

УДК 552.144

ПИРИТИЗАЦИЯ ПОРОД ЗОН ПЕРЕХОДА ЧЕРНОСЛАНЦЕВОЙ ТОЛЩИ К ВМЕЩАЮЩИМ ОТЛОЖЕНИЯМ НА ПРИМЕРЕ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2020 г. В. Г. Эдер*

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
просп. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, 630090 Россия*

**e-mail: edervika@gmail.com*

Поступила в редакцию 29.12.2018 г.

После доработки 30.10.2019 г.

Принята к публикации 30.10.2019 г.

В породах верхнеюрско-нижнемеловой баженовской свиты и зонах ее перехода к вмещающим отложениям проведен комплекс литолого-геохимических исследований: проанализированы состав пород, соотношение в них органического углерода и сульфидной серы (распределение значений C/S), распределение ряда редокс-показателей (степени пиритизации, содержания аутигенного урана, величин отношений Mn/Al и Mo/Mn), а также изучены особенности морфологии пирита в сканирующем электронном микроскопе. Выявлены два основных типа пирита: а) фрамбоидальный, образованный в раннем диагенезе при участии бактериальной деятельности, б) скрытокристаллический, образование которого могло происходить в диагенезе (включая раннюю стадию) и в мезокатагенезе (*перевод англ. middle substage of catagenesis*). Показано, что некоторая часть скрытокристаллического пирита сформировалась раньше фрамбоидального. Установлено, что пиритизация пород, с образованием скрытокристаллического пирита происходит у нижней и верхней границ баженовской свиты, в выше- и нижележащих отложениях, где образуются “пиритовые” низкоуглеродистые породы. Интенсивная пиритизация наблюдается также в высокоуглеродистых породах баженовской свиты, залегающих вблизи ее кровли, где образуются “пирит-керогеновые” породы. Пиритовые породы обоих типов характеризуются значением отношения C/S < 1.5, в то время как в породах баженовской свиты C/S > 2. “Пиритовые” низкоуглеродистые и “пирит-керогеновые” породы располагаются у границ литологически различных пачек (преимущественно биогенного генезиса в баженовской свите и терригенного – во вмещающих породах), которые накапливались в разных окислительно-восстановительных условиях, существовавших в толще вод и вблизи дна морского палеобассейна. Границы таких пачек на более поздних стадиях литогенеза могли служить редокс-геохимическими барьерами. “Пиритовые” и “пирит-керогеновые” породы нами рассматриваются как пиритизированные в диагенезе, в результате осаждения пирита на редокс-геохимических барьерах из флюидов, содержащих сульфиды железа и мигрировавших из высокоуглеродистой баженовской толщи. Предположительно, пиритизация продолжалась на стадии катагенеза и была связана с термохимическими процессами преобразования органического вещества.

Ключевые слова: баженовская свита, черные сланцы, титон-берриас, пиритизация, C/S, редокс-условия.

DOI: 10.31857/S0024497X20030027

Скопления пирита и керогена морского происхождения являются основными породообразующими компонентами черносланцевой баженовской свиты (БС) Западной Сибири наряду с кремнеземом, глинистым и карбонатным веществом. По возрастному диапазону баженовская свита соответствует верхней части нижневолжского подъяруса – низам рязанского регионального яруса (верхней части нижнетитонского – нижней части нижнего берриаса) [Решение ..., 2004; Шурыгин, Дзюба, 2015]. Содержание как пирита, так и керо-

гена в породах баженовской свиты изменяется в пределах от 5 до 25% [Zanin et al., 2008; и др.]. По мнению большинства исследователей [Гурари, Матвиенко, 1980; Филина и др., 1984; Захаров, 2006; и др.], во время седиментации БС в палеобассейне преобладало сероводородное заражение, что способствовало накоплению значительного количества органического вещества (ОВ) в осадках и образованию в них высоких концентраций пирита.

Явления интенсивной пиритизации низкоуглеродистых пород, находящихся на границе с углеродистыми отложениями, в диагенезе при относительно низких температурах описаны в отложениях Черного моря [Волков, 1961; Страхов, 1960, 1976; Leventhal, 1995], Прибалтики [Страхов, 1960], в мезозойско-кайнозойских толщах юга России [Гаврилов, 2010]. Свидетельства процессов пиритизации, происходивших при высоких температурах в начале стадии катагенеза приведены Дж.С. Левенталем [Leventhal, 1995], Х.Г. Мачелом [Machel et al., 1995, 2001], а также З.А. Каниповой с соавторами [Канипова и др., 2014], А.Ю. Юрченко с соавторами [Юрченко и др., 2016]. По данным ряда исследователей [Страхов, 1960; Перельман, 1961, 1989; Гаврилов, 2010; Алексеенко, Алексеенко, 2003 и др.], свидетельств осаждения сульфидов следует ожидать на границах осадков разного состава, накапливавшихся в различных окислительно-восстановительных условиях.

Существование повышенных концентраций пирита в зоне перехода от БС к перекрывающим отложениям ранее было отмечено [Зубков, 2016; Панченко и др., 2016] в разрезах центральной части Западно-Сибирского осадочного бассейна (ЗСБ), но генезис их не обсуждался.

Целью настоящего исследования являлось выявление свидетельств образования пирита на геохимических барьерах в черных сланцах и зонах их контакта с вмещающими отложениями (на примере баженовской свиты). В задачи работы входило: 1) выяснение закономерностей распределения пирита по разрезу БС, выявление приуроченности его повышенных концентраций к определенным интервалам баженовской толщи; 2) анализ корреляционной связи между величинами содержания органического углерода (С) и серы сульфидной (S), распределения значений отношения С/S по разрезу; 3) определение интервалов с резкими изменениями окислительно-восстановительного режима и исследование приуроченности к ним повышенных концентраций пирита.

Полученные результаты будут способствовать уточнению постседиментационной истории формирования одной из крупнейших черносланцевых толщ мира, внесут вклад в понимание процессов аутигенного минералообразования, в частности пирита, позволят решать задачи корреляции и детального литостратиграфического расчленения баженовского горизонта Западной Сибири.

В ходе выполнения работы исследованы 25 разрезов БС, вскрытых скважинами в Центральном, Северном, Юго-восточном, Юго-западном и Южном районах ЗСБ и охарактеризованных керном. Центральный район разделен автором условно на

три подрайона: Салымский, Юганский и Северо-Сургутский (рис. 1).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Особенности структуры и минерального состава пород изучались в шлифах с помощью поляризационного микроскопа Olympus BX60. Необходимо отметить, что матрица пород, насыщенных органическим веществом, часто непрозрачна, и ее исследование методом оптической микроскопии не вполне результативно. В этой связи классические петрографические исследования пород сочетались с исследованиями в сканирующих электронных микроскопах (СЭМ) TEXCAN MIRA и LEO-1430VP, оснащенных энергодисперсионными спектрометрами INCAEnergy 350, учитывались результаты рентгеноструктурного анализа и определения химического состава пород.

Основная часть скважин, в которых были изучены разрезы БС Центрального района ЗСБ, характеризуется 100%-ным выходом керна. Отбор на аналитические исследования образцов БС, представленной в этих разрезах, был проведен через 0.1–0.5 м. В образцах слоистых пород прослой разного состава, если было возможно, анализировались литологическими и геохимическими методами для более детальной характеристики особенностей осадконакопления и геохимической обстановки. При переходе от БС к вмещающим отложениям (у нижней и верхней границ свиты) происходят следующие изменения состава пород: резкое падение содержания керогена (с 10–25 до 1–5%), изменение генезиса кремнезема с преимущественно биогенного до терригенного, увеличение содержания глинистого материала (с 20–30 до 40–60%), уменьшение содержания биогенного карбонатного материала (с 10–30 до 0–5%). Вследствие этого границы свиты уверенно определяются по данным геолого-геофизических исследований (ГИС) – в частности гамма (ГК) и бокового каротажей (БК). Данные спектрального гамма-каротажа керна, а также результаты определения содержаний U, Th и K методом сцинтилляционной гамма-спектрометрии использовались в дальнейшем для детализации привязки керна к результатам ГИС.

Химические анализы пород с определением основных породообразующих окислов (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , MnO , K_2O , Na_2O , P_2O_5 , BaO) выполнялись рентгенофлуоресцентным методом (РФА) на спектрометре ARL-9900-XP. Определение содержания в породах серы сульфидной, сульфатной и форм железа осуществлялось методами “мокрой химии”, органического углерода – весовым полумикрометодом с помощью экспресс-анализатора (АН-7529) на углерод.

