменения положения зернодержателя, закачивают ксенон (Xe) в виде газа до достижения давления 3 Мпа, выдерживают зерно в ксеноне и осуществляют повторное послойное сканирование КМТ 19, получая изображение микроструктуры зерна, насыщенного ксеноном (Xe) с пространственным разрешением от 0,5 мкм до 100 мкм и динамическим диапазоном интенсивностей от 8 до 32 бит. На основании изображений могут получить значение пористости. Пример получения значений пористости будет раскрыт ниже.

После этого на этапе 120 посредством электронного микроскопа (ЭМ) 20 осуществляют получение изображения поверхности шлифа зерна, для чего зерно извлекают из зернодержателя, помещают и закрепляют в ЭМ 20 и осуществляют съемку его шлифа (фиг. 3).

После этого осуществляют этап 130, на котором посредством сфокусированным ионным пучком (СИП) 21 осуществляют получение изображений структуры

субразрешенной области порового пространства зерна (на фиг.3), для чего осуществляют выделение субразрешенной области. На фиг.5 представлено шесть зон (0-5 зоны) – областей съемки, выполненной с помощью СИП 21. При этом в качестве наиболее предпочтительной выбирают ту субразрешенную область, в которой наблюдают повышенную концентрацию ксенона (Xe) на изображениях микроструктуры зерна, насыщенного ксеноном (Xe), после чего посредством функции ионного травления сфокусированным ионным пучком СИП 21 послойно срезают и осуществляют съемку поверхности зерна.

После этого на этапе 140 посредством функции электронно-зондового микроанализа (ЭЗМА) 22, получают элементную карту поверхности шлифа зерна, на основе которой методом анализа минерального состава зерна по данным энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии получают минеральную карту поверхности шлифа зерна (фиг.6).

Полученные изображения могут дополнительно обрабатывать, при этом:

- удаляют артефакты на изображениях КМТ 19, в частности удаляют: неоднородности интенсивности вдоль одного или нескольких направлений, полосы, кольца, рябь и пр.;
- снижают уровень шума на изображениях КМТ 19;
- нормализуют томографические изображения;
- объединяют классы минералов в группы на изображениях ЭЗМА 22 таким образом, чтобы наименее распространенная группа минералов занимала не менее 10% изображения;
- удаляют ложные единичные минералы на изображениях ЭЗМА 22;
- проводят экспертный анализ качества определения минерального состава с точки зрения наличия минералов не характерных для анализируемой горной породы;
- объединяют минералы в группы классов, которые плохо различаются алгоритмом машинного обучения ввиду близкого нахождения в пространстве.

Поскольку получение изображений микроструктуры зерна, насыщенного воздухом, и изображения микроструктуры зерна, насыщенного ксеноном (Xe), осуществляют без изменения положения зернодержателя, то снижается трудоемкость объединения изображений зерна, насыщенного ксеноном (Xe), и модели зерна с разрешенными порами.

Кроме того, могут выполнять нормализацию изображений образца зерна, насыщенного ксеноном, так, чтобы интенсивности доминирующей фазы, и наиболее ярких (плотных) включений были одинаковыми на изображениях зерна, насыщенного воздухом, и зерна, насыщенного ксеноном. Корректировку изображений зерна, насыщенного ксеноном, осуществляют на основе линейной зависимости:

$$I_{Xe}^* = A * I_{Xe}^0 + B$$

где  $I_{Xe}^0$  - интенсивность исходных изображений зерна, насыщенного ксеноном;

$I_{Xe}^*$  - интенсивность скорректированных изображений зерна, насыщенного ксеноном;

A и B – корректировочные параметры.

Имея пару реперных значений интенсивности для кварца и, например, пирита, определяют параметры A и B.

После этого приступают к построению трехмерных моделей. Их построение могут осуществлять, как последовательно, так и параллельно.

Осуществляют этап 200, на котором строят трехмерную модель зерна с разрешенными порами. Для этого объединяют изображения микроструктуры зерна, насыщенного воздухом, полученные на этапе 100 (на фиг. не представлена).

На этапе 300 осуществляют построение модели зерна с субразрешенными областями порового пространства (Фиг.9). Для этого осуществляют объединение трехмерной модели зерна с разрешенными и порами и изображений зерна, насыщенного ксеноном (Xe), полученные на этапе 110.

При построении модели зерна с субразрешенными областями могут выполнять вычитание объединенных трехмерных изображений зерна, насыщенного воздухом, из трехмерного изображения, насыщенного ксеноном зерна, получая изображение пространственного распределения ксенона в объеме исследуемого образца (дифференциальное изображение зерна).

Затем дифференциальное изображение инвертируют и подвергают процедуре предобработки изображений (удалению артефактов и снижению шума), что позволяет рассматривать менее интенсивные воксели как поры, а наиболее интенсивные, как скелет породы.

Затем предобработанное дифференциальное изображение образца объединяют с бинаризованным изображением зерна, насыщенного воздухом, что обеспечивает сохранение полной информации о разрешенных открытых порах, которая может быть утеряна на изображении зерна, насыщенного ксеноном, поскольку такие поры, в которые не попал ксенон, по своей яркости мало чем будут отличаться от скелета и могут быть неправильно сегментированы. При этом в случае, если бинарное изображение образца, насыщенного воздухом, содержит связанное поровое пространство, а проницаемость такой бинарной модели превышает экспериментальное значение, то данный этап не выполняется.

В данном случае далее создают бинарную маску, которая включает оба типа пористости – разрешенные поры из бинаризованного изображения зерна, насыщенного воздухом, и субразрешенные поры из изображения зерна, насыщенного ксеноном. Разница

такой бинарной маски и бинаризованного изображения керна, насыщенного воздухом, показывает распределение вокселей, содержащих субразрешенную пористость, в объеме керна.

Поскольку в каждом вокселе может храниться число в диапазоне от 0 до 255, то максимальное количество классов будет равно 255, где 0 – класс разрешенных открытых пор, 255 – класс непроницаемого скелета, а оставшиеся 254 класса могут содержать информацию о различных диапазонах пористости субразрешенных областей (классы субразрешенных пор).

В рассмотренном примере анализ показывает, что субразрешенные классы имеют значения интенсивности от 1 до 190 (фиг. 7), а воксели с интенсивностями от 191 до 255 относятся к классу скелета.

Затем строят линейную корреляцию между интенсивностью вокселей субразрешенных классов и пористостью в виде:

$$\phi = a * Intensity + b.$$

Поскольку воксели со значениями интенсивности 0 имеют пористость 100, а воксели со значением интенсивности 191 и выше имеют пористость 0, принимая линейный характер зависимости пористость – интенсивность, функциональная зависимость для керна имеет вид:

$$\phi = - 0,00523 * Intensity + 1.$$

После замены значений интенсивности на значения пористости во всех вокселях, содержащих субразрешенные поры, получают гистограмму ( $\phi_i$ ) распределения пористости в субразрешенных классах. (Фиг.8).

Общую пористость вычисляют с помощью усреднения значений всех вокселей модели керна. При этом пористость субразрешенного класса была равна 3.3% (усреднялись значения вокселей, принадлежащих только субразрешенному классу), а общая пористость модели была равна  $7.8+3.3=11.1\%$ .

Также на основании изображений определяют и другие фильтрационно-емкостные свойства (400). Для этого объединяют изображения, полученные на этапах 110, 120 и 130. При этом могут использовать данные PoreSpy (Gostick 2019) и функцию, которая производит расчет, например, пористости и проницаемости.

Для расчета пористости и проницаемости на вход этой функции подают сегментированную на 2 класса детализированную область керна, в которой значения вокселя, равное 1, соответствует порам, а 0 - непроницаемой среде. Детализированная область имеет более высокое разрешение, чем разрешение моделей, построенных на этапах 200 или 300.

Расчет проницаемости субразрешенной области керна осуществляют в 2 этапа.

На первом этапе считают с помощью библиотеки PoreSpy. На входе указывают следующие параметры: размер вокселей; грани, через которые может проходить течение.

Затем на основе полученных данных строят корреляцию (К-φ) между пористостью и проницаемостью по разным осям (Фиг. 11). Зависимость пористости от проницаемости в таком случае имеет следующий вид:

$$K = 7.251 * 10^{-5} e^{0.147076689 * \varphi},$$

где φ – пористость в %, а К – проницаемость в мД.

Этап построения корреляции между пористостью и проницаемостью может осуществляться одним из трех методов, при котором:

1. Используют наиболее вероятное значение пористости для подстановки его в корреляцию К-φ для оценки проницаемости. Наиболее вероятное значение пористости оценивают по карте пористостей, путем построения гистограммы распределения вокселей по пористости. Далее, значение проницаемости, определенное для наиболее вероятного значения пористости, используется для всех вокселей, содержащих субразрешенную пористость.

