

*О. Н. Злобина<sup>1</sup>*

## **Особенности преобразования глинистых минералов в мезозойских нефтегазоносных отложениях севера Средней Сибири**

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация  
\* e-mail: ZlobinaON@ipgg.sbras.ru

**Аннотация.** Представлены результаты исследования седиментационных и постседиментационных преобразований глинистых минералов в мезозойских отложениях Енисей-Хатангского регионального прогиба и Анабаро-Хатангской седловины, расположенных на севере Средней Сибири. С помощью сканирующего электронного микроскопа и микрозондового химического анализа установлено, что механические и хемогенные изменения глинистых минералов могут способствовать возникновению пустотного пространства, улучшающего коллекторские свойства аргиллитов и других пород. Механические деформации зёрен, происходящие при транспортировке и захоронении в осадке, достаточно часто приводят к расщеплению глинистых минералов по плоскостям совершенной спайности, в пределах которых возникает пустотное пространство в виде серии каналовидных, линзовидных пор. В изученных мезозойских морских отложениях наблюдалось дальнейшее расширение таких пор за счёт роста в них кристаллов галита, гипса, пирита и каолинита в результате хемогенных и биохемогенных процессов. Кристаллы, осаждённые в седиментогенезе и диагенезе, уменьшали способность глин к сильному уплотнению по мере их погружения в осадочные толщи вплоть до завершения стадии раннего катагенеза. В это же время формировалось дополнительное пустотное пространство за счёт преобразования монтмориллонита (из осадочных зёрен) в хлорит. Кристаллизация агрегатов каолинита (типа столбика монет) в межзерновых и внутризерновых порах вероятно связана с деятельностью пластовых флюидов.

**Ключевые слова:** глинистые минералы, седиментационные и постседиментационные преобразования, пористость

*O. N. Zlobina<sup>1</sup>*

## **Features of transformation of clay minerals in mesozoic oil and gas deposits of the north of Middle Siberia**

<sup>1</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,  
Novosibirsk, Russian Federation  
\* e-mail: ZlobinaON@ipgg.sbras.ru

**Abstract.** The paper presents the results of a study of sedimentation and post-sedimentation transformations of clay minerals in the Mesozoic deposits of the Yenisei-Khatanga regional trough and the Anabar-Khatanga saddle located in the north of Middle Siberia. Using a scanning electron microscope and microprobe chemical analysis, it was found that mechanical and chemogenic changes in clay minerals can contribute to the formation of a void space that improves the reservoir properties of mudstones and other rocks. Mechanical deformations of grains that occur during transportation and burial in sediment quite often lead to the splitting of clay minerals along perfect cleavage planes, within which a void space appears in the form of a series of canal-like, lenticular pores. In the studied Mesozoic marine sediments, further expansion of such pores was observed due to the growth of halite,

gypsum, pyrite, and kaolinite crystals in them as a result of chemogenic and biochemogenic processes. Further expansion of such pores was observed due to the growth of halite, gypsum, pyrite and kaolinite crystals in them as a result of chemogenic and biochemogenic processes in the studied Mesozoic marine sediments. At the same time, additional void space was formed due to the transformation of montmorillonite (from sedimentary grains) into chlorite. The crystallization of kaolinite aggregates (such as a column of coins) in intergranular and intragranular pores is probably associated with the activity of reservoir fluids.