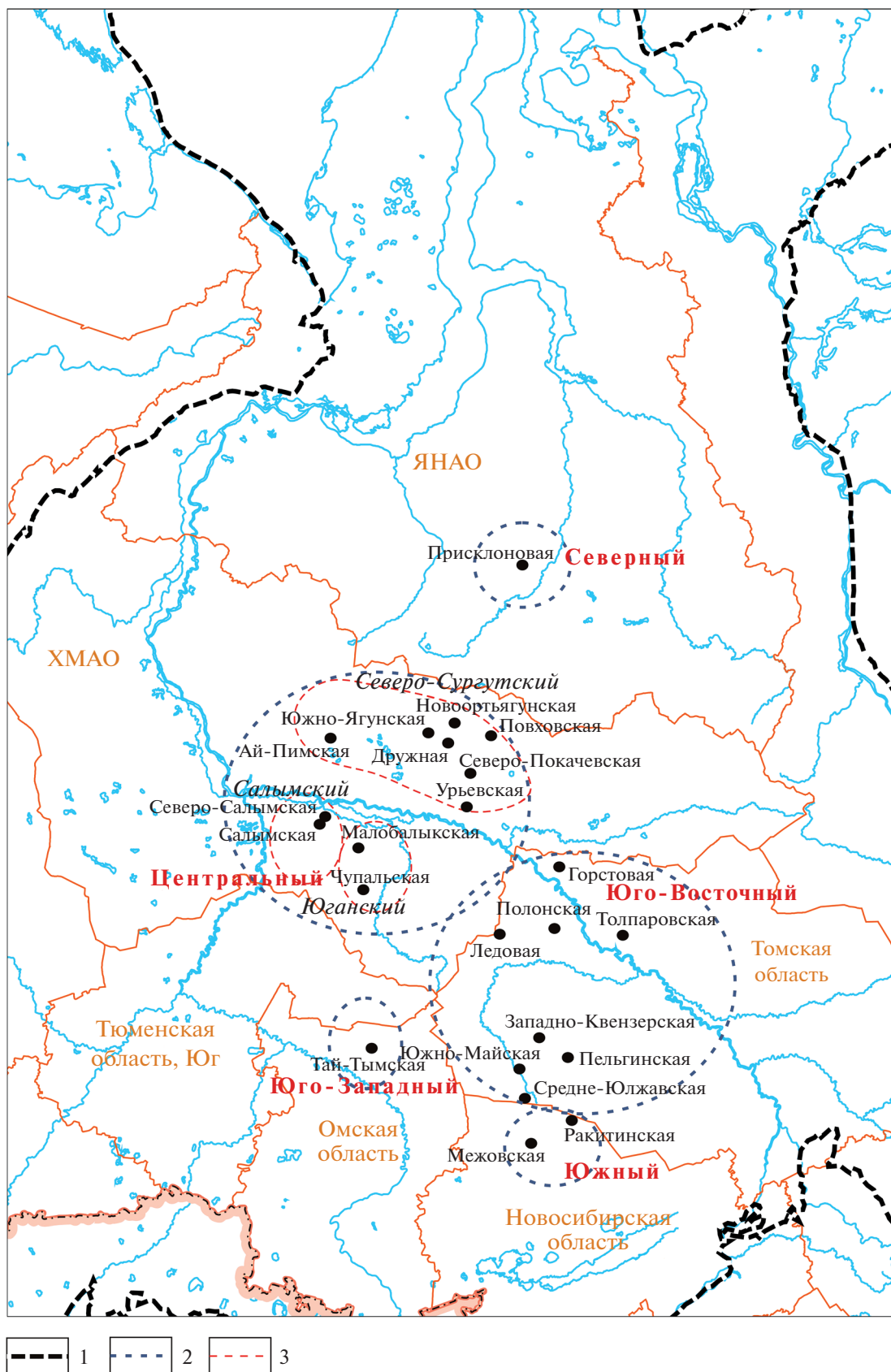


Рис. 1. Схема расположения изученных разрезов баженовской свиты.
1–3 – границы – выклинивания мезозоя (1), изучаемых районов (2), подрайонов (3).

По результатам анализов проведен пересчет химического состава пород на минеральный по методике О.М. Розена с соавторами [Розен и др., 2000], далее породы были типизированы и названы в соответствии с классификацией А.Э. Конторовича с соавторами [Конторович и др., 2016]. В рамках этой классификации для пород баженовской свиты введено понятие “микститы” (био-хемогенные микститы) — это класс пород, в которых содержание ни одного из породообразующих компонентов (кремнезем, глинистое и карбонатное вещество, кероген) не достигает 50%. Термин “микстит” эквивалентен ранее используемому [Шванов и др., 1988] термину “смешанные породы” и введен в вышеупомянутой классификации для удобства использования, как более краткое название. Он также соответствует термину “mudstone” классификации тонкозернистых пород, предложенной О.Р. Лазаром [Lazar et al., 2015]. В тексте настоящей статьи термин “кероген” используется для обозначения всего, в т.ч. дебитуминизированного ОВ породы, содержание которого рассчитано по величине $C_{орг}$ с учетом степени катагенеза [Богородская и др., 2005].

Для выявления признаков интенсивной пиритизации использовалась величина отношения содержания органического углерода к сере сульфидной (C/S) [Berner, Raiswell, 1983; Berner, 1984; Leventhal, 1995; и др.]. В осадках, отлагавшихся в нормально-морских условиях, значение C/S около 3 [Berner, Raiswell, 1983]. Дж.С. Левенталь [Leventhal, 1995] пришел к выводу, что породы с $C/S = 1$ повторно претерпели пиритизацию.

Для всех изученных разрезов БС построены диаграммы распределения отношения C/S и проанализированы коэффициенты корреляции между величинами содержания органического углерода и серы сульфидной в породах; также построены диаграммы распределения по разрезу величин содержания кремнезема и глинистого материала, кальцита, доломита, пирита и органического углерода, которые сопоставлены с распределением показателя C/S. Для реконструкции окислительно-восстановительных условий среды формирования пород использовались следующие показатели: степень пиритизации железа (СП — перевод англ. DOP) [Raiswell et al., 1988], содержание урана аутигенного (U_a), величины отношений марганца к алюминию (Mn/Al) и молибдена к марганцу (Mo/Mn).

Согласно Л.А. Гуляевой [1953] и Р. Райсвеллу с соавторами [Raiswell et al., 1988], степень пиритизации железа определяется следующим образом:

$$СП = Fe_{пир} / (Fe_{пир} + Fe_{reactive}).$$

Р. Райсвеллом с соавторами [Raiswell et al., 1988] предложены следующие граничные значения и соответствующие им обстановки: СП < 0.45

указывает на окислительные условия, $0.45 < СП < 0.75$ — на диоксидные условия, СП > 0.75 — на аноксидные и эвксинные условия. Очень низкие значения Mn/Al < 0.005, согласно П. Хофману [Hofmann et al., 1999], указывают на бескислородные условия в течение седиментации.

Отношение Mo/Mn используется в качестве редокс-показателя, так как эти элементы противоположным образом реагируют на изменения газового режима наддонных вод [Холодов, Недумов, 1991]. Молибден активно осаждается в условиях сероводородного заражения, тогда как марганец, напротив, находится в этих условиях в растворенной форме [Холодов, Недумов, 1991; Pratt et al., 1991; Холодов, 2006; и др.]. При смене режима на окислительный, марганец выпадает в осадок, а молибден переходит в растворенную форму. По данным В.Н. Холодова и Р.Н. Недумова [1991], значения Mo/Mn > 0.0n характеризуют бескислородные условия в наддонных водах; Mo/Mn от 0.0n до 0.00n — субоксидные; Mo/Mn < 0.00n — оксидные.

В бескислородных условиях уран химически осаждается из морской воды в осадок, в виде т.н. аутигенного урана [Wignall, Myers, 1988; Wignall, 1994]. Доля урана аутигенного (U_a) в общем содержании урана (U_{total}), находящегося в породах, согласно [Wignall, Myers, 1988], определяется как

$$U_a = U_{total} - Th/3.$$

По данным этих авторов, значения $U_a < 2$ указывают на оксидные условия; $2 < U_a < 10$ — на субоксидные; $10 < U_a < 15$ — на аноксидные (бескислородные), а значения $U_a > 15$ — характерны для эвксинных условий.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При анализе корреляционной зависимости между содержанием серы сульфидной и органического углерода в породах баженовской свиты, в большинстве изученных разрезов устанавливаются низкие значения коэффициента детерминации ($R^2 = 0.2-0.5$, редко 0.6), при этом во многих разрезах основная масса проанализированных образцов выделяется в группу, в которой содержания этих элементов явно связаны прямой зависимостью. Но, как видно из приведенных графиков (рис. 2), существуют и отклонения. Определено, что в таких образцах, представлены: 1) породы из зон перехода БС к вмещающим отложениям подстилающей георгиевской (абалакской) свиты и перекрывающей подачимовской толщи, с относительно низкими содержаниями керогена (0–5%) и повышенными — пирита (более 7%, часто более 10–15%); 2) породы БС с примерно равными высокими содержаниями пирита и керогена (10–20% и более каждого компонента). Поро-