2. Используют гистограмму распределения пористости в субразрешенных вокселях ( $\varphi_i$ ) и корреляцию К-φ для построения гистограммы распределения проницаемостей в субразрешенных вокселях. Затем оценивают наиболее вероятное значение проницаемости по гистограмме и используют его во всех вокселях, содержащих субразрешенную пористость, при расчете абсолютной проницаемости трехмерной модели керна.

3. Оценивают проницаемость каждого вокселя, содержащего субразрешенную пористость, по соответствующему значению пористости и с использованием корреляции К-φ. При расчете абсолютной проницаемости модели керна учитывают все распределение вокселей по проницаемости.

Результаты расчетов по каждому из трех методов приведены в Таблице 1.

Таблица 1 - Результаты расчетов пористости и проницаемости (ФЕС).

Метод	Пористость каждого вокселя субразрешенной области, %	Проницаемость каждого вокселя субразрешенной области, мД	Проницаемость, мкД (Kx/Ky/Kz)
1	16	0.00076	0.18 / 0.08 / 0.06
2	$\varphi_i$	0.001	0.23 / 0.11 / 0.075
3	$\varphi_i$	$K_i$	31.2 / 37.8 / 32.1

После этого, на этапе 500 осуществляют построение трехмерной минеральной модели зерна (Фиг.13). Для этого объединяют изображения зерна, насыщенного воздухом, полученные на этапе 100, изображения зерна, полученные на этапе 110, изображения сканирующей электронной микроскопии поверхности шлифа зерна 120 и минеральную карту поверхности шлифа зерна, полученную на этапе 140. При этом оценивают объемное распределение минералов только тех пикселей скелета породы, которые примыкают к пикселям, формирующим открытые и субразрешенные поры. Минеральный состав выделенных субразрешенных областей представлен на фиг. 13.

После этого на этапе 510 определяют значения контактных углов смачиваемости на границах минералов, например, с использованием справочных данных: (Lourenço, S. D. N., et al. "Wettability of crushed air-dried minerals." *Géotechnique Letters* 5.3 (2015): 173-177.)

Полученные на этапах 200, 300, 500 трехмерные модели зерна и значения ФЕС объединяют на этапе (400), и на этапе 600 строят трехмерную модель зерна (Фиг.16). Она имеет более высокую детализацию за счет того, что каждый воксель содержит дополнительную информацию о субразрешенных порах, выраженную в виде значений пористости и проницаемости  $\phi$  и  $K$ , а также в виде дополнительного признака, представленного типом минерала, присутствующего в стенке субразрешенных пор, имеющего значение контактного угла на границах с другими минералами.

Следует отметить, что для снижения трудоемкости построения моделей и повышения скорости построения трехмерной модели зерна, этапы 200, 300 и 500 могут осуществлять с применением алгоритма машинного обучения и сверточной нейронной сети.

Для этого осуществляют создание обучающей выборки за счет регистрации изображений, полученных на этапах 100–130, приводя их к одному масштабу в единой системе координат так, чтобы одна и та же структура имела одинаковое положение в пространстве. При этом выделяют два типа изображений: фиксированное (*fixed/reference image*) и трансформируемое (*moving image/label*). В результате объединения систему координат трансформируемого изображения преобразуют в систему координат фиксированного изображения.

Кроме того, для построения трехмерной минеральной модели зерна на этапе 600 могут применять нейронную сеть глубокого обучения (UNet+inceptionv3 или UNet+efficientnetb4), решающую задачу семантической сегментации и предсказания минеральных классов на основе изображения поверхности шлифа зерна, полученного на этапе 120. В качестве обучающей выборки для такой нейронной сети используют изображения сканирующей электронной микроскопии поверхности шлифа зерна,

полученное на этапе 120 и минеральный состав, определенный с применением методики QEMSCAN на этапе 140.

Построенная трехмерная модель ядра, за счет повышенной яркости вокселей на реконструированном томографическом изображении относительно яркости вокселей скелета горной породы, позволяет сегментировать воксели «твердой» компоненты на скелет породы (минералы непроницаемого скелета) и области субразреженной пористости, содержащие даже небольшой объем ксенона, тем самым визуализировать субразреженные поры, неразрезанные при томографии ядра, насыщенного воздухом. Совокупно с изображениями микроструктуры ядра такой подход позволяет определить корреляцию между пористостью и проницаемостью и наполнить визуализированные области субразреженной пористости значениями параметров фильтрационно-емкостных свойств.

После этого на основе трехмерной модели ядра осуществляют этап 700, на котором определяют значения параметров ФЕС низкопроницаемых коллекторов:

- Пористость (общая, открытая, закрытая, связанная, субмикронная);
- Проницаемость абсолютная;
- Кривая капиллярного давления;
- Определение коэффициента вытеснения нефти/газа/конденсата различными химическими агентами;
- Определение фазовых проницаемостей при совместной фильтрации двух или трех флюидов.

Заявленный способ может применяться для низкопроницаемых образцов ядра ачимовских отложений, для которых были рассчитаны следующие ФЕС (таблица 2).

Таблица 2 – Сопоставление способов определения ФЕС

	Способы определения ФЕС ядра (пласта)	Пористость (%)	Проницаемость (мД)
1	Эксперименты на образце 37800-19 (Ø 30 мм)	13,55	0,104
2	Цифровая бинарная модель 37800-2 (Разрешение 2 мкм) – способ, известный из уровня техники (прототип)	6,0	0,0
3	Заявленный способ определения ФЕС	11,6	0,089

Из таблицы 2 видно, что наиболее точным (приближенным) к экспериментальным данным является заявленный способ определения ФЕС, который более, чем на 40% является точнее, чем способ известный из уровня техники.

Система построения трехмерной модели керна и система определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов реализуется посредством пользовательской компьютерной системы 10 (Фиг. 15), содержащей шину 11, процессор 12, системную память 13, графический адаптер 14, устройство 15 вывода данных, графический интерфейс 16 и устройство 17 ввода данных, а также за счет подключенных к системе 10 по сети 18: компьютерного микротомографа 19 (КМТ) и электронного микроскопа (ЭМ) 20, с функцией 21 электронно-зондового микроанализа (ЭЗМА) и функцией 22 травления сфокусированным ионным пучком (СИП).

Аналогично способу и системе, описанным выше, реализуются машиночитаемый носитель для определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов и машиночитаемый носитель для построения трехмерной модели керна.

Таким образом, обеспечивается достижение технического результата, заключающегося в повышении точности трехмерной модели керна, включающей субразрешенные поровые каналы и их параметры, а также в повышении точности определения фильтрационно-емкостных свойств образца керна, полученных на основе его трехмерной модели, и в точности определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов, из которых получен исследуемый керн.

## Формула изобретения

1. Способ определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов, включающий:

- получение изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры керна, насыщенного воздухом, которые содержат контуры разрешенных пор керна;

- получение изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры керна, насыщенного ксеноном, которые содержат контуры субразрешенных областей порового пространства керна;

- получение изображений сканирующей электронной микроскопии поверхности шлифа керна;

- получение изображений структуры субразрешенной области порового пространства керна;

- получение элементной карты поверхности шлифа керна и получение на ее основе минеральной карты поверхности шлифа керна;

- построение трехмерной модели керна с разрешенными порами путем обработки изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры керна, насыщенного воздухом;

- построение трехмерной модели керна с субразрешенными областями порового пространства путем объединения трехмерной модели керна с разрешенными порами и изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры керна, насыщенного ксеноном, которые содержат контуры субразрешенных областей порового пространства;

- определение фильтрационно-емкостных свойств субразрешенных областей порового пространства с помощью обработки изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры керна, насыщенного ксеноном, изображений сканирующей электронной микроскопии поверхности шлифа керна и изображений структуры субразрешенной области порового пространства керна;

- построение трехмерной минеральной модели керна путем объединения изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры керна, насыщенного воздухом, изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры керна, изображений сканирующей электронной микроскопии поверхности шлифа керна, минеральной карты поверхности шлифа керна;

- получение на основе трехмерной минеральной модели керна значений контактных углов смачиваемости на поверхности минералов;

- построение трехмерной модели ядра путем объединения построенных ранее трехмерных моделей с фильтрационно-емкостными свойствами субразрешенных областей порового пространства;

- определение фильтрационно-емкостных свойств ядра на основе трехмерной модели ядра, фильтрационно-емкостных свойств субразрешенных областей порового пространства ядра и значений контактных углов смачиваемости на поверхностях минералов.

