

Свидетельства образования карбонатных пород на геохимических барьерах в черных сланцах на примере баженовской свиты Западной Сибири

В.Г. Эдер^{1*}, А.Г. Замирайлова¹, Г.А. Калмыков²

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Комплексное литолого-геохимическое исследование пород верхнеюрско-нижнемеловой черносланцевой баженовской свиты показало, что большинство ее карбонатизированных прослоев тяготеют к границам пачек разного состава, отличающимися по карбонатности, степени кремнистости или глинистости. При этом на границах баженовской свиты с вмещающими отложениями, где часто встречаются карбонатные породы в ассоциации с «пиритовыми» низкоуглеродистыми породами, по геохимическим показателям (степень пиритизации, Mn/Al, U_о) фиксируется смена окислительно-восстановительного режима. В самой изучаемой толще на интервалах залегания карбонатов смены окислительно-восстановительного режима не наблюдается. Предполагается, что на них существовали щелочные барьеры, что подтверждается сменой состава пород. В баженовской свите (БС) и зонах ее перехода во вмещающие отложения определены следующие геохимические барьеры (снизу-вверх по разрезу), на которых обнаружены свидетельства локализации карбонатных минералов: редокс барьер 1 (нижняя граница БС), щелочной барьер 1 (граница пачки микститов кероген-глинисто-кремнистых низкокарбонатных и силицитов), щелочной барьер 2 (граница микститов кероген-глинисто-кремнистых низкокарбонатных и кремнисто-карбонатной «кокколитовой» пачки); редокс барьер 2 (верхняя граница БС).

Ключевые слова: баженовская свита, верхняя юра, карбонатные породы, геохимические барьеры

Для цитирования: Эдер В.Г., Замирайлова А.Г., Калмыков Г.А. (2019). Свидетельства образования карбонатных пород на геохимических барьерах в черных сланцах на примере баженовской свиты Западной Сибири. *Георесурсы*, 21(2), с. 143-152. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2019.2.143-152>

Согласно А.И. Перельману (1961), геохимические барьеры – это участки земной коры, где на коротком расстоянии происходит резкое уменьшение интенсивности миграции химических элементов и, как следствие, их концентрация. основоположниками концепции существования геохимических барьеров являются W.C. Krumbein, R.M. Garrels (1952), Н.М. Страхов (1960, 1967), А.И. Перельман (1961, 1989). Геохимические барьеры располагаются на участках изменения факторов среды. Выделяется несколько типов барьеров: физико-химические, механические и биогеохимические (Алексеев В.А., Алексеев Л.П., 2003). По данным вышеупомянутых авторов физико-химический барьер в своей основе представляет зону осаждения химических элементов (их ионов) из вод с разными окислительно-восстановительными и кислотно-щелочными обстановками. Концентрация элементов на барьере происходит за счет резкого изменения термодинамической, щелочно-кислой или окислительно-восстановительной обстановок и, как следствие этого, выпадения в осадок ряда элементов (Страхов, 1976; Алексеев В.А., Алексеев Л.П., 2003).

Объектом исследования являются карбонатные породы баженовской свиты (БС) Западной Сибири. По стратиграфическому диапазону эта толща соответствует верхней половине нижнего титона-низам берриаса (Шурыгин,

Дзюба, 2015), мощность ее изменяется от 20 до 40 м.

Карбонаты баженовской свиты достаточно хорошо изучены. Их генезис неоднократно рассматривался (Предтеченская и др., 2006; и др.) с привлечением изотопного анализа (Немова, 2012; Балущкина и др., 2016; Немова, Панченко, 2017; Эдер и др., 2018; и др.). В разрезе БС породы этого типа занимают подчиненное значение, их суммарная мощность редко составляет более 10% от разреза. В то же время на ряде территорий они являются коллекторами углеводородов (Нестеров, 1979; Мормышев и др., 1985; Немова, 2011; Зубков, 2016; Балущкина и др., 2016; и др.).

В публикациях предыдущих лет разрез БС не анализировался с точки зрения концентрации аутигенных минералов на геохимических барьерах.

Настоящее исследование направлено на установление приуроченности карбонатных пород к границам смены физико-химических условий в черных сланцах и зонах их перехода во вмещающие отложения на примере баженовской свиты Западной Сибири. Проведенное исследование будет способствовать развитию теории диа- и катагенеза черносланцевых отложений, в частности определению специфики образования вторичных карбонатных пород в толщах этого типа. В работе исследованы 35 разрезов БС, охарактеризованные керном из Центрального, Северного, Юго-восточного, Юго-западного и Южного районов Западно-Сибирского бассейна (ЗСБ). Центральный район разделен на три подрайона: Салымский, Юганский и Северо-Сургутский (рис. 1).

* Ответственный автор: Вика Георгиевна Эдер
E-mail: edervika@gmail.com

© 2019 Коллектив авторов



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

Методы исследования

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

Основная часть разрезов Центрального района ЗСБ характеризуется 100% выходом керна. Отбор образцов

БС этих разрезов на аналитические исследования был произведен через 0,1-0,5 м. В слоистых образцах прослойки разного типа, визуально различимые в кернах, были отданы на литологические и геохимические анализы, в результате чего определен детальный литолого-геохимический состав разрезов.

Химический анализ 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) выполнялся методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) на спектрометре ARL-9900-XP.

Определение содержания в породах серы сульфидной, сульфатной и форм железа осуществлялось методами «мокрой химии». Определение содержания керогена (органического углерода) выполнялось весовым

полумикрометодом с помощью экспресс-анализатора (АН-7529) на углерод. По результатам анализов был проведен пересчет химического состава пород на минеральный по методике О.М. Розена с соавторами (2000) в приложении MINLITH. По результатам пересчета химических анализов на минеральный, породы были названы согласно принятой классификации (Конторович и др., 2016).

Для всех изучаемых разрезов БС построены диаграммы распределения по разрезу кремнезема и глинистого материала, кальцита, доломита, пирита, органического углерода, степени пиритизации железа (СП), отношения марганца к алюминию (Mn/Al), урана аутигенного (U_a). Вышеупомянутые показатели были использованы для реконструкции окислительно-восстановительных условий формирования пород.

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

$$СП = Fe_{\text{нпр}} / (Fe_{\text{нпр}} + Fe_{\text{реактив}}).$$

Р. Райсвеллом и соавторами (Raiswell et al., 1988) были предложены следующие граничные значения и соответствующие им обстановки: $СП < 0,45$ указывает на окисные условия, $0,45 < СП < 0,75$ – «застойные» дизоксические условия, $СП > 0,75$ – эвксинские условия. Очень низкие значения отношения $Mn/Al < 0,005$, согласно П. Хофману (Hofmann et al., 1999), указывают на бескислородные условия седиментации. В бескислородных условиях марганец находится в растворенной форме (Mn^{2+}), а при смене режима на более кислородный – выпадает в осадок (Pratt et al., 1991; Холодов, 2006; и др.). Уран аутигенный (U_a) (Wignall, Myers, 1988) определяется как:

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

По данным этих авторов, $U_a < 2$ определяет окислительные условия, $2 < U_a < 10$ – субокислительные, $10 < U_a < 15$ – аноксидные (бескислородные), $U_a > 15$ – эвксинские.