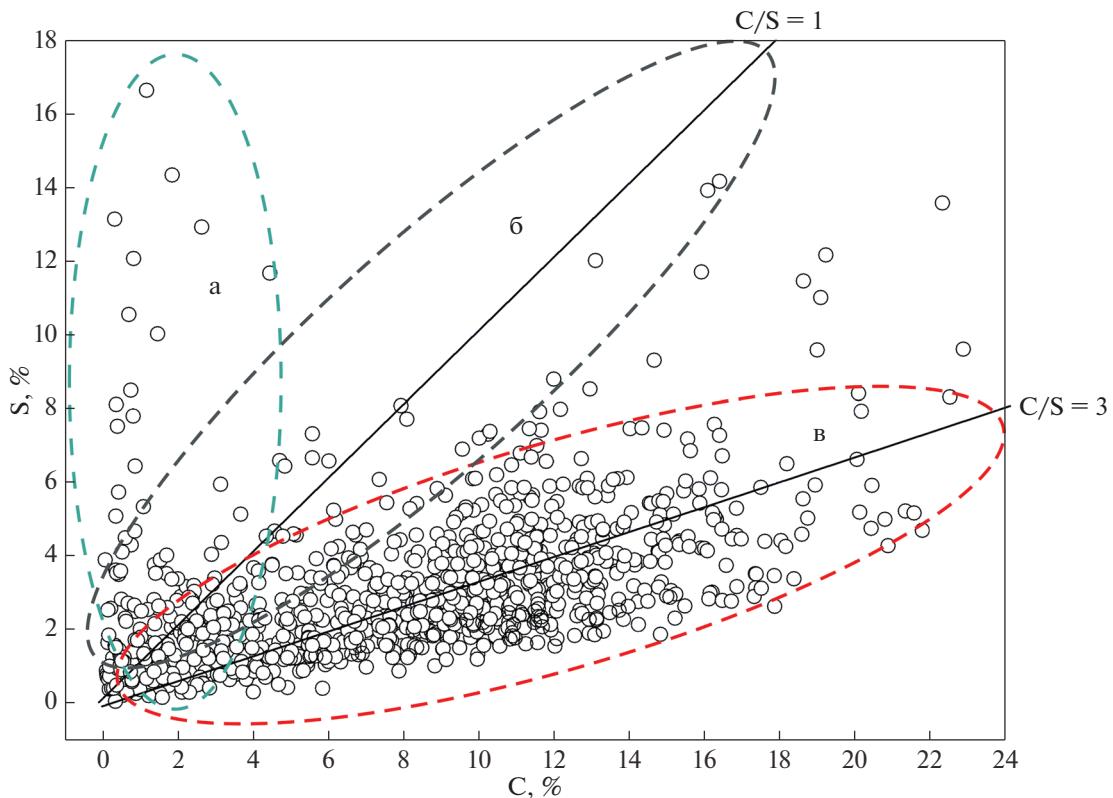


Рис. 2. Диаграмма корреляционной зависимости между органическим углеродом (С) и серой сульфидной (S) в породах баженовской свиты и зонах ее перехода к вмещающим отложениям. а – “пиритовые” низкоуглеродистые породы зон перехода баженовской свиты к вмещающим отложениям; б – “пирит-керогеновые” породы с C/S около 1; в – породы баженовской свиты с C/S около 3, подчиняющиеся линейной значимой положительной зависимости.

ды первого типа были названы – “пиритовыми”, второго типа – “пирит-керогеновыми”.

При исключении образцов “пиритовых” и “пирит-керогеновых” пород из анализируемой выборки, значение коэффициента детерминации, рассчитанного для серы сульфидной и органического углерода, заметно возрастает ($R^2 = 0.7-0.9$), т.е. прямая зависимость между величинами содержания этих элементов в породах БС становится более значимой (см. рис. 2).

По результатам исследования в СЭМ, установлено два морфологических типа пирита (рис. 3) в интенсивно пиритизированных породах, присутствующих в толще БС и в зонах ее перехода к вмещающим отложениям: 1) скрытокристаллический (см. рис. 3а, б, д, е) и кристаллический (см. рис. 3г); 2) фрамбоидальный (см. рис. 3а, б, в).

Фрамбоидальный пирит более широко распространен в породах БС. Скрытокристаллический и кристаллический пирит образует мелкие линзы, микропрослойки и довольно мощные (от нескольких сантиметров до одного метра) прослои в зонах перехода БС к ниже- и вышележащим отложениям. По характеру взаимоотно-

шений с фрамбоидальным пиритом, который в некоторых случаях выполняет пустоты в скрытокристаллических агрегатах пирита, можно судить о более позднем формировании фрамбоидального – на стадии раннего диагенеза (см. рис. 3а, б, г). Фрамбоиды пирита в породах БС имеют размерность 6–9 микрон, а фрамбоиды в пиритизированных породах зон перехода во вмещающие отложения – 10–14 микрон. В целом наблюдается тенденция изменения диаметра фрамбоидов, установленная ранее Р.Т. Уилкин с соавторами [Wilkin et al., 1996]: образования этого типа, сформировавшиеся в восстановительных обстановках (высокоуглеродистые осадки БС) характеризуются меньшим диаметром по сравнению с теми, которые были образованы в субоксидных обстановках (вмещающие БС глинистые осадки). Детальное изучение фрамбоидов пирита в отложениях БС представляет собой отдельное самостоятельное исследование, и в задачи этой работы не входило.

В высокоуглеродистых породах БС, величина отношения C/S изменяется в пределах 1.5–6. Низкоуглеродистые “пиритовые” породы локализируются вблизи подошвы и кровли БС (в кровле

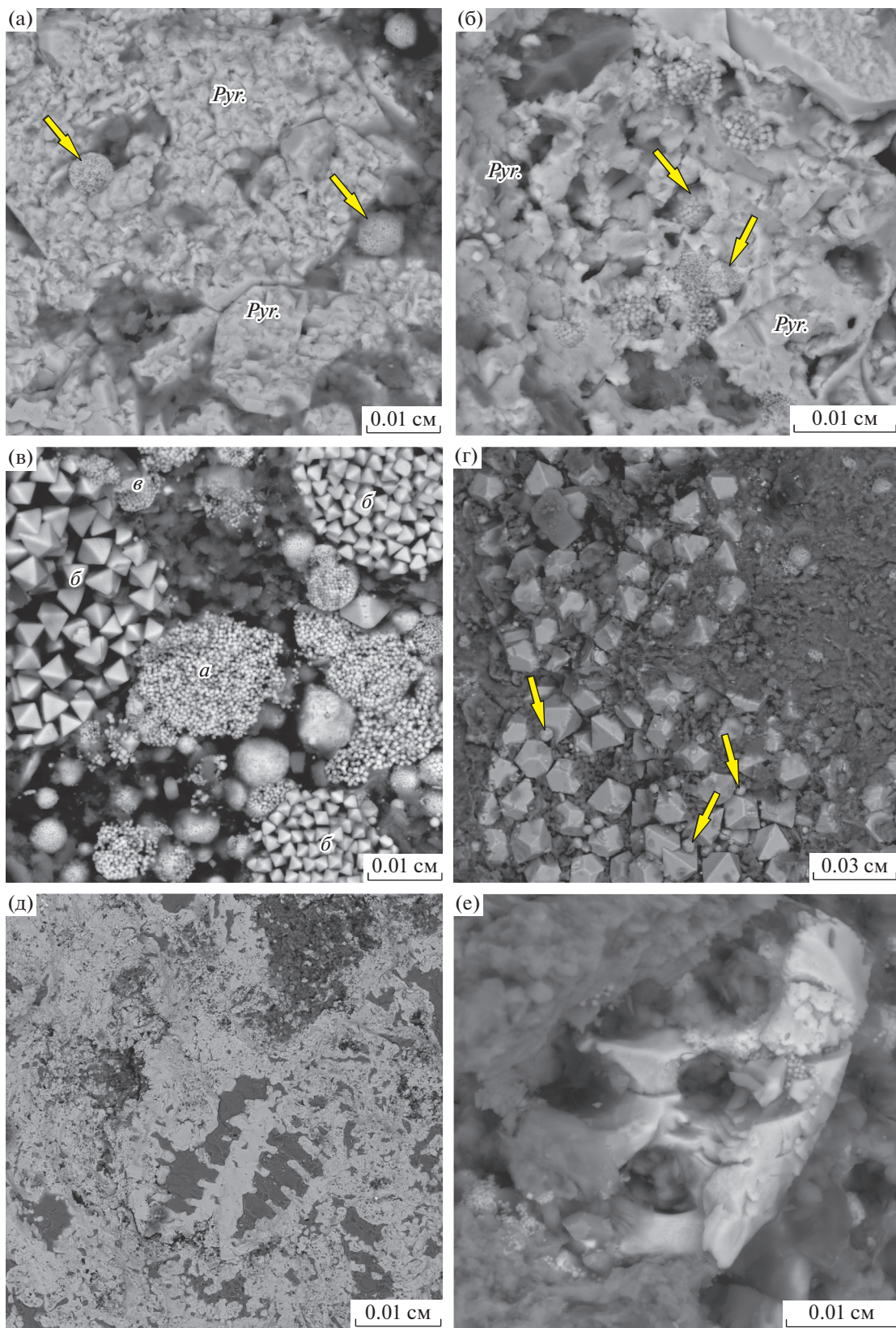


Рис. 3. Морфологические виды пирита баженовской свиты.

