

УДК 553.21:549.02:553.679

МИНЕРАЛЬНЫЕ МИКРОВКЛЮЧЕНИЯ В ГЛАУКОНИТАХ БАКЧАРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ТОМСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Рудмин Максим Андреевич¹,
rudminma@tpu.ru

Мазуров Алексей Карпович¹,
akm@tpu.ru

Рева Игорь Витальевич¹,
igor_1993@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

За счет своих уникальных свойств глауконит является ценным источником геологической информации. Как активный природный сорбент глауконит способен накапливать элементы в обстановке седиментации, которые впоследствии образуют новые минеральные фазы внутри глауконитовых гранул. **Актуальность исследования** определяется возможностью познания процессов осадкообразования на основе и посредством изучения созданного ими вещества в пределах Бакчарского месторождения.

Цель работы: изучение ультрадисперсных минеральных включений в глауконитах Бакчарского месторождения для характеристики минерального субстрата, поступающего в бассейн седиментации.

Методы исследования: разделение проб на гранулометрические классы размером более 1 мм, 1...0,5, 0,5...0,2, 0,2...0,1, менее 0,1 мм методом «мокрого» ситования; электромагнитная сепарация (ЭВС 10/5) при силе тока 4...2 А; очистка минеральных монофракций глауконита из магнитной фракции под бинокулярном; изготовление полированных шашек; сканирующая электронная микроскопия на оборудовании TESCAN VEGA 3 SBU с энергодисперсионной приставкой OXFORD X-Max50 для рентгенспектрального анализа.

В результате проведенных исследований в глауконитах Бакчарского месторождения были обнаружены микроскопические включения золота, серебра и некоторых других минералов (фосфатов, сульфидов, сульфатов, оксидов и силикатов). Минеральные ассоциации микровключений указывают на наличие в среде осадкообразования благородных, цветных и редких металлов. Предполагается, что глауконит как активный природный сорбент «загружался» металлами и терригенными ультрадисперсными компонентами на фоне сероводородного заражения осадка микроорганизмами. Эти условия способствовали образованию новых минеральных фаз сульфидов, сульфатов и золота. Полученные данные являются признаком потенциальной золотоносности глауконитовых пород Бакчарского месторождения.

Ключевые слова:

Глауконит, золото, микровключения, сульфиды, Бакчарское месторождение.

Введение

Глауконит – слоистый водный алюмосиликатный минерал переменного состава с условной формулой $(K, Na, Ca)(Fe, Al, Mg, Mn)_2(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2$, широко распространенный в осадочных породах [1–3]. За счет своих молекулярно-сорбционных и ионообменных свойств он является ценным источником палеоклиматической информации [1, 2, 4–10] а также минералом разнопланового промышленного использования. В настоящее время известно, что глаукониты являются активными природными сорбентами, благодаря чему они способны накапливать элементы в обстановке седиментации (in situ). Такая «загрузка» химическими элементами приводит к образованию новых минералов на фоне дигенетического преобразования осадков. Теоретически подобные процессы могут привести к формированию зон, обогащенных металлами, что уже предполагалось в работе [11]. С этой позиции детальные микроскопические исследования глауконитов позволяют расширить знания о составе материала, привносимого в бассейн, и тем самым реконструировать геохимический облик среды седиментации.

В данной работе изучались ультрадисперсные минеральные включения в глауконитах Бакчарского месторождения для характеристики минерального субстрата, поступающего в бассейн седиментации.

Объектом для исследований послужили верхнемеловые отложения Бакчарского месторождения. Глауконитовые породы формировались совместно с оолитовыми железными рудами. В прошлые десятилетия некоторыми учеными [12] в образцах оолитовых железных руд были обнаружены вышекларковые содержания золота (от 0,3...5,0 до 10...50 ppb) и платины (от 0,5...3,0 до 10...40 ppb). Однако попытки установить минеральные формы благородных металлов не увенчались успехом. Позже, при изучении оолитовых железных руд прецизионными методами (атомно-абсорбционный анализ, электронная микроскопия), данные о повышенном содержании золота и других благородных металлов в них не подтвердились [13].

Изучая аутигенную минерализацию мел-палеогеновых пород юго-восточной части Западной Си-

бири, авторы данной статьи предположили, что наличие или отсутствие золота и других редких металлов в этих отложениях можно установить при детальном исследовании глауконитов. Золото субмикронных размеров уже отмечалось в составе гидрослюд различных природных объектов [14–17], в том числе в палеогеновых отложениях юга Западной Сибири [18].

Фактический материал и методы исследования

Для исследований было отобрано 18 проб глауконитовых пород из керна скважин (рис. 1) с различных участков Бакчарского месторождения. Методом «мокрого» ситования выполнялось разделение проб на гранулометрические классы размером более 1 мм, 1,0...0,5 мм, 0,5...0,2 мм, 0,2...0,1 мм, менее 0,1 мм. Каждый гранулометрический класс разделялся на электромагнитном сепараторе (ЭВС 10/5) при силе тока 3,5...1,8 А на немагнитную (более 3,5 А), слабомагнитную (3,5...1,8 А) и магнитную (менее 1,8 А) фракции. Из магнитной и слабомагнитной фракций ручным способом (под биноклем) отбирались монофракции глауконита. Далее из монофракций изготавливались полированные шашки для изучения на электронном микроскопе. Шашка представляет собой множество зёрен глауконита, связанных и заполненных в оксидной матрице.

Все сделанные шашки изучались на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 SBU (минимальное разрешение 3 нм) с энергодисперсионной приставкой OXFORD X-Max 50.

Содержание золота в пробах определялось методом атомной абсорбции (Varian). Навеску пробы помещали в корундовый тигель и прокаляли в муфельной печи. Для вскрытия пробы добавляли фтористоводородную кислоту и упаривали до состояния влажного остатка. К остатку приливали свежеприготовленный раствор «царской водки», полученный раствор упаривали до объема 2–4 мл при температуре 180 °С. После чего к смеси добавляли концентрированную соляную кислоту, упаривали, а затем охлаждали и разбавляли до объема 10 мл 4М соляной кислотой. Концентрирование золота проводили экстракцией полученного раствора с ди-н-октил сульфидом в толуоле [19].

Краткая геологическая характеристика объекта исследований

Бакчарское месторождение находится в юго-восточной части Западной Сибири (рис. 1), в административном отношении в 200 км на северо-запад от г. Томска.

Глауконитовые толщи приурочены к верхнемеловым отложениям и залегают на глубинах 180...230 м (рис. 2) среди горизонтов осадочных железных руд, песчаников, алевролитов и глин. В изучаемом районе авторами выделяется три главных природных типа руд: сыпучие гидрогетитовые, сцементированные гидрогетит-хлорито-

вые, сцементированные сидерит-гидрогетитовые. Наибольшая доля глауконита связана со сцементированными гидрогетит-хлоритовыми рудами и нерудными песчаниками.