2. Способ определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов по п.1, в котором получение изображений структуры субразрешенной области порового пространства ядра осуществляют с помощью электронного микроскопа путем сопутствующего травления сфокусированным ионным пучком.

3. Способ определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов по п.1, в котором получение изображений структуры субразрешенной области порового пространства ядра осуществляют с помощью машинного обучения на основе изображений сканирующей электронной микроскопии поверхности шлифа ядра.

4. Способ определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов по п.1, в котором значения контактных углов смачиваемости на поверхности минералов получают с использованием значений межфазного натяжения для флюидных систем, состоящих из нефти и воды или нефти и газа или воды и газа или нефти, воды и газа.

5. Способ определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов по п.1, в котором изображения рентгеновской микротомографии микроструктуры ядра, насыщенного воздухом, получают с помощью рентгеновской микро- или нано- томографии.

6. Способ определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов по п.1, в котором изображения рентгеновской микротомографии микроструктуры ядра, насыщенного ксеноном, получают с помощью рентгеновской микро- или нано- томографии.

7. Способ определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов по п.1, в котором изображения рентгеновской микротомографии микроструктуры ядра, насыщенного ксеноном, получают с разрешением от 0,5 до 100 мкм и динамическим диапазоном интенсивностей от 8 до 32 бит.

8. Способ определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов по п.1, в котором определение минеральной карты поверхности шлифа ядра

дополнительно осуществляется с помощью минералогического анализа изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры зерна, насыщенного воздухом.

9. Способ определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов по п.1, в котором размер субразрешенной области порового пространства не превышает 3 мкм.

10. Способ определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов по п.1, в котором разрешенными порами являются поры, размером более 1 мкм.

11. Способ определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов по п.1, в котором субразрешенные области порового пространства зерна содержат поры, размером менее 1 мкм.

12. Способ определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов по п.1, в котором для получения изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры зерна, насыщенного ксеноном, выбирают область зерна с повышенной концентрацией ксенона.

13. Способ определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов по п.1, в котором получение изображений сканирующей электронной микроскопии поверхности шлифа зерна осуществляют с верхней, нижней или срединной поверхности шлифа.

14. Способ определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов по п.1, в котором фильтрационно-емкостными свойствами субразрешенных областей порового пространства зерна являются значения пористости, проницаемости, капиллярной кривой, фазовой проницаемости для флюидных систем, состоящих из нефти и воды или нефти и газа, или воды и газа, или нефти, воды и газа.

15. Способ определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов по п.1, в котором дополнительно осуществляют обработку полученных изображений, которая включает снижение уровня шума.

16. Способ определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов по п.1, в котором дополнительно осуществляют обработку полученных изображений, которая включает нормализацию.

17. Способ определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов по п.1, в котором дополнительно осуществляют обработку минеральной карты поверхности шлифа зерна, которая включает выявление и объединение классов минералов в группы и удаление единичных минералов.

18. Способ определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов по п.17, в котором объединение классов минералов в группы осуществляют таким образом, чтобы наименее распространенная группа минералов занимает не менее 10% изображения.

19. Способ определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов по п.1, в котором построение трехмерных моделей осуществляют с применением алгоритма машинного обучения.

20. Способ определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов по п.19, в котором в качестве алгоритма машинного обучения используют сверточную нейронную сеть.

21. Способ построения трехмерной модели зерна, включающий

- получение изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры зерна, насыщенного воздухом, которые содержат контуры разрешенных пор зерна;

- получение изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры зерна, насыщенного ксеноном, которые содержат контуры субразрешенных областей порового пространства зерна;

- получение изображений сканирующей электронной микроскопии поверхности шлифа зерна;

- получение изображений структуры субразрешенной области порового пространства зерна;

- получение элементной карты поверхности шлифа зерна и получение на ее основе минеральной карты поверхности шлифа зерна;

- построение трехмерной модели зерна с разрешенными порами путем обработки изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры зерна, насыщенного воздухом;

- построение трехмерной модели зерна с субразрешенными областями порового пространства путем объединения трехмерной модели зерна с разрешенными порами и изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры зерна, насыщенного ксеноном, которые содержат контуры субразрешенных областей порового пространства;

- определение фильтрационно-емкостных свойств субразрешенных областей порового пространства с помощью обработки изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры зерна, насыщенного ксеноном, изображений сканирующей электронной микроскопии поверхности шлифа зерна и изображений структуры субразрешенной области порового пространства зерна;

- построение трехмерной минеральной модели керна путем объединения изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры керна, насыщенного воздухом, изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры керна, изображений сканирующей электронной микроскопии поверхности шлифа керна, минеральной карты поверхности шлифа керна;

- получение на основе трехмерной минеральной модели керна значений контактных углов смачиваемости на поверхности минералов;

- построение трехмерной модели керна путем объединения построенных ранее трехмерных моделей с фильтрационно-емкостными свойствами субразрешенных областей порового пространства.

22. Способ построения трехмерной модели керна по п.21, в котором получение изображений структуры субразрешенной области порового пространства керна осуществляют с помощью электронного микроскопа путем сопутствующего травления сфокусированным ионным пучком.

23. Способ построения трехмерной модели керна по п.21, в котором получение изображений структуры субразрешенной области порового пространства керна осуществляют с помощью машинного обучения на основе изображений сканирующей электронной микроскопии поверхности шлифа керна.

24. Способ построения трехмерной модели керна по п.21, в котором значения контактных углов смачиваемости на поверхности минералов получают с использованием значений межфазного натяжения для флюидных систем, состоящих из нефти и воды или нефти и газа или воды и газа или нефти, воды и газа

25. Способ построения трехмерной модели керна по п.21, в котором изображения рентгеновской микротомографии микроструктуры сухого керна получают с помощью рентгеновской микро- или нано- томографии.

26. Способ построения трехмерной модели керна по п.21, в котором изображения рентгеновской микротомографии микроструктуры керна, насыщенного ксеноном, получают с помощью рентгеновской микро- или нано- томографии.

27. Способ построения трехмерной модели керна по п.21, в котором изображения рентгеновской микротомографии микроструктуры керна, насыщенного ксеноном, получают с разрешением от 0,5 до 100 мкм и динамическим диапазоном интенсивностей от 8 до 32 бит.

28. Способ построения трехмерной модели керна по п.21, в котором определение минеральной карты поверхности шлифа керна дополнительно осуществляется с помощью

минералогического анализа изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры зерна, насыщенного воздухом.

29. Способ построения трехмерной модели зерна по п.21, в котором размер субразрешенной области порового пространства не превышает 3 мкм.

30. Способ построения трехмерной модели зерна по п.21, в котором разрешенными порами являются поры, размером более 1 мкм.

31. Способ построения трехмерной модели зерна по п.21, в котором субразрешенные области порового пространства зерна содержат поры, размером менее 1 мкм.

32. Способ построения трехмерной модели зерна по п.21, в котором для получения изображений рентгеновской микротомографии микроструктуры зерна, насыщенного ксеноном, выбирают область зерна с повышенной концентрацией ксенона.

33. Способ построения трехмерной модели зерна по п.21, в котором получение изображений сканирующей электронной микроскопии поверхности шлифа зерна осуществляют с верхней, нижней или срединной поверхности шлифа.

34. Способ построения трехмерной модели зерна по п.21, в котором дополнительно осуществляют обработку полученных изображений, которая включает снижение уровня шума.

35. Способ построения трехмерной модели зерна по п.21, в котором дополнительно осуществляют обработку полученных изображений, которая включает нормализацию.

36. Способ построения трехмерной модели зерна по п.21, в котором дополнительно осуществляют обработку минеральной карты поверхности шлифа зерна, которая включает выявление и объединение классов минералов в группы и удаление единичных минералов.

37. Способ построения трехмерной модели зерна по п.36, в котором объединение классов минералов в группы осуществляют таким образом, чтобы наименее распространенная группа минералов занимает не менее 10% изображения.

38. Способ построения трехмерной модели зерна по п.21, в котором построение трехмерных моделей осуществляют с применением алгоритма машинного обучения.

39. Способ построения трехмерной модели зерна по п.21, в котором в качестве алгоритма машинного обучения используют сверточную нейронную сеть.

