НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ УГЛЕРОДИСТЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

SOME ASPECTS OF OIL AND GAS CARBONACEOUS DEPOSITIONS FORMATION ON THE TERRITORY OF RUSSIA

М. В. Рыкус
Mikhail V. Rykus

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
ООО «РН-БашНИПнефть»,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
RN-BashNIPneft LLC,
Ufa, Russian Federation

А. С. Огнева
Aleksandra S. Ogneva

ООО «РН-БашНИПнефть»,
г. Уфа, Российская Федерация

RN-BashNIPneft LLC,
Ufa, Russian Federation

Е. Ф. Смолянец
Evgeniy F. Smolyanec

ООО «РН-БашНИПнефть»,
г. Уфа, Российская Федерация

RN-BashNIPneft LLC,
Ufa, Russian Federation

М. С. Антонов
Maksim S. Antonov

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
ООО «РН-БашНИПнефть»,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
RN-BashNIPneft LLC,
Ufa, Russian Federation

Рассмотрены условия осадконакопления углеродистых отложений и процессы формирования в них коллекторских свойств на примере доманиковой и баженовской свит как наиболее перспективных потенциально нефтегазоносных объектов на территории России. Показано, что в палеозое вдоль восточной периферии Русской платформы существовала пассивная континентальная окраина, развивавшаяся во франско-турнейское время в режиме некомпенсированной впадины. Типичные разрезы доманика приурочены к фазам высоко-го стояния уровня моря и локализованы в осевых частях прогибов, где они представлены кремнистыми, карбонатно-кремнистыми литотипами, обогащёнными гумусово-сапропелевым материалом.

Баженовские отложения формировались в бассейне синеклизного типа, возникшего под влиянием раннетриасового рифтогенеза. Устойчивое погружение и режим некомпенсированного развития баженовского моря пришлись на волжское время. Несмотря на принадлежность к различным геодинамическим типам бассейнов, углеродистые толщи характеризуются общей объединяющей их особенностью — они входят в состав рифтогенно-депрессионных комплексов трансгрессивных стадий седиментационных циклов, что предопределило устойчивое некомпенсированное погружение коры и обеспечило образование, накопление и сохранность больших объёмов органического вещества.

Ключевые слова

бассейн; пассивная
континентальная окраина;
Западная Сибирь; надрифтовая
синеклиза; баженовиты;
доманикиты;
нетрадиционный коллектор

Установлено, что распределение органического вещества в бассейновых впадинах подчиняется площадной зональности и вертикальной цикличности: максимумы концентраций органических веществ (ОВ) приурочены к осевым наиболее прогнутым, а минимумы — к бортовым относительно приподнятым участкам. Отмечается закономерная стратифицированная последовательность обогащённых и обеднённых ОВ прослоев в разрезе, что, возможно, связано с периодическими изменениями биопродуктивности или физико-химических условий седиментации.

Показана важная роль в формировании нетрадиционного коллектора взаимосвязанных процессов внешней и внутренней динамики, включая литогенез погружения, тектоническую активизацию и сопутствующие им термобарические и флюидодинамические изменения органического вещества. Подчеркнута определяющая роль катагенетических преобразований в гидрофобизации матрицы и формировании зон аномально высокого пластового давления, а также геодинамических факторов, способствующих образованию коллекторских свойств, что должно учитываться при проведении геологоразведочных и эксплуатационных работ.

The article discusses the conditions of sedimentation of carbonaceous depositions and the formation of reservoir properties in them on the example of the Domanik and Bazhenov formations, as the most promising potentially oil and gas objects in Russia. It is shown that in the Paleozoic along the eastern periphery of the Russian platform, there was a passive continental margin that developed in the French-Tournaisian time as an uncompensated depression. Typical domanik sections are confined to the tracts of high sea level and are localized in the axial parts of the depressions. Here they are represented by siliceous, carbonate-siliceous lithotypes enriched in humus-sapropel material.

Bazhenov depositions were formed in the syneclyse basin, which arose under the influence of early Triassic rifting. Submergence and uncompensated development of the bazhenov sea occurred in the volga period. Despite belonging to different geodynamic types of basins, carbonaceous strata are characterized by a common feature — they are part of the rift-depressive complexes of the transgressive stages of the sedimentation cycles, which predetermined a stable non-compensated crust submersion and ensured the formation, accumulation and preservation of large volumes of organic matter.

It is established that the distribution of organic matter in the basins is subject to areal zoning and vertical cyclicity: the maximal concentrations of organic matter are confined to the axial ones, and the minimal to onboard relatively elevated areas. A regular stratified sequence of enriched and depleted organic matter layers in the section is noted, which may be due to periodic changes in bioproductivity or physico-chemical conditions of sedimentation.

An important role in the formation of an unconventional reservoir of interrelated processes of external and internal dynamics, including submergence lithogenesis, tectonic activation and the accompanying temperature, pressure and fluid dynamic changes of organic matter, is shown. The decisive role of catagenetic transformations in the hydrophobization of the matrix and the formation of the abnormally high pressure zones, as well as geodynamic factors that contribute to the formation of reservoir properties, which should be taken into account when carrying out exploration and oil field development, is emphasized.

Key words

sedimentary basin;
passive continental margin;
West Siberia; postrift syncline;
bazhenovites; domanikites;
unconventional reservoir

Углеродистые нефтематеринские отложения давно находятся в центре внимания геологов как потенциальные объекты добычи углеводородов. Они входят в состав разновозрастных осадочных комплексов, образующих слои и горизонты мощностью до первых десятков метров и относятся к так называемым

нетрадиционным породам-коллекторам. В последние годы проблема нефтегазоносности нетрадиционных коллекторов, к которым в первую очередь относятся западно-сибирские баженовиты и волго-уральские доманикиты, получила широкое освещение в научной литературе. Для этих отложений были выявлены

основные обстановки осадконакопления, определены типовые разрезы и показана литологическая изменчивость, намечены основные термобарические параметры генерации углеводородов, предложены критерии выявления продуктивных участков, частично подтвержденные результатами бурения.

Вместе с тем низкая эффективность геологоразведочных работ, проведенных на рекомендуемых участках, со всей очевидностью продемонстрировала многочисленные общие и частные проблемы, требующие безотлагательного решения. В частности, до сих пор нет адекватных моделей формирования коллектора и залежей нефти в материнских толщах, что не позволяет разработать не только рациональную стратегию поисково-разведочных работ, но и надёжно решить технологические вопросы вскрытия и эксплуатации продуктивных отложений.

В этих условиях, как нам представляется, возникает необходимость ещё раз обратиться к обсуждению проблемы с привлечением материалов по потенциально нефтегазоносным нетрадиционным коллекторам различных регионов России с акцентом на бассейновый анализ и литогенетическую историю углеродистых отложений (УО). Именно в ходе развития осадочного бассейна происходит зарождение и функционирование углеводородной и флюидогидродинамической систем, осуществляется тепломассоперенос и обеспечивается активность водно-флюидных фаз, что может быть ключом к пониманию механизмов преобразования углеродистых отложений и формирования в них нетрадиционных залежей углеводородов.

Типы осадочных бассейнов углеродистых формаций

Высокоуглеродистые нефтематеринские толщи являются неотъемлемой частью осадочных формаций седиментационных бассейнов молодых и древних платформ и подвижных областей земной коры. Типичными представителями подобных отложений на территории России являются баженовская свита Западной Сибири, доманиковские толщи Тимано-Печорской и Волго-Уральской провинций, породы хадумской свиты Северного Кавказа и куонамской свиты Восточной Сибири