

УДК 622

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2024

**Возможности применения метода электронной микроскопии при изучении литологических особенностей нефтеносных песчаников****Б.М. Осовецкий<sup>1</sup>, К.П. Казымов<sup>1</sup>, С.В. Галкин<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет (Российская Федерация, 614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15)<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29)**The Potential Applications of Electron Microscopy in Studying the Lithological Characteristics of Oil-Bearing Sandstones****Boris M. Osovetsky<sup>1</sup>, Konstantin P. Kazymov<sup>1</sup>, Sergei V. Galkin<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Perm State National Research University (15 Bukireva st., Perm, 614068, Russian Federation)<sup>2</sup>Perm National Research Polytechnic University (29 Komsomolskiy av., Perm, 614990, Russian Federation)

Получена / Received: 03.04.2024. Принята / Accepted: 30.09.2024. Опубликовано / Published: 31.10.2024

**Ключевые слова:**

месторождения нефти и газа, электронная микроскопия, нефтеносные песчаники, пористость, проницаемость, литология.

Целью исследований является применение методики изучения пустотного пространства потенциально нефтеносных продуктивных пластов методом электронной микроскопии. Проведены микроскопические исследования характерных участков поверхности зерна с оценкой микроструктуры пустотного пространства, особенностей зерен обломочного каркаса и заполнителя, микроструктуры цементирующего вещества. Выполнено сканирование поверхности образцов при разных увеличениях, микрондовый анализ с целью диагностики зерен обломочного каркаса, заполнителя, цементирующего и новообразованного вещества.

Изучена связь фильтрационно-емкостных свойств коллекторов с особенностями гранулометрического состава, пустотного пространства, состава и структуры цемента.

В составе коллекторов Соликамской впадины выделены группы, для которых установлена закономерная связь продуктивности с особенностями гранулометрического состава, пустотного пространства, состава и структуры цемента. Первая группа коллекторов характеризуется хорошей сортировкой и плотной упаковкой зерен кварцевого обломочного каркаса, небольшим количеством частиц заполнителя и цементирующего вещества, представленного каолинитом со структурой типа «книжный домик». Коллекторы с пониженной проницаемостью характеризуются повышенной долей цементирующего вещества, слабой сортировкой зерен за счет присутствия значительного количества частиц заполнителя в обломочном каркасе. Характерным признаком такого коллектора является менее совершенная микроструктура каолинита типа «книжный домик». Для исследованных алевролитов установлен разноразмерный гранулометрический состав, отсутствие сортировки зерен по крупности, неструктурированный каолинитовый цемент с отсутствием структур типа «книжный домик».

Литологические различия песчаников одного геологического возраста, определяющие их нефтеносность, обусловлены важной ролью фациальной обстановки осадконакопления и последующих процессов преобразования породы на стадиях диagenеза и катагенеза. Метод электронной микроскопии можно рекомендовать для более широкого применения в нефтегазовой геологии при оценке литологических особенностей нефтегазоносных коллекторов.

**Keywords:**

oil and gas fields, electron microscopy, oil sandstones, porosity, permeability, lithology.

The purpose of the research is to apply a technique for studying of the void space in potentially oil-bearing reservoirs using electron microscopy. Microscopic studies of characteristic areas of the core surface are carried out with an assessment of the void space microstructure, the characteristics of the fragmentary framework grains and filler, and the microstructure of the cementing substance. The surface of the samples is scanned at different magnifications, and microprobe analysis is carried out to diagnose the grains of the detrital framework, filler, cementing and newly formed substances.

The relationship between the filtration and capacitance properties of reservoirs and the characteristics of the granulometric composition, void space, composition and structure of cement has been studied.

A number of groups have been identified in the Solikamsk Depression reservoirs, for which a regular relationship between productivity and the features of granulometric composition, void space, composition and structure of cement has been established. The first group of reservoirs is characterized by good sorting and dense packing of quartz detrital framework grains, a small amount of filler particles and cementing substance represented by kaolinite with "book-like structure" type. Reservoirs with reduced permeability are characterized by an increased proportion of cementing substance, poor grain sorting due to the presence of a significant amount of filler particles in the detrital framework. A characteristic feature of such a reservoir is a less perfect microstructure of kaolinite of the "book-like structure" type. For the studied siltstones, a mixed-grained granulometric composition, no grain sorting by size, unstructured kaolinite cement with no "book-like structure" type have been established.

The lithological differences of sandstones of the same geological age, determining their oil-bearing capacity, are determined by the important role of the facies environment of sedimentation and subsequent processes of rock transformation at the stages of diagenesis and catagenesis. The electron microscopy method can be recommended for wider application in oil and gas geology when assessing the lithological features of oil and gas reservoirs.

© **Осовецкий Борис Михайлович** – доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры минералогии и петрографии, заслуженный деятель науки РФ (тел.: +007 (919) 476 33 26, e-mail: opal@psu.ru).

© **Казымов Константин Павлович** – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры минералогии и петрографии (тел.: +007 (342) 239 63 32, e-mail: kazymov@psu.ru).

© **Галкин Сергей Владиславович** – доктор геолого-минералогических наук, профессор, декан горно-нефтяного факультета (тел.: +007 (342) 219 81 18, e-mail: gnfd@pstu.ru). Контактное лицо для переписки.

© **Boris M. Osovetsky** (Author ID in Scopus: 55683368400, ORCID: 0000-0003-0766-5112) – Doctor in Geology and Mineralogy, Professor at the Department of Mineralogy and Petrography, Honored Scientist of the Russian Federation, (tel.: +007 (919)476 33 26, e-mail: opal@psu.ru).

© **Konstantin P. Kazymov** (Author ID in Scopus: 56692924600) – PhD in Geology and Mineralogy, Associate Professor at the Department of Mineralogy and Petrography (tel.: +007 (342) 239 63 32, e-mail: kazymov@psu.ru).

© **Sergei V. Galkin** (Author ID in Scopus: 36711675500, ORCID: 0000-0001-7275-5419) – Doctor in Geology and Mineralogy, Professor (tel.: +007 (342) 219 81 18, e-mail: gnfd@pstu.ru). The contact person for correspondence.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Осовецкий, Б.М. Возможности применения метода электронной микроскопии при изучении литологических особенностей нефтеносных песчаников / Б.М. Осовецкий, К.П. Казымов, С.В. Галкин // Недропользование. – 2024. – Т.24, №4. – С.178–185. DOI: 10.15593/2712-8008/2024.4.1

Please cite this article in English as:

Osovetsky B.M., Kazymov K.P., Galkin S.V. The potential applications of electron microscopy in studying the lithological characteristics of oil-bearing sandstones. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2024, vol.24, no.4, pp.178-185. DOI: 10.15593/2712-8008/2024.4.1

## Введение

Целью выполненных исследований является применение специализированной методики изучения пустотного пространства потенциально нефтеносных продуктивных пластов, основанной на данных сканирующей электронной микроскопии. Объектами исследования являются образцы зерна терригенных нефтяных залежей. Возможности изучения структуры пород методом электронной микроскопии имеют определенные ограничения, обусловленные небольшими размерами изучаемых образцов, в которых исследуются только детали строения поверхности (зерна, пустоты, агрегаты и т.д.). В то же время у данного метода есть и определенные преимущества: дополнительная информация о веществе, полученная на микроразмерном уровне изучения объекта, наглядная визуализация характерных микрообъектов, возможность определения химического состава индикаторных включений микронзондовым методом и др.