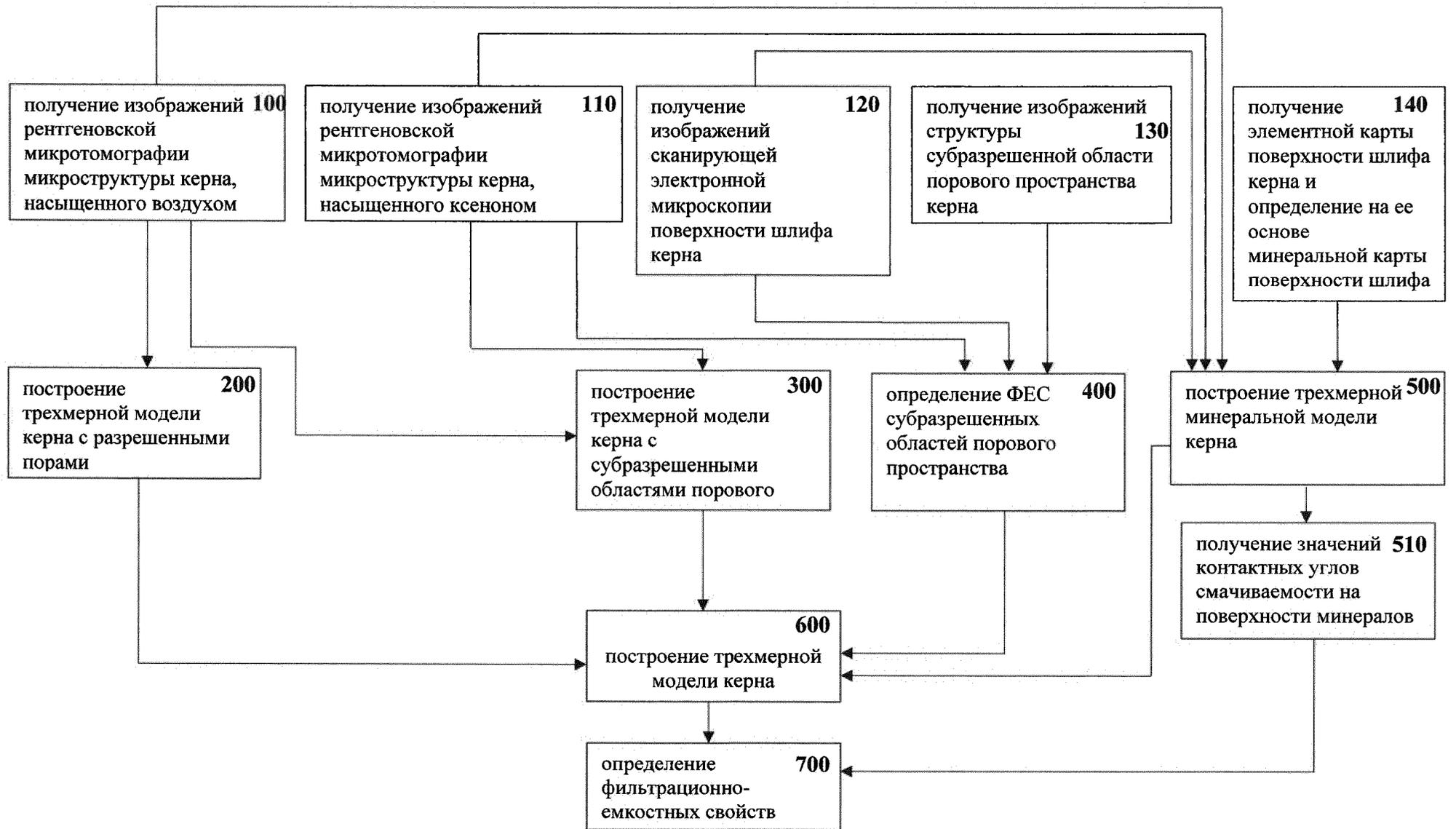
40. Система определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов, включающая по крайней мере один процессор, оперативную память и

машиночитаемые инструкции для выполнения способа определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов по любому из пп. 1-20.

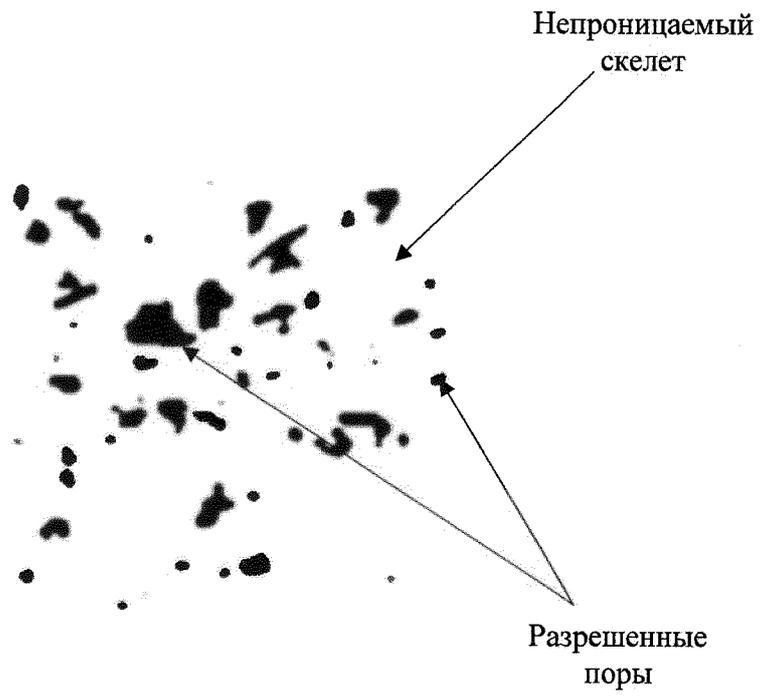
41. Система построения трехмерной модели ядра, включающая по крайней мере один процессор, оперативную память и машиночитаемые инструкции для выполнения способа построения трехмерной модели ядра по любому из пп. 21-39.

42. Машиночитаемый носитель для определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов, содержащий машинные инструкции способа определения фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов по любому из пп. 1-20.

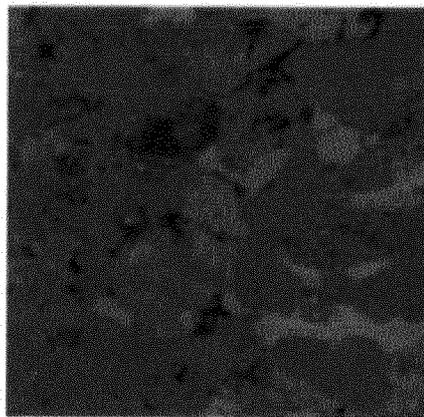
43. Машиночитаемый носитель для построения трехмерной модели ядра, содержащий машинные инструкции способа построения трехмерной модели ядра по любому из пп. 21-39.