На интервалах залегания карбонатных прослоев проанализировано изменение содержания в них кремнистого, глинистого материала и СП, с целью уточнения изменения палеоусловий в эти периоды.

Результаты

Карбонатные породы в составе разрезов БС занимают подчиненное значение. Они присутствуют в свите в виде прослоев или линз мощностью от 0,1 до 2 м, редко до нескольких метров. По составу выделяются следующие литотипы: известняки доломитистые, доломиты известковистые, известково-доломитовые породы (с содержанием доломита и кальцита менее 50% каждого). По микротекстуре породы делятся на две группы: 1. микритовые породы, представленные микрокристаллическим кальцитом или доломитом; 2. апорадиоляриты (изначально кремнистые радиоляриевые породы, замещенные кальцитом или доломитом). Содержание органического углерода в них, как правило, низкое – менее 3%.

Закономерности распространения карбонатных пород в БС

Карбонатные породы встречаются в разных частях разреза БС в: 1) кровле БС или подошве подачимовской

толщи; 2) средней части БС; 3) подошве БС или в кровле подстилающих отложений (георгиевская или абалакская свиты) (рис. 2, 3). Необходимо отметить, что в некоторых скважинах отсутствует керн нижней половины разреза БС (Салымский подрайон), в юго-восточных районах ЗСБ кровельная часть свиты не охарактеризована керном. Таким образом, указание в тексте присутствия карбонатных прослоев только в кровле какой-либо скважины никоим образом не указывает на то, что прослои этого типа отсутствуют в нижней части и наоборот. Полным выходом керна характеризуются разрезы лишь Северо-Сургутского подрайона. Ниже приведена более подробная характеристика и приуроченность к определенным разрезам карбонатных пород этих интервалов изучаемых разрезов.

Кровля БС или подошва подачимовской толщи. Ранее (Eder et al., 2017) определено, что у границ с БС во вмещающих отложениях в большинстве изученных разрезов отмечаются так называемые «пиритовые» и «пирит-керогеновые» слои, в которых отсутствует корреляция между органическим углеродом и серой сульфидной. Первые из вышеупомянутых характеризуются низкими содержаниями органического углерода и относительно высокими пирита. Вторые находятся в самой БС у ее кровли и отличаются высокими содержаниями пирита и $S_{\text{орг}}$. Породы этого типа рассматриваются как перенесшие на стадии диа- и катагенеза вторичную пиритизацию в результате осаждения пирита из растворов на редокс барьерах. Установлено, что в большинстве разрезов БС в непосредственной близости от «пиритовых» и «пирит-керогеновых» прослоев залегают карбонатные породы разных типов по составу. Так, в кровле БС под «пиритовым» слоем на Салымской площади наблюдается известково-доломитовый слой, скрытокристаллический, тонкослоистый, на Повховской площади – линзы известняка и доломита микрокристаллического толщиной 5-10 см, на Южно-Ягунской площади – линза известняка доломитового скрытокристаллического с баритом толщиной около 10 см. Над «пиритовой» низкоуглеродистой породой в подошве подачимовской толщи Чупальской площади залегает прослой известняка, в Малобалыкской площади – прослой доломита. Микроструктура пород – скрытокристаллическая, микротекстура в первом случае массивная, во втором линзовидно-слоистая. В скважинах Юго-восточного, Юго-западного и Южного районов ЗСБ керновый материал кровельной части разреза БС отсутствует.

В целом непосредственно у верхней границы БС встречаются прослои или линзы доломитового, известкового или смешанного состава, которые представлены скрыто- или микрокристаллическим карбонатным материалом. Мощность этих образований 0,05-0,2 м.

Средняя часть БС (верхняя половина БС). В скважинах Салымского подрайона в БС наблюдается существенное количество карбонатных прослоев. В верхней половине свиты Салымской площади наблюдается серия из 8 прослоев микститов кремнисто-известково-доломитисто-глинистого состава каждый. Изучение шлифов пород показало, что многие из этих прослоев содержат карбонатизированные реликты радиолярий, реже карбонатный материал в них скрыто- или микрокристаллический.