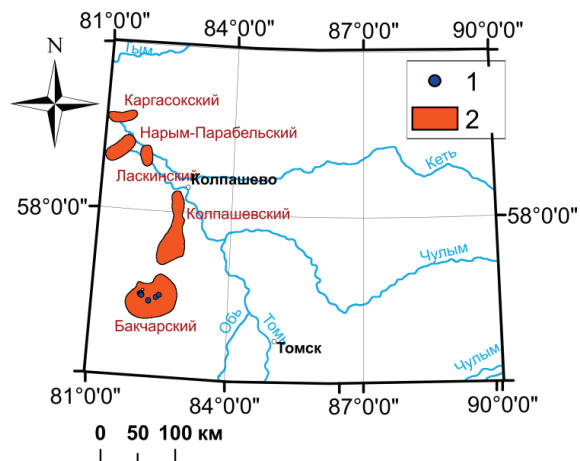


Рис. 1. Обзорная схема изучаемого района: 1 – скважины, из которых были отобраны пробы глауконитовых пород; 2 – железорудные районы

Fig. 1. Diagram of the studied area: 1 are the wells from which the samples of glauconite rocks were taken; 2 are the iron-ore areas

Содержание глауконита в породах и рудах достигает 20...90 %, остальное приходится на хлорит-гидрогетитовые оолиты, терригенные обломки и глинисто-глауконитовый цемент. Структура пород мелко-среднезернистая, наибольший средний выход (87 %) имеет гранулометрический класс 0,5...0,1 мм, в котором доля глауконита увеличивается до 40 %, а в некоторых породах – до 90 %.

Как известно, трансгрессия верхнемелового моря сопровождалась интенсивным образованием глауконитовых (а также фосфоритовых и железорудных) месторождений в пассивной континентальной окраине по всему миру [20–23], в том числе и на территории Западной Сибири.

Верхнемеловые и эоценовые осадки Бакчарского месторождения формировались в прибрежно-морской обстановке. Прибрежная зона мезозойского моря представляла собой систему мелководных валов и баров, в которой происходило распределение терригенных и хемогенных компонентов. Глауконитовые осадки, согласно разработанной авторами седиментационной модели [24], формировались преимущественно в седловидных и пологих участках морского дна, где, вероятно, происходило осаждение большей части ультрадисперсного вещества.

Результаты и их обсуждение

Подобно глауконитам бассейна Кавери в Индии [5], в верхнемеловых отложениях Бакчарского месторождения выделяются глауконитовые пеллеты, формирующиеся в результате изменения фекаль-



Рис. 2. Схематическая стратиграфическая колонка скважины Бакcharского месторождения и фотографии образцов глауконитовых пород

Fig. 2. Sedimentary log of the Bakchar deposit and photos of samples of glauconite rocks

ных шариков, и глаукониты выполнения, развивающиеся внутри пор, трещин преимущественно отмершей органики. Глауконитовые пеллеты имеют изометричные округлые (глобулярные, почковидные) (рис. 3, а) морфологические формы [25], глаукониты выполнения – вытянутые глобулярные (рис. 3, б), гроздевидные (рис. 3, в), биоморфные (рис. 3, г), сложные агрегаты (рис. 3, д). Поверхность зёрен шероховатая, ямчатая, со следами коррозии (трещины, пустоты), реже гладкая, блестящая. По окраске зёрен были выделены две основные разновидности: 1) фишашково-зеленые, зеленые; 2) зеленовато-желтые, зеленовато-коричневые. Помимо этого встречаются зёрна синевато-зеленого, почти черного цвета, а также желтые со слабым зеленоватым оттенком. Окраска зёрен, а также следы коррозии (выщелачивание калия), как известно [1], зависят от степени постседиментационных изменений глауконита. Коричневатое окаймление глауконита связано с более поздним осаждением гидроокислов железа в окислительной обстановке [2, 10, 26, 27]. Известно, что под действие метеорных вод на поздних стадиях формирования осадочных пород происходит селективное выщелачивание калия и железа вдоль неоднородностей (поры, микротрещины) глауконитовых глобулей, так называемый процесс «обратной» глауконитизации [28].

Химический состав глауконитов охарактеризован по данным рентгеноспектральных анализов (490 измерений). Кристаллохимическая формула, рассчитанная по кислородному методу, имеет усредненный вид: $K_{0.51}(Fe_{1.83}Mg_{0.24}Ca_{0.05})_{2.12}[Si_{3.27}Al_{0.69}O_{10}](OH)_2nH_2O$. Содержание основных оксидов в глауконитах варьирует в следующих пределах: K_2O – 2,5...7,7 %, $Fe_2O_{3(total)}$ – 20,2...69,4 %, MgO – 1,7...2,8 %, CaO – 0,5...0,9 %, Al_2O_3 – 5,5...11,5 %, SiO_2 – 32,5...52,5 %, H_2O – 8,3...12,3 % (по разности).

Внутреннее строение глауконитовых глобулей представлено хаотично расположенными пластинками и чешуйками (рис. 3, е) с изрезанными очертаниями. Следует отметить что термины «глобуля», «зерно» и «гранула» в данной работе употребляются как синонимы. При высоких увеличениях в срезе некоторых глобулей вдоль пластинок наблюдаются следы окисления железа. На рис. 4 показано распределение калия, железа, кремния на участке среза зерна глауконита. В точке 1 содержание K_2O и $FeO_{(total)}$ на порядок выше, чем в точке 2, что объясняется переходом Fe^{2+} в Fe^{3+} при параллельном вытеснении K^+ из межслоевого пространства и замещении Si^{4+} минерала. Вероятно, это начальный этап преобразования глауконита в лептохлорит и гидрогетит. Многочисленные исследования зёрен глауконита с помощью электронной микроскопии показали, что степень их изме-

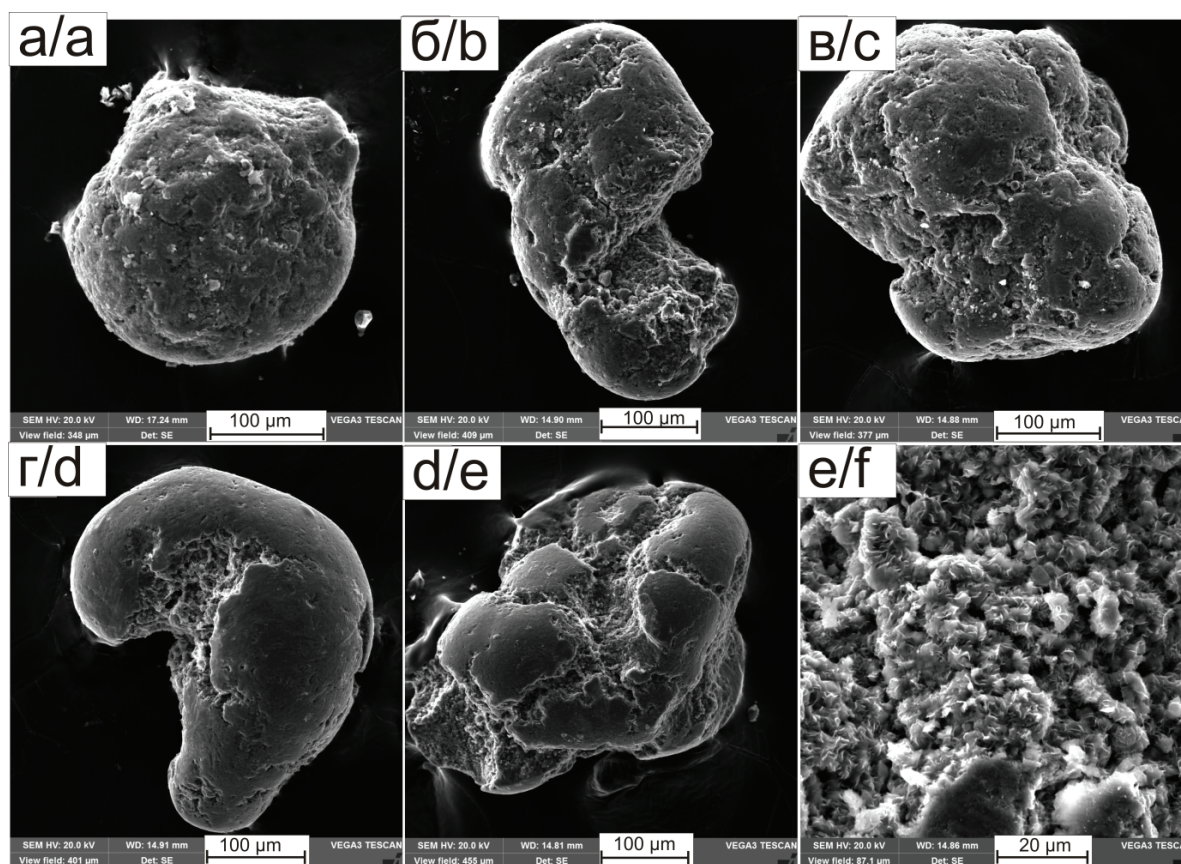


Рис. 3. Морфология и внутреннее строение зёрен глауконита из Бакчарского месторождения [25]: а) изометричная округлая форма; б) вытянутая глобулярная; в) гроздевидная; г) биоморфная; д) неправильная агрегатная; е) внутреннее строение зёрен