Фиг. 1



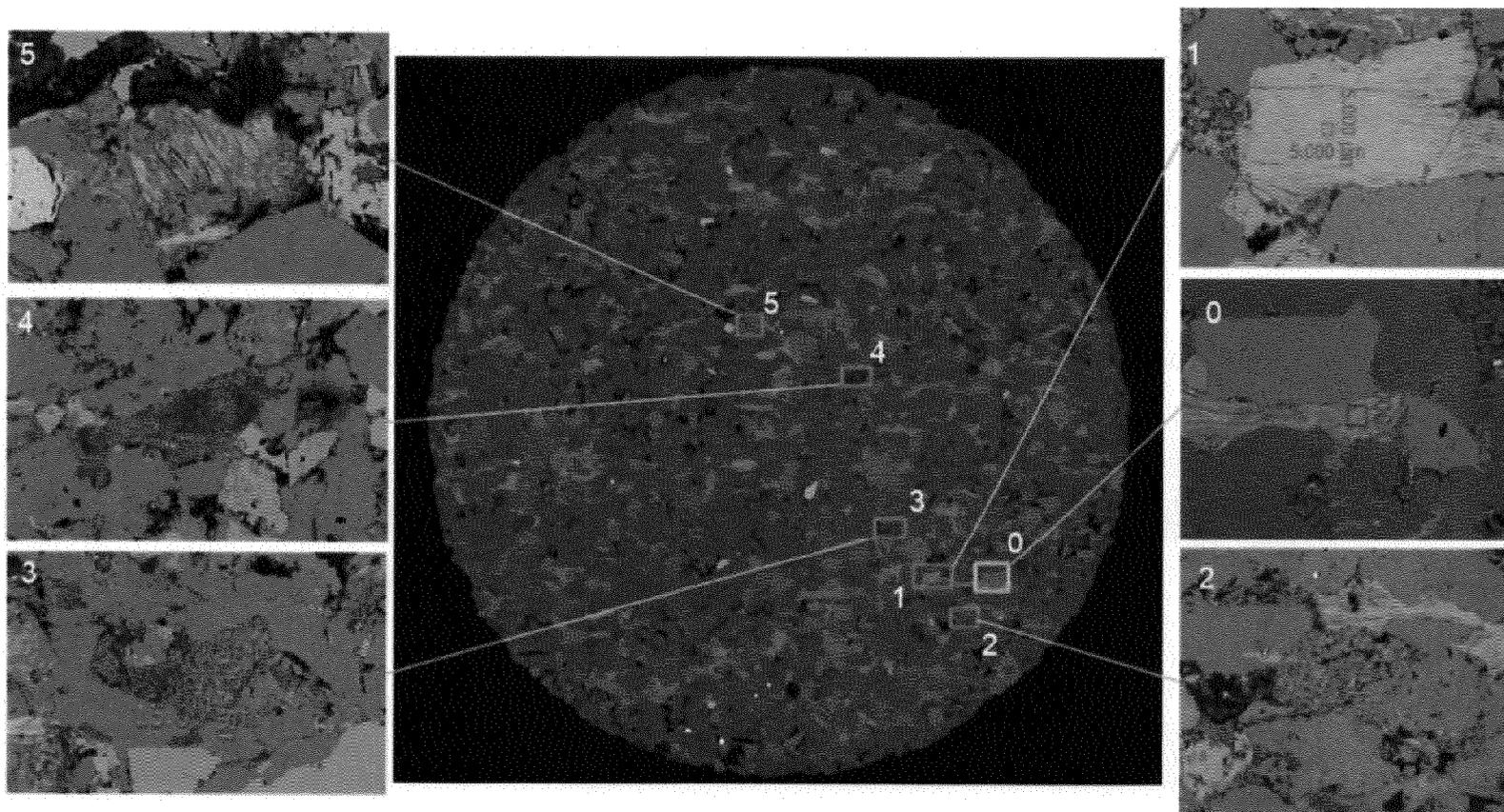
Фиг.2



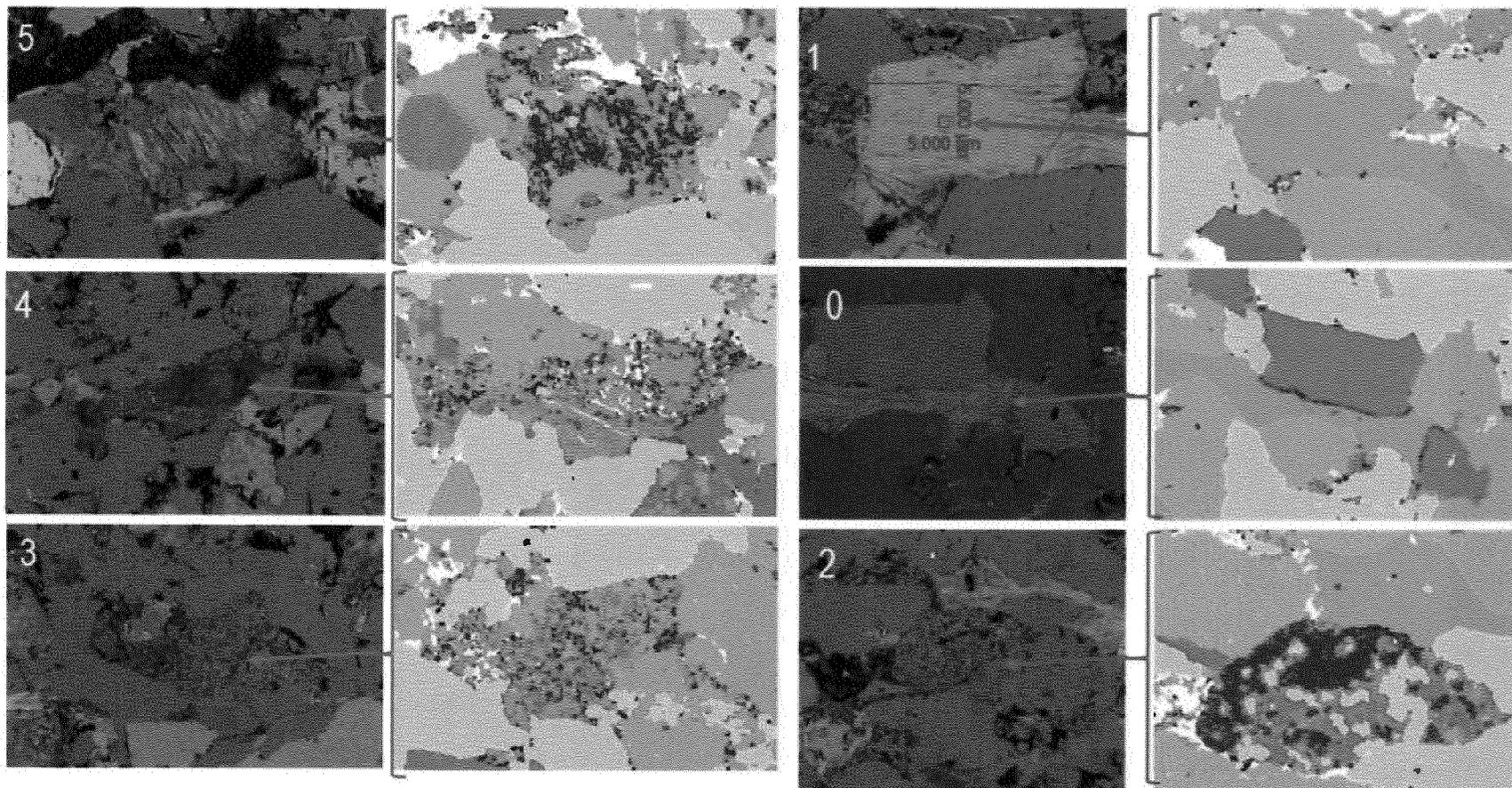
Фиг. 3



Фиг. 4



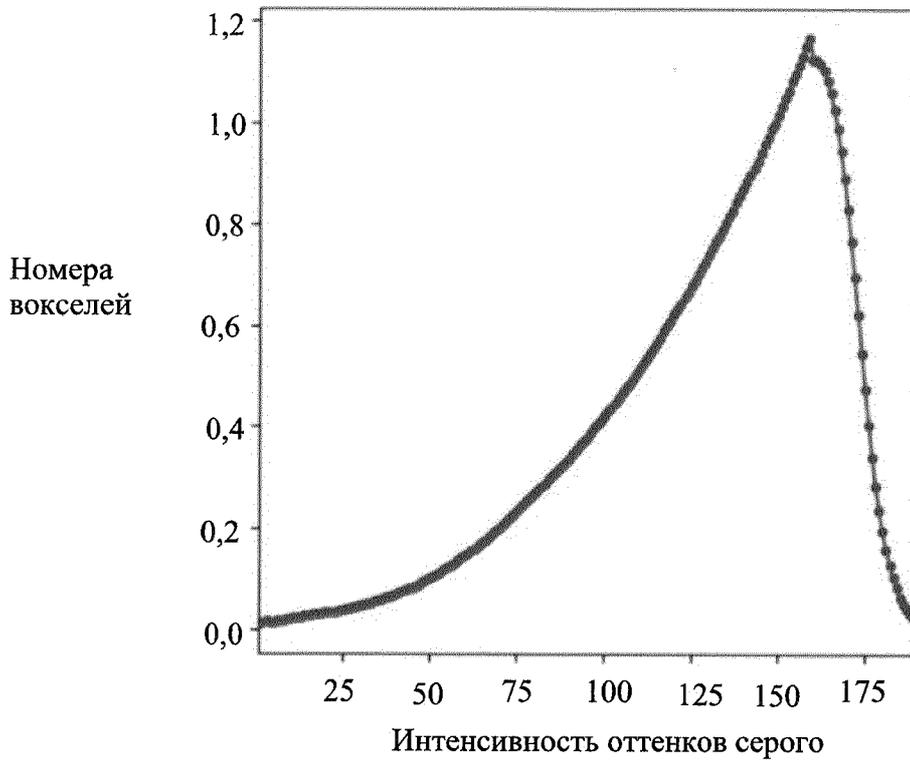
Фиг. 5



Другие минералы	
	Кварц
	Альбит
	Полевой шпат
	Хлорит
	Иллит
	Кальцит
	Биотит

Фиг. 6