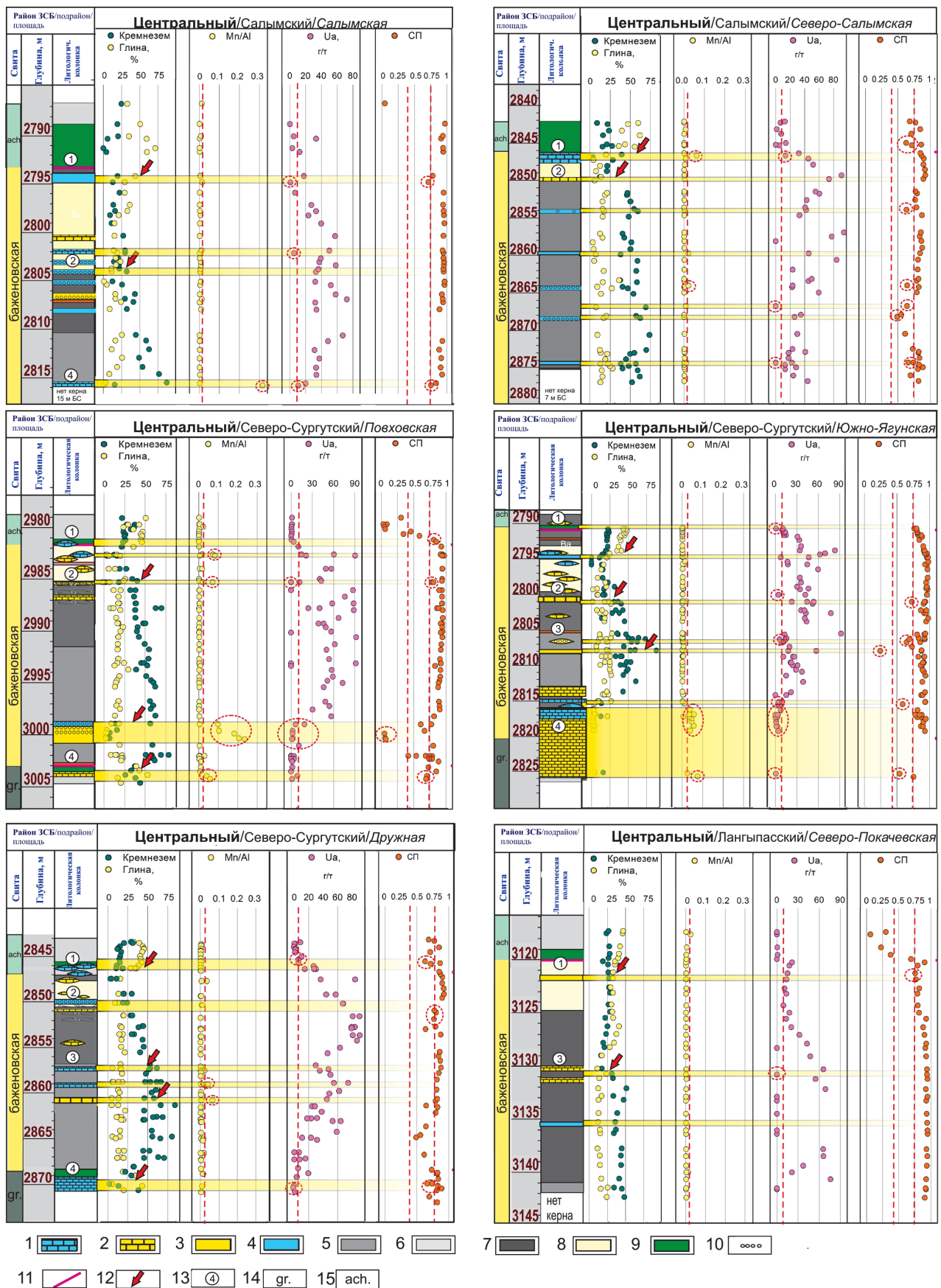


Рис. 2. Литологические колонки и диаграммы распределений по разрезу кремнезема и глинистого материала, значений редокс показателей (СП, U_a , Mn/Al) в породах баженовской свиты и зон ее перехода во вмещающие отложения Центрального района ЗСБ. 1 – доломиты породы и доломитовые микститы, 2 – известняки и известковые породы, 3 – известковистые микститы, 4 – доломитистые микститы, 5 – силициты, 6 – микститы глинистые и аргиллиты, 7 – микститы кероген-глинисто-кремнистые, 8 – микститы кероген-кремнисто-карбонатные с реликтами кокколита, 9 – пиритовые низкоуглеродистые породы, 10 – апорадиолариты, 11 – границы баженовской свиты; 12 – стрелки указывают на границы изменения вещественного состава пород, 13 – геохимический барьер, 14 – георгиевская свита, 15 – ачимовская толща.

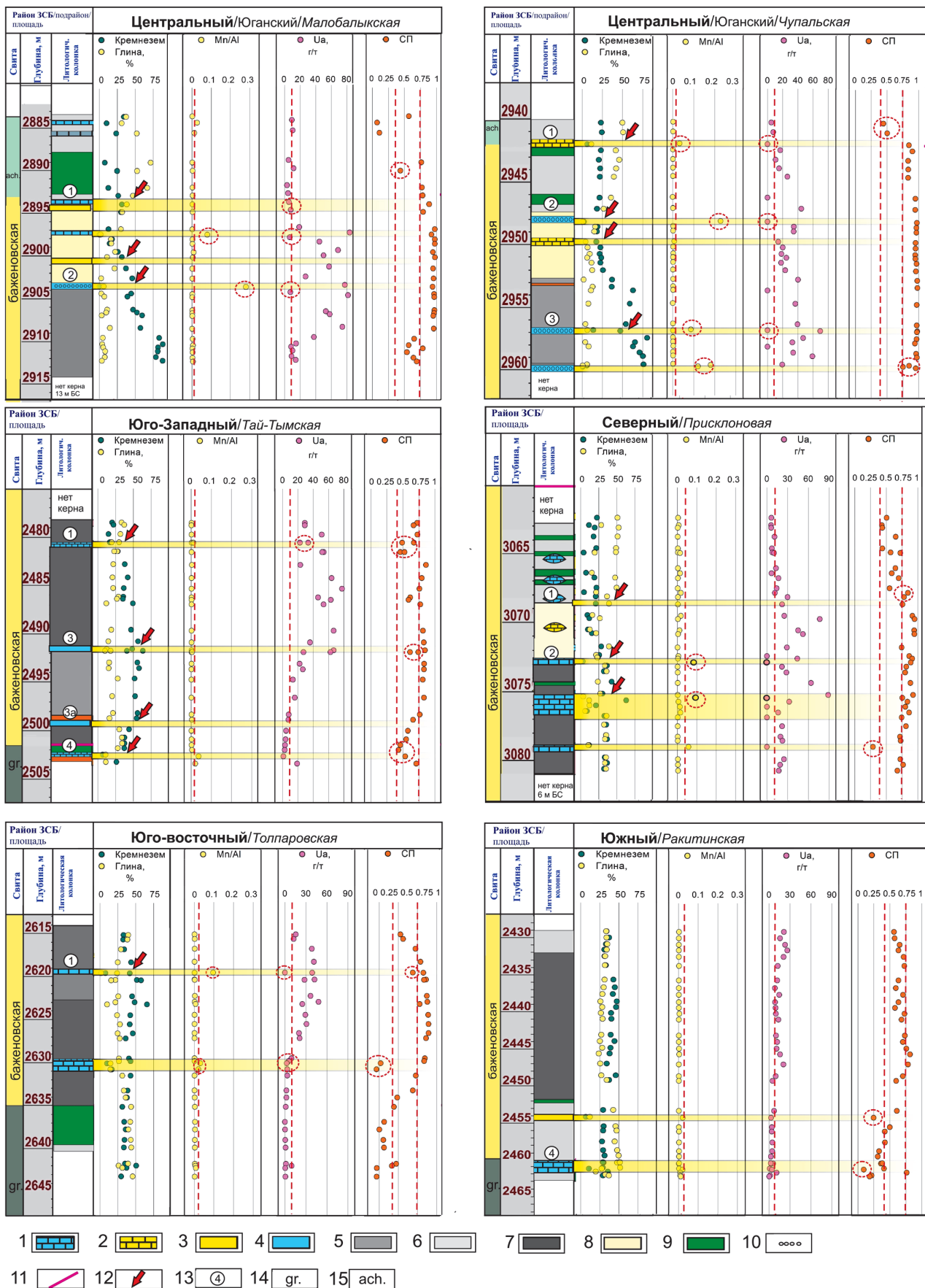


Рис. 3. Литологические колонки и диаграммы распределений по разрезу кремнезема и глинистого материала, значений редокс показателей (СП, U_a, Mn/Al) в породах баженовской свиты и зон ее перехода во вмещающие отложения Юго-восточного, Юго-западного, Южного и Северного районов ЗСБ. Условные обозначения см. рис. 2.

На Северо-Салымской площади также наблюдается серия из 5 прослоев микститов глинисто-кремнисто-доломитовых, три из которых представлены апорадиоляритами или содержат карбонатизированные радиолярии. Содержание доломита в карбонатных прослоях составляет 10-25%, в кровле БС Северо-Салымской площади содержание доломита несколько снижено (5-13%).

В рассматриваемых отложениях, близких к Салымскому подрайону площадях (Малобалыкской и Чупальской), количество доломитизированных прослоев или линз в верхней половине свиты несколько снижено (2-3) по сравнению с вышеупомянутыми разрезами скважин Салымского месторождения. Они также представлены, главным образом, апорадиоляритами, в ряде случаев микрокристаллическими известняками или смешанными породами известково-доломитового состава. Доломита в них присутствует порядка 15-20%. В средней части БС в некоторых изучаемых разрезах (Салымская, Урьевская, Чупальская, Малобалыкская площади) фиксируются прослои карбонатизированного апорадиолярита мощностью 0,1-0,3 м.