Fig. 3. Morphology and internal structure of glauconite grains in Bakchar ore deposit [25]: a) isometric round shape; b) elongated globular shape; c) clustered shape; d) biomorphic; e) composite aggregate shape; f) internal grain structure

нения не влияет на состав его минеральных включений, что свидетельствует о прочном сцеплении последних на пластинках глауконита.

На поверхности глауконитов и в его корродированных полостях отмечаются фрамбоидальные скопления пирита и агрегаты куларита. Фрамбоды имеют размер до 10 мкм и представляют собой скопления микрорезинок кубической или октаэдрической формы размером до 1 мкм. Куларит встречается на поверхности глауконита в единичных случаях в виде скоплений микросферолитов размером до 5...6 мкм. Судя по форме и химическому составу, подобный куларит распространен в гидрогетитовых оолитах месторождения [24].

Во внутренней структуре изученных глауконитов сосредоточены разнообразные включения сульфидных, оксидных и силикатных минералов цветных (Cu, Zn, Pb, Sn, Bi, Co, Ni), редких и редкоземельных (Ce, Nd, La, Ta, Zr, Sr, Nb, Ba), благородных (Au, Ag), черных (Fe, Ti) металлов. Помимо перечисленных в них распространены типичные терригенные минералы данных отложений (кварц, полевые шпаты и др.), которые были описаны в предыдущих работах авторов. Следует отметить,

что в ходе проведенных исследований описаны минералы, которые ранее не были установлены в изучаемом разрезе. К ним относятся: золото, борнит, тетрадимит, карролит (?), сталдерит (?), барит, баритоцелестин, бисмит, бисмоклит, треворит (?), нормандит и некоторые другие минеральные фазы стронция, цинка, олова, которые не были определены в силу предельных технических возможностей сканирующей электронной микроскопии.

Наиболее распространенным минеральным включением в глауконите является фосфат редкоземельных элементов, который авторы [13] относят к аутигенной разновидности монацита (*куларит*). Размеры агрегатов куларита (рис. 5) варьируют от нескольких микрон до 15 мкм и представляют собой скопления микросферолитов размером 0,5...2,0 мкм. Усредненная формула куларита имеет следующий вид: $Ca_{0,38}(Ce_{0,31}Nd_{0,11}La_{0,11}Y_{0,1})_{0,62}(P_{1,05}O_4)$, при этом всегда устойчив тренд: $Ce > Nd \geq La$. Химический состав минерала характеризуется следующими вариациями: CaO – 7,3...13,8 %, Ce_2O_3 – 21,9...27,6 %, Nd_2O_3 – 7,5...9,5 %, La_2O_3 – 5,8...8,9 %, Y_2O_3 – 2,0...11,3 %, P_2O_5 – 30,0...38,7 %, с примесями Pr, Dy, W, Os, U, Th до 2,5 %.

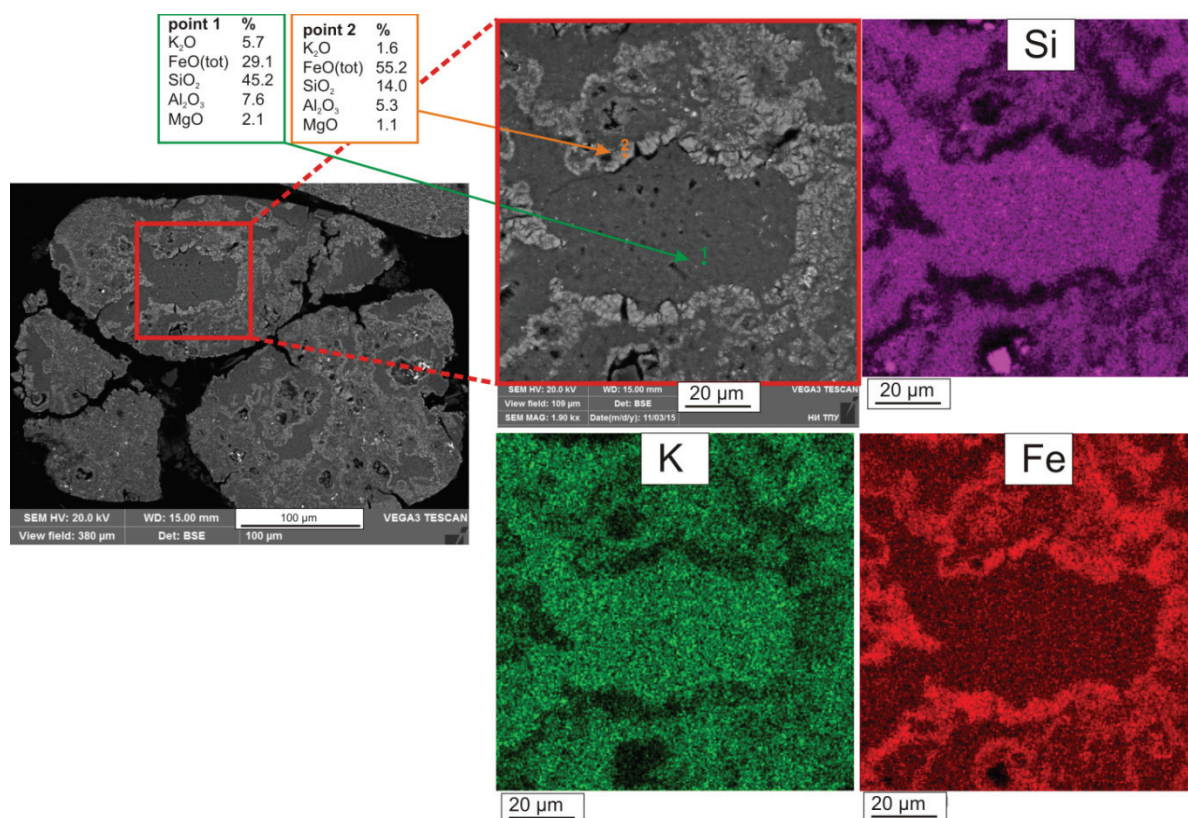


Рис. 4. Внутреннее строение и элементные карты распределения в срезе зерна глауконита
 Fig. 4. Internal structure and element distribution maps in the section of glauconite grain

В глауконитовых породах по результатам атомно-абсорбционного анализа содержание золота варьирует в пределах 0,1...7,2 ррб при среднем 1,1 ррб, что ниже кларка в земной коре (1,8 ррб по [29]). При этом в мономинеральной фракции глауконита оно достигает 14,4 ррб. Повышенные содержания связаны с субмикронными включениями (рис. 6, а–в) в глауконите. Золото (рис. 6) имеет субизометричную, лапчатую форму с извилистыми очертаниями, размерами 0,4...0,7 мкм, в ред-

ких случаях до 2 мкм. По содержанию Ag (6,0...13,1 %) это золото приближается к электруму. Полученные данные доказывают наличие благородных металлов в среде осадкообразования. Вероятно, в условиях седиментации основная часть золота сорбировалась на поверхности аутигенных глауконитовых пластинок. В единичном случае обнаружено включение серебра (рис. 6, г) размером 0,5 мкм с содержанием серы 1,3 % и хлора 0,79 %.