**Keywords:** clay minerals, sedimentation and post-sedimentation transformations, porosity

### *Введение*

В мезозойских толщах Средней Сибири значительные части разрезов (мощностью до 200 м и более) сложены существенно глинистыми отложениями – аргиллитами полиминерального состава с варьирующим содержанием примеси песчано-алевритового материала и включений пирита. В псефитовых, псаммитовых и алевритовых породах, слагающих в этих же разрезах потенциально продуктивные пласты (коллекторы нефти и газа), глинистые минералы присутствуют: в первичном составе обломков, в качестве продуктов их постседиментационных преобразований, в составе седиментационного и вторичного цементов. Процессы ухудшающие или улучшающие коллекторские свойства песчаников и алевритов исследованы широким кругом российских и зарубежных специалистов, результаты по различным осадочным бассейнам изложены к настоящему моменту в многочисленных публикациях [1, 2 и др.]. В то же время активное изучение структуры порового пространства и механизмов его формирования в существенно глинистых отложениях началось только в 21 веке с целью решения вопросов, касающихся не только качества флюидоупоров, в роли которых традиционно рассматриваются толщи аргиллитов, но и с точки зрения размещения в них залежей углеводородов (по примеру баженовской и др. свит, которые, являясь нефтематеринскими, также представляют собой коллектор).

### *Методы и материалы*

В рамках исследования, проводимого в ИНГГ СО РАН под руководством академика А.Э. Конторовича, автором с помощью сканирующего электронного микроскопа снабженного микрозондовым химическим анализатором были получены новые материалы свидетельствующие об особенностях преобразования глинистых минералов в разрезах Енисей-Хатангского регионального прогиба и Анабаро-Хатангской седловины, располагающихся на севере Средней Сибири.

С 2007 г. были изучены отложения верхнего триаса, юры и нижнего мела, вскрытые скважинами на Балахнинской, Волочанской, Кубалахской, Логатской, Массоновской, Новой, Озёрной, Хабейской и др. площадях, а также из обнажений западного берега п-ва Юрюнг-Тумус. В настоящее время, в пределах указанных площадей и прилегающих территорий разрабатываются месторождения нефти и газа (Пайяхское, Балахнинское), на лицензионных участках (Посойском, Янгодском, Мезенинском, Западно-Анабарском и др.) ведутся геологоразведочные работы [3, 4, 5].

## Результаты

Изменения, которым подвергается весь обломочный материал, поступающий в бассейн седиментации с суши, в целом, можно разделить на механические, хемогенные и биохемогенные. Механические проявляются в дезинтеграции и деформации зёрен в результате воздействия физических процессов при транспортировке и захоронении в осадке. При этом глинистые минералы со слоистой структурой часто расщепляются по плоскостям совершенной спайности на гибкие пластинки, что наблюдается в тонкочешуйчатых аргиллитах (рис. 1а) и характерно для глинистых обломков в песчаниках и алевролитах (рис. 1б, с). При расщеплении в пределах зёрен (если они сохраняют свою целостность) возникает пустотное пространство в виде серии субпараллельных, каналовидных, линзовидных пор. В образцах из мезозойских морских отложений севера Средней Сибири отмечалось дальнейшее расширение таких пустот, за счёт роста в них кристаллов галита, гипса, пирита и каолинита (рис. 1с-ф, 2h). Так, в аргиллитах нижнего мела зафиксированы зерна хлорита (длиной до 40 мкм) с концентрирующимися на плоскостях спайности кристаллами галита (диаметром до 2,5 мкм), при этом среди пелитовых частиц (диаметром <10 мкм) основной массы породы кристаллы галита редки (рис. 1d). Очевидно, что все возможные варианты кристаллизации галита внутри зёрен хлорита предусматривают их предварительное насыщение соляным раствором, которое могло происходить на этапе седиментогенеза (в том числе промежуточного, если размывались отложения засоленных лагун и маршей), в результате обогащения донных илов рассолами (рапой) и/или пропитывания ими пород в пластовых условиях. Кристаллы, осаждённые в седиментогенезе и диагенезе, уменьшали способность глин к сильному уплотнению по мере их погружения в осадочные толщи вплоть до достижения уровня предельной прочности галита на сжатие (при давлении в 296 атм), что соответствует стадии раннего катагенеза. Дальнейшее повышение пластовых температур, рост давления и вероятная миграция пластовых вод способствовали растворению и удалению части галита с высвобождением пустотного пространства. О пределах изменений указанных параметров можно судить, исходя из преобразованности органического вещества, содержащегося в изученных толщах: для отложений средне-верхнего триаса это стадии от МК<sub>1</sub><sup>2</sup> до МК<sub>3</sub><sup>1</sup> (в рамках различных тектонических структур); нижней юры ПК-МК<sub>3</sub><sup>1</sup>; средней, верхней юры и нижнего мела ПК-МК<sub>1</sub><sup>2</sup> [6, 7].