В разрезах БС Северо-Сургутского и Северного подрайонов в верхней половине свиты находится существенное количество карбонатных конкреций толщиной 10-13 см. Как показало исследование в сканирующем микроскопе, некоторые из них в переходной зоне между конкрецией и вмещающей породой содержат реликты кокколитовых водорослей, также как и сама вмещающая порода (Эдер и др., 2016). В целом полагается, что при формировании верхней части БС вышеупомянутых районов основной породобразующей фауной являлись кокколитофоридовые водоросли. Возможно, что именно они являлись материалом для вышеупомянутых конкреционных образований. В единичных случаях встречаются конкреции, окаймленные реликтом раковины двустворки. Также в разрезах этого района на рассматриваемом интервале наблюдаются редкие сантиметровые прослои карбонатизированного радиолярита.

Для разрезов Юго-восточного и Южного районов ЗСБ характерны лишь единичные прослои карбонатных пород в верхней половине БС мощностью 0,1-0,2 м. Так, в некоторых разрезах скважин Юго-восточного района (Пельгинская и Южно-Майская площади) в средней части БС залегает прослой доломита микрокристаллического с реликтами радиолярий (5-15%). В рассматриваемой части свиты Ракитинской площади наблюдается прослой известняка скрытокристаллического, на Северо-Покачевской и Тай-Тымской площадях – прослои микститов доломитисто-известковых с карбонатизированными радиоляриями.

Подошва БС или кровля абалакской, или георгиевской свит. В большей части разрезов Северо-Сургутского подрайона в рассматриваемом интервале присутствует карбонатная пачка пород. В нижней части БС на Повховской площади в нескольких метрах от нижней границы свиты наблюдается пачка известняка доломитистого апорадиоляриевого, в кровле этой пачки присутствует доломит известковистый мощностью 1,5 м. В подошве БС и кровле подстилающей ее георгиевской свиты Южно-Ягунской площади залегает карбонатный нефтенасыщенный пласт, представленный известняками доломитистыми, микститами известково-доломитистыми микритовыми, на

некоторых интервалах брекчированными. В ряде образцов этой пачки обнаружены реликты кокколита, в кровле пачки присутствуют реликты радиолярий. Мощность карбонатного пласта составляет около 4 м. На Новоуртыгунской площади в подошве БС над «пиритовым» бескарбонатным прослоем находятся известково-доломитистые линзы толщиной 10 см, которые также характеризуются повышенным содержанием пирита. На Тай-Тымской площади залегают прослои доломита (0,1 м) известковистого непосредственно под «пиритовым» пластом у нижней границы БС.

Нижняя часть разрезов Салымского и некоторых разрезов Северо-Сургутского (Северо-Покачевская и Урьевская) подрайонов керном не охарактеризована.

Во многих разрезах Юго-восточного района в 1-4-х метрах от подошвы БС встречается прослой доломита известковистого апорадиоляриевого мощностью около 0,2-1,0 м (Полонская, Средне-Юлжавская, Межовская, Толпаровская, Западно-Квензерская площади).

Изменение состава пород на интервалах залегания карбонатов

В разрезах БС центральных районов ЗСБ во многих случаях на или вблизи границы «кокколитовой» пачки, представленной микститами кероген-карбонатно-кремнистыми, и нижележащей низкокарбонатной пачки микститов кероген-глинисто-кремнистых во многих случаях залегают карбонатные известковые или доломитовые породы. На этих интервалах происходит следующая смена состава пород от «кокколитовой» к нижележащей пачке: 1) изменяется содержание кремнезема от менее 20% до 40-50% в Салымской и Юганском районах, в Северо-Сургутском такого резкого изменения содержания этого компонента пород не наблюдается; 2) заметно изменяется содержание карбонатного материала в породах – от 10-30% до менее 5%. На границах рассматриваемых пачек карбонатные прослои или линзы наблюдаются на следующих площадях: Салымской, Северо-Салымской, Малобалыкской, Южно-Ягунской, Присклоновой, Дружной.

На границе пачки микститов кероген-глинисто-кремнистых и силицитов пачки также в некоторых разрезах (Дружная, Южно-Ягунская, Малобалыкская), фиксируются карбонатные прослои. На этом интервале произошло резкое увеличение содержания кремнезема: от менее 30% до более 50%. В Северо-Покачевском, Средне-Юлжавском и Южно-Майском разрезах БС прослой известняка залегает на интервале следующей смены состава пород: содержание кремнезема меняется от менее 30% до более 35%.

В БС юго-восточных районов в нижней части карбонатные прослои в большинстве случаев залегают на границе пачек микститов кероген-глинисто-кремнистых с содержанием глинистого материала менее 35% и более 40% (Ракитинская, Ледовая, Толпаровская, Полонская, Западно-Квензерская).

Особенности смены состава пород и окислительно-восстановительного режима у верхней и нижней границ БС рассмотрены ранее (Eder et al., 2017). У верхней границы БС карбонаты (линзы или прослои) отмечаются практически во всех разрезах центральных районов ЗСБ на следующих площадях: Дружная, Повховская, Южно-Ягунская, Новоуртыгунская, Салымская, Чупальская,

Малобалыкская, Северо-Салымская. Как было отмечено ранее, керновый материал по кровле БС юго-восточных районов отсутствует. Верхнюю границу свиты возможно проследить лишь в разрезе Арчинской площади, в которой прослой известняка апорадиоляриевый в кровле залегает на границе смены состава пород – от менее (25-35%) до более (35-45%) кремнистого состава.

Карбонатные породы часто наблюдаются в ассоциации с «пиритовыми» низкоуглеродистыми породами у нижней границы БС в ее подошве или кровле георгиевской или абалакской свит (Дружная, Новортыгунская, Повховская, Тай-Тымская, Ай-Пимская, Ракитинская, Горстовая, Арчинская).

Закономерности изменения редокс показателей на интервалах залегания карбонатных пород БС

Литолого-геохимический анализ изучаемых отложений позволил установить по характеру изменения редокс показателей несколько групп карбонатных пород БС (рис. 2-3).

Известняки, известково-доломитовые породы кровли (Северо-Салымская, Повховская, Ледовая площади) и подошвы БС (Тай-Тымская, Новоортыгунская, Ай-Пимская, Ледовая площади) характеризуются увеличением значения отношения Mn/Al . В некоторых разрезах БС в доломитах ее кровли не отмечается изменения редокс показателей (Малобалыкская, Салымская площади). Непосредственно над кровлей и под подошвой БС наблюдается значительное снижение СП.

Апорадиоляриты БС (известковые и известково-доломитовые породы) – увеличение Mn/Al и уменьшение U_a , во многих случаях отмечается уменьшение СП (Повховская, Малобалыкская, Чупальская, Южно-Ягунская, Присклоновая, Толпаровская, Полонская площади).