а, б – скрытокристаллический пирит с заполнением пустот фрамбоидами (стрелки); в – фрамбоиды пирита различных генераций (а – кубические, б – крупные – октаэдрические, в – пентагондодокаэдрические); г – кристаллический пирит с фрамбоидами, расположенными на гранях микрокристаллов (стрелки); д, е – замещение реликтов радиолярий скрытокристаллическим пиритом.

георгиевской или абалакской свит и у основания перекрывающей БС подачимовской толщи). В единичных случаях, прослой “пиритовых” пород этого типа встречаются в баженовской толще. Величина отношения C/S в “пиритовых” низкоуглеродистых породах в целом изменяется от 0.2 до 1, и редко достигает 1.5.

Так, например, в БС Салымского подрайона в прослоях “пиритовых” пород установлены следующие соотношения содержаний керогена и пирита (в числителе и знаменателе указаны %): 1/20, 2/16, 6/23, 0.7/7, 0.6/9, 0.4/24 и т.п., то есть при крайне низком содержании керогена концентрации пирита достаточно высокие. Толщина прослоев “пиритовых” пород, развитых над верхней границей БС Салымской и Северо-Салымской площадей, а также Северо-Сургутского подрайона (Дружная площадь) достигает 2.5–5.5 м, в остальных изученных разрезах – менее 1 м.

Прослой “пиритовых” пород присутствуют также в зоне перехода георгиевской свиты к БС, при этом на Новоортъягунской площади по мощности они достигают 2 м, на Повховской площади – 1.3 м. В некоторых разрезах Юго-восточного района (Арчинская, Пельгинская площади) мощность прослоев “пиритовых” пород в верхнем переходном интервале также достигает 1–2 м, в остальных разрезах – не превышает 0.5 м. В Северо-Сургутском подрайоне, на ряде площадей (Дружная, Новоортъягунская) и в Юго-западном районе (Тайтымская площадь) вблизи кровли георгиевской свиты и у нижней границы БС, т.е. в зоне перехода георгиевской свиты к БС, наблюдается переслаивание “пиритовых” кремнисто-глинистых пород с известняками или известково-доломитовыми породами.

При наблюдениях в керне “пиритовые” низкоуглеродистые породы, присутствующие в самой нижней части подачимовской толщи, практически не отличаются от “пиритовых” пород, относящихся к верхам БС. Однако в некоторых случаях в пределах этого переходного интервала окраска пород меняется с темно-серой, отчетливо коричневатой на темно-серую за счет уменьшения органического вещества. Текстуры “пиритовых” пород в зоне перехода массивные, по структуре породы скрытокристаллические. При изучении “пиритовых” пород в шлифах в них наблюдаются многочисленные пиритизированные линзочки толщиной 0.01–0.03 мм и длиной 0.05–0.07 мм, ориентированные по напластованию. Состав пород определялся при помощи комплекса химических анализов. “Пиритовые” низкоуглеродистые породы представлены, в основном, пиритизированными микститами кремнисто-глинистыми (с содержанием глинистого и кремнистого материала по 20–30%), а в некоторых случаях – пиритизированными доломитами или пиритизиро-

ванными известково-доломитовыми породами. В ряде случаев, в зонах перехода БС к вмещающим отложениям (чаще под нижней ее границей) присутствует серия “пиритовых” прослоев, образовавшихся по породам разного состава – кремнисто-глинистым, доломитовым, доломитово-известковым. Как правило, под нижней границей БС располагается низкокарбонатный “пиритовый” слой, который, в свою очередь, подстилается карбонатной или карбонатсодержащей “пиритовой” породой. Над верхней границей БС, в зоне ее перехода к вышележащей подачимовской толще, “пиритовые” прослой слагаются в основном микститами кремнисто-глинистыми.

“Пирит-керогеновые” породы

“Пирит-керогеновые” породы обычно присутствуют в самой верхней части БС, вблизи ее кровли, и значительно реже встречаются ниже по разрезу. Эти породы подразделяются на два типа: 1) с содержанием керогена – более 20% и пирита – более 10%; 2) с примерно одинаковым (по 10–15%) содержанием керогена и пирита. Значение отношения C/S в прослоях обоих типов – около 1, и в основном не превышает 1.8–2, что резко отличается от пород остальной части разреза БС, для которых характерны значения C/S до 2–3 и более (что отмечено выше).

Прослой микститов глинисто-кремнистых, в которых содержание керогена превышает 20% и пирита – более 10%, как правило, встречаются в БС, залегая вблизи ее кровли часто вместе с доломитовыми или известковыми прослоями, а также породами с примерно одинаковым (по 10–15%) содержанием керогена и пирита (рис. 4, 5). Прослой “пирит-керогеновых” пород второго типа могут встречаться как в самой верхней части БС, у ее кровли, так и на других ее уровнях.

В разрезах Малобалыкской и Чупальской площадей, в 2 м ниже кровли БС залегают пачка мощностью 1–2 м, в которой наблюдается следующий характер переслаивания (сверху вниз): микстит доломитисто-кремнисто-глинистый, “пирит-керогеновая” порода (керогена – 25%, пирита – 20%), известняк доломитовый, “пирит-керогеновая” порода (керогена – 16%, пирита – 13%). В некоторых скважинах Северо-Сургутского подрайона (Повховская и Дружная площади) подобная пачка переслаивающихся пород наблюдается непосредственно у верхней границы БС, под “пиритовым” слоем мощностью 0.2–0.5 м. На Южно-Ягунской площади этого подрайона пачка переслаивания залегают в 3 м ниже кровли БС, и ее мощность достигает 3.5 м. В прослоях “пирит-керогеновых” пород установлены следующие соотношения керогена и пирита (в числителе и знаменателе приведено содержание в %): 24/24, 24/19, 28/18. Указанные величины содержаний