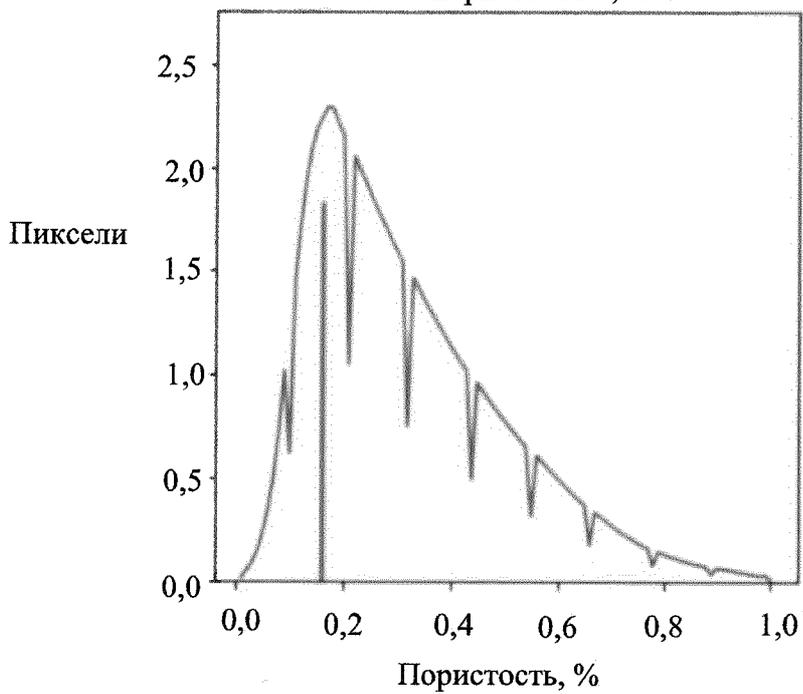
Классы от 1 до 190



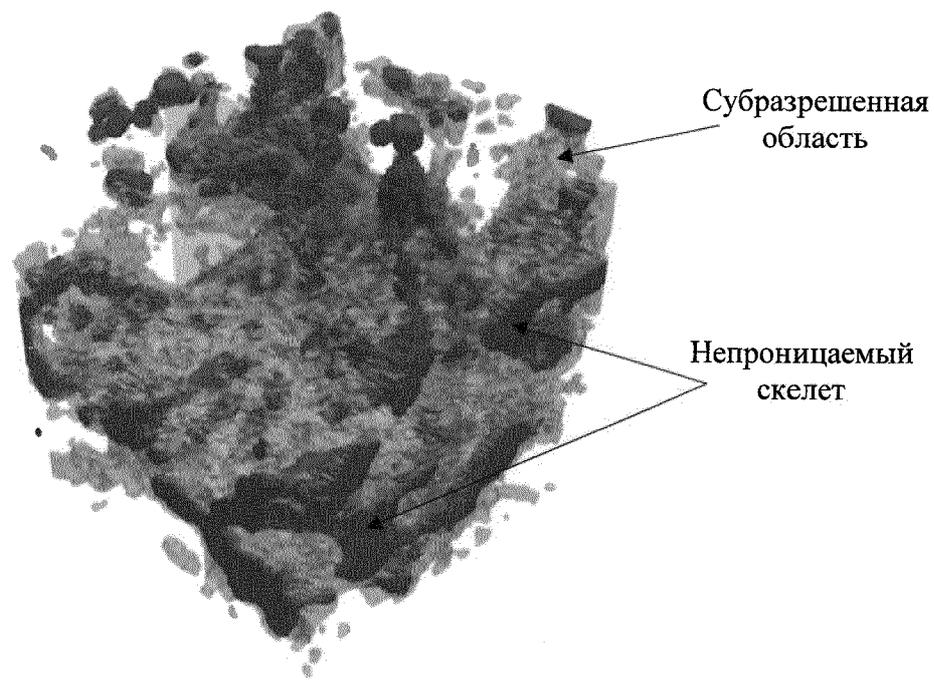
Фиг.7

Гистограмма распределения пористости на основе  
 $\phi = -0,00523 * Intensity + 1$

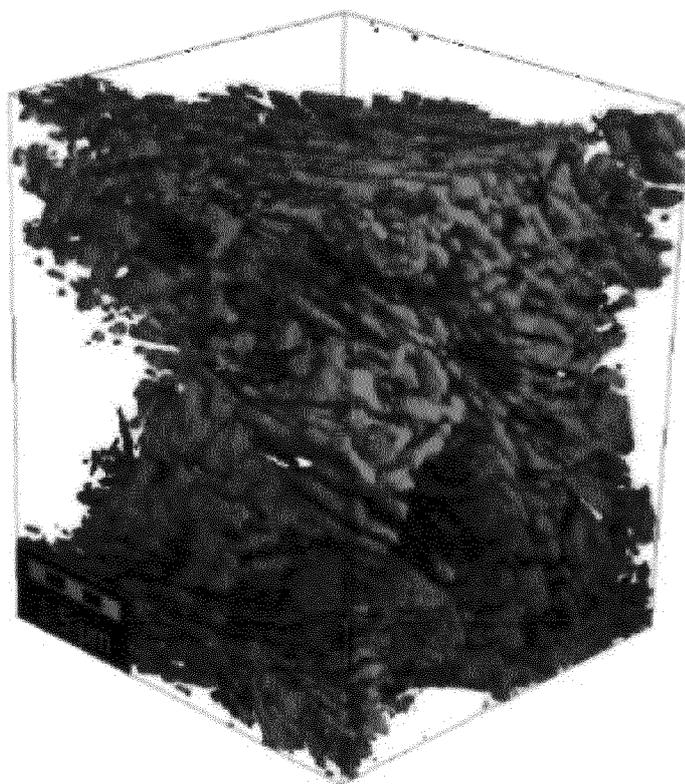
Наиболее часто встречающееся  
значение пористости 0,16%