В интервалах залегания доломитовых прослоев БС Салымской площади не наблюдается изменения редокс показателей, встречен лишь один прослой доломита, в котором устанавливается увеличение значений отношения Mn/Al и уменьшение U_a , а также небольшое снижение значений СП.

В целом на интервалах залегания карбонатных пород в БС не наблюдается существенного изменения значений степени пиритизации железа, за исключением границ БС с вмещающими отложениями, что было описано ранее (Eder et al., 2017). Значения отношения Mn/Al и U_a , напротив, в большинстве случаев изменяются на этих интервалах.

Обсуждение результатов

Как показали предыдущие исследования (Предтеченская и др., 2006; Юрченко, 2017; Эдер и др., 2018) в БС присутствует седиментационный, диагенетический и катагенетический карбонатный материал. Первый из них слагает реликты кокколита и обломки раковин двустворок. Диа- и катагенетические карбонатные образования в БС – это в различной степени перекристаллизованные породы с кокколитами, конкреции и апорадиоляриты. Необходимо отметить, что рассматриваемые в настоящем исследовании карбонатные породы БС имеют диа- или катагенетическую природу (конкреции, апорадиоляриты,

скрыто- и микрокристаллические породы). По данным большинства исследователей (Гурари и др., 1986; Предтеченская, 2006; Балущкина и др., 2016; Юрченко, 2017; Коробов, 2017; Эдер и др., 2018; и др.), вторичный кальцит в БС является продуктом перераспределения карбонатного вещества осадочно-диагенетических известняков, обломков раковин двустворок, аммонитов, известковых водорослей и др.

Доломиты кремнистые апорадиоляриевые БС характеризуются массивной текстурой и микрокристаллической структурой. Свидетельства катагенетической доломитизации известны в отложениях различного возраста (Bausch, Hoefs, 1972; Mastuda, Iijima, 1989; Farr, 1992; и др.). По изотопным данным определено, что доломитизированные радиоляриты баженовской свиты формировались в стадию катагенеза (Немова, 2012; Балущкина и др., 2016; Немова, Панченко, 2017; Эдер и др., 2018). В.Д. Немова (2012) определила температуру доломитизации баженовских радиоляритов по изотопным данным в 100°C. По данным Н.С. Балущкиной и соавторов (2016) изотопный состав углерода доломитов ($\delta^{13}C$ от -3,7 до -6,7‰ VPDB) характеризует их как нормальные морские карбонаты, облегченный состав кислорода указывает на диагенетические и/или катагенетические преобразования ($\delta^{18}O$ от -13,93 до -14,42‰ VPDB). По данным А.А. Махнача (1989) «процесс доломитообразования в кровле и подошве карбонатных пластов и известковых линз внутри глинистых отложений вызван миграцией из последних реакционно-способных растворов». В качестве источника магния А.Д. Коробов (2017) рассматривает водоросли баженовского палеоморя, которые при жизни накапливают магний. Многие авторы (Юдович, Кетрис, 2011; Коробов, 2017; и др.) полагают, что освобождающийся в катагенезе при трансформации глин Mg (Ca и Mg) может также участвовать в образовании гидротермального (гидротермально-метасоматического) доломита.

Определено, что в большинстве разрезов БС доломиты и известняки: 1) тяготеют к кровле или подошве свиты, во многих случаях они залегают непосредственно выше или ниже «пиритовых» прослоев, 2) часто расположены на границах пачек разного состава. В первом случае осаждение карбонатов происходило на вышеописанных редокс барьерах, при резкой смене окислительно-восстановительных условий. В случае образования карбонатных пород на границе «кокколитовой» кремнисто-карбонатной пачки и низкоуглеродистой кремнистой пачки – это контакт осадков с явно разными рН условиями – более кислыми, в которых карбонатный материал не отлагался, и щелочными – благоприятными для его осаждения. Таким образом, на границе между этими пачками, вероятно, существовал щелочной барьер. По данным В.А. Алексеенко и Л.П. Алексеенко (2003), щелочные барьеры формируются на участках, где кислая среда сменяется щелочной, слабощелочная – резкощелочной или сильнокислая – слабокислой. Согласно этим авторам, они возникают при скачкообразном изменении рН, что способствует осаждению из водных растворов многих минералов, относящиеся к карбонатам, гидроксидам, фосфатам, арсенатам, ванадатам.

В случае локализации карбонатных минералов на границах пачек силицитов и микститов

кероген-глинисто-кремнистых, а также микститов этого типа с различным содержанием глинистого материала – это граница сильноокислых и менее кислых пород, еще один так называемый щелочной барьер БС. По результатам исследования в БС предварительно выделены 2 редокс и 2 основных щелочных барьера (рис. 2, 3). Вероятно, геохимических барьеров в диагенезе существовало больше, чем мы можем наблюдать в настоящее время, в связи с перераспределением вещества по мере погружения БС. С этим фактом частично связывается нахождение некоторых карбонатных разностей внутри пачек этой толщи.

Заключение

В баженовской свите на границах между пачками разного литологического состава во многих случаях при переходе от а) кремнисто-глинистой к кремнисто-карбонатной «кокколитовой» пачке, б) силицитовой к глинисто-кремнистой пачке, в большинстве случаев в литогенезе, в) между пачками микститов кероген-глинисто-кремнистых с различным содержанием глинистого материала, происходила карбонатизация пород, часто апорадиоляритов. На этих границах вероятно существовали щелочные барьеры, что способствовало осаждению карбонатного вещества из растворов на стадии диа- и катагенеза.

В баженовской свите и зонах ее перехода во вмещающие отложения определены следующие геохимические барьеры (снизу-вверх по разрезу), на которых обнаружены свидетельства локализации карбонатных минералов.

- Редокс барьер 1. Нижняя граница БС. Граница пачки микститов кероген-глинисто-кремнистых и алевритово-глинистых низкоуглеродистых пород с глауконитом.

- Щелочной барьер 1. Граница пачки микститов кероген-глинисто-кремнистых с содержанием глинистого материала около 30% и более 40% (характерен в основном для юго-восточных районов ЗСБ).

- Щелочной барьер 2. Граница пачки микститов кероген-глинисто-кремнистых низкокарбонатных и силицитов.

- Щелочной барьер 3. Граница микститов кероген-глинисто-кремнистых низкокарбонатных и кремнисто-карбонатной «кокколитовой» пачки (характерен для центральных районов ЗСБ).

- Редокс барьер 2. Верхняя граница БС. Граница микститов кероген-карбонатно-кремнистых (в центральных районах) или кероген-глинисто-кремнистых (в юго-восточных районах) и микститов глинистых низкоуглеродистых.

Благодарности

Авторы высказывают глубокую благодарность профессору Ю.Н. Занину, академику А.Э. Конторовичу за предоставление материалов работы и обсуждение результатов исследования, Е.А. Костыревой за совместный отбор кернa Северо-Сургутского района, аналитикам Л.А. Горчуковой, И.М. Фоминых, Н.Г. Кармановой, (ИГМ СОРАН) и Н.В. Аксеновой (ИНГГ СОРАН), выполнявшим геохимические анализы пород, а также отдельную благодарность В.И. Поляковой за неоценимую помощь в подготовке графических иллюстраций проведенного исследования и М.А. Павловой и Л.Г. Вакуленко за обсуждение результатов исследования и редактирование текста статьи.