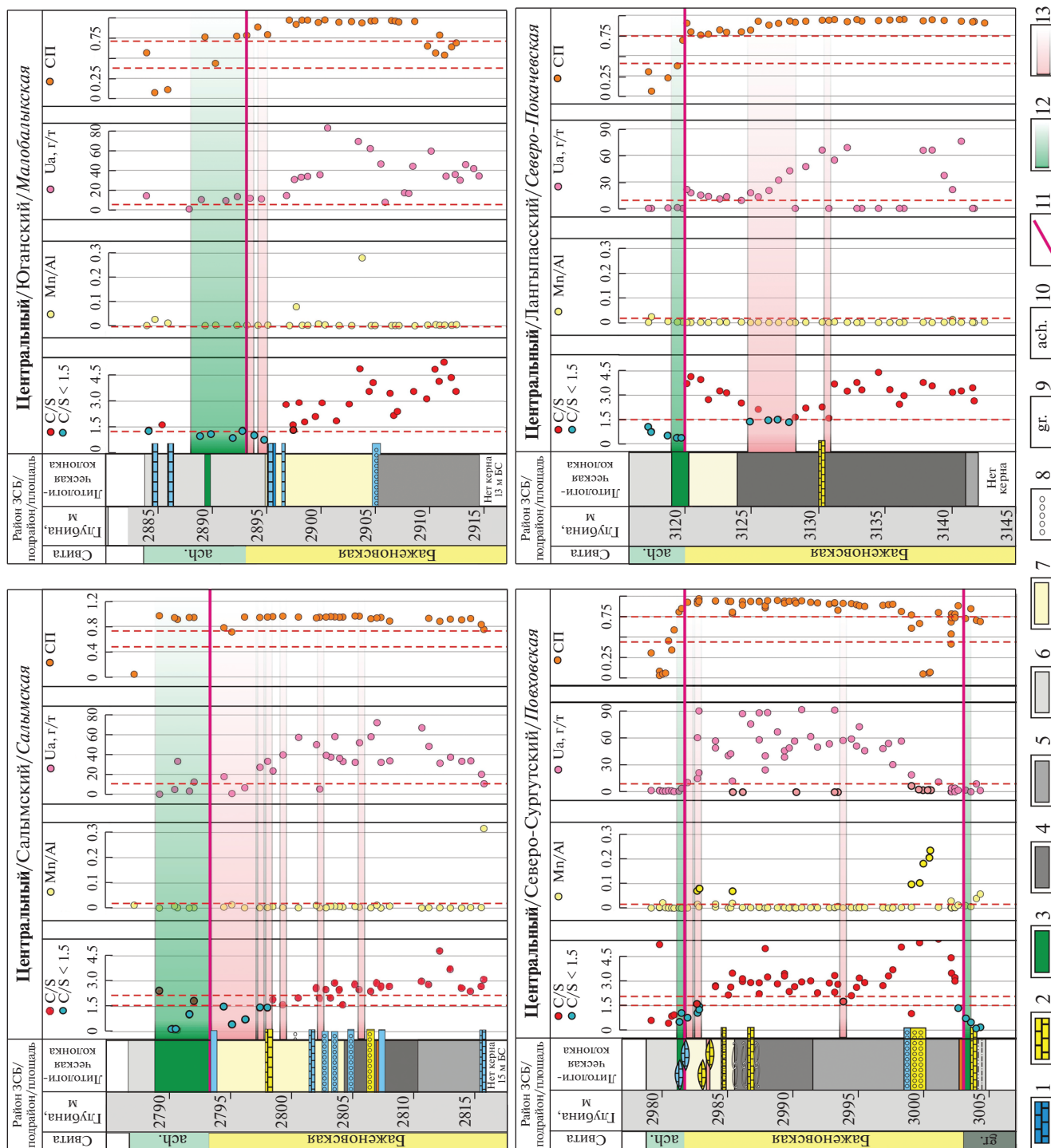


Рис. 4. Литологические колонки и распределение величин редокс-показателей (СП, U_a , Mn/Al) в породах баженовской свиты и зонах ее перехода к вмещающим отложениям в Центральном районе ЗСБ. 1–11 – литологическая колонка: 1 – доломитовые и доломитистые породы, 2 – известняки и известковые породы, 3 – “пиритовые” низкоуглеродистые породы, 4 – микститы кероген-глинисто-кремнистые, 5 – силициты, 6 – микститы глинистые и аргиллиты, 7 – микститы кероген-кремнисто-карбонатные с остатками кокколитов, 8 – апорадиолариты, 9 – георгиевская свита, 10 – подачимовская толща, 11 – границы баженовской свиты; 12, 13 – диаграммы изменения редокс-показателей: 12 – “пиритовые” породы, 13 – “пирит-керогеновые” породы.

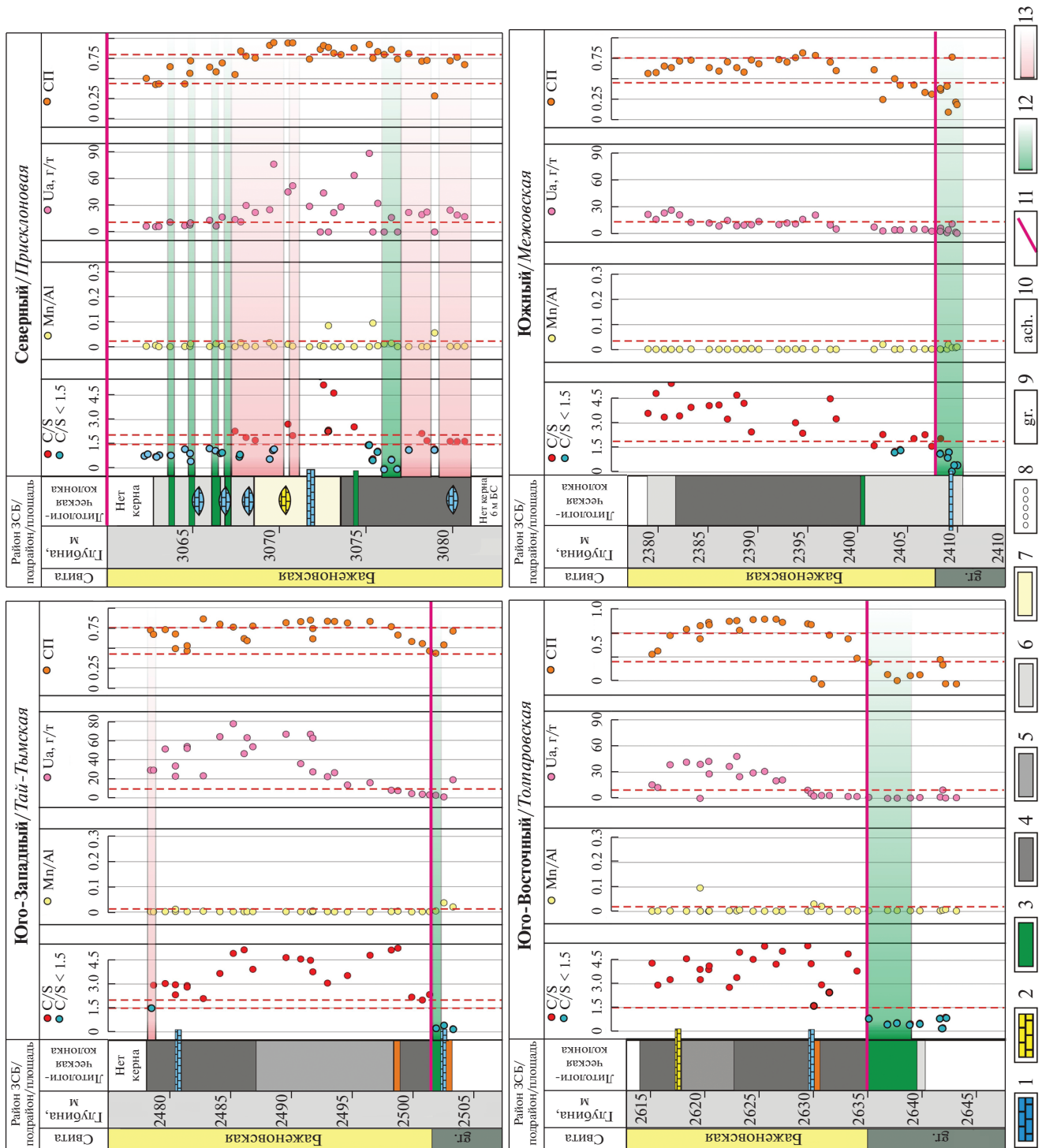


Рис. 5. Литологические колонки и распределение величин редокс-показателей (СП, U_a , Mn/Al) в породах баженовской свиты и зонах ее перехода к вмещающим отложениям в Юго-восточном, Юго-западном, Южном и Северного районах ЗСБ. Условные обозначения см. рис. 4.

этих компонентов являются самыми высокими в разрезе БС. На Салымской площади мощность рассматриваемой пачки около 2 м, соотношение керогена и пирита: (в числителе и знаменателе

приведено содержание в %): 12/14, 9/8, 12/14 и 14/15, т.е. содержание обоих компонентов понижено по сравнению с породами приведенных выше разрезов. В БС Северо-Салымской площади

мощность пачки чередования “пирит-керогеновых” и карбонатных пород около 3 м. Близкая по мощности пачка переслаивания установлена на Северо-Покачевской площади, однако она расположена в 5 м ниже кровли БС. На Ай-Пимской площади “пирит-керогеновая” пачка с прослоями карбонатных или карбонатсодержащих пород, мощностью около 2 м, также располагается в 5 м ниже кровли БС. Подобная пачка также встречается под верхней границей БС Юго-западного района ЗСБ (Тай-Тымская площадь, мощность 1 м), присутствует в некоторых разрезах БС Юго-восточного района (Арчинская площадь, мощность 1 м) и Северного района (Присклонная площадь, мощность 2.6 м).

В разрезах БС Юго-восточного района “пирит-керогеновая” пачка имеет несколько иные характеристики. Содержание керогена и пирита в слагающих ее породах существенно понижено по сравнению с такой же пачкой, присутствующей в БС центральной части Западной Сибири. Например, на Межовской площади Южного района ЗСБ, прослой с одинаковым содержанием этих компонентов присутствует у кровли БС (керогена — 5%, пирита — 5%) и в средней ее части (керогена — 7–10%, пирита — 7–10%) части БС. На Пельгинской и Полонской площадях “пирит-керогеновая” пачка (1–2 м) также характеризуется пониженным содержанием керогена (менее 10%), и пирита (менее 10%), и залегает в прикровельной части БС. В средней части разреза БС, вскрытого скважинами на этой территории, встречаются единичные прослои “пирит-керогеновых” пород в ассоциации с карбонатными прослоями. Закономерность распределения значений отношения C/S в отложениях БС, установленная в Центральном районе ЗСБ, сохраняется и в Юго-восточном районе.