Заполнение пиритом субпараллельных, линзовидных пустот в глинистых зёрнах наблюдалось автором в образцах аргиллитов и песчаников. Полученные данные свидетельствуют о том, что в пределах зёрен преобладают хорошо ограниченные кристаллы пирита октаэдрической формы (диаметром 1-14 мкм), а на их внешней поверхности (в межобломочном пространстве песчаников) отмечаются фрамбоидальные сферы (диаметром до 10 мкм) (рис. 1e-h).

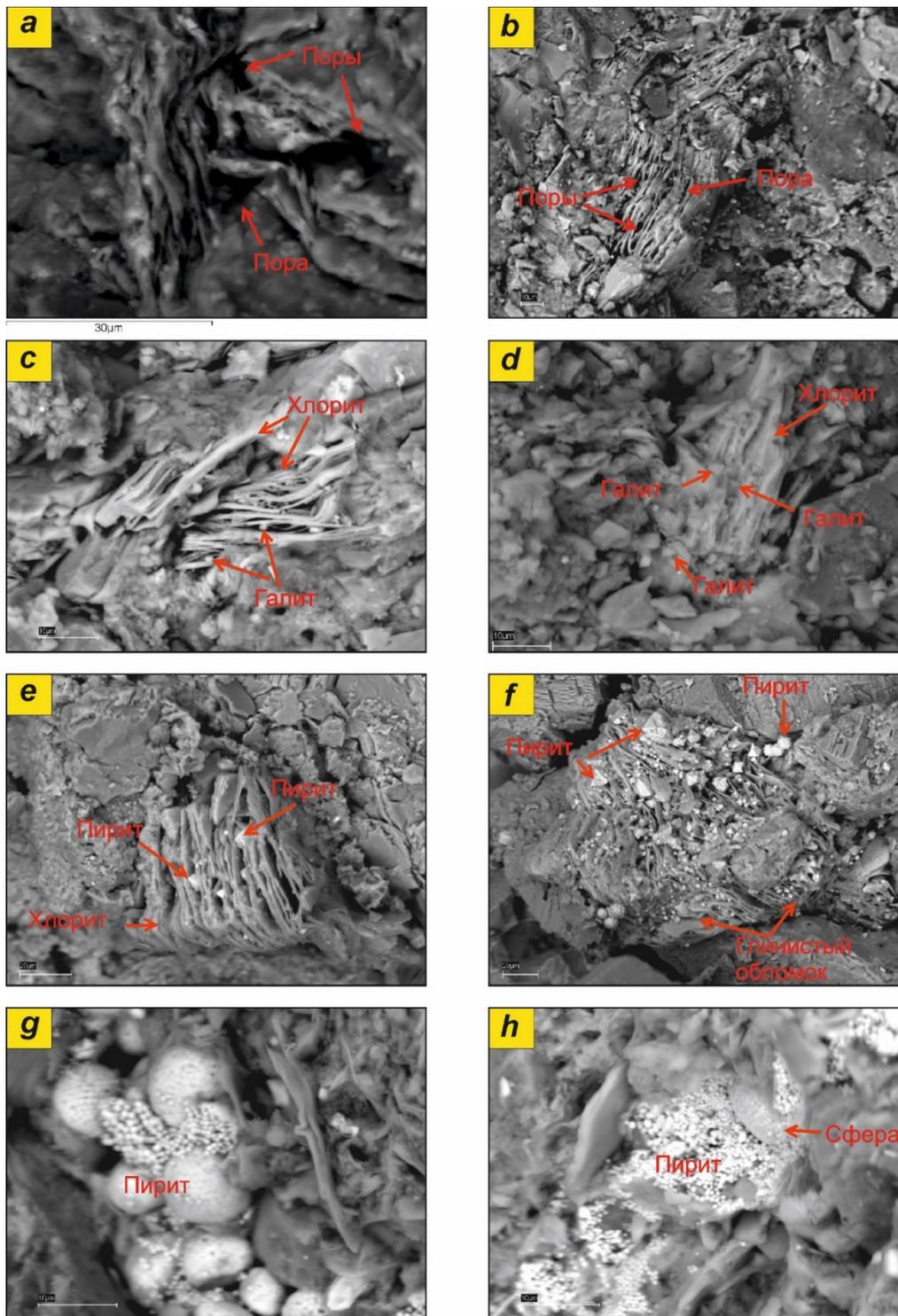


Рис. 1. Механические изменения глинистых зёрен за счёт их деформации и расщепления по плоскостям спайности, способствующие образованию внутризерновых пор: **a** – в аргиллите (Кубалахская площадь, средняя юра), **b** – песчанике (п-ов Юрюнг-Тумус, нижний мел), **c** – глинистом алевролите (п-ов Юрюнг-Тумус, нижний мел). Последующее расширение образовавшихся пустот из-за роста в них кристаллов галита (**c, d**) и пирита (**e, f**) (п-ов Юрюнг-Тумус, нижний мел). Франкоидальные сферы с микролитами пирита из межзернового пространства аргиллитов: **g** - в основном, не повреждённые, **h** - разрушенные

Многие исследователи интерпретируют подобные сфероиды с заключенными в них микрокристаллами пирита фрамбоидальной формы как пиритизированные клетки бактерий [8-10]. Опираясь на изложенные в публикациях результаты анализа различных морфоструктур сульфидов железа, можно предполагать, что хорошо ограниченными, разноразмерными кристаллами пирита в зёрнах хлорита являются продуктом перекристаллизации фрамбоидов, и таким образом основная часть выделений пирита сгенерировалась на плоскостях спайности в результате жизнедеятельности сульфатредуцирующих микроорганизмов. Королёв С. А. с соавторами полагают, что источником Fe при такой минерализации пирита служат