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0021 «Основные седиментационные и постседиментационные процессы и закономерности их эволюции в протерозойских и фанерозойских осадочных бассейнах Сибири».

Авторы выражают благодарность рецензенту за вопросы и рекомендации.

Литература

- Алексеев В.А., Алексеев Л.П. (2003). Геохимические барьеры. М: Логос, 143 с.
- Балушкина Н.С., Юрченко А.Ю., Калмыков Г.А., Коробова Н.И., Петракова Н.Н., Бугаев И.А. (2016). Условия образования и нефтенасыщенность карбонатных коллекторов баженовской и абалакской свит. *Нефтяное хозяйство*, 1, с. 32-35.
- Гуляева Л.А. (1953). Осадки сероводородных бассейнов геологического прошлого. *Доклады АН СССР*, ХСII(5), с. 1019-1022.
- Зубков М.Ю. (2016). Региональный и локальный прогнозы нефтеносности баженовской и абалакской свит (Западная Сибирь). *Горные ведомости*, 3-4, с. 46-68.
- Конторович А.Э., Ян П.А., Замирайлова А.Г., Костырева Е.А., Эдер В.Г. (2016). Классификация пород баженовской свиты. *Геология и геофизика*, 11, с. 2034-2043.
- Коробов А.Д., Коробова Л.А., Морозов В.П., Заграновская Д.Е., Захарова О.А. (2017). Аутигенный доломит высокобитуминозных баженовских отложений – показатель завершающей стадии генерации углеводородов. *Нефтяное хозяйство*, 4, с. 41-43.
- Махнач А.А. (1989). Катагенез и подземные воды. Минск: Наука и техника, 335 с.
- Морышев В.В., Завьялец А.Н. (1985). Схема строения и обоснование режима разработки пласта Ю₀ Салымского месторождения. Особенности подсчета запасов нефти в баженовских отложениях Западной Сибири. Тюмень: СибНИИИП.
- Немова В.Д. (2012). Условия формирования коллекторов в отложениях баженовского горизонта в районе сочленения Красноленинского свода и Фроловской мегавпадины. *Нефтегазовая геология и практика. Теория и практика*, 7(2), с. 1-14.
- Немова В.Д., Колосков В.Н., Покровский Б.Г. (2011). Формирование карбонатизированных коллекторов в глинисто-кремнистых отложениях баженовского горизонта на Западе Широкого Приобья. *Разведка и охрана недр*, 12, с. 31-35.
- Немова В.Д., Панченко И.В. (2017). Факторы продуктивности баженовского горизонта во Фроловской мегавпадине. *Нефтегазовая геология и практика. Теория и практика*, 12(4), с. 1-16.
- Нестеров И.И. (1979). Новый тип коллектора нефти и газа. *Геология нефти и газа*, 10, с. 26-29.
- Перельман А.И. (1961). Геохимия ландшафта. М: Географгиз, 392 с.
- Перельман А.И. (1989). Геохимия. М: Высшая школа, 528 с.
- Предтеченская Е.А., Кроль Л.А., Гурари Ф.Г., Сапьяник В.В., Перозин Г.Н., Малюшко Л.Д. (2006). О генезисе карбонатов в составе баженовской свиты центральных и юго-восточных районов Западно-Сибирской плиты. *Литосфера*, 4, с. 131-148.
- Розен О.М., Аббясов А.А., Мигдисов А.А., Ярошевский А.А. (2000). Программа MINLITH для расчета минерального состава осадочных пород: достоверность результатов в применении к отложениям древних платформ. *Геохимия*, 4, с. 431-444.
- Страхов Н.М. (1960). Основы теории литогенеза. Т. II. М: Изд-во АН СССР, 574 р.
- Страхов Н.М. (1976). Проблемы геохимии современного океанского литогенеза. М: Наука, 299 с.
- Гурари Ф.Г., Вайц Э.Я., Москвин В.И. и др. (1988). Условия формирования и методика поисков залежей нефти в аргиллитах баженовской свиты. Под ред. Гурари Ф.Г. М: Недра, 199 с.
- Холодов В.Н. (2006). Геохимия осадочного процесса. М: ГЕОС, вып. 574, 608 с.
- Шурыгин Б.Н., Дзюба О.С. (2015). Границы юры и мела на севере Сибири и бореально-тетическая корреляция приграничных толщ. *Геология и геофизика*, 56(4), с. 830-844.
- Эдер В.Г., Юрченко А.Ю., Балушкина Н.С., Костырева Е.А., Козлова Е.В., Замирайлова А.Г. (2018). Карбонатные породы черносланцевой баженовской свиты района Хантейской гемиянтеклизы, Западная Сибирь. *Интерэкспо ГЕО-Сибирь: Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология»:*

Сборник материалов, т. 1, с. 93-101.

Эдер В.Г., Замирайлова А.Г., Ян П.А. (2017). Закономерности распространения кремнистых пород и «кокколитовой» пачки баженовской свиты. *Геология и геофизика*, 58(3-4), с. 511-521.

Юрченко А.Ю. (2017). Формирование вторичных карбонатных пород верхнебабаласко-баженовской толщи Салымского, Правдинского и Малобалыкского нефтяных месторождений Западной Сибири. *Автореф. дис. кандидата геол.-мин. наук*. М: МГУ, 25 с.

Юдович Я.Э., Кетрис М.П. (2011). Геохимические индикаторы литогенеза. Литологическая геохимия. М: Геопринт, 740 с.

Bausch W., Hoefs J. (1972). Isotopic composition of dolomites and calcites from the Upper Jurassic of Southern Germany. *Contrib. Mineral Petrology*, 37(2), pp. 121-130.

Berner R. (1984). Sedimentary pyrite formation: an update. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 47, pp. 605-615.

Berner R., Raiswell R. (1983). Burial of organic carbon and pyrite sulfur in sediments over Phanerozoic time: a new theory. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 47, pp. 855-862.

Eder V.G., Fomin A.N., Zamiraylova A.G. (2017). Study of Pyrite in Upper Jurassic-Lower Cretaceous Black Shales of the Bazhenov Formation in the West-Siberian Sedimentary Basin, its Distribution and Diagenetic Migration Patterns. *17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017. Geology, Mineral processing: Conference Proceedings*, 17(11), pp. 1059-1066.

Farr M.R. (1992). Geochemical variation of dolomite cement within the Cambrian Bonnetterre Formation, Missouri: Evidence for fluid mixing. *J. Sed. Petrol.*, 62(4), pp. 636-651.

Hofmann P., Ricken W., Schwark L. (1999). Leythaeuser coupled oceanic effects of climatic cycles from late Albian deep-sea sections of the North Atlantic. In: *Evolution of the Cretaceous Ocean Climate System*. Geological Society of America, Special Paper 332, pp. 143-160.