Анализ изменений состава пород и величин редокс-показателей в интервалах распространения “пиритовых” низкоуглеродистых и “пирит-керогеновых” пород

Наблюдения показывают, что зоны интенсивной пиритизации вблизи кровли БС тесно связаны с изменениями содержания глинистого материала в породах. Так в Северо-Сургутском подрайоне содержание этого компонента увеличивается с 15–20% в породах БС до 40% и более в перекрывающих породах подачимовской толщи, на Северо-Покачевской площади — с 35 до 40%; в Салымском подрайоне — с 20–30 до 40–50%, в Юганском подрайоне — с 40 до 50%. Во многих разрезах над верхней границей БС (в зоне перехода БС в подачимовскую толщу) в породах резко уменьшается содержание карбонатного материала: с 5–20% и более до 0–1% (реже до 3%). Содержание кремнезема в породах практически не из-

меняется (20–25%). Однако генезис кремнезема у этой границы меняется коренным образом — с преимущественно биогенного на терригенный, и в породах заметно увеличивается количество мелкой алевритовой примеси.

Вблизи нижней границы БС, в георгиевской свите, в большинстве скважин, охарактеризованных керном, также присутствуют “пиритовые” низкоуглеродистые породы, и прослеживается сходная закономерность, связанная с изменениями содержания глинистого материала и биогенного кремнезема.

По результатам анализа величин отношений ряда химических элементов, использующихся нами в качестве редокс-показателей, можно предполагать, что в толще осадков БС на стадии диагенеза преобладали аноксидные условия, а в наддонных водах часто развивалось сероводородное заражение: в среднем в породах БС значения степени пиритизации железа $СП > 0.75$; доля урана аутигенного $U_a > 15$; величина отношения — Mn/Al не превышает 0.005, а $Mo/Mn > 1$.

В интервалах разреза, в которых распространены “пиритовые” породы, наблюдается резкое снижение степени пиритизации железа ($СП < 0.75$) и уменьшение содержания аутигенного урана ($U_a < 10$) (см. рис. 4, 5). В некоторых разрезах БС подобная тенденция снижения СП и уменьшения U_a отмечается в более низких горизонтах — в “пирит-керогеновых” породах БС, расположенных под ее кровлей (Салымская, Южно-Ягунская площади). Значения Mn/Al в подачимовской толще существенно не меняются (не превышают 0.005), молибдена к марганцу Mo/Mn составляют около 0.001, т.е. указывают на окислительные условия. На основании различий в значениях СП, U_a и Mo/Mn можно предполагать, что во время накопления осадков БС в них существовали восстановительные условия, тогда как в толще осадков подачимовской свиты — субоксидные до окислительных. При анализе величин редокс-показателей в “пиритовых” породах зоны перехода георгиевской (абалакской) свиты к БС также устанавливаются отличия от тех значений СП, U_a , Mn/Al и Mo/Mn , которые определены в породах БС и в подстилающих ее отложениях. Окислительные и субоксидные геохимические обстановки, существовавшие в наддонных водах и в верхнем слое осадков при накоплении георгиевской или абалакской свит, сменились резко восстановительными обстановками во время накопления БС (см. рис. 4, 5, разрезы Ракитинской, Толпаровской, Тай-Тымской, Повховской и др. площадей).

Таким образом, интенсивная пиритизация с образованием прослоев “пиритовых” низкоуглеродистых и “пирит-керогеновых” пород могла быть связана с колебаниями окислительно-вос-

становительного режима в толще отложений БС и его резкими изменениями в зонах ее перехода к вмещающим отложениям.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По данным И.В. Панченко и др. [2016], граница БС с перекрывающимися подачимовскими глинами часто бывает подчеркнута в керне мало-мощной (первые сантиметры) зоной пиритизации. М.Ю. Зубков [2016] отмечал, что в одной из скважин на Салымском месторождении был зафиксирован пласт толщиной до 1 м, сложенный на 40–60% пиритом и на 25–30% карбонатами (кальцитом, доломитом, сидеритом).

По данным Р. Бернера [Berner, 1983] и Дж. Левенталь [Leventhal, 1995], в аноксических обстановках ОВ и пирит взаимосвязаны. Поскольку в этих обстановках происходит образование в основном фрамбоидального (бактериогенного) пирита, количество пирита, образованного в осадках на стадии раннего диагенеза, зависит от содержания в них свежего реакционноспособного ОВ. В отложениях, накапливавшихся в аноксидных условиях, отношение C/S около 3 [Berner, 1983; Leventhal, 1995]. Как было показано выше, в породах БС преобладает фрамбоидальный пирит, образование которого, по мнению многих исследователей, обусловлено деятельностью сульфатредуцирующих бактерий в восстановительных условиях, существовавших в наддонных водах и в верхнем слое осадков [Герасименко, Заварзин, 1993; Maclean et al., 2008; Савельева и др., 2013; и др.]. Для пород БС характерна довольно тесная связь органического углерода и серы сульфидной. В “пиритовых” низкоуглеродистых и “пирит-керогеновых” породах, залегающих вблизи верхней и нижней границ БС, как было установлено в ходе настоящего исследования, такая связь между этими элементами отсутствует, что может служить признаком образования пирита в этих отложениях без участия бактериальной деятельности. Пирит в интенсивно пиритизированных породах подобного типа преимущественно кристаллический и скрытокристаллический.

По мнению Н.М. Страхова [1960] и Ю.О. Гаврилова [2010], интенсивно пиритизированные горизонты в разрезах осадочных толщ, часто бывают приурочены к границам, разделяющим породы с резко различными литологическими и геохимическими характеристиками, и эти границы соответствуют резким изменениям окислительно-восстановительного режима, существовавшего в осадочной толще на стадии диагенеза. Подобная пиритизация рассматривается как результат миграции сульфидной массы (гидротроилита) из углеродистых отложений, в которых она первоначально формировалась, под действием гравитационных сил [Страхов, 1960; Гаврилов,

2010], а также диффузии и элизионных процессов [Гаврилов, 2010]. Таким образом, по их мнению, миграция гелеобразного сульфида железа происходила из материнских пород в соседние – низкоуглеродистые, где его образование по геохимическим условиям было невозможно; и здесь происходила кристаллизация моносульфида железа в виде пирита.

Дж. Левенталь [Leventhal, 1995], исследуя осадки Черного моря, определил, что некоторые образцы характеризуются высоким содержанием сульфидной серы (более 1%) и низким – органического углерода (менее 1%). Таким образом, значения C/S в них не соответствуют модели Р. Бернера (C/S = 1), предполагающей линейную зависимость между органическим углеродом и серой. Вследствие этого Дж. Левенталь пришел к выводу о том, что породы с C/S около 1 претерпели позднедиagenетическую сульфидизацию в результате эпигенетического воздействия: вторичный пирит сформировался в результате взаимодействия реакционноспособного железа и HS⁻, образовавшейся в позднем диагенезе (по зарубежной классификации, что по Н.В. Логвиненко, Л.В. Орловой (1987) соответствует среднему катагенезу, началу “нефтяного окна”). Вероятно, пиритовые горизонты образованные по механизму, описанному Н.М. Страховым [1960] и Ю.О. Гавриловым [2010], также должны характеризоваться отсутствием корреляционной связи между С и S.

Установлено, что “пиритовые” низкоуглеродистые и “пирит-керогеновые” породы, расположенные вблизи границ БС с вмещающими отложениями – перенесли интенсивную пиритизацию и характеризуются отношением C/S < 1.5. Таким образом, эта величина может быть использована, как индикатор пород БС, в которых на более поздних стадиях диагенеза и в катагенезе произошли изменения первоначальных содержаний органического углерода и пирита, достигнутых в раннедиagenетических процессах. В этих породах корреляционная связь между органическим углеродом и серой сульфидной отсутствует.

Выявлено, что прослой изученных нами “пирит-керогеновых” пород присутствуют в зоне перехода БС к вмещающим отложениям и находятся вблизи границы относительно низкоглинистой (20%) и высокоглинистой (40% и более) пачек. Над верхней границей БС и далее вверх по разрезу практически полностью исчезает карбонатная фауна. Анализ значений содержания урана аутигенного в породах этого интервала разреза (см. рис. 4, 5) свидетельствует о резком изменении редокс-условий в толще пород от восстановительных до переходных или окислительных. Возможные причины изменений окислительно-восстановительного режима в толще отложений БС были нами рассмотрены ранее и

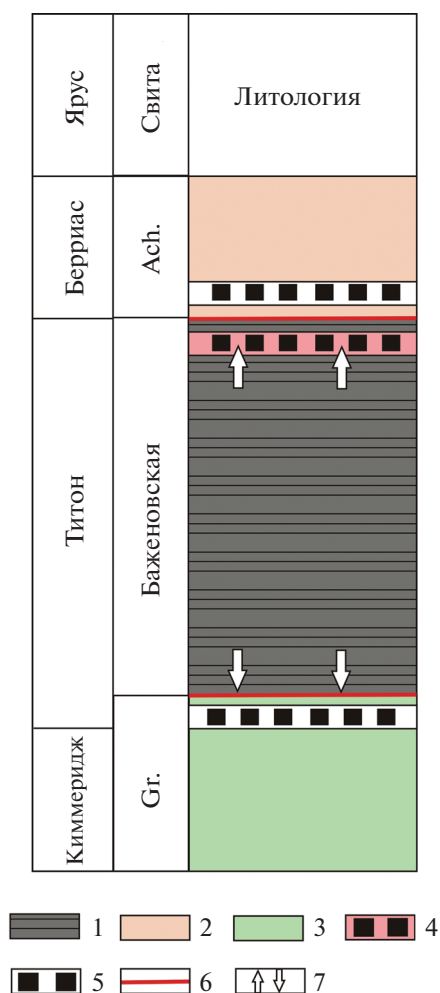


Рис. 6. Распространение “пиритовых” низкоуглеродистых и “пирит-керогеновых” пород в разрезе баженовской свиты и зонах ее перехода к вмещающим отложениям.