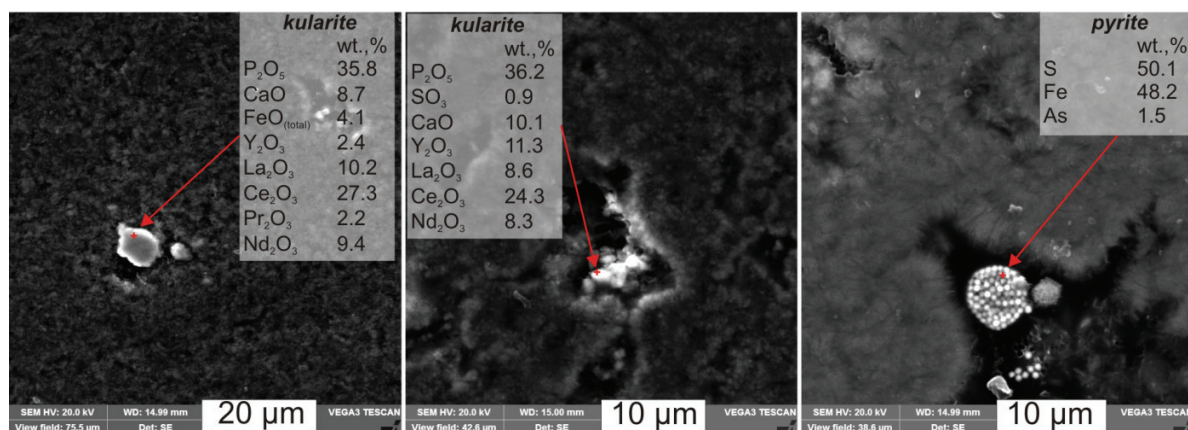


Рис. 5. Микровключения фосфата редкоземельных элементов (куларит) и фрамбоидов пирита в глауконитах
 Fig. 5. Microinclusions of phosphate of rare earth elements (kularite) and framboids of pyrite in glauconite

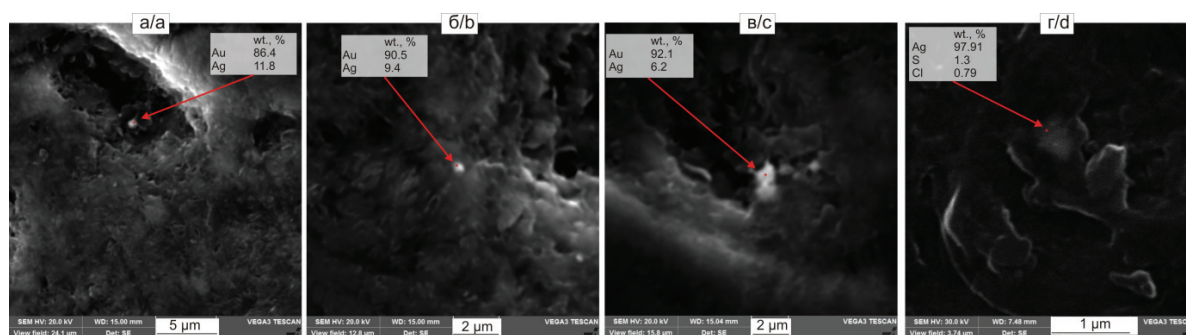


Рис. 6. Микровключения: а–в) золота; г) серебра в глауконитах

Fig. 6. Microinclusions of: а–с) gold; d) silver in glauconite

Среди сульфидных минералов в глауконитах встречается пирит, халькопирит, пирротин, борнит, арсенопирит, галенит, в единичных пробах отмечается карролит (?) и тетрадимит. Пирит является самым распространенным сульфидом. В большинстве проб он образует фрамбоидальные скопления (рис. 5), аналогичные тем, которые описаны на поверхности глауконитовых глобулей. В составе фрамбоидального пирита постоянно отмечается примесь мышьяка до 1,5 %. В более редких случаях он встречается в виде единичных кристаллов размером 1,2...2,5 мкм или в виде обломков более крупных кристаллов размером до 5,5 мкм, в которых не фиксируется мышьяк (рис. 6, в). В зависимости от генезиса можно выделить две генерации пирита в глауконитах. Аутигенный (или «in situ») пирит, образующий фрамбоиды с повышенным содержанием мышьяка, и терригенный (или кластогенный) пирит без мышьяка, который, вероятно, перетлагался в восстановительной обстановке в пределах шельфа.

Борнит распространен в виде зёрен (рис. 7, а) размером от 1,0 до 4,6 мкм, имеет формулу $Cu_{4,8}Fe_{1,2}S_4$ с содержанием Fe – 11,5...16,5 %, Cu – 58,4...61,4 %; S – 25,2...27,1 %. Галенит образует кристаллы размером от 0,5...0,8 до 2,6 мкм (рис. 7, б) с содержанием свинца 85,8...87,2 %. Помимо пирита отмечается пирротин (рис. 7, г) размером до 2 мкм с содержанием железа 65...68 %. Халькопирит встречается в виде единичных зёрен изометричной формы размером 1,5...2,3 мкм с содержанием Fe – 35,9...37,4 %, Cu – 32,2...33,6 %, S – 30,3...31,8 %. Арсенопирит отмечается в виде зёрен размером 1,8...2,0 мкм. В единичной пробе он фиксируется в виде относительно крупного кристалла (рис. 7, д) размером 28 мкм. Морфология относительно крупного обломка арсенопирита свидетельствует о переносе и механической обработке зерна, то есть о его терригенной природе. Антимонит встречен в виде субизометричных зёрен размером 0,6...1,4 мкм с содержанием Sb – 71,6 % и S – 28,3 %. В пустотном пространстве глауконитового зерна найден сульфид кобальта и меди, формула которого имеет вид $Co_{3,24}Cu_{0,72}S_4$, с примесью

Sn (1 %). Сульфид имеет размер 1,5...1,8 мкм и, судя по составу, является карролитом (?) с более высоким содержанием кобальта. Тетрадимит встречен в единичной пробе в виде ромбоэдрического кристалла (рис. 7, е) размером 1,9 мкм с содержанием Bi – 56,8 %, Te – 38,3 %, S – 4,8 %. В двух пробах отмечается сульфид меди, цинка, мышьяка и олова, который по рассчитанной формуле $(Cu_{3,6}Zn_{0,9}(As_{3,3}Sb_{0,4})S_6)$ похож на сталдерит (?). Этот сульфид представлен кристаллами вытянутой формы размером 3,4 и 0,8 мкм.

В глауконитах изучаемых отложений широко распространен барит и, в редких случаях, отмечается баритоцелестин. Барит образует зерна преимущественно субизометричной формы (рис. 7, ж) размером от 0,6 до 2,5 мкм с содержанием SO_3 – 36...38,3 %, и BaO – 61,4...63,6 %, в некоторых случаях отмечается содержание Pm до 2 %. Баритоцелестин наблюдается в виде включения изометричной формы (рис. 7, з) размером 2 мкм. От барита отличается высоким содержанием стронция (SrO – 21,5 %).