Фиг.8



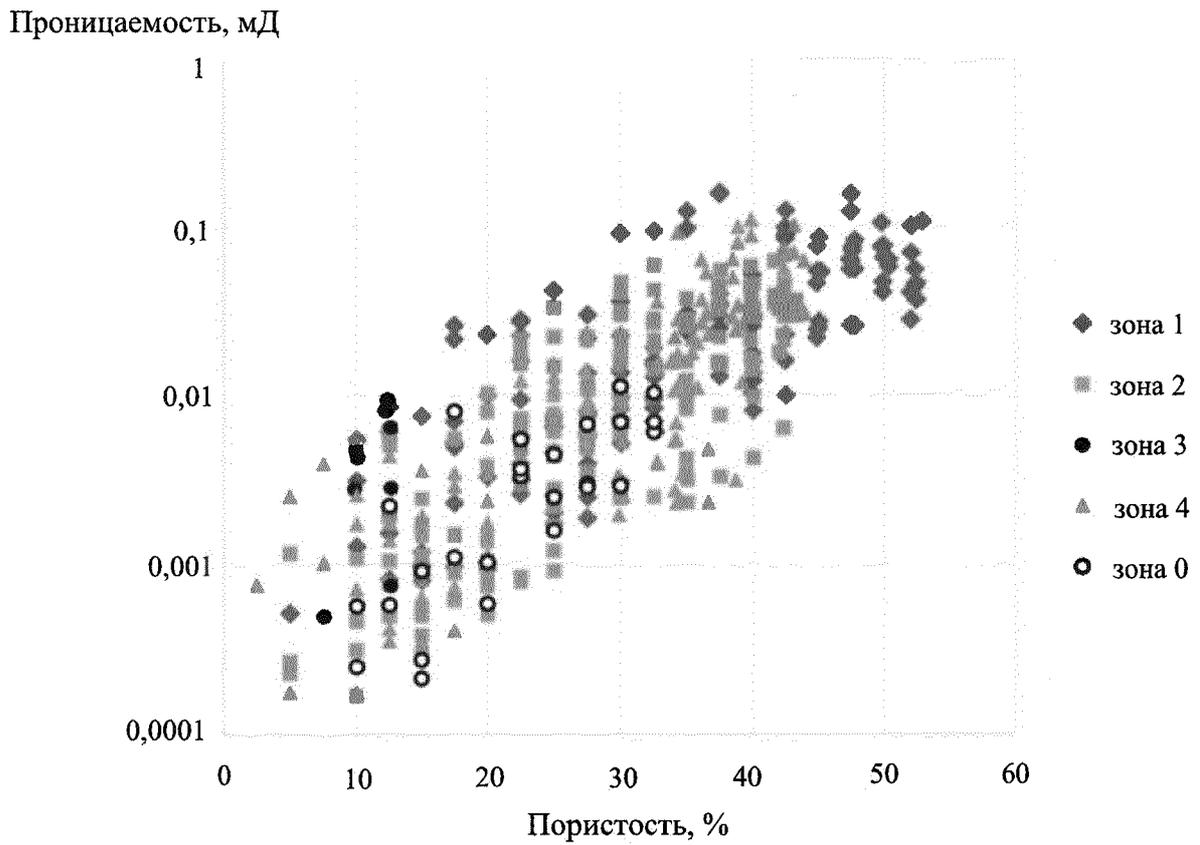
Фиг.9



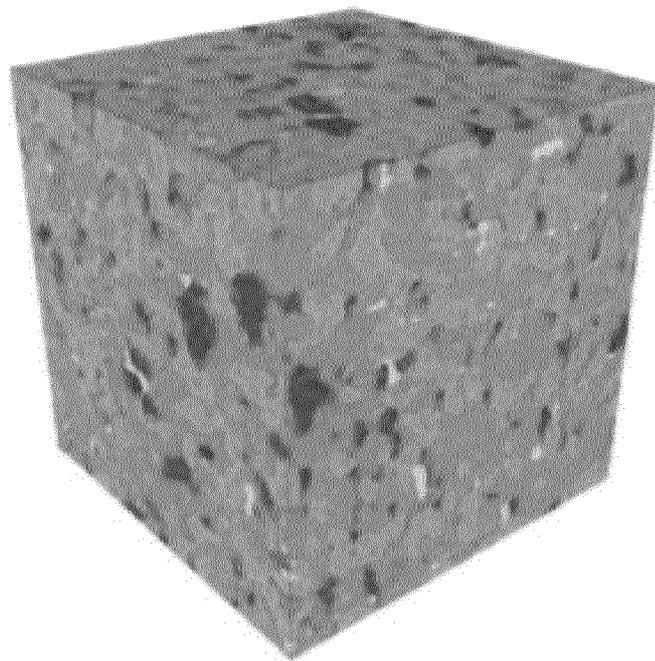
Фиг.10

Область съемки	Размер	Разрешение, нм	Пористость, %	Проницаемость, мкД		
				Ось x	Ось y	Ось z
Зона 0	300*250*250	20	11,85	0,0524	0,266	0,128
Зона 1	470*350*333	14	13,10	0	0,001	0
Зона 2	—	32,6	—	—	—	—
Зона 3	360*540*500	29	10,19	0,135	4,25	5,31
Зона 4	400*460*495	34	2,43	0	0	0
Зона 5	450*500*500	22	8,83	2,02	0	0