1 — баженовская свита, 2 — подачимовская толща (Ach.), 3 — георгиевская свита (Gr.), 4 — “пирит-керогеновые” породы, 5 — “пиритовые” низкоуглеродистые породы, 6 — границы баженовской свиты с вмещающими отложениями, соответствующие границам изменения редокс-условий в толще пород; 7 — направления миграции сульфидсодержащих флюидов и HS⁻.

связываются с увеличением привноса терригенного материала на стадии седиментации, обусловленным проградацией береговой линии позднеюрско-нижнемелового Западно-Сибирского палеобассейна [Эдер и др., 2015], на завершающем этапе крупной морской трансгрессии, начавшейся в конце позднего оксфорда [Конторович и др., 2013]. Возрастание доли глинистого материала приводило к разбавлению ОВ и разубоживанию высокоуглеродистых осадков. Вероятно, в результате более активной гидродинамики застойный режим в придонных водах часто нарушался. В результате рассмотренных выше процессов, толща высокоуглеродистых пород БС

была перекрыта глинистым флюидоупором. Можно предположить, что на стадии диагенеза осадочной толщи, глинистый флюидоупор препятствовал миграции углеводородов (УВ) из нижележащих пород БС, обогащенных ОВ, и способствовал их скоплению у ее кровли — со временем на этих интервалах происходило образование “пирит-керогеновых” пород. Аномально высокое содержание и керогена, и пирита в породах, залегающих в кровле свиты, под глинистой пачкой подачимовской толщи, а также отсутствие прямой зависимости между содержанием органического углерода и серы в этих породах позволяет предположить, что они были вторично пиритизированы.

Смена обстановок осадконакопления в центральных частях палеобассейна способствовала также и изменению окислительно-восстановительных условий в наддонных водах и в верхних горизонтах осадка. Таким образом, после захоронения между толщами осадков, накапливавшимися при различной биопродуктивности палеоводоема и в разных редокс-обстановках, возник физико-химический окислительно-восстановительный барьер, вероятно, сохранявшийся и на более поздних стадиях преобразования пород. Об изменении окислительно-восстановительной обстановки свидетельствует исчезновение следов инфауны, смена глауконита в георгиевской свите на пирит в БС, изменение значений СП, Ua и Mo/Mn в породах.

Над редокс-барьером в подачимовской толще происходило осаждение пирита из гелеобразной сульфидной массы, мигрировавшей из БС — что способствовало в дальнейшем образованию “пиритовых пород”. Особенности распространения (локализации) “пиритовых” и “пирит-керогеновых” пород в БС и зонах ее перехода к вмещающим отложениям показаны на рис. 6. Таким образом, предполагается, что на стадии раннего диагенеза мигрировали сульфиды железа в гелеобразной форме, и вблизи этой границы, связанной с резкими литологическими и геохимическими изменениями, происходила их разгрузка с осаждением скрытокристаллического пирита. По характеру взаимоотношений фрамбоидального и скрытокристаллического пирита, установленному при наблюдениях в СЭМ, можно предположить, что рассмотренные выше процессы интенсивной пиритизации начались в раннем диагенезе и продолжились на его более поздних стадиях.

Х.Г. Мачел различает два типа сульфат-редукции — биогенную и абиогенную термохимическую [Machel et al., 1995; Machel, 1995]. В работе [Канипова и др., 2014] отмечена катагенетическая пиритизация в нефтесодержащих отложениях Башкирского Приуралья. А.Ю. Юрченко и соавторы [2016] проанализировали изотопы серы в

пирите пиритизированных пород из кровли подстилающей БС абалакской свиты Салымского месторождения и получили свидетельства образования этого минерала термохимическим путем в катагенезе, без участия бактериальной деятельности. Принимая во внимание, что преобразованность ОВ в породах БС изученных нами разрезов соответствует грациям среднего катагенеза МК₁–МК₂ [Фомин и др., 2014], есть все основания предполагать, что процессы пиритизации происходили также и в среднем катагенезе (что верно главным образом, в разрезах для пород со степенью преобразованности ОВ, соответствующей МК₁² и МК₂) за счет высвобождения HS⁻ при термохимическом преобразовании ОВ и его связывания с реакционноспособным железом.

В дальнейшем необходимо продолжить исследование генезиса пирита баженовской свиты с привлечением изотопного анализа серы в этом минерале, для уточнения результатов проведенного нами стадийного анализа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В изученных отложениях установлено присутствие двух основных типов пирита: а) фрамбоидальный пирит, образованный в основном в раннем диагенезе при участии бактериальной деятельности; б) скрытокристаллический и кристаллический пирит.

2. Выяснено, что на стадии раннего диагенеза скрытокристаллический пирит был образован раньше фрамбоидального.

3. В зонах перехода БС к вмещающим отложениям в большинстве изученных разрезов присутствуют “пиритовые” низкоуглеродистые и “пирит-керогеновые” породы Первые располагаются под подошвой БС, в подстилающих георгиевской или абалакской свитах и над кровлей БС, в подачимовской пачке), вторые – в самой верхней части БС, под ее кровлей. Пиритизированные породы этих двух типов, как правило, характеризуются значениями отношения C/S < 1.5 и ассоциируют с диа- и катагенетическими карбонатами.

4. Выяснено, что скрытокристаллический и кристаллический пирит характерен для “пиритовых” низкоуглеродистых и “пирит-керогеновых” пород, расположенных на границах литологически и геохимически различных (преимущественно биогенного генезиса в БС и терригенного – во вмещающих отложениях), которые накапливались в разных окислительно-восстановительных обстановках (см. рис. б). Определено, что породы этих двух типов перенесли интенсивную пиритизацию в диагенезе, в результате осаждения пирита вблизи геохимических редокс-барьеров из геолообразного вещества, содержащего сульфиды железа, мигрировавшего из высокоуглеродистых

отложений БС (материнских по отношению к сульфидам). Предположительно процессы пиритизации продолжились в среднем катагенезе, в результате процессов термохимического преобразования ОВ и осаждения пирита.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарен своему учителю Ю.Н. Занину, А.Э. Конторовичу – за консультации; Л.Г. Вакуленко, М.А. Павловой, А.Ю. Юрченко – за плодотворные дискуссии и ценные замечания при подготовке рукописи; А.Г. Замирайловой – за предоставление литолого-геохимических данных по баженовской свите юго-восточного района ЗСБ; Е.А. Костыревой – за консультации и участие в отборе образцов керна скважин Северо-Сургутского района, а также аналитикам Л.А. Горчуковой, И.М. Фоминых и Н.Г. Кармановой (ИГМ СО РАН), Н.В. Аксеновой (ИНГГ СО РАН); отдельная благодарность – В.И. Поляковой за помощь в подготовке иллюстраций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В.А., Алексеев Л.П.* Геохимические барьеры / Учебное пособие. М.: Логос, 2003. 143 с.
- Богородская Л.И., Конторович А.Э., Ларичев А.И.* Кероген. Методы изучения, геохимическая интерпретация. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал “Гео”, 2005. 255 с.
- Волков И.И.* Сульфиды железа, их взаимосвязь и превращения в осадках Черного моря // Труды Института океанологии АН СССР. 1961. Т. 50.
- Гаврилов Ю.О.* Диагенетическая миграция сульфидов в отложениях различных обстановок седиментации // Литология и полез. ископаемые. 2010. № 2. С. 133–150.
- Герасименко Л.М., Заварзин Г.А.* Реликтовые цианобактериальные сообщества // Проблемы доантропогенной эволюции биосферы. М.: Наука, 1993. С. 222–253.
- Гуляева Л.А.* Осадки сероводородных бассейнов геологического прошлого // Докл. АН СССР. 1953. Т. ХСII. № 5. С. 1019–1022.
- Гурари Ф.Г., Матвиенко Н.И.* Палеогеография баженовской свиты по распространению в ней урана // Тр. СНИИГГиМС. № 275. Новосибирск, 1980. С. 81–91.
- Захаров В.А.* Условия формирования волжско-берриасской высокоуглеродистой баженовской свиты Западной Сибири по данным палеоэкологии // Эволюция биосферы и биоразнообразие / Отв. ред. С.В. Рожнов. М.: Товарищество научных издательств КМК Scientific Press Ltd., 2006. С. 552–568.
- Зубков М.Ю.* Региональный и локальный прогнозы нефтеносности баженовской и абалакской свит (Западная Сибирь) // Горные ведомости. 2016. № 3–4(142–143). С. 46–68.
- Канипова З.А., Мичурин С.В., Горожанин В.М. и др.* Изотопно-геохимические особенности пирита из нефтеносных пород Аязовского месторождения (Башкирское Приуралье) // Институт геологии Уфимского на-