Ассоциация сульфидов и наличие сульфатов указывает на высокую насыщенность глауконитов сероводородом и тяжелыми цветными металлами. Благодаря разложению органического вещества, внутри глауконитовых гранул создавалась восстановительная среда, полузакрытая от доступа кислорода. Эта среда способствовала формированию новых минеральных фаз сульфидов, сульфатов и золота, параллельно с развитием глауконита. О связи глауконита и пирита в среде осадкообразования уже неоднократно упоминалось в литературе [30–32]. При первоначальном аэробном (или аэробно-анаэробном) разложении органического вещества внутри гранул глауконита происходила редукция сульфат-ионов [33], которые вступали в реакцию с катионами бария. В результате образовывался барит и баритоцелестин. По мере погружения осадка доступ кислорода становился ограниченным или прекращался и в полузакрытых системах глауконитовых гранул протекали анаэробные процессы [30–34], в результате чего формировались сульфиды.

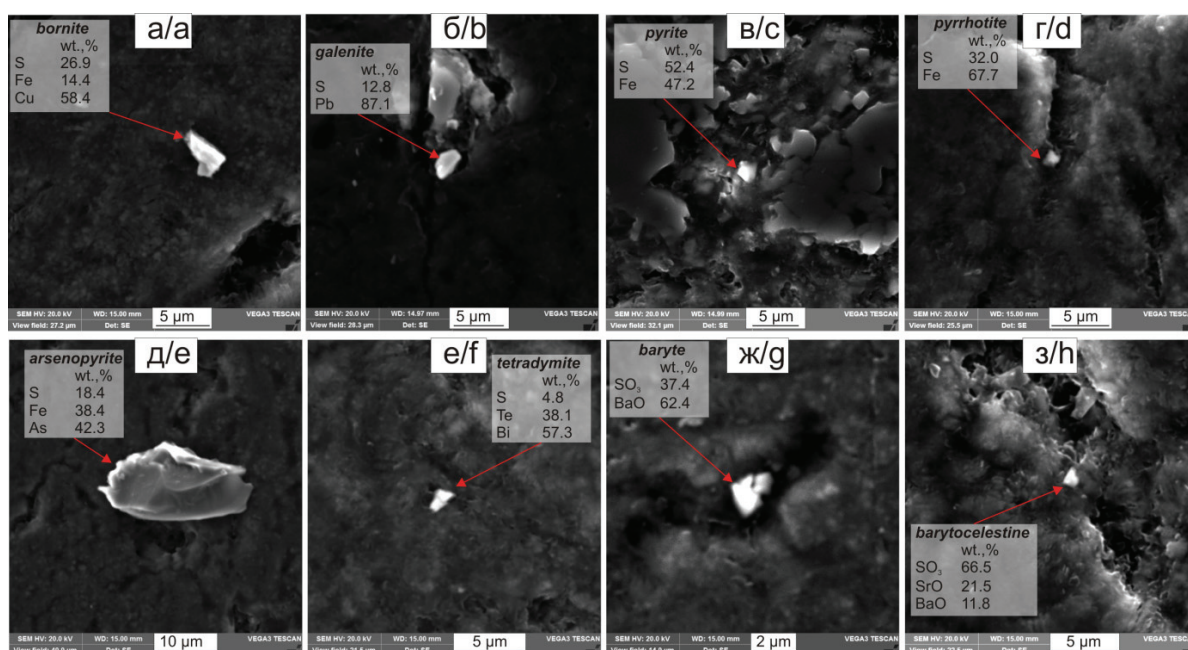


Рис. 7. Минеральные микровключения в глауконитах: а) борнит; б) галенит; в) пирит; г) пирротин; д) арсенопирит; е) тетрадимит; ж) барит; з) баритоцелестин

Fig. 7. Mineral microinclusions in glauconite: a) bornite; b) galenite; c) pyrite; d) pyrrhotite; e) arsenopyrite; f) tetradymite; g) barite; h) barytocelestine

Эти данные позволяют рассматривать обстановку образования глауконита как своеобразный сорбционно-сероводородный (восстановительный) геохимический барьер в илстом слое прибрежно-морской зоны верхнемелового «Западно-Сибирского» моря.

Помимо типичных акцессорных оксидов (магнетит (рис. 8, б), ильменит, анатаз (рис. 8, в)) изучаемых толщ, в глауконитах обнаружены сложные оксиды висмута, стронция, никеля (бисмит, группа перовскита, треворит). Они встречаются в нескольких пробах в виде кристаллов вытянутой формы с неровными очертаниями. Бисмит (рис. 8, а) имеет размеры от 1,3...1,8 до 5,5...8,8 мкм и содержит примесь Cu до 5%. В одной пробе как результат окисления он полностью покрывается бисмокли-

том (BiClO). Найденный оксид стронция имеет формулу $Sr_{0.84}Ca_{0.14}Fe_{0.03}O_3$, что позволяет отнести его к группе перовскита. Этот минерал встречается в виде ксеноморфного кристалла размером 8,5 мкм. Сложный оксид никеля и железа встречается в одной пробе в форме двух кристаллов размером по 2 мкм вытянутой формы. По кристаллохимический формуле ($Ni_{3.14}Fe_{0.51}Cu_{0.23}O_4$) этот оксид больше всего похож на треворит (?).

К числу «редких» силикатов, локализирующихся в глауконитах, относятся: циркон, нормандит, франклинфилит (?). Циркон отмечается в пробах, отобранных с глубин от 180 метров. Этот минерал описан в предыдущих работах авторов в составе оолитовых железных руд [24]. В глауконитах он встречается в виде обломков кристаллов размером до 1 мкм.

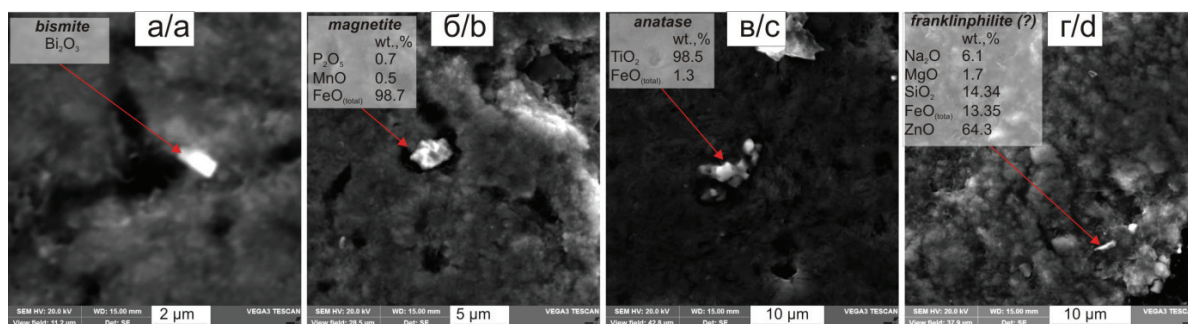


Рис. 8. Минеральные микровключения оксидов и силикатов в глауконитах (изображения во вторичных электронах): а) бисмит; б) магнетит; в) анатаз; г) франклинфилит (?)

Fig. 8. Mineral microinclusions of oxides and silicates in glauconite: a) bismite; b) magnetite; c) anatase; d) franklinphillite (?)