Krumbein W.C., Garrels R.M. (1952). Origin and classification of chemical sediments in terms of pH and oxidation – reduction potentials. *Journ. Geol.*, 60, pp. 1-33.

Leventhal J.S. (1995). Carbon-sulfur plots to show diagenetic sulfidation in sediments. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 59(6), pp. 1207-1211.

Maastuda H., Iijima A. (1989). Occurrence and genesis of Permian dolostone in the Kuzuu area, Tohigi Preference, Central Japan. *J.Fac.Sci. Univ. Tokyo*, Sec.2, 22(1), pp.-89-119.

Pratt L.M., Force E.R., Pomerol B. (1991). Coupled manganese and carbon-isotopic events in marine carbonates at the Cenomanian-Turonian boundary. *J. Sediment. Petrol.*, 61, pp. 370-383.

Raiswell R., Buckley F., Berner R.A., Anderson T.F. (1988). Degree of pyritization of iron as a paleoenvironmental indicator of bottom-water oxygenation. *J. Sediment. Petrol.*, 58, pp. 812-819.

Wignall P.B., Myers K.J. (1988). Interpreting the benthic oxygen levels in mudrocks: A new approach. *Geology*, 16, pp. 452-455.

Сведения об авторах

Вика Георгиевна Эдер – кандидат геол.-мин. наук, старший научный сотрудник лаборатории седиментологии Института нефтегазовой геологии и геофизики имени А.А. Трофимука СО РАН

Россия, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, д. 3
Тел: +7 (383) 323 33 03, e-mail: edervg@ipgg.sbras.ru

Альвина Григорьевна Замирайлова – кандидат геол.-мин. наук, старший научный сотрудник лаборатории седиментологии

Института нефтегазовой геологии и геофизики имени А.А. Трофимука СО РАН

Россия, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, д. 3

Георгий Александрович Калмыков – доктор геол.-мин. наук, профессор кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1

Статья поступила в редакцию 19.03.2019;

Принята к публикации 17.04.2019;

Опубликована 20.05.2019

IN ENGLISH

Evidence of carbonate rocks formation on geochemical barriers in black shale on the example of the Bazhenov formation of the Western Siberia

V.G. Eder^{1*}, A.G. Zamiraylova¹, G.A. Kalmykov²

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

*Corresponding author: Vika G. Eder, e-mail: edervika@gmail.com

Abstract. A comprehensive lithological-geochemical study of rocks of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous black-shale Bazhenov formation showed that most of its carbonatized interlayers to the boundaries of packs of different composition differing in carbonate content, degree of siliceousness or clayiness. At the same time, at the boundaries of the Bazhenov formation with host sediments, where carbonate rocks are often found in association with “pyrite” low carbon rocks according to geochemical parameters (degree of pyritization, Mn/Al, Ua), a change in the redox regime is recorded. In the most studied stratum at intervals of occurrence of carbonates, a change in the redox regime is not observed. It is assumed that they existed alkaline barriers, as evidenced by the change in the composition of rocks. The following geochemical barriers (bottom-up along the section) were identified in the Bazhenov formation and its transition to the enclosing sediments, on which evidence of localization of carbonate minerals was found: redox barrier 1 (lower BF boundary), alkaline barrier 1

(border of mixes of kerogen - clay-siliceous low-carbonate and silicites), alkaline barrier 2 (border of kerogen-clay-siliceous low-carbonate and siliceous-carbonate “coccolith” packs); Redox barrier 2 (the upper limit of the BF).

Keywords: Bazhenov formation, Upper Jurassic, carbonate rock, geochemical barriers

Recommended citation: Eder V.G., Zamiraylova A.G., Kalmykov G.A. (2019). Evidence of carbonate rocks formation on geochemical barriers in black shale on the example of the Bazhenov formation of the Western Siberia. *Georesursy = Georesources*, 21(2), pp. 143-152. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2019.2.143-152>

References

Alekseenko V.A., Alekseenko L.P. (2003). *Geokhimicheskie bar'ery [Geochemical barriers]*. Moscow: Logos, 143 p. (In Russ.)

Balushkina N.S., Yurchenko A.Yu., Kalmykov G.A., Korobova N.I., Petrakova N.N., Bugaev I.A. (2016). Formation conditions and oil saturation