гидроксилы трехвалентного железа, которые всегда присутствуют в адсорбированном виде на поверхности глинистых частичек и восстанавливаются в устойчивых аноксических условиях [11]. При взаимодействии с сероводородом восстановленное железо связывается в коллоидные агрегаты гидротроилита, со временем переходящие в пирит, реже марказит. С этой точки зрения объясняется приуроченность «следов жизнедеятельности» микроорганизмов к плоскостям спайности, на поверхностях которых могли изначально присутствовать гидроксилы трехвалентного железа в адсорбированном виде. Однако, в некоторых зёрнах наблюдается несоответствие между значительным количеством аутигенного пирита и явно недостаточным для его образования максимально возможным объёмом коллоидных плёнок гидротроилита, если его рассчитывать исходя из фактической площади поверхности и величины раскрытия (при расщеплении зерна) по плоскостям спайности. Кроме того, аналогичные гидроксильные образования должны присутствовать на поверхностях всех глинистых зёрен в осадке, но на их большей части (в образце аргиллита) выделений пирита не наблюдается (рис. 1e). Вероятно, избирательность сульфатредукторов в выборе субстрата для жизнедеятельности была связана с меняющимися окислительно-восстановительными условиями, а размещение колоний (аэротолерантных групп) внутри зёрен создавало более устойчивый и благоприятный для них «микроклимат». В то же время нельзя полностью исключить предположение о роли глинистого материала как источника химических элементов необходимых для развития других микроорганизмов, хотя достоверно оценить степень прямого воздействия литотрофов на глинистые минералы из отложений столь значительного возраста (до 200 млн лет) представляется весьма затруднительным.