В одной пробе были найдены микронные (1,2 мкм) включения минерала со следующим составом: Nb_2O_5 – 29,5 %, $FeO_{(total)}$ – 22,7 %, SiO_2 – 26,9 %, Al_2O_3 – 6,6 %, Na_2O – 4,4 %, MgO – 1,6 %, K_2O – 3,0 %, CaO – 5,9 %, TiO_2 – 0,5 %. Его кристаллохимическая формула $Na_{0,48}Ca_{0,36}K_{0,21}Fe_{1,08}Nb_{0,75}[Si_{1,51}Al_{0,44}O_7](O_{0,53}F_{0,47})$ соответствует *нормандиту*, минералу группы вёрлита. Минерал с рассчитанной формулой $Na_{0,99}Fe_{0,93}Mg_{0,21}Zn_{3,97}Si_{1,24}O_4$ является предположительно *франклинфилитом* (?) и имеет размер до 3 мкм (рис. 8, з).

Оксидные и силикатные минералы имеют более крупные размеры относительно сульфидных и, преимущественно, ксеноморфную форму, что указывает на их терригенную природу. Большинство этих минералов известны в породах (в том числе в коре выветривания) складчатого обрамления Западно-Сибирской низменности (Салаирский кряж, Кузнецкий Алатау, Западные Саяны, Енисейский кряж), которые, вероятно, являлись их источниками.

Выводы

В верхнемеловой период прибрежно-морская обстановка древнего моря в пределах Бакчарского месторождения способствовала интенсивному формированию глауконитовых пород. В илистом слое за счет преобладания песчано-алевритового материала и высокого содержания фекальных частиц и органики создавалась восстановительная, слабопроницаемая (за счет пористости осадка) среда. В этой среде происходила мобилизация железа из окружающего осадка и формирование глауконитовых гранул, преимущественно на фекальных шариках и другом биоматериале.

В результате выполненных исследований в глауконитах Бакчарского месторождения устано-

влено наличие минеральных вкраплений золота, некоторых минералов цветных и редких металлов, многие из которых в данном районе обнаружены впервые. К их числу относятся: самородное золото, барит, борнит, карролит, тетрадимит, бисмит, треворит, нормандит, баритоцелестин, а также не определенные, в силу предельной разрешающей способности прибора, минеральные фазы стронция, цинка, олова. Размер включений варьирует от 0,1 до 10 мкм. Золото локализуется в глауконитовых гранулах в нижней и средней частях пластов в виде зёрен размером от 0,4 до 2,0 мкм с содержанием серебра до 13 %.

Широкий спектр микровключений объясняется высокой сорбционной способностью материнского минерала и благоприятными физико-химическими условиями среды. Это позволяет считать обстановку формирования глауконита своеобразным геохимическим барьером, на котором происходит образование новых минеральных фаз микронных размеров.

Состав разнородных включений в глауконитах свидетельствует о том, что минеральный субстрат, поступающий в морской бассейн, был обогащен благородными, цветными и редкими металлами. Вероятно, источниками металлов послужили размываемые породы восточного складчатого обрамления Западной Сибири.

Полученные данные позволяют судить о глауконите Бакчарского месторождения как о минерале, отражающем состав среды осадкообразования, и о потенциальном нетрадиционном источнике золота в будущем.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и администрации Томской области в рамках научного проекта 16-45-700090.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Odin G.S., Matter A. De glauconiarium origine // *Sedimentology*. – 1981. – V. 28. – P. 611–641.
2. Николаева И.В. Минералы группы глауконита в осадочных формациях. – Новосибирск: Наука, 1977. – 321 с.
3. Дриц В.А., Коссовская А.Г. Генетические типы диоктаэдрических слюд. Сообщение 1. Семейство железисто-магнезиальных слюд (глаукониты, селадониты) // *Литология и полезные ископаемые*. – 1986. – № 5. – С. 563–580.
4. Substrate control on formation and maturation of glauconites in the Middle Eocene Harudi Formation, western Kutch / S. Banerjee, S.L. Chatteraj, P.K. Saraswati, S. Dasgupta, U. Sarkar // *India Marine and Petroleum Geology*. – 2012. – V. 30. – P. 144–160.
5. Compositional variability of glauconites within the Upper Cretaceous Karai Shale Formation, Cauvery Basin, India: implications for evaluation of stratigraphic condensation / S. Banerjee, U. Bansal, K. Pande, S.S. Meena // *Sedimentary Geology*. – 2016. – V. 331. – P. 12–29.
6. Banerjee S., Bansal U., Thorat A.V. A review on palaeogeographic implications and temporal variation in glaucony composition // *Journal of Palaeogeography*. – 2016. – V. 5 (1). – P. 43–71.
7. Meunier A., El Albani A. The glauconite-Fe-illite-Fe-smectite problem: a critical review // *Terra Nova*. – 2007. – V. 19. – P. 95–104.
8. Wigley R., Compton J.S. Oligocene to Holocene glauconite-phosphorite grains from the Head of the Cape Canyon on the western margin of South Africa // *Deep-Sea Research II*. – 2007. – V. 54. – P. 1375–1395.
9. Kossovskaya A.G., Drits V.A. The variability of micaceous minerals in sedimentary rocks // *Sedimentology*. – 1970. – V. 15. – P. 83–101.
10. Николаева И.В. Фациальная зональность химического состава минералов группы глауконита и определяющие ее факторы // *Минералогия и геохимия глауконита*. – Новосибирск: Наука. – 1981. – С. 4–41.
11. Милецкий Б.Е. Глауконитовые пески – предполагаемая металлогенная формация // *Руды и металлы*. – 2012. – Т. 3. – С. 69–71.
12. Пшеничкин А.Я., Домаренко В.А. Петрографо-геохимические особенности Бакчарского месторождения // *Вестник науки Сибири*. – 2011. – № 1(1). – С. 13–18. URL: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/17/82> (дата обращения: 25.11.2011).
13. Rudmin M., Mazurov A., Bolsunovskaya L. Mineral and elemental composition features of «Loose» oolitic ores in Bakchar iron