- of carbonate reservoirs of the Bazhenov and Abalaki suites. *Neftyanoe khozyaistvo = Oil industry*, 1, pp. 32-35. (In Russ.)
- Bausch W., Hoefs J. (1972). Isotopic composition of dolomites and calcites from the Upper Jurassic of Southern Germany. *Contrib. Mineral Petrology*, 37(2), pp. 121-130.
- Berner R. (1984). Sedimentary pyrite formation: an update. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 47, pp. 605-615.
- Berner R., Raiswell R. (1983). Burial of organic carbon and pyrite sulfur in sediments over Phanerozoic time: a new theory. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 47, pp. 855-862.
- Eder V.G., Fomin A.N., Zamiraylova A.G. (2017). Study of Pyrite in Upper Jurassic-Lower Cretaceous Black Shales of the Bazhenov Formation in the West-Siberian Sedimentary Basin, its Distribution and Diagenetic Migration Patterns. *17th Int. Sci. GeoConference SGEM 2017. Geology, Mineral processing: Conference Proceedings*, 17(11), pp. 1059-1066.
- Eder V.G., Yurchenko A. Yu., Balushkina N.S., Kostyreva E.A., Kozlova E.V., Zamiraylova A.G. (2018). Carbonate rocks of the black shale Bazhenov Formation of the Khantey Hemianteclise area, Western Siberia. *Interesko GEO-Sibir: Mezhdunar. nauch. konf. «Nedropol'zovanie. Gornoe delo. Napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh. Ekonomika. Geologiya»* [Proc. Int. Sci. Conf.: Interexpo GEO-Siberia: Subsoil use. Mining. Directions and technologies of prospecting, exploration and development of mineral deposits. Economy. Geoecology], vol. 1, pp. 93-101. (In Russ.)
- Eder V.G., Zamiraylova A.G., Yan P.A. (2017). Regularities of the distribution of siliceous rocks and the "coccolith" pack of the Bazhenov suite. *Geologiya i geofizika = Russian Geology and Geophysics*, 58(3-4), pp. 511-521. (In Russ.)
- Farr M.R. (1992). Geochemical variation of dolomite cement within the Cambrian Bonnetterre Formation, Missouri: Evidence for fluid mixing. *J. Sed. Petrol.*, 62(4), pp. 636-651.
- Gulyaeva L.A. (1953). Precipitation of hydrogen sulfide basins of the geological past. *Doklady AN SSSR*, XCH(5), pp. 1019-1022. (In Russ.)
- Gurari F.G., Vaitis E. Ya., Moskvina V.I. et al. (1988). Formation conditions and methods for the search for oil deposits in the mudstones of the Bazhenov formation. Ed. Gurari F.G. Moscow: Nedra, 199 p. (In Russ.)
- Hofmann P., Ricken W., Schwark L. (1999). Leythaeuser coupled oceanic effects of climatic cycles from late Albian deep-sea sections of the North Atlantic. In: *Evolution of the Cretaceous Ocean Climate System*. Geological Society of America, Special Paper 332, pp. 143-160.
- Kholodov V.N. (2006). Geokhimiya osadochnogo protsessa [Geochemistry of the sedimentary process]. Moscow: GEOS, iss. 574, 608 p. (In Russ.)
- Kontorovich A.E., Yan P.A., Zamiraylova A.G., Kostyreva E.A., Eder V.G. (2016). Classification of rocks of the Bazhenov formation. *Geologiya i geofizika = Russian Geology and Geophysics*, 11, pp. 2034-2043. (In Russ.)
- Korobov A.D., Korobova L.A., Morozov V.P., Zagranyovskaya D.E., Zakharaeva O.A. (2017). Authigenic dolomite of high-bituminous Bazhenov sediments is an indicator of the final stage of hydrocarbon generation. *Neftyanoe khozyaistvo = Oil industry*, 4, pp. 41-43. (In Russ.)
- Krumbein W.C., Garrels R.M. (1952). Origin and classification of chemical sediments in terms of pH and oxidation – reduction potentials. *Journ. Geol.*, 60, pp. 1-33.
- Leventhal J.S. (1995). Carbon-sulfur plots to show diagenetic sulfidation in sediments. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 59(6), pp. 1207-1211.
- Maastuda H., Iijima A. (1989). Occurrence and genesis of Permian dolostone in the Kuzuu area, Tochigi Prefecture, Central Japan. *J.Fac.Sci. Univ. Tokyo*, Sec.2, 22(1), pp. -89-119.
- Makhnach A.A. (1989). Katagenез i podzemnye vody [Catagenesis and groundwater]. Minsk: "Nauka i tekhnika" Publ., 335 p.
- Mormyshev V.V., Zav'yalets A.N. (1985). Structure diagram and justification of the reservoir development mode of the Yu0 Salym field. Features of the calculation of oil reserves in Bazhenov sediments of Western Siberia. Tyumen: SibNIINP. (In Russ.)
- Nemova V.D. (2012). Conditions reservoir formation in deposits of the Bazhenov strata within the junction of the Krasnoleninsky arch and the Frolovsky megadepression. *Neftgazovaya geologiya i praktika. Teoriya i praktika*, 7(2), pp. 1-14. (In Russ.)
- Nemova V.D., Koloskov V.N., Pokrovskii B.G. (2011). Formation of carbonatized reservoirs in clay-siliceous sediments of the Bazhenov horizon in the West of the Ob basin. *Razvedka i okhrana neдр*, 12, pp. 31-35. (In Russ.)
- Nemova V.D., Panchenko I.V. (2017). The productivity factors of the Bazhenov formation in Frolov megadepression. *Neftgazovaya geologiya i praktika. Teoriya i praktika*. *Teoriya i praktika*, 12(4), pp. 1-16. (In Russ.)
- Nesterov I.I. (1979). New type of oil and gas reservoir. *Geologiya nefi i gaza = Geology of oil and gas*, 10, pp. 26-29. (In Russ.)
- Perel'man A.I. (1961). Geokhimiya landshafta [Geochemistry of the landscape]. Moscow: "Geografiz" Publ., 392 p. (In Russ.)
- Perel'man A.I. (1989). Geokhimiya [Geochemistry]. Moscow: "Vysshaya shkola", 528 p. (In Russ.)
- Pratt L.M., Force E.R., Pomeroy B. (1991). Coupled manganese and carbon-isotopic events in marine carbonates at the Cenomanian-Turonian boundary. *J. Sediment. Petrol.*, 61, pp. 370-383.
- Pretechenskaya E.A., Krol' L.A., Gurari F.G., Sap'yanik V.V., Perozio G.N., Malyushko L.D. (2006). On the genesis of carbonates in the composition of the Bazhenov Formation of the central and south-eastern regions of the West Siberian Plate. *Litosfera = Lithosphere*, 4, pp. 131-148. (In Russ.)
- Raiswell R., Buckley F., Berner R.A., Anderson T.F. (1988). Degree of pyritization of iron as a paleoenvironmental indicator of bottom-water oxygenation. *J. Sediment. Petrol.*, 58, pp. 812-819.
- Rozen O.M., Abbyasov A.A., Migdisov A.A., Yaroshevskii A.A. (2000). The MINLITH program for calculating the mineral composition of sedimentary rocks: the reliability of the results applied to deposits of ancient platforms. *Geokhimiya = Geochemistry*, 4, pp. 431-444. (In Russ.)
- Shurygin B.N., Dzyuba O.S. (2015). The boundaries of the Jurassic and Cretaceous in the north of Siberia and the boreal-tetic correlation of the border strata. *Geologiya i geofizika = Russian Geology and Geophysics*, 56(4), pp. 830-844. (In Russ.)
- Strakhov N.M. (1960). Osnovy teorii litogeneza [Fundamentals of the theory of lithogenesis]. V. II. Moscow: Academy of Sciences of the USSR, 574 p. (In Russ.)
- Strakhov N.M. (1976). Problemy geokhimii sovremennogo okeanskogo litogeneza [Problems of geochemistry of modern ocean lithogenesis]. Moscow: Nauka, 299 p. (In Russ.)
- Wignall P.B., Myers K.J. (1988). Interpreting the benthic oxygen levels in mudrocks: A new approach. *Geology*, 16, pp. 452-455.
- Yudovich Ya.E., Ketris M.P. (2011). Geokhimicheskie indikatory litogeneza. Litologicheskaya geokhimiya [Geochemical indicators of lithogenesis. Lithological geochemistry]. Moscow: Geoprint, 740 p. (In Russ.)
- Yurchenko A.Yu. (2017). Formation of secondary carbonate rocks of the Upper Ababalak-Bazhenov strata of the Salym, Pravdinsk and Malobalyk oil fields of Western Siberia. *Avto-ref. dis. kandidata geol.-min. nauk* [Author. dis. candidate geol.-min. sciences]. Moscow: MSU, 25 p. (In Russ.)
- Zubkov M.Yu. (2016). Regional and local oil-bearing forecasts of the Bazhenov and Abalak Formations (Western Siberia). *Gornye vedomosti*, 3-4, pp. 46-68. (In Russ.)

About the Authors

Vika G. Eder – PhD (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Laboratory of Sedimentology Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences 3, Ak. Koptyug ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

Tel: +7 (383) 323 33 03, e-mail: edervg@ipgg.sbras.ru

Alvina G. Zamiraylova – PhD (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Laboratory of Sedimentology Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences 3, Ak. Koptyug ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

Georgii A. Kalmykov – DSc (Geology and Mineralogy), Professor, Petroleum Geology Department Lomonosov Moscow State University 1, Leninskie gory, Moscow, 119234, Russian Federation

Manuscript received 19 March 2019;
Accepted 17 April 2019; Published 20 May 2019