Хемотропные преобразования глинистых минералов в мезозойских осадках прослеживаются в зёрнах с различной степенью деформации (рис. 2a, b, e, f). На рисунке 2a зерно таблитчатой формы (диаметром около 20 мкм) не деформировано, его верхняя поверхность (параллельная спайности) ровная и достаточно чистая, а перпендикулярные к ней краевые части покрыты тонковолокнистой (войлокоподобной) субстанцией. В спектре 1 центральной площадки отсутствует Al, можно предполагать, что на этом участке отражается состав монтмориллонита с высоким содержанием Mg или октаэдрического слоя хлорита с катионами Mg без Al. Для монтмориллонитов, в целом, характерна большая способность к обменному поглощению магния [12]. Спектр 2 краевой части полностью соответствует Mg-хлориту. На некоторых участках в этом волокнистом агрегате

наблюдаются микролиты пирита (диаметром около 0,5 мкм) отдельные и в скоплениях. Вдоль задней стенки зерна микронзондовый анализ показал значительное увеличение количества железа, спектр 4 соответствует Mg-Fe хлориту. Проведённые американскими учёными эксперименты с помещением глинистых минералов (монтмориллонита, каолинита и иллита) в искусственно смоделированную морскую среду показали, что в течение диагенетической стадии (наблюдения длились до 5 лет) существенные изменения произошли с монтмориллонитом, структурные характеристики иллита и каолинита сохранились [13]. На снимках с электронного микроскопа зафиксированы нитевидные формы хлорита, образовавшегося через 36 месяцев из Mg-монтмориллонита (рис. 2*c, d*). Отдельные пластинчатые выделения, как указывают исследователи, стали появляться только через 50 месяцев. Подобные хорошо выраженные нитевидные и пластинчатые образования наблюдаются и в мезозойских отложениях севера Средней Сибири (рис. 2*b, e, f*). В глинистом алевролите, представленном на рис. 2*e*, зёрна монтмориллонита в форме пластинок неправильной формы (спектр 1) переходят в нитевидные агрегаты, которые в нижней части снимка имеют спутанно-волоконистый облик, а справа более упорядоченный, щеткообразный с многочисленными вытянутыми каналовидными пустотами. В этой части из состава новообразований (спектр 2) исчезает Mg, возрастает количество Fe и Ti. Причина интенсивного выноса Mg не ясна. Таким образом, постседиментационное преобразование монтмориллонита в хлорит, происходившее в диагенезе и вероятно продолжавшееся в катагенезе, способствовало возникновению в глинистых породах дополнительного пустотного пространства.

Изменения глинистых минералов, связанные с деятельностью пластовых флюидов, могут выражаться в значительном разрушении исходных фаз и интенсивной кристаллизации новых. Следы небольшого растворения глинистых минералов в алевроито-пелитовых породах сложно диагностировать, по причине отсутствия идеальных кристаллографических форм у основной части зёрен, принесённых из источников сноса. В результате более масштабных процессов образуются пустоты растворения с достаточно чёткими стенками (рис. 2*g*), при этом состав кристаллизующихся в них минералов может частично или совсем не соответствовать растворённому веществу. На рис. 2*h* зафиксировано зерно хлорита деформированное и расщеплённое по плоскостям спайности на пластины, между которыми развиваются агрегаты хорошо окристаллизованного аутигенного каолинита.

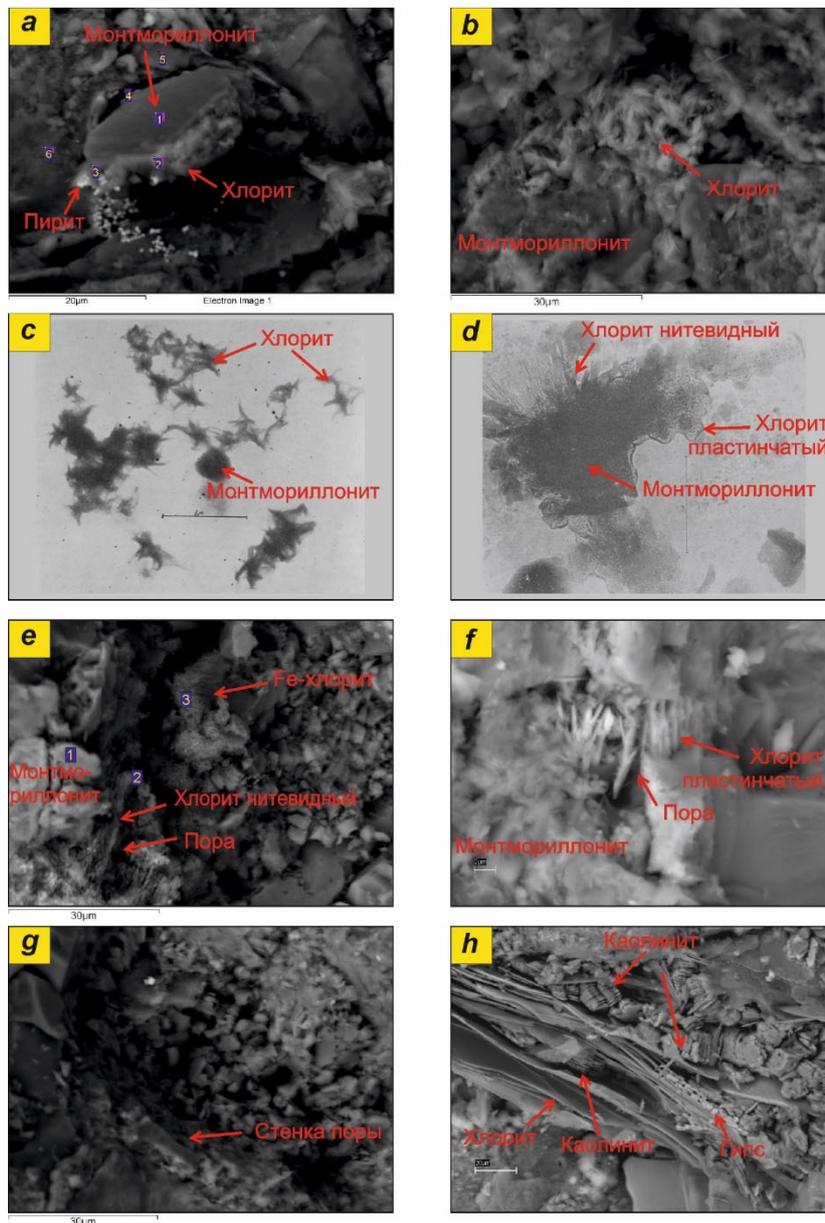


Рис. 2 Хемогенные преобразования монтмориллонита в хлорит и кристаллизация аутигенного каолинита в пустотном пространстве: **a, b** – нитевидный хлорит в тонковолокнистых агрегатах (**a** - п-ов Юрюнг-Тумус, нижний мел; **b** - Кубалахская площадь, средняя юра); **c, d** – новообразования нитевидного, пластинчатого хлорита и первичные пластинки обогащенного магнием монтмориллонита через 36-60 месяцев в экспериментах Whitehouse U.G. и McCarter R.S. [13]; **e** – вытянутые, каналовидные пустоты между нитевидными выделениями хлорита (Кубалахская площадь, средняя юра); **f** – поры неправильной, сложной формы между пластинчатыми выделениями хлорита (Кубалахская площадь, средняя юра); **g** – фрагмент стенки поры растворения в аргиллите (Кубалахская площадь, средняя юра); **h** – деформированное и расщеплённое на пластины зерно хлорита, между которыми развиваются микролиты гипса и агрегаты хорошо окристаллизованного аутигенного каолинита (Волочанская площадь, верхний триас).

Следы растворения пластинок хлорита проявлены слабо, между ними на участках более плотного примыкания наблюдаются микролиты гипса (диаметром до 3 мкм). Ориентируясь на степень преобразованности органического вещества, эти отложения верхнего триаса испытали стадию не более МК<sub>2</sub> (определения по керну скважины Волочанская 1) [7]. Восстанавливая последовательность возможных постседиментационных преобразований, можно предполагать заполнение внутризерновых пор микролитами гипса в диагенезе, их последующее растворение и повторное заполнение пустот кристаллами каолинита в катагенезе.

### *Благодарности*

Работа выполнена в рамках темы FWZZ-2022-0008 Государственной программы ФНИ.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Титов Ю.В., Шайхутдинова Г.Х., Астаркин С.В., Колпаков В.В., Кожевникова Н.В. Постседиментационные преобразования нижнемеловых отложений Большехетской впадины (Западная Сибирь) // Литосфера. – 2019. – Т. 19. № 1. – С. 48-58.
2. Кокшина Л.В. Глинистые минералы в цементе палеозойских граувакк: Магнитогорская мегазона (Южный Урал) и Боровская зона (юго-запад Западной Сибири) // Литосфера. – 2012. – № 2. – С. 33-42.
3. Исаев А.В., Поляков А.А. Пайяхская зона нефтенакпления западной части Енисей-Хатангской НГО // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2020. – № 1. – С. 20-39.
4. Исаев А.В., Хилько И.А. Нефтеперспективные зоны и локальные объекты клиноформного комплекса Енисей-Хатангского регионального прогиба // Геология нефти и газа. – 2021. – № 5. – С. 5-18.
5. Геоинформационная система / Сибирский НИИ Геологии, Геофизики и Минерального сырья. <https://sniiggims.ru/service/map/>
6. Филиппов Ю.А., Болдушевская Л.Н., Конторович А.А., Кригин В.А., Фомин А.Н. Катагенез органического вещества и фазовый состав залежей углеводородов северо-западного обрамления Сибирской платформы // Геология нефти и газа. – 1998. – № 12. – С. 25-33.
7. Филиппов Ю.А., Давыдова И.В., Болдушевская Л.Н., Данилова В.П., Костырева Е.А., Фомин А.Н. Взаимосвязь материнских пород и нефтей в мезозойских отложениях северо-востока Западно-Сибирской плиты на основе изучения углеводородов-биомаркеров и катагенеза органического вещества // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2006. – № 5-6. – С. 52-57.
8. Schieber J. Sedimentary Pyrite: A window into the microbial past // Geology. – 2002. – V. 30. – № 6. – P. 531-534.
9. Folk R.L. Nannobacteria and the formation of framboidal pyrite: textural evidence // Journal of Earth System Science. – 2005. – V. 114. – № 3. – P. 369-374.
10. Савельева О.Л., Савельев Д.П., Чубаров В.М. Фрамбоиды пирита в углеродистых породах смагинской ассоциации п-ова Камчатский мыс // Вестник Краунц. Науки о Земле. – 2013. – № 2(22). – С. 144-151.
11. Королёв Э.А., Шиловский О.П., Бариева Э.Р., Нуждин Е.В., Николаева В.М., Хамадиев Р.И. Влияние структурно-генетических особенностей различных видов органических остатков на характер образования аутигенных пиритовых агрегатов в верхнеюрских отложениях // Ученые записки Казанского университета. Естественные науки. – 2010. – Т. 152 (кн. 3). – С. 192-207.

12. Везенцев А.И., Королькова С.В., Буханов В.Д. Текстуальные характеристики и сорбционные свойства природной и магний-замещенной монтмориллонит содержащей глины // Научные ведомости. Серия Естественные науки. – 2010. – № 9(80). – С. 119-123.
13. Whitehouse U.G., McCarter R.S. Diagenetic modification of clay mineral types in artificial sea water // Clays and Clay Minerals. – 1956. – V. 5. – № 1. – P. 81-119.

© О. Н. Злобина, 2023