- ore cluster (Tomsk Oblast) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2014. – V. 21 (1). – Art. numb. 012003.
14. Cline J.S., Hofstra A.H., Manteau J.L. Carlin-Type Gold Deposits in Nevada: Critical Geologic Characteristics and Viable Models // *Econom. Geol.*, 100th Anniversary Volume. – 2005. – P. 451–484.
 15. The assembly of gold nanoparticle monolayer onto mica substrate / W. Guo, L. Wei, X.T. Zhang, Y.B. Bai // *Chem. J. Chinese Univ.* – 2001. – V. 22. – P. 1987–1989.
 16. Nanoparticles of noble metals in the supergene zone / S.M. Zhmodik, Yu.A. Kalinin, N.A. Roslyakov, A.G. Mironov, Yu.L. Mikhlin, D.K. Belyanin, N.A. Nemirovskaya, A.M. Spiridonov, G.V. Nesterenko, E.V. Airiyants, T.N. Moroz, T.A. Bul'bak // *Geology of Ore Deposits*. – 2012. – V. 54. – Iss. 2. – P. 141–154.
 17. Никитин Н.М., Ясырев А.П. О среднем содержании золота в осадочных породах // *Геохимия*. – 1974. – № 8. – С. 1237–1239.
 18. Nesterenko G., Kolpakov V., Boboshko L.P. Native gold in complex Ti–Zr placers of the southern West Siberian Plain // *Russian Geology and Geophysics*. – 2013. – V. 54. – Iss. 12. – P. 1484–1498.
 19. Decomposition and Preconcentration Methods for the Determination of Pt, Pd, Re in Mineral Raw Materials. *Advanced Materials Research / Y. Oskina, E. Pakrieva, E. Ustinova, A. Kryazhov // Scientific Journal*. – 2014. – V. 1040. – P. 278–281.
 20. Glauconite and phosphate peloids in Mesozoic carbonate sediments (Eastern Subbetic Zone, Betic Cordilleras, SE Spain) / J. Jiménez-Millán, J.M. Molina, F. Nieto, L. Nieto, P.A.R. Ortiz // *Clay Minerals*. – 1998. – V. 33. – P. 547–559.
 21. Delamette M. Trace fossil assemblages from the Albian phosphate-rich sandstones of the Helvetic Shelf (Western Alps) // *Cretaceous Research*. – 1989. – V. 10. – P. 207–219.
 22. Garzanti E., Haas R., Jadoul F. Ironstones in the Mesozoic passive margin sequence of the Tethys Himalaya (Zaskar, Northern India): sedimentology and metamorphism / Eds. T.P. Young, W.E.G. Taylor // *Phanerozoic Ironstones*. – London: Geological Society Special Publication. – 1989. – V. 46. – P. 229–244.
 23. Amorosi A. The occurrence of glaucony in the stratigraphic record: distribution patterns and sequence-stratigraphic significance // *International Association of Sedimentologists Special Publications*. – 2012. – V. 45. – P. 37–54.
 24. Rudmin M., Mazurov A., Ruban A. Facies and Sedimentation Model of Iron-ore Sequence in Bakchar Deposit // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.: Scientific and Technical Challenges in the Well Drilling Progress*. – 2015. – V. 24. – Art. numb. 012028.
 25. Structural-chemical features and morphology of glauconites in sedimentary iron ore of Bakchar prospect (Western Siberia) / M. Rudmin, I. Reva, A. Gunko, A. Mazurov, R. Abramova // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* – 2015. – V. 27. – Art. numb. 012026.
 26. Depositional controls on glaucony texture and composition, Upper Jurassic, West Siberian Basin / V.G. Eder, A. Martín-Algarra, A. Sánchez-Navas, Y.N. Zanin, A.G. Zamirailova, Y.N. Lebedev // *Sedimentology*. – 2007. – V. 54. – P. 1365–1387.
 27. Color, mineralogy and composition of Upper Jurassic West Siberian glauconite: useful indicators of paleoenvironment / A. Sánchez-Navas, A.M. Algarrá, V. Eder, B.J. Reddy, F. Nieto, Y.N. Zanin // *The Canadian Mineralogist*. – 2008. – V. 46. – P. 1545–1564.
 28. Courbe C., Velde B., Meunier A. Weathering of glauconites: reversal of the glauconitization process in a soil profile in western France // *Clay Minerals*. – 1981. – V. 16. – P. 231–243.
 29. Taylor S.R., McLennan S.M. *The Continental Crust: its Composition and Evolution*. – UK: Blackwell, 1985. – 384 p.
 30. Kelly J.C., Webb J.A. The genesis of glaucony in the Oligo-Miocene Torquay Group, southeastern Australia: petrographic and geochemical evidence // *Sedimentary Geology*. – 1999. – V. 125. – P. 99–114.
 31. Lee C.H., Choi S., Suh M. High iron glaucony from the continental shelf of the Yellow Sea off the southwestern Korean Peninsula // *Journal of Asian Earth Science*. – 2002. – V. 20. – P. 507–515.
 32. El Albani A., Meunier A., Fürsich F. Unusual occurrence of glauconite in a shallow lagoonal environment (Lower Cretaceous, northern Aquitaine Basin, SW France) // *Terra Nova*. – 2005. – V. 17. – P. 537–544.
 33. Страхов Н.М. Железородные фации и их аналоги в истории Земли. – М.: Изд-во АН СССР. – 1947. – 266 с.
 34. Biological processes and apatite formation in sedimentary environments / K.P. Krajewski, P. Cappelen, J. Trichet, O. Kuhn, J. Lucas, A. Martín-Algarra, L. Prevot, V.C. Tewari, L. Gaspar, R.I. Knight, M. Lamboy // *Eclogae Geologicae Helvetiae*. – 1994. – V. 87 (3). – P. 701–745.

Поступила 20.04.2016 г.

Информация об авторах

Рудмин М.А., кандидат геолого-минералогических наук, ассистент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Мазуров А.К., доктор геолого-минералогических наук, первый проректор, профессор кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Рева И.В., студент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 553.21:549.02:553.679

MINERAL MICROINCLUSIONS IN GLAUCONITE OF BAKCHAR DEPOSIT (TOMSK REGION)

Maxim A. Rudmin¹,
rudminma@tpu.ru

Aleksey K. Mazurov¹,
akm@tpu.ru

Igor V. Reva¹,
igor_1993@mail.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Due to its unique properties glauconite is a prospective geological information source. Glauconite is an active natural sorbent. It can accumulate elements in the environment of sedimentation, which subsequently form a new mineral phase within the granules of glauconite.

The relevance of the study is determined by the possibility of awareness of sedimentation on the basis and through the study of the matter created by them within the Bakchar deposit.

The main aim of the research is to study the mineral microinclusions in glauconite of Bakchar deposit to describe the mineral substrate coming into sedimentation basin.

The methods used in the study: samples sieving into granulometric classes with the size more than 1mm, 1...0,5, 0,5...0,2, 0,2...0,1, less than 0,1 mm; electromagnetic separation (EVS 10/5) at 4...2 A; additional cleaning of glauconite grains from magnetic fraction under a binocular microscope; pressed pellet production; scanning electron microscope (TESCAN VEGA 3 SBU) with energy dispersive attachment OXFORD X-Max50 for X-ray spectroscopic analysis.

With the help of electron microscopy, microinclusions of gold, silver and other minerals (phosphates, sulfides, sulfates, oxides, and silicates) were found in the glauconites of Bakchar deposit. Mineral associations of microinclusions indicate the occurrence of precious, non-ferrous and rare metals in the sedimentation environment. It is assumed that glauconite as an active natural sorbent «was loaded» by metals and ultrafine terrigenous components on the background of hydrogen sulfide contamination of sediment with microorganisms. These conditions were favorable for forming new mineral phases of sulfides, sulfates and gold. The findings are a sign of potential gold mineralization of glauconite rocks of Bakchar deposit.

Key words:

Glauconite, gold, microinclusions, sulphides, Bakchar deposit.

The research was financially supported by the RFBR and the authorities of Tomsk region within the scientific project 16–45–700090.