В научной литературе электронной микроскопии терригенных нефтяных коллекторов посвящено большое количество работ. Достигнуты большие успехи в изучении под электронным микроскопом пустотного пространства и цементирующего вещества [1–3], а также изучения вторичных процессов минералообразования [4–5].

В данном исследовании методом электронной микроскопии анализировались структуры и пустотное пространство терригенных коллекторов нефтяных месторождений Соликамской депрессии (Пермский край). При этом основной задачей являлось установление литологических показателей и признаков, выявляемых методами электронной микроскопии, которые связаны с продуктивностью пород.

## Постановка задачи. Материалы и методы

Объектом исследований являются коллекторы визейских отложений Соликамской депрессии, для территории которой в последние десятилетия открыто несколько относительно крупных нефтяных месторождений [6–8]. Визейский эксплуатационный объект является основным для территории Пермского края, его нефтеносность связана с перспективными терригенными коллекторами гранулярного (порового) типа. Следует отметить, что установление промышленной нефтеносности визейского коллектора, находящегося непосредственно под соляной залежью Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей, стало серьезным пополнением запасов нефти в регионе. В настоящее время перспективы визейского коллектора оцениваются очень высоко. В связи с этим в Пермском крае выполнен ряд исследований по обеспечению рациональной совместной разработки месторождений соли и нефти [9–11].

Для 33 визейских объектов Соликамской депрессии принятые Государственным балансом значения для  $K_n$  находятся в диапазоне от 11 до 17 % (в среднем – 14 %), для  $k$  – от 5 до 655 мД (в среднем – 173 мД). При этом граничные значения для коллекторов гранулярного типа, ниже которых порода принимается при подсчете запасов как неколлектор, приняты для объектов по  $K_n$  в диапазоне от 7 до 10,6 %, по  $k$  – от 0,75 до 2,5 мД. В целом широкий диапазон изменения фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) коллекторов позволяет сделать вывод о сложном литологическом строении продуктивных отложений с чередованием пластов с разной структурой.

Изученная в данной работе коллекция кернов представлена 11 образцами четырех месторождений нефти (Сибирское, Уньвинское, Шершневское и Жилинское) в широком диапазоне ФЕС с вариациями коэффициентов пористости ( $K_n$ ) от 3,9 до 21,5 % и проницаемости ( $k$ ) от 0,3 до 749 мД. Образцы с ФЕС выше установленных граничных значений коллекторов отнесены к песчаникам.

Согласно опыту разработки визейских отложений Соликамской депрессии, среди параметров ФЕС определяющее влияние на коэффициенты вытеснения нефти и производительность скважин оказывает проницаемость пород [12–14]. В работах [15–17] показано, что притоки флюидов могут быть получены из интервалов, которые по данным стандартного комплекса ГИС, то есть на основе оценки гранулярной пористости пород, отнесены к неколлекторам. В связи с этим в программу исследований дополнительно включен образец зерна, представленного алевритом с ФЕС ниже граничных значений коллекторов ( $K_n < 4$  %;  $k < 1$  мД). Необходимо заметить, что для территории исследования нефтяные залежи характеризуются низкой вязкостью (от 0,7 до 3,5 мПа·с), что определяет возможность производительной работы скважин даже в условиях коллекторов с относительно низкими ФЕС.

Аналитические исследования выполнены в Центре коллективного пользования с использованием уникального научного оборудования Пермского государственного национального исследовательского университета – сканирующего электронного микроскопа JSM 6390LV фирмы Jeol (Япония). Микронзондовый анализ объектов осуществлен с использованием энергодисперсионного спектрометра INCA ENERGY 350 (Oxford Instruments). Режим работы прибора: рабочее напряжение 30 кВ, рабочее расстояние 12 мм, сила тока – 10 мА.

Производилось фотографирование характерных участков поверхности кернового образца при разных увеличениях электронного микроскопа. При этом основными целями исследования являлись микроструктура пустотного пространства, особенности зерен обломочного каркаса и заполнителя, микроструктура цементирующего вещества и минеральные новообразования. Микронзондовым методом определялся химический состав компонентов и проводилась их диагностика с установлением минерального вида. Образцы зерна исследовались с изучением размеров, формы зерен и упаковки обломочных частиц, характера и элементов пустотного пространства, состава и микроструктуры цементирующего и вторичного вещества, являющегося результатом проявления наложенных процессов минералообразования. Проводились сканирование поверхности образцов при разных увеличениях (от десятков до нескольких тысяч крат), микрофотографирование характерных структур и микрообъектов, микронзондовый анализ с целью диагностики зерен обломочного каркаса, заполнителя, цементирующего и новообразованного вещества.

## Исследование пустотного пространства горных пород методами сканирующей электронной микроскопии

Пустотное пространство коллекторов является основным объектом исследований при использовании электронно-микроскопических методов [18, 19].

Микрокаверны. Наиболее крупными формами пустотного пространства в изученных коллекторах являются микрокаверны. Для обнаружения микрокаверн проводилось сканирование поверхности образца при увеличении микроскопа 50X. Сканирование показало,

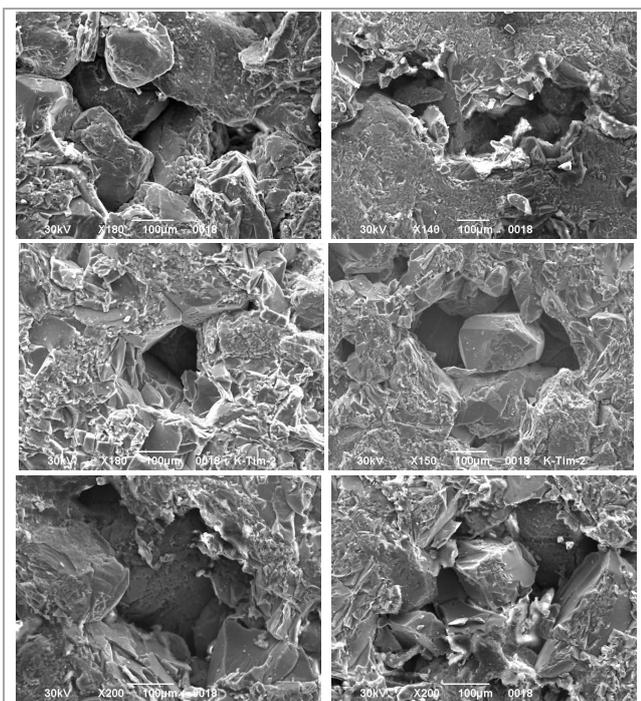


Рис. 1. Типичные микрокаверны в прослоях визейских песчаников с высокими фильтрационно-емкостными свойствами