Фиг.11

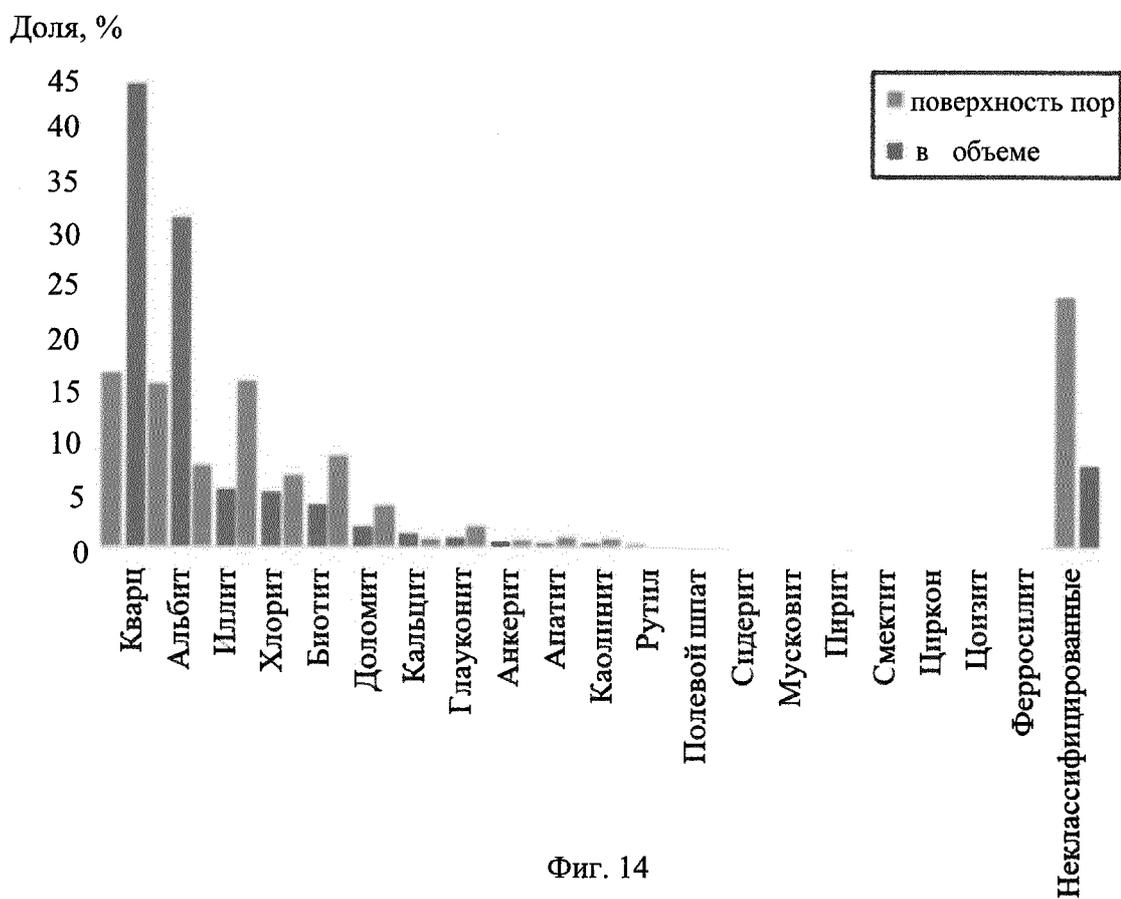


Фиг.12

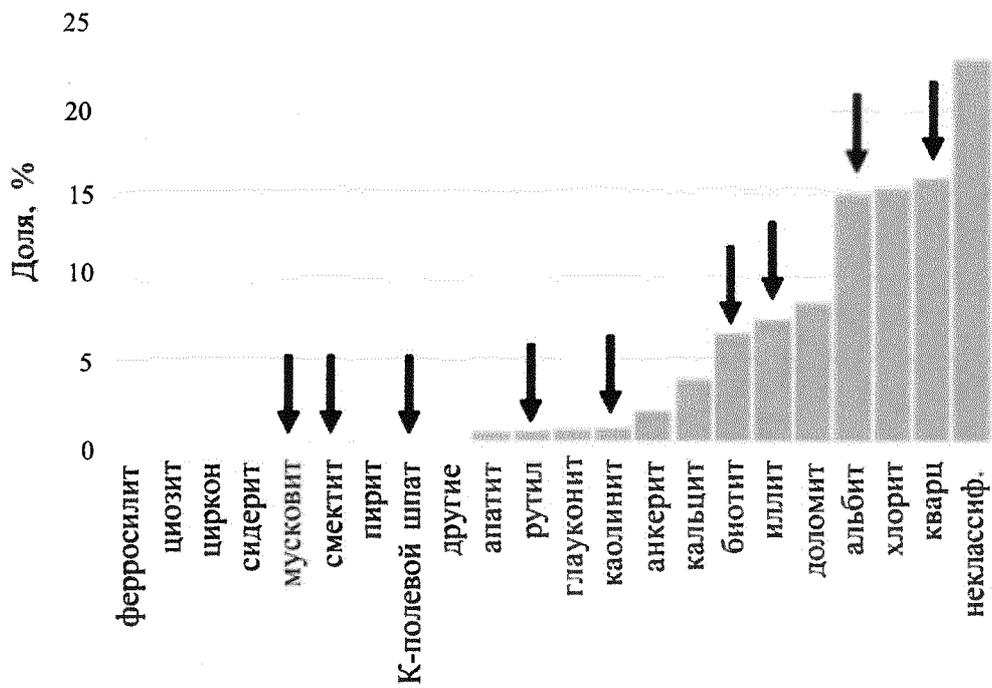


Другие минералы	
Кварц	
Альбит	
Полевой шпат	
Хлорит	
Иллит	
Кальцит	
Биотит	

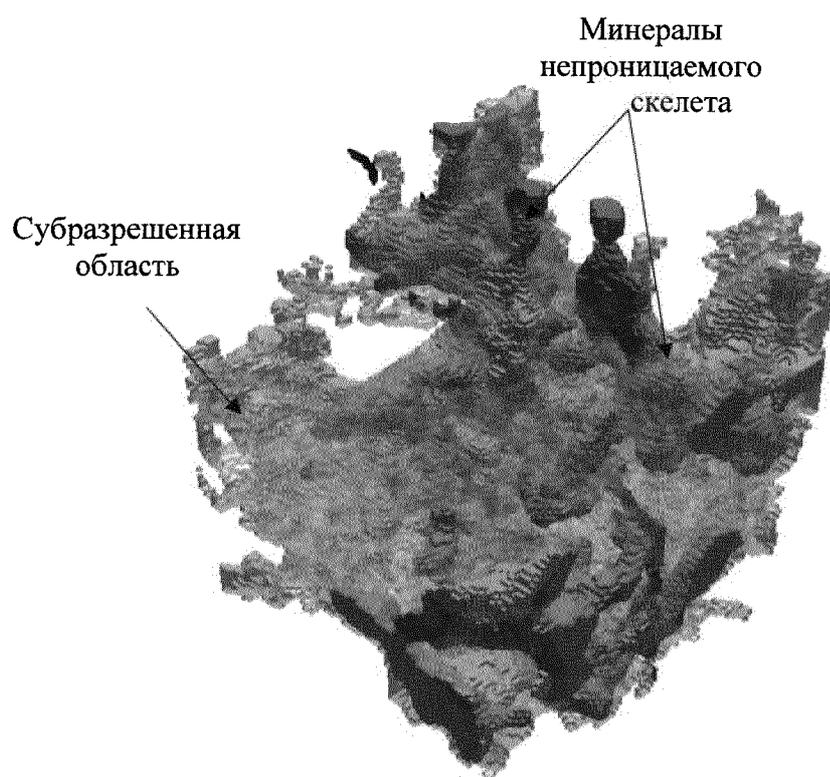
Фиг.13



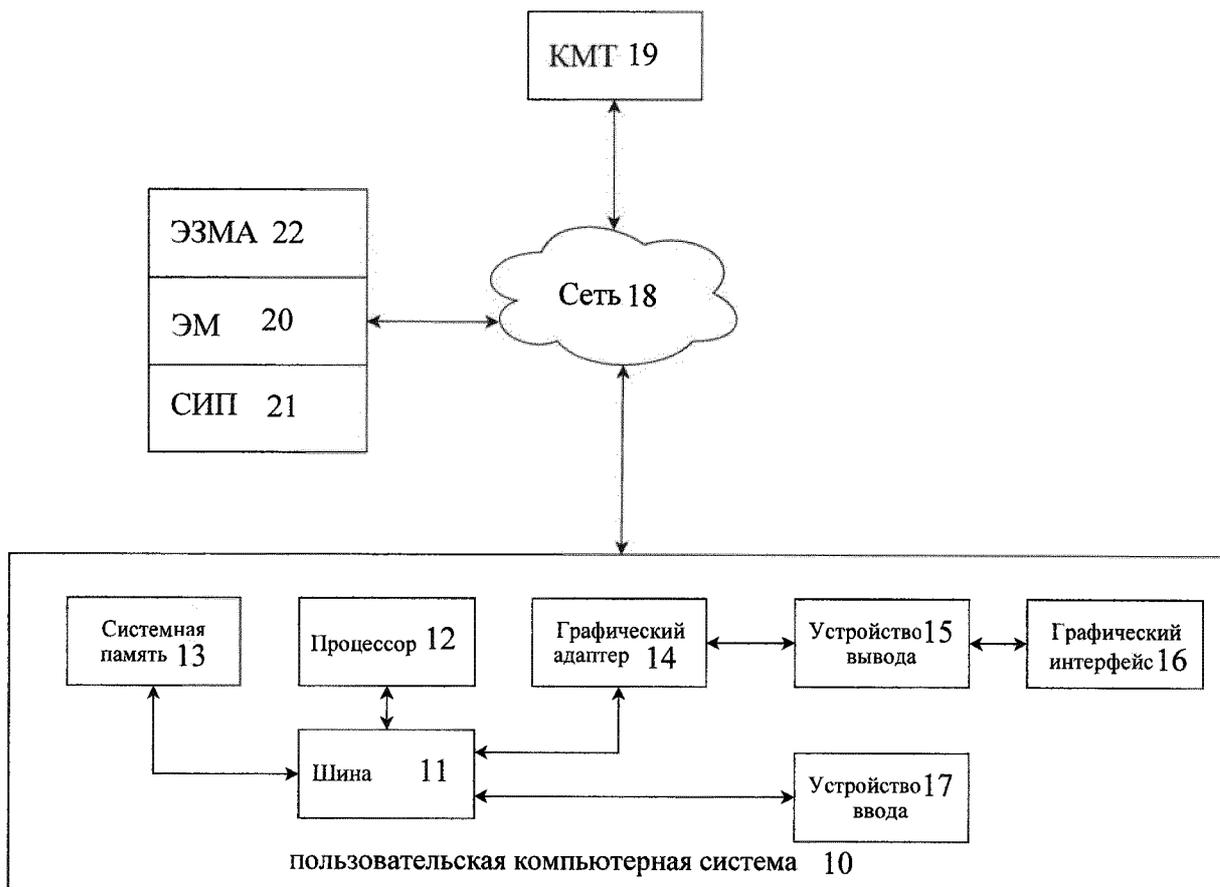
Фиг. 14



Фиг.15



Фиг.16



Фиг. 17

**ОТЧЕТ О ПАТЕНТНОМ ПОИСКЕ**

(статья 15(3) ЕАПК и правило 42 Патентной инструкции к ЕАПК)

Номер евразийской заявки:

**202293207****А. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРЕДМЕТА ИЗОБРЕТЕНИЯ:**  
**G01N 23/04 (2018.01)**

Согласно Международной патентной классификации (МПК)

**Б. ОБЛАСТЬ ПОИСКА:**Просмотренная документация (система классификации и индексы МПК)  
G01N 21/00-21/03, G09B 25/00-25/08Электронная база данных, использовавшаяся при поиске (название базы и, если возможно, используемые поисковые термины)  
Espascanet, ЕАПАТИС, ЕРОQUE Net, Reaxys, Google**В. ДОКУМЕНТЫ, СЧИТАЮЩИЕСЯ РЕЛЕВАНТНЫМИ**

Категория*	Ссылки на документы с указанием, где это возможно, релевантных частей	Относится к пункту №
A	RU 2651679 C1 (АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО "ВСЕРОССИЙСКИЙ НЕФТЕГАЗОВЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА А.П. КРЫЛОВА" (АО "ВНИИНЕФТЬ")) 23.04.2018 реферат, страница 6, строки 26-43, пункт 1 формулы, фигура 1	1-43
A	В.В.МОРОЗОВ и др. Опыт применения технологии "Цифровой анализ керна" на месторождении "Саркала". PRO НЕФТЬ, октябрь 2020, выпуск 3 [он-лайн] [найдено 05.05.2023]. Найдено в: < <a href="https://proneft.elpub.ru/jour/article/download/161/161">https://proneft.elpub.ru/jour/article/download/161/161</a> >	1-43
A	US 2020/0225655 A1 (STRONG FORCE IOT PORTFOLIO 2016, LLC) 16.07.2020	1-43
A	CN 113848806 A (UNIV CHINA PETROLEUM EAST CHINA) 28.12.2021	1-43

 последующие документы указаны в продолжении

\* Особые категории ссылочных документов:

«А» - документ, определяющий общий уровень техники

«D» - документ, приведенный в евразийской заявке

«E» - более ранний документ, но опубликованный на дату подачи евразийской заявки или после нее

«O» - документ, относящийся к устному раскрытию, экспонированию и т.д.

"P" - документ, опубликованный до даты подачи евразийской заявки, но после даты испрашиваемого приоритета"

«Т» - более поздний документ, опубликованный после даты приоритета и приведенный для понимания изобретения

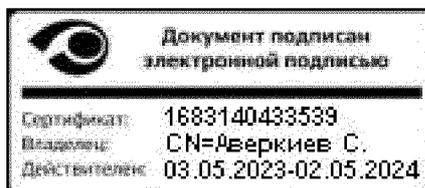
«X» - документ, имеющий наиболее близкое отношение к предмету поиска, порочащий новизну или изобретательский уровень, взятый в отдельности

«Y» - документ, имеющий наиболее близкое отношение к предмету поиска, порочащий изобретательский уровень в сочетании с другими документами той же категории

«&amp;» - документ, являющийся патентом-аналогом

«L» - документ, приведенный в других целях

Дата проведения патентного поиска: 27 июня 2023 (27.06.2023)

Уполномоченное лицо:  
Начальник Управления экспертизы

С.Е. Аверкиев