REFERENCES

- Odin G.S., Matter A. De glauconiarium origine. *Sedimentology*, 1981, vol. 28, pp. 611–641.
- Nikolaeva I. *Mineraly gruppy glaukonita v osadochnykh formatsiyakh* [Minerals of Glauconite Group in Sedimentary Formations]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977. 319 p.
- Drits V.A., Kossovskaya A.G. Geneticheskie tipy dioktaedricheskikh slyud. Soobshchenie 1. Semeystvo zhelezisto-magnezialnykh slyud (glaukonity, seladonity) [Genetic types of dioctahedral mica. Issue 1. The family of iron-magnesia mica (glauconite seladonite)]. *Lithology and mineral resources*, 1986, no. 5, pp. 563–580.
- Banerjee S., Chattoraj S.L., Saraswati P.K., Dasgupta S., Sarkar U. Substrate control on formation and maturation of glauconites in the Middle Eocene Harudi Formation, western Kutch. *India Marine and Petroleum Geology*, 2012, vol. 30, pp. 144–160.
- Banerjee S., Bansal U., Pande K., Meena S.S. Compositional variability of glauconites within the Upper Cretaceous Karai Shale Formation, Cauvery Basin, India: implications for evaluation of stratigraphic condensation. *Sedimentary Geology*, 2016, vol. 31, pp. 12–29.
- Banerjee S., Bansal U., Thorat A.V. A review on palaeogeographic implications and temporal variation in glaucony composition. *Journal of Palaeogeography*, 2016, vol. 5 (1), pp. 43–71.
- Meunier A., El Albani A. The glauconite-Fe-illite-Fe-smectite problem: a critical review. *Terra Nova*, 2007, vol. 19, pp. 95–104.
- Wigley R., Compton J.S. Oligocene to Holocene glauconite-phosphorite grains from the Head of the Cape Canyon on the western margin of South Africa. *Deep-Sea Research II*, 2007, vol. 54, pp. 1375–1395.
- Kossovskaya A.G., Drits V.A. The variability of micaceous minerals in sedimentary rocks. *Sedimentology*, 1970, vol. 15, pp. 83–101.
- Nikolaeva I.V. Fatsialnaya zonalnost khimicheskogo sostava mineralov gruppy glaukonita i opredelyayushchie ee factory [Facies zonation of the chemical composition of glauconite group minerals and its determinants]. *Mineralogiya i geokhimiya glaukonita* [Mineralogy and geochemistry of glauconite]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981. pp. 4–41.
- Miletsky B.E. Glauconite sand is possible ore-metal formation. *Ores and metals*, 2012, vol. 3, pp. 69–71. In Rus.
- Pshenichkin A.Ya., Domarenko V.A. Petrography and geochemical features of the Bakchar deposit. *Siberian Journal of Science*, 2011, no. 1 (1), pp. 13–18. In Rus. Available at: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/17/82> (accessed 25 November 2011).
- Rudmin M., Mazurov A., Bolsunovskaya L. Mineral and elemental composition features of «Loose» oolitic ores in Bakchar iron ore cluster (Tomsk Oblast). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014, vol. 21 (1), art. numb. 012003.

14. Cline J.S., Hofstra A.H., Manteau J.L. Carlin-Type Gold Deposits in Nevada: Critical Geologic Characteristics and Viable Models. *Econom. Geol., 100th Anniversary Volume*, 2005, pp. 451–484.
15. Guo W., Wei L., Zhang X.T., Bai Y.B. The assembly of gold nanoparticle monolayer onto mica substrate. *Chem. J. Chinese Univ.*, 2001, vol. 22, pp. 1987–1989.
16. Zhmodik S.M., Kalinin Yu.A., Roslyakov N.A., Mironov A.G., Mikhlin Yu.L., Belyanin D.K., Nemirovskaya N.A., Spiridonov A.M., Nesterenko G.V., Airiyants E.V., Moroz T.N., Bul'bak T.A. Nanoparticles of noble metals in the supergene zone. *Geology of Ore Deposits*, 2012, vol. 54, Iss. 2, pp. 141–154.
17. Nikitin N.M., Yasyrev A.P. O srednem sodержanii zolota v osadochnykh porodakh [On average gold content in sedimentary rocks]. *Geochemistry*, 1974, no. 8, pp. 1237–1239.
18. Nesterenko G., Kolpakov V., Boboshko L.P. Native gold in complex Ti–Zr placers of the southern West Siberian Plain. *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, Iss. 12, pp. 1484–1498.
19. Oskina Y., Pakrieva E., Ustinova E., Kryazhov A. Decomposition and Preconcentration Methods for the Determination of Pt, Pd, Re in Mineral Raw Materials. *Advanced Materials Research. Scientific Journal*, 2014, vol. 1040, pp. 278–281.
20. Jiménez-Millán J., Molina J.M., Nieto F., Nieto L., Ortiz P.A.R. Glauconite and phosphate peloids in Mesozoic carbonate sediments (Eastern Subbetic Zone, Betic Cordilleras, SE Spain). *Clay Minerals*, 1998, vol. 33, pp. 547–559.
21. Delamette M. Trace fossil assemblages from the Albian phosphate-rich sandstones of the Helvetic Shelf (Western Alps). *Cretaceous Research*, 1989, vol. 10, pp. 207–219.
22. Garzanti E., Haas R., Jadoul F. Ironstones in the Mesozoic passive margin sequence of the Tethys Himalaya (Zaskar, Northern India): sedimentology and metamorphism. T.P. Young, W.E.G. Taylor (Eds.), *Phanerozoic Ironstones. Geological Society Special Publication*, 1989, vol. 46, pp. 229–244.
23. Amorosi A. The occurrence of glaucony in the stratigraphic record: distribution patterns and sequence-stratigraphic significance. *International Association of Sedimentologists Special Publications*, 2012, vol. 45, pp. 37–54.
24. Rudmin M., Mazurov A., Ruban A. Facies and Sedimentation Model of Iron-ore Sequence in Bakchar Deposit. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.: Scientific and Technical Challenges in the Well Drilling Progress*, 2015, vol. 24, art. numb. 012028.
25. Rudmin M., Reva I., Gunko A., Mazurov A., Abramova R. Structural-chemical features and morphology of glauconites in sedimentary iron ore of Bakchar prospect (Western Siberia). *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2015, vol. 27, art. numb. 012026.
26. Eder V.G., Martín-Algarra A., Sánchez-Navas A., Zanin Y.N., Zamirailova A.G., Lebedev Y.N. Depositional controls on glaucony texture and composition, Upper Jurassic, West Siberian Basin. *Sedimentology*, 2007, vol. 54, pp. 1365–1387.
27. Sánchez-Navas A., Algarra A.M., Eder V., Reddy B.J., Nieto F., Zanin Y.N. Color, mineralogy and composition of Upper Jurassic West Siberian glauconite: useful indicators of paleoenvironment. *The Canadian Mineralogist*, 2008, vol. 46, pp. 1545–1564.
28. Courbe C., Velde B., Meunier A. Weathering of glauconites: reversal of the glauconitization process in a soil profile in western France. *Clay Minerals*, 1981, vol. 16, pp. 231–243.
29. Taylor S.R., McLennan S.M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. UK, Blackwell, 1985. 384 p.
30. Kelly J.C., Webb J.A. The genesis of glaucony in the Oligo-Miocene Torquay Group, southeastern Australia: petrographic and geochemical evidence. *Sedimentary Geology*, 1999, vol. 125, pp. 99–114.
31. Lee C.H., Choi S., Suh M. High iron glaucony from the continental shelf of the Yellow Sea off the southwestern Korean Peninsula. *Journal of Asian Earth Science*, 2002, vol. 20, pp. 507–515.
32. El Albani A., Meunier A., Fürsich F. Unusual occurrence of glauconite in a shallow lagoonal environment (Lower Cretaceous, northern Aquitaine Basin, SW France). *Terra Nova*, 2005, vol. 17, pp. 537–544.
33. Strakhov N.M., Zhelezorudnye fatsii i ikh analogi v istorii Zemli [Iron Ore Facies and their Analogues in the Earth's History]. *Tr. IGAN SSSR. Geol. Ser.*, 1947, vol. 22, pp. 231–243.
34. Krajewski K.P., Cappelen P., Trichet J., Kuhn O., Lucas J., Martín-Algarra A., Prevot L., Tewari V.C., Gaspar L., Knight R.I., Lamboy M. Biological processes and apatite formation in sedimentary environments. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 1994, vol. 87 (3), pp. 701–745.

Received: 20 April 2016.

Information about the authors

Maxim A. Rudmin, Cand. Sc., teaching assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

Aleksey K. Mazurov, Dr. Sc., first vice-rector, professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Igor V. Reva, student, National Research Tomsk Polytechnic University.