- учного центра РАН. Геологический сборник № 11. Информационные материалы. 2014. С. 169–175.
- Конторович А.Э., Конторович В.А., Рыжкова С.В. и др.* Палеогеография Западно-Сибирского осадочного бассейна в юрском периоде // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 8. С. 972–1012.
- Конторович А.Э., Ян П.А., Замирайлова А.Г. и др.* Классификация пород баженовской свиты // Геология и геофизика. 2016. № 11. С. 2034–2043.
- Логвиненко Н.В., Орлова Л.В.* Образование и изменение осадочных пород на континенте и в океане. Л.: Недра, 1987. 237 с.
- Панченко И.В., Немова В.Д., Смирнова М.Е. и др.* Стратификация и детальная корреляция баженовского горизонта в центральной части Западной Сибири по данным литолого-палеонтологического изучения керн и ГИС // Геология нефти и газа. 2016. № 6. С. 22–34.
- Перельман А.И.* Геохимия ландшафта. М.: Географгиз, 1961. 392 с.
- Перельман А.И.* Геохимия. М.: Высшая школа, 1989. 528 с.
- 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.
- Розен О.М., Аббясов А.А., Мигдисов А.А., Ярошевский А.А.* Программа MINLITH для расчета минерального состава осадочных пород: достоверность результатов в применении к отложениям древних платформ // Геохимия. 2000. № 4. С. 431–444.
- Решение 6-го межведомственного стратиграфического совещания по рассмотрению и принятию уточненных стратиграфических схем мезозойских отложений Западной Сибири, Новосибирск, 2003 г. Новосибирск: СНИИГГиМС, 2004. 114 с.
- Страхов Н.М.* Основы теории литогенеза. Т. II. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 574 с.
- Страхов Н.М.* Проблемы геохимии современного океанского литогенеза // Труды ГИН АН СССР. Вып. 292. М.: Наука, 1976. 300 с.
- Филина С.И., Корж М.В., Зонн М.С.* Палеогеография и нефтеносность баженовской свиты Западной Сибири. М.: Наука, 1984. 36 с.
- Холодов В.Н.* Геохимия осадочного процесса. М.: ГЕОС, 2006. Вып. 574. 608 с.
- Холодов В.Н., Недумов Р.И.* О геохимических критериях появления сероводородного заражения в водах древних водоемов // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1991. № 12. С. 74–82.
- Шванов В.Н., Фролов В.Т., Сергеева Э.И. и др.* Систематика и классификации осадочных пород и их аналогов. Л.: Недра, 1988. 352 с.
- Шурыгин Б.С., Дзюба О.С.* Граница юры и мела на севере Сибири и бореально-тетическая корреляция приграничных толщ // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 4. С. 830–844.
- Эдер В.Г., Замирайлова А.Г., Занин Ю.Н., Жигульский И.А.* Особенности литологического состава основных типов разрезов баженовской свиты // Геология нефти и газа. 2015. № 6. С. 96–106.
- Юрченко А.Ю., Такахата Н., Танака К. и др.* Природа рассеянного и конкреционного пирита в верхах абалакской свиты Сальмского месторождения Западной Сибири // Вестник МГУ. Серия 4. Геология. 2016. № 5. С. 96–101.
- Berner R.* Sedimentary pyrite formation: an update // *Geochem. Cosmochim. Acta.* 1984. V. 47. P. 605–615.
- Berner R., Raiswell R.* Burial of organic carbon and pyrite sulfur in sediments over Phanerozoic time: a new theory // *Geochem. Cosmochim. Acta.* 1983. V. 47. P. 855–862.
- Hofmann P., Ricken W., Schwark L.* Leythaeuser coupled oceanic effects of climatic cycles from late Albian deep-sea sections of the North Atlantic // *Evolution of the Cretaceous Ocean Climate System, Geological Society of America.* 1999. Special Paper 332. P. 143–160.
- Lazar O.R., Bohacs K.M., Macquaker J.H., Schieber J.* Capturing key attributes of fine grained sedimentary rocks in outcrops, cores and thin-sections: nomenclature and description guidelines // *Sedimentary Research.* 2015. V. 85. P. 230–246.
- Leventhal J.S.* Carbon-sulfur plots to show diagenetic sulfidation in sediments // *Geochem. Cosmochim. Acta.* 1995. V. 59. № 6. P. 1207–1211.
- Machel H.G., Krouse H.R., Sassen R.* Products and distinguishing criteria of bacterial and thermochemical sulfate reduction // *Applied Geochemistry.* 1995. V. 10. № 4. P. 373–389.
- Maclean L.C., Tylliszczak T., Gilbert P.U. et al.* A high-resolution chemical and structural study of framboidal pyrite formed within a low temperature bacterial biofilm // *Geobiology.* 2008. V. 6. P. 471–480.
- Pratt L.M., Force E.R., Pomeroy B.* Coupled manganese and carbon-isotopic events in marine carbonates at the Cenomanian-Turonian boundary // *J. Sediment. Petrol.* 1991. V. 61. P. 370–383.
- Raiswell R., Buckley F., Berner R.A., Anderson T.F.* Degree of pyritization of iron as a paleoenvironmental indicator of bottom-water oxygenation // *J. Sediment. Petrol.* 1988. V. 58. P. 812–819.
- Wignall P.B., Myers K.J.* Interpreting the benthic oxygen levels in mudrocks: A new approach // *Geology.* 1988. V. 16. P. 452–455.
- Wignall P.B.* Black shales. Clarendon press. Oxford, 1994. 127 p.
- Wilkin R.T., Barnes H.L., Brantley S.L.* The size distribution of framboidal pyrite in modern sediments: An indicator of redox conditions // *Geochem. Cosmochim. Acta.* 1996. V. 60. № 20. P. 3897–3912.
- Zanin Yu.N., Eder V.G., Zamirailova A.G.* Composition and formation environments of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous black shale Bazhenov Formation (the central part of the West Siberian Basin) // *Mar. Pet. Geol.* 2008. V. 25. P. 289–306.

Pyritization of the Transition Zone from the Black Shale Formation to the Enclosing it Deposits on the Example of the Bazhenov Formation of Western Siberia

V. G. Eder[#]

*The Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
prosp. Akademika Koptyuga, 3, Novosibirsk, 630090 Russia*

[#]*e-mail: edervika@gmail.com*

A complex of lithological and geochemical studies was carried out in the rocks of the Bazhenov formation and in the zones of its transition to host deposits: the composition of the rocks, the ratio of organic carbon and sulfide sulfur in them (distribution of C/S values) and the distribution of a number of redox indicators (degree of pyritization, authigenic uranium content, values of the Mn/Al and Mo/Mn) were analyzed, the morphology of pyrite were studied in a scanning electron microscope. Two main types of pyrite were revealed: a) framboidal, formed in early diagenesis with the participation of bacterial activity, b) cryptocrystalline, which was formed in diagenesis (including the early stage) and, presumably, in middle catagenesis. It was established that cryptocrystalline pyrite in the early diagenesis was formed earlier than framboidal pyrite. It was shown that rock pyritization, with the formation of cryptocrystalline pyrite, in most cases occurs in the upper and lower deposits at the borders with the Bazhenov formation, where “pyrite” low-carbon rocks were formed. Intensive pyritization is also observed in the rocks of the Bazhenov Formation, which lie near its roof, where “pyrite-kerogen” rocks enriched with organic carbon were deposited. The rocks of both types are characterized by the value of the ratio $C/S < 1.5$, while in the bulk of the rocks of the Bazhenov formation $C/S > 2$. “Pyrite” low-carbon and “pyrite-kerogen” rocks are located at the boundaries of lithologically different packs (mainly of biogenic origin in the Bazhenov formation and terrigenous in host deposits), which accumulated under different redox conditions that existed in the water column and near the sea bottom of the paleobasin. The boundaries of such packs at later stages of sediment lithogenesis could serve as redox-geochemical barriers. “Pyrite” and “pyrite-kerogen” rocks are considered as pyritized in the diagenesis, as a result of the deposition of pyrite on redox-geochemical barriers from the Bazhenov Formation of a gel-like substance containing iron sulfides that migrated from the high-carbonaceous rocks. Presumably, the pyritization processes continued at the stage of secondary catagenesis by the thermochemical way due to the transformation of organic matter.

Keywords: Bazhenov Formation, pyritization, C/S, redox conditions, Late Tithonian-Early Berriassian, black shales.