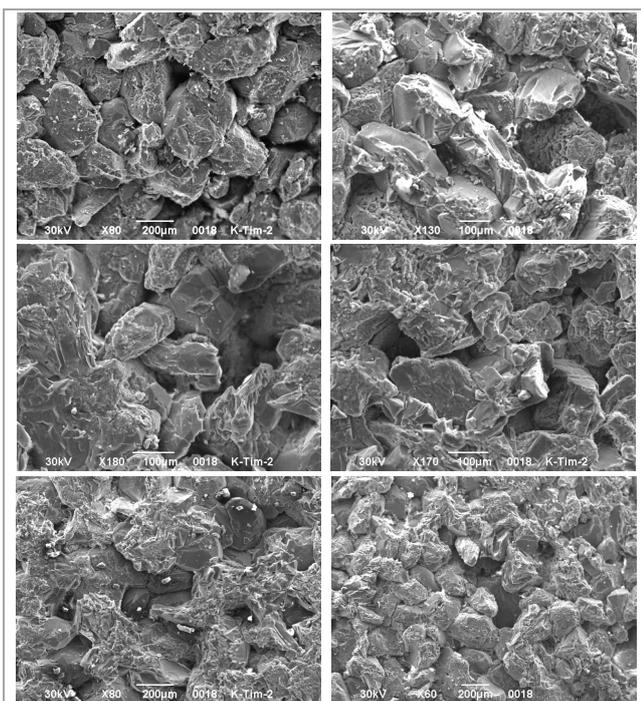


Рис. 2. Межзерновая пористость прослоев визейских песчаников с высокими фильтрационно-емкостными свойствами

что они особенно распространены в образцах кернов с высокими значениями ФЕС ( $K_{ц}$  – от 14,6 до 21,5%;  $k$  – от 147 до 749 мД).

Встречаемость микрокаверн заметно снижается в образцах керна, отобранных из прослоев песчаника с пониженной пористостью (11,4–13,6%) и проницаемостью (23,0–87,70 мД). Характерно, что в кернах наиболее плотного образца (алевролита) микрокаверны полностью отсутствуют.

Далее особенности строения пустотного пространства отдельных микрокаверн исследовались с использованием

электронно-микроскопических снимков, полученных при увеличении до 200X. Наиболее крупными по размерам являются микрокаверны удлиненной формы (некоторые более 1 мм по длинной оси и до 0,2 мм по короткой). Они нередко имеют ответвления в виде трещиноватых зон, которые являются их продолжением и выклиниванием. Другие микрокаверны имеют разную форму (изометрическую, неправильную, прямоугольную и др.) (рис. 1).

Обычно в той или иной степени пустоты микрокаверн заполнены зернами кварца, но с оставлением заметного объема пустотного пространства. Характерно, что в них крайне редко и в небольшом количестве присутствует цементирующее вещество.

Межзерновые пустоты. Существенную часть пустотного пространства песчаников составляют межзерновые поры. Выявляются существенные различия в характере межзерновой пустотности для песчаников, различающихся по значениям пористости и проницаемости, что позволяет разделить их на две группы.

К первой группе можно отнести образцы песчаников с высокими значениями ФЕС, т.е. те же, которые отличались присутствием микрокаверн. Сканирование поверхности таких образцов при изучении межзерновых пустот проводилось с применением небольших увеличений микроскопа (от 60X до 180X). Межзерновые поры в них имеют локальное распространение, размеры пустот обычно варьируются от 0,3 до 0,1 мм. Формы межзерновых пустот – треугольные, угловатые, прямоугольные, щелевидные и др. (рис. 2). Нередко соседние поры соединяются друг с другом с образованием протяженных каналов извилистой формы.

Характер такой межзерновой пористости является результатом формирования еще на стадии седиментогенеза особой структуры обломочного каркаса песчано-гравийного осадка, сложенного в основном хорошо сортированными по крупности зернами кварца. На стадиях диа- и катагенеза формируется порода, основной которой является тот же обломочный каркас. В гранулометрическом составе такого песчаника выделяется одна мода на гистограмме распределения зерен по крупности. Соответствующая этому типу коллектора одномодальная гистограмма гранулометрического состава песчаника представлена на рис. 3.

В природных условиях такой состав характерен для крупно- и среднезернистых песчаников, формирование которых на стадии седиментогенеза происходило в обстановках с активной динамикой водного потока (речные русловые и прибрежно-морские фации). Активная динамика водной среды на протяжении всего периода осадконакопления является необходимым условием для достижения высокой степени сортировки зерен по крупности. Межзерновое пространство в таких песчаниках практически остается незаполненным. При этом размеры межзерновых пор являются функцией размеров зерен обломочного каркаса и плотности их упаковки.

При изучении таких структур под электронным микроскопом выявляются достаточно плотная упаковка зерен обломочного каркаса (в основном – зерна кварца, реже – полевые шпаты) и незначительное количество частиц заполнителя между ними. За счет этого структура песчаника отличается широким развитием межзерновых пор, нередко соприкасающихся друг с другом с образованием протяженных извилистых каналов. Характерно также незначительное количество цементирующего глинистого и другого новообразованного вещества.

Применяемая к данному типу коллекторов модель одномодального распределения песчаных частиц с островершинной модой (в данном случае 0,4–0,315 мм) обломочного каркаса предопределяет размер межзерновых пор порядка 0,2 мм (рис. 3). Вариации значений проницаемости для такого коллектора, кроме того, во многом определяются плотностью упаковки зерен обломочного каркаса. Последняя в основном контролируется их формой, которая достаточно корректно определяется под электронным микроскопом. Для данных коллекторов она близка к изометрической, что определяет наличие большого объема межзернового пустотного пространства.

Кроме того, форма зерен кварца в обломочном каркасе характеризует также степень их окатанности, которая свидетельствует о фациальных условиях осадконакопления. Среди зерен кварца коллекторов данной группы обычно преобладают среднеокатанные, что соответствует фациальным обстановкам речных бассейнов. Однако некоторые зерна слабоокатаны, причем на их поверхности сохраняются гладкие фрагменты граней первичных кристаллов. Данный признак свидетельствует о присутствии в породе зерен, поступивших из разных источников питания обломочного материала, что можно использовать при детальных палеогеографических построениях.

В подчиненном количестве в составе зерен обломочного каркаса песчаников изученных месторождений присутствуют полевые шпаты. В отличие от зерен кварца, они подвергаются заметному воздействию катагенетических процессов (например, каолинизации). Данную особенность с оценкой интенсивности указанного процесса можно использовать при установлении этапа катагенеза, что является важным диагностическим признаком потенциальной нефтегазоносности геологического разреза.

Ко второй группе отнесены керны пород, для которых наряду с зернами обломочного каркаса выявляется присутствие обломочных частиц заполнителя. Последние располагаются в пустотах между зернами обломочного каркаса. Причиной их появления является изменение фациальной обстановки осадконакопления с чередованием режимов высокой и пониженной скорости потока. Заполнение межзерновых пор зернами заполнителя приводит к заметному снижению ФЭС коллектора.

Для учета особенностей гранулометрического состава таких коллекторов может быть использована модель с бимодальной гистограммой распределения частиц по крупности (рис. 4). На такой гистограмме первый пик соответствует зернам обломочного каркаса (обычно 0,4–0,315 или 0,315–0,25 мм), второй – частицам заполнителя (обычно 0,16–0,125 или 0,125–0,1 мм).

Особенности пространственного размещения зерен коллекторов данного типа отчетливо выявляются на электронно-микроскопических снимках (рис. 5). По минеральному составу заполнитель представлен в основном зернами кварца, но присутствует и достаточно много зерен полевых шпатов. Характерными морфологическими особенностями зерен заполнителя являются более слабая степень окатанности, обилие остроугольных индивидов и присутствие зерен с совершенной кристаллографической огранкой.

К отдельной группе относится алевролитистый образец, который отличается по всем литологическим признакам от песчаников. Наиболее важной особенностью данного типа пород, выявляемой под электронным микроскопом, является отсутствие обломочного каркаса, причиной чего может быть недостаточное количество крупных зерен кварца (рис. 6).

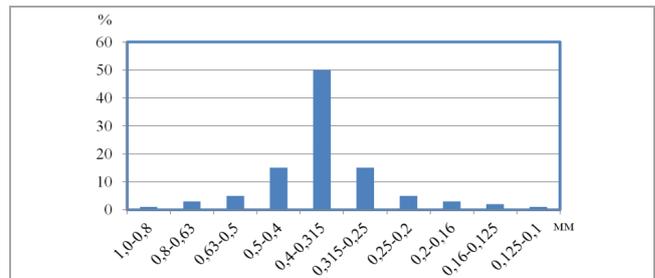


Рис. 3. Модель гистограммы с одномодальным грансоставом фракции песчаников с высокими фильтрационно-емкостными свойствами

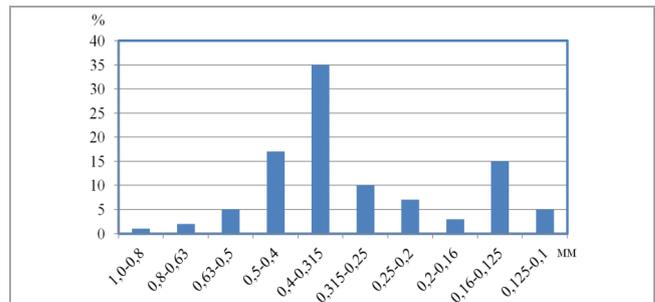


Рис. 4. Модель гистограммы с одномодальным грансоставом фракции песчаников с пониженными фильтрационно-емкостными свойствами

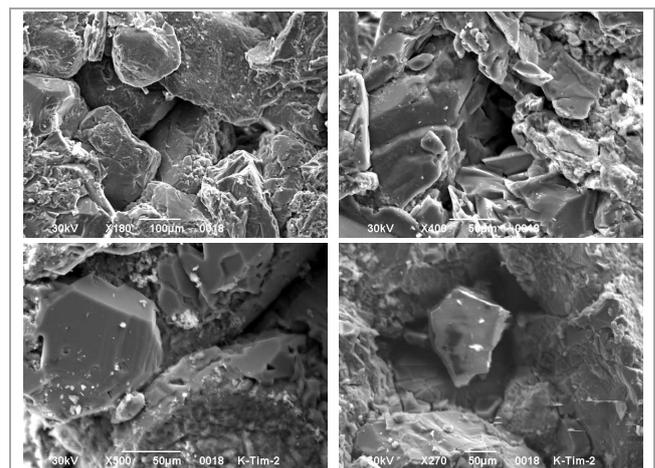


Рис. 5. Зерна заполнителя в межзерновых пустотах песчаников

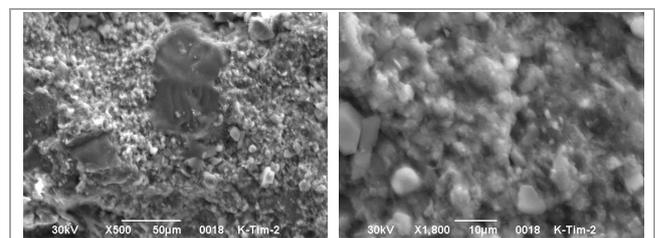


Рис. 6. Фрагменты структуры алевролита

Моделью гранулометрического состава данного типа является бимодальная гистограмма распределения обломочных частиц, но с преобладанием моды алевролитовой размерности (рис. 7). Для данной модели отсутствуют типичные для песчаников крупные межзерновые поры, однако достаточно широко распространены мелкие межзерновые пустоты размером до 10 мкм. Формирование такой структуры возможно только в условиях неустойчивой фациальной обстановки осадконакопления при крайне слабом участии периодов с активной динамикой водного потока.

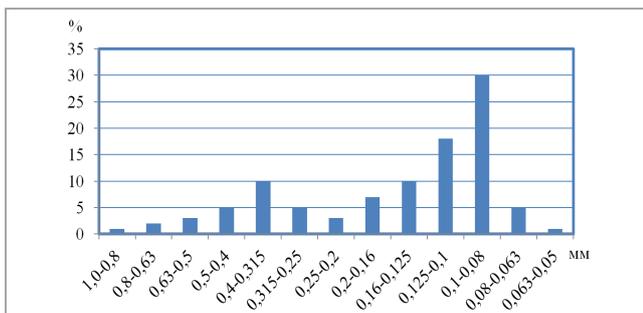


Рис. 7. Модель гистограммы грансостава алевролитовой фракции

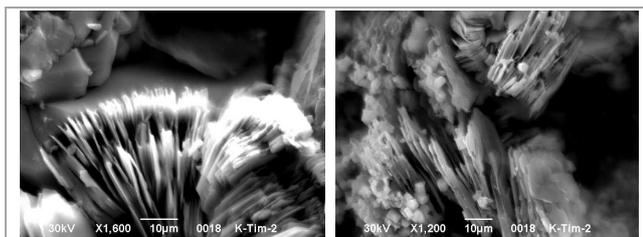


Рис. 8. Совершенные агрегаты каолинита типа «книжный домик» в песчанике с высокими фильтрационно-емкостными свойствами

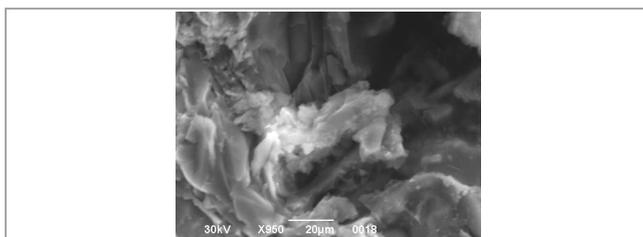


Рис. 9. Каолинитизированное зерно полевого шпата

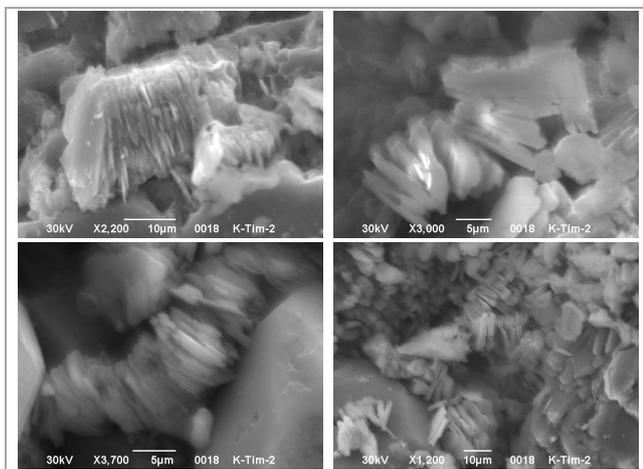


Рис. 10. Структуры каолинита типа «книжный домик» в песчанике с пониженными фильтрационно-емкостными свойствами

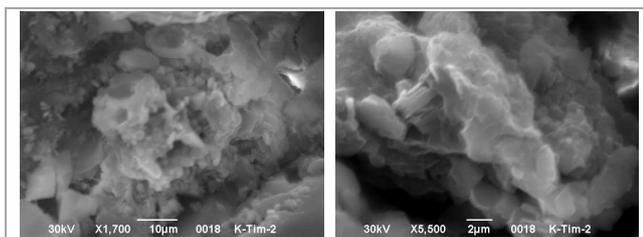


Рис. 11. Агрегаты каолинита в цементирующем веществе алевролита

### Исследование цементирующего вещества горных пород методами сканирующей электронной микроскопии

Особенности строения цементирующего вещества в коллекторах рассматриваются в многочисленных работах [20, 21]. При этом в мировой литературе особое внимание уделяется каолиническому цементу в связи со спецификой его преобразования на разных этапах катагенеза [22, 23].

Цементирующее вещество в визейских песчаниках Соликамского района имеет локальное распространение. Оно обнаружено только в некоторых межзерновых пустотах и прежде всего представлено агрегатами частиц каолинита. В песчаниках с высокой пористостью и проницаемостью каолинит образует характерные микроструктуры типа «книжный домик», заметно различающиеся по степени совершенства. По характеру агрегатов каолинита в изученных песчаниках отмечается отчетливое разделение их на те же две группы, которые были выделены при изучении гранулометрического состава.

Для первой группы характерны наиболее совершенные структуры агрегатов каолинита типа «книжный домик». Особенностью таких структур является присутствие колонн (пакетов), сложенных пластинчатыми новообразованными частицами каолинита в субпараллельной ориентации (рис. 8). Наиболее совершенные структуры каолинита присутствуют только в отдельных образцах песчаников, отличающихся наиболее высокими ФЕС.

Исходным веществом для их образования являлись зерна полевых шпатов в составе обломочного каркаса или заполнителя, которые отличаются неустойчивостью к воздействию факторов катагенеза (подземные воды, сера, органическое вещество и т.д.). В качестве примера приведено частично каолинитизированное зерно полевого шпата, обнаруженное в составе заполнителя (рис. 9).

Вторая группа структур «книжного домика» отличается менее совершенной структурой, что выражается в меньших размерах колонн, нарушениями в их строении и др. (рис. 10). Такие структуры свойственны для песчаников, характеризующихся пониженными значениями ФЕС.

В образце алевролита структуры типа «книжный домик» не обнаружены. Примечательно, что цементирующее вещество в данном случае широко распространено и по составу также является каолинитовым (рис. 11). Однако каолинит здесь образует плотные бесформенные скопления, в которых в небольшом количестве присутствуют межагрегатные и внутриагрегатные пустоты размером до 5 мкм.

Определенная связь степени совершенства структур типа «книжный домик» с продуктивностью коллекторов обусловлена влиянием данного фактора на значения коэффициентов пористости и проницаемости коллекторов. Причиной является увеличение объема микропустотного пространства в виде межагрегатных пустот между новообразованными пластинками каолинита. Последние возникли на стадии катагенеза в процессе укрупнения первичных (гипергенного происхождения) частиц. Благоприятным фактором, способствующим повышенной нефтеносности пластов, является также гидрофобность пластин каолинита.

Надежным индикатором мономинерального каолинитового состава цементирующего вещества песчаников с агрегатами типа «книжный домик» являются данные микронзондового анализа (табл. 1). Среди сопутствующих элементов несколько выделяется присутствие кальция, что является следствием сопутствующего процесса карбонатизации.

Таблица 1

Химический состав агрегатов каолинита типа «книжный домик», мас. %

Оксид	Номер агрегата									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO <sub>2</sub>	47,70	52,15	46,04	54,46	57,01	49,21	48,13	43,49	42,13	47,86
TiO <sub>2</sub>	0,28	0,24	–	0,10	0,53	0,08	–	0,06	–	0,05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36,97	33,13	38,89	30,77	26,99	35,59	36,33	42,07	37,40	32,76
CaO	0,12	0,23	–	0,19	0,62	–	1,44	0,06	2,15	0,02
MgO	0,16	–	–	–	0,15	0,19	0,06	–	0,08	–
FeO*	0,14	0,10	0,04	0,42	0,37	0,53	–	0,13	0,03	0,21
K <sub>2</sub> O	0,30	0,16	0,07	0,07	0,34	0,39	0,04	0,11	0,11	0,09
Na <sub>2</sub> O	–	–	–	–	–	–	–	0,08	0,09	–

Таблица 2

Химический состав оксидных минеральных новообразований, мас. %

Оксид	Номер анализа						
	1	2	3	4	5	6	7
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	–	2,52	–	–	–	–	–
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	–	–	36,44	34,75	–	–	–
SO <sub>3</sub>	–	–	1,12	3,98	0,22	2,65	1,29
SiO <sub>2</sub>	9,77	3,30	14,45	14,75	3,60	–	12,37
TiO <sub>2</sub>	89,41	90,50	–	–	0,95	3,74	0,19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,64	0,55	2,27	1,67	1,10	–	6,24
CaO	0,03	0,20	39,14	37,21	0,43	0,38	4,77
MgO	–	0,08	–	–	–	–	8,07
FeO*	0,13	2,76	0,09	1,89	–	–	65,79
MnO	–	0,06	–	–	–	–	–
BaO	–	–	–	–	0,35	0,94	–
CuO	–	–	–	–	38,38	29,66	–
K <sub>2</sub> O	0,03	0,03	–	–	–	–	0,99
Na <sub>2</sub> O	–	–	0,49	0,32	–	–	0,30
F	–	–	5,96	5,43	–	–	–
Cl	–	–	0,04	–	–	–	–

Примечание: лейкоксен: 1 – Уньвинское месторождение, 2 – Сибирское месторождение (см. рис. 12, 1); апатит: 3, 4 – Сибирское месторождение (см. рис. 12, 3, 4); малахит: 5, 6 – Сибирское месторождение (см. рис. 12, 5, 6), 7 – железистая минерализация, Уньвинское месторождение.

Таблица 3

Химический состав новообразований пирита, мас. %

Элемент	Месторождение	
	Уньвинское	Сибирское
Fe	43,94	45,33
S	55,05	54,31
Ti	0,79	–
Co	0,22	0,18
As	–	0,18

Образование структур типа «книжный домик» происходит на этапе мезокатагенеза, что наиболее благоприятно для потенциальной продуктивности коллекторов. Данные структуры являются чрезвычайно чувствительными к факторам катагенеза (рН среды, сопутствующие наложенные процессы и др.), что позволяет использовать их при более детальном анализе изменений породы на стадии катагенеза, оценке особенностей микропустотного пространства и в целом при прогнозировании нефтеносности пород.

**Изучение наложенных процессов минералообразования методами сканирующей электронной микроскопии**

Постседиментационные изменения в коллекторах обычно заметно влияют на потенциальную нефтегазоносность горных пород. Нередко их пористость и проницаемость существенно преобразуются на стадиях диагенеза и катагенеза за счет заполнения новообразованным веществом пустотного пространства. Так, именно процесс интенсивной природной цементации обусловил существенное снижение ФЕС для керны алевролитовых пород. В кернах, представленных песчаниками, с применением микронзондового анализа

зафиксированы следующие процессы вторичного минералообразования: лейкоксенизация, пиритизация, фосфатизация, ожелезнение и проявления медистой минерализации (рис. 12, табл. 2, 3).

Процесс лейкоксенизации приводит к появлению плотных агрегатов размером более 0,1 мм, состоящих из тонкослоистых наростов лейкоксена, заполняющих отдельные пустоты между зернами обломочного каркаса. Процесс пиритизации обуславливает появление пакетов хорошо образованных кристаллов пирита пластинчатого облика в параллельной ориентировке, а также тонкозернистых агрегатов. Отмечен также процесс фосфатизации с образованием агрегатов кристаллов апатита пластинчатого или столбчатого облика. Наконец, обнаружена наложенная медистая минерализация в виде выделений агрегатов малахита.

Роль описанных наложенных процессов заключается в установлении участия органического вещества коллектора во вторичном минералообразовании как специфического фактора катагенеза. Тем самым они могут служить дополнительным индикатором их нефтеносности. При этом учитывается, что все участвующие в наложенных процессах химические элементы (Fe, Ti, P, S, Cu, V) являются типичными примесями в органике.

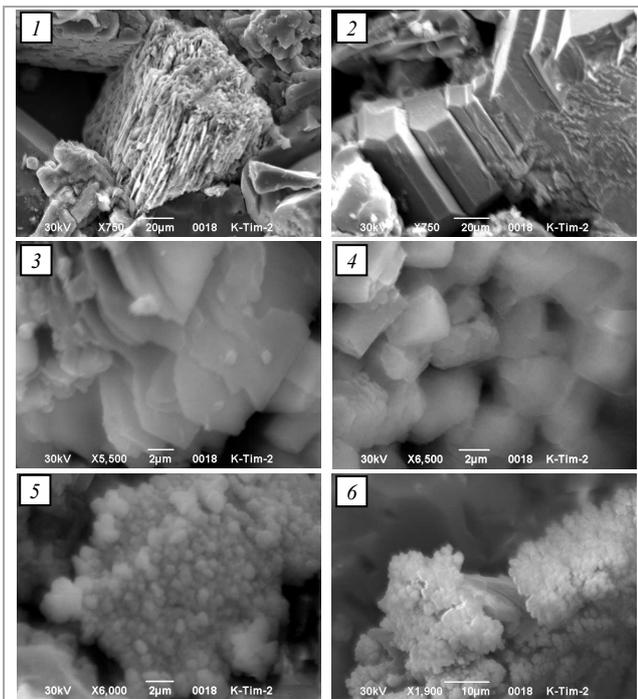


Рис. 12. Вторичные новообразования в нефтеносных песчаниках: 1 – лейкоксит; 2 – лейцит; 3, 4 – апатит; 5, 6 – малахит

В то же время преобразование пустотного пространства коллекторов за счет наложенных процессов минералообразования оказалось не столь существенным вследствие локального их проявления. Оно сводится к частичному заполнению некоторых межзерновых пустот и появлению генерации новообразованных межзерновых пор размером до 5 мкм.

### Заключение

Методы электронной микроскопии позволяют выявить и детально исследовать литологические особенности терригенных продуктивных пластов. В целом ФЭС коллекторов во многом определяется структурными особенностями осадка, которые закладываются на стадии седиментогенеза и определяются фациальной обстановкой осадконакопления. Основную роль при этом играют процессы формирования обломочного каркаса, состоящего обычно из зерен

### Библиографический список

1. Ситдикова, Л.М. Геодинамические условия формирования деструкционных резервуаров / Л.М. Ситдикова, В.Г. Изотов // Георесурсы. – 2003. – № 4. – С. 17–22.
2. Ситдикова, Л.М. Механизм формирования пустотно-порового пространства нетрадиционных коллекторов глубоких горизонтов фундамента Татарского свода / Л.М. Ситдикова // Георесурсы. – 2006. – № 1(16). – С. 18–21.
3. Рыжов, А.Е. Особенности строения пустотного пространства пород-коллекторов ботуобинского горизонта Чайядинского месторождения / А.Е. Рыжов, Т.А. Перунова, Д.М. Орлов // Вести газовой науки. – 2011. – № 4. – С. 182–174.
4. О постседиментационных изменениях в породах юрско-неокомских пластов, их влиянии на коллекторские свойства и нефтеотдачу / И.Ю. Вильковская, З.Я. Сердюк, Л.И. Зубарева [и др.] // Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории. – 2013. – Т. 1. Новосибирск. – С. 163–167.
5. Кузьмин, В.А. Результаты исследования микростроения терригенных пород-коллекторов нефти и газа методами растровой электронной микроскопии / В.А. Кузьмин // Поверхность, рентгеновский, синхротронные и нейтронные исследования. – 2020. – № 6. – С. 106–112. DOI: 10.31857/S1028096020060114
6. Варушкин, С.В. Использование данных о газосодности толщ Соликамской депрессии для прогнозирования нефтегазосодности подсолевых отложений / С.В. Варушкин // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2020. – Т. 15, № 2. – С. 9–10. DOI: 10.17353/2070-5379/21\_2020
7. Волкова, А.С. Выбор приоритетных направлений развития ресурсной базы углеводородов соликамской депрессии с применением вероятностно-статистических методов / А.С. Волкова, С.Н. Кривошеков // Вестник Пермского государственного технического университета. Геология, геоинформационные системы, горно-нефтяное дело. – 2010. – Т. 9, № 5. – С. 23–30.
8. Щербаков, А.А. Оценка эффективности мероприятий по интенсификации добычи нефти (на примере месторождений Соликамской депрессии) / А.А. Щербаков, Г.П. Хижняк, В.И. Галкин // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2019. – № 2. – С. 70–73. DOI: 10.30713/2413-5011-2019-2-70-73
9. Толкачев, Г.М. Технология и опыт строительства скважин для решения задач комплексного освоения калийных и нефтяных месторождений / Г.М. Толкачев, А.С. Козлов // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. – № 12. – С. 29–32.
10. Козлов, А.С. Об использовании магнезиальных цементов при строительстве нефтяных и газовых скважин / А.С. Козлов, А.М. Пастухов, Н.В. Козлов // Нефть. Газ. Новации. – 2021. – № 8 (248). – С. 85–88.
11. Перспективы использования магнезиальных тампонажных материалов при освоении недр подземными горными выработками / Г.М. Толкачев, А.С. Козлов, А.М. Шилов, А.В. Анисимова // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 187–189.
12. Поплыгин, В.В. Прогнозная экспресс-оценка показателей разработки нефтяных залежей / В.В. Поплыгин, С.В. Галкин // Нефтяное хозяйство. – 2011. – № 3. – С. 112–115.
13. Гладких, Е.А. Применение многомерных моделей для оценки коэффициента вытеснения нефти на примере визейских продуктивных отложений Соликамской депрессии / Е.А. Гладких // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 4. – С. 58–61. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-04-58-61

кварца. Важными компонентами терригенного коллектора являются минеральные зерна заполнителя и состав цементирующего вещества. Наложённые процессы диагенеза и катагенеза особенно воздействуют на пустотное пространство, во многом определяют минеральный состав и микроструктуру цементирующего вещества. В целом применение методов электронной микроскопии позволяет выявить многие особенности пород, влияющие на их пористость, проницаемость и потенциальную нефтеносность,

В составе изученных песчаных коллекторов Соликамской впадины выделены две группы, для которых установлена закономерная связь продуктивности с особенностями гранулометрического состава, пустотного пространства, состава и структуры цемента.

Первая группа коллекторов характеризуется хорошей сортировкой и плотной упаковкой зерен кварцевого обломочного каркаса, небольшим количеством частиц заполнителя и цементирующего вещества, представленного каолинитом со структурой типа «книжный домик».

Вторая группа коллекторов с пониженной проницаемостью характеризуется слабой сортировкой зерен за счет присутствия значительного количества частиц заполнителя в обломочном каркасе, что существенно снижает их ФЭС. Повышенная доля цементирующего вещества также способствует снижению пористости и проницаемости. Характерным индикаторным признаком такого коллектора является менее совершенная микроструктура каолинита типа «книжный домик».

Для исследованного керна алевролита установлены следующие литологические особенности: разномасштабный гранулометрический состав, отсутствие сортировки зерен по крупности, неструктурированный каолинитовый цемент с отсутствием структур типа «книжный домик».

Столь существенные литологические различия песчаников одного геологического возраста, определяющие их нефтеносность, обусловлены важной ролью фациальной обстановки осадконакопления и последующих процессов преобразования породы на стадиях диагенеза и катагенеза. Важным индикатором этих процессов является микроструктура глинистого вещества.

Литологические индикаторные признаки, исследуемые методами электронной микроскопии и описанные в статье, можно рекомендовать для более широкого применения в нефтегазовой геологии.

14. Гладких, Е.А., Хижняк Г.П., Галкин В.И. Влияние фильтрационно-емкостных свойств объектов разработки на величину коэффициента вытеснения нефти в различных геолого-физических условиях / Е.А. Гладких, Г.П. Хижняк, В.И. Галкин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329, № 7. – С. 77–85.
15. Belhouchet, H. Reservoir compartmentalization and fluid property determination using a modular dynamic tester (MDT): case study of an Algerian oil field / H. Belhouchet, M. Benzagouta // Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration. – 2021. – DOI: 10.1007/s41207-020-00216-5
16. Martyushev, D.A. Evaluation of opening of fractures in the Logovskoye carbonate reservoir / D.A. Martyushev, A. Yurikov // Petroleum Research. – 2021. – Vol. 6 (2). – P.137–143. DOI: 10.1016/j.ptlrs.2020.11.002
17. Тюрина, Г.В. Применение модульного динамического испытателя пластов на каротажном кабеле для уточнения фильтрационных характеристик продуктивных пластов Маговского нефтяногазоконденсатного месторождения / Г.В. Тюрина // Недропользование. – 2023. – Т. 23, №1. – С. 25–31. DOI: 10.15593/2712-8008/2023.1.4
18. Калмыкова, Г.А. Модель нефтенасыщенности порового пространства пород баженовской свиты Западной Сибири и ее использование для оценки ресурсного потенциала / Г.А. Калмыкова, Н.С. Балущкина. – М.: ГЕОС. – 2017. – 247 с.
19. Япаскурт, О.В. Вопросы и проблемы теории интрастратиферных процессов формирования и преобразования вещества осадочных пород – их эпигенеза / О.В. Япаскурт // Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории. – 2013. – Т.3. – С. 337–340.
20. Тимонина, Н.Н. Условия формирования коллекторов в нижнетриасовых отложениях Тимано-Печорской нефтяногазодносной провинции / Н.Н. Тимонина // Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории. – 2013. – Т.3. – С. 206–209.
21. Шмырина, В.А. Седиментологические и литогенетические факторы, определяющие коллекторские свойства терригенных пород / В.А. Шмырина, В.Т. Морозов, Я.Х. Саегалева // Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории. – 2013. – Т.3. – С. 303–305.
22. Ерошев-Шак, В.А. Размерность и форма минералов семейства каолинита разного генезиса и возраста / В.А. Ерошев-Шак, В.А. Богатырев // Концептуальные проблемы литологических исследований в России. Казань. – 2011. – Т.1. – С. 293–297.
23. Осовецкий, Б.М. Катагенетический каолинит в терригенных коллекторах / Б.М. Осовецкий // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. – Пермь: Перм. ун-т. – 2020. – Т. 23. – С. 129–139.

## References

1. Sitdikova L.M., Izotov V.G. Geodinamicheskie usloviia formirovaniia destruktivnykh rezervuarov [Geodynamic conditions for the formation of destructive reservoirs]. *Georesursy*, 2003, no. 4, pp. 17–22.
2. Sitdikova L.M. Mekhanizm formirovaniia pustotno-porovogo prostranstva netraditsionnykh kollektorov glubokikh gorizontov fundamenta Tatarskogo svoda [The mechanism of formation of void-pore space of unconventional collectors of deep horizons of the basement of the Tatar arch]. *Georesursy*, 2006, no. 1 (16), pp. 18–21.
3. Ryzhov A.E., Perunova T.A., Orlov D.M. Osobennosti stroeniia pustotno-porovogo prostranstva porod-kollektorov botuobinskogo gorizonta Chaiandinskogo mestorozhdeniia [Features of the structure of the void space of reservoir rocks of the Botuobinsky horizon of the Chaiandinskoye field]. *Vesti gazovoi nauki*, 2011, no. 4, pp. 182–174.
4. Vil'kovskaiia I.Iu., Serdiuk Z.Ia., Zubareva L.I. et al. O postsedimentatsionnykh izmeneniakh v porodakh iursko-neokomskikh plastov, ikh vliianiia na kollektorskie svoistva i nefteotdachu [On post-sedimentary changes in rocks of Jurassic-Neocomian formations, their influence on reservoir properties and oil recovery]. *Osadochnye basseiny, sedimentatsionnye i postsedimentatsionnye protsessy v geologicheskoi istorii*, 2013, vol. 1, pp. 163–167.
5. Kuz'min V.A. Rezul'taty issledovaniia mikrostroueniia terrigenykh porod-kollektorov nef'ti i gaza metodami rastrovoy elektronnoi mikroskopii [Results of study of microstructure of terrigenic rocks-collectors of oil and gas by scanning electron microscopy methods]. *Poverkhnost', rentgenovskii, sinkhrotronnyy i neutronnyy issledovaniia*, 2020, no. 6, pp. 106–112. DOI: 10.31857/S1028096020060114
6. Varushkin S.V. Ispol'zovanie dannykh o gazonosnosti solenosnoi tolshchi Solikamskoi depressii dlia prognozirovaniia neftegazonosnosti podsolevykh otlozhenii [Using data on the gas capability of the salt section of the Solikamsk Depression for the forecasting of petroleum possibility of subsalt sequences]. *Neftegazovaiia geologii. Teoriia i praktika*, 2020, vol. 15, no. 2, pp. 9–10. DOI: 10.17353/2070-5379/21\_2020
7. Volkova A.S., Krivoshechekov S.N. Vyb'or prioritnykh napravlenii razvitiia resursnoi bazy uglevodorodov solikamskoi depressii s primeneniem veroiatnostno-statisticheskikh metodov [Selection of hydrocarbon resource base priorities of Solikamskaya depression using probabilistic and statistical methods]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Geologii, geoinformatsionnye sistemy, gorno-neftianoe delo*, 2010, vol. 9, no. 5, pp. 23–30.
8. Shcherbakov A.A., Khizhniak G.P., Galkin V.I. Otsenka effektivnosti meropriiati po intensifikatsii dobychi nef'ti (na primere mestorozhdenii Solikamskoi depressii) [Effectiveness evaluation of oil production stimulation measures (on the example of the Solikamsk depression fields)]. *Geologii, geofizika i razrabotka nef'tiannykh i gazovykh mestorozhdenii*, 2019, no. 2, pp. 70–73. DOI: 10.30713/2413-5011-2019-2-70-73
9. Tolkachev G.M., Kozlov A.S. Tekhnologii i opyt stroitel'stva skvazhin dlia resheniia zadach kompleksnogo osvoeniia kaliinykh i nef'tiannykh mestorozhdenii [Technologies and experience in well construction for solving problems of integrated development of potash and oil deposits]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*, 2011, no. 12, pp. 29–32.
10. Kozlov A.S., Pastukhov A.M., Kozlov N.V. Ob ispol'zovanii magnezial'nykh tsementov pri stroitel'stve nef'tiannykh i gazovykh skvazhin [On the use of magnesia cements for the construction of oil and gas wells]. *Nef't. Gaz. Novatsii*, 2021, no. 8 (248), pp. 85–88.
11. Tolkachev G.M., Kozlov A.S., Shilov A.M., Anisimova A.V. Perspektivy ispol'zovaniia magnezial'nykh tamponazhnykh materialov pri osvoenii nedr podzemnymi gornymi vyrabotkami [Prospects of use of the magnesian plugging materials for resources development by mine workings]. *Vestnik Kyrgyzsko-Rossiiskogo Slavianskogo universiteta*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 187–189.
12. Poplygin V.V., Galkin S.V. Prognoznoia ekspress-otsenka pokazatelei razrabotki nef'tiannykh zalezhei [Forecast quick evaluation of the indices of the development of the oil deposits]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2011, no. 3, pp. 112–115.
13. Gladkikh E.A. Primenenie mnogomernykh modelei dlia otsenki koeffitsienta vytesneniia nef'ti na primere vizeiskikh produktivnykh otlozhenii Solikamskoi depressii [Application of multidimensional models for the evaluation of oil displacement efficiency in the Visean productive sediments of the Solikamsk depression]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2018, no. 4, pp. 58–61. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-04-58-61
14. Gladkikh E.A., Khizhniak G.P., Galkin V.I. Vliianiie fil'tratsionno-emkostnykh svoystv ob'ektov razrabotki na velichinu koeffitsienta vytesneniia nef'ti v razlichnykh geologicheskikh usloviakh [Influence of filtration capacitive properties of development objects on the value of oil displacement efficiency in various geological and physical conditions]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2018, vol. 329, no. 7, pp. 77–85.
15. Belhouchet H., Benzagouta M. Reservoir compartmentalization and fluid property determination using a modular dynamic tester (MDT): case study of an Algerian oil field. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 2021. DOI: 10.1007/s41207-020-00216-5
16. Martyushev D.A., Yurikov A. Evaluation of opening of fractures in the Logovskoye carbonate reservoir. *Petroleum Research*, 2021, vol. 6 (2), pp. 137–143. DOI: 10.1016/j.ptlrs.2020.11.002
17. Tiurina G.V. Primenenie modul'nogo dinamicheskogo ispytatiel'ia plastov na karotazhnom kabele dlia utocneniia fil'tratsionnykh kharakteristik produktivnykh plastov Magovskogo neftegazokondensatnogo mestorozhdeniia [Application of a Modular Dynamic Formation Tester on a Wire Line to Refine the Filtration Characteristics of the Production Formations of the Magovsky Oil and Gas Condensate Field]. *Nedropol'zovanie*, 2023, vol. 23, no. 1, pp. 25–31. DOI: 10.15593/2712-8008/2023.1.4
18. Kalmykova G.A., Balushkina N.S. Model' neftenasyshchennosti porovogo prostranstva porod bаженовской свиты Западной Сибири и ee ispol'zovanie dlia otsenki resursnogo potentsiala [Model of oil saturation of pore space of rocks of the Bazhenov formation of Western Siberia and its use for resource potential assessment]. Moscow: GEOS, 2017, 247 p.
19. Iapaskurt O.V. Voprosy i problemy teorii vnutristratifernykh protsessov formirovaniia i preobrazovaniia veshchestva osadochnykh porod - ikh epigenеза [Questions and problems of the theory of intrastratigraphic processes of formation and transformation of sedimentary rocks - their epigenesis]. *Osadochnye basseiny, sedimentatsionnye i postsedimentatsionnye protsessy v geologicheskoi istorii*, 2013, vol. 3, pp. 337–340.
20. Timonina N.N. Usloviia formirovaniia kollektorov v nizhnetriasovykh otlozheniakh Timano-Pechorskoi neftegazonosnoi provintsi [Conditions of reservoir formation in the Lower Triassic deposits of the Timan-Pechora oil and gas province]. *Osadochnye basseiny, sedimentatsionnye i postsedimentatsionnye protsessy v geologicheskoi istorii*, 2013, vol. 3, pp. 206–209.
21. Shmyrina V.A., Morozov V.T., Saetgaleev Ia.Kh. Sedimentologicheskie i litogeneticheskie fакторы, opredeliaushchie kollektorskie svoistva terrigenykh porod [Sedimentological and lithogenic factors determining the reservoir properties of terrigenous rocks]. *Osadochnye basseiny, sedimentatsionnye i postsedimentatsionnye protsessy v geologicheskoi istorii*, 2013, vol. 3, pp. 303–305.
22. Eroshchev-Shak V.A., Bogatyrev B.A. Razmernost' i forma mineralov semeistva каолинита raznogo genезisa i vozrasta [Size and shape of minerals of the kaolinite family of different genesis and age]. *Kontseptualnye problemy litologicheskikh issledovaniy v Rossii. Kazan'*, 2011, vol. 1, pp. 293–297.
23. Osovetskii B.M. Katageneticheskii каолинит в terrigenykh kollektorakh [Catagenetic kaolinite in terrigenous collectors]. *Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii. Perm'*: Permskii universitet, 2020, vol. 23, pp. 129–139.

Благодарность. Работы выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования уникальным научным оборудованием ПНИУ и Центра фильтрационно-емкостных свойств горных пород ПНИПУ.

Финансирование. Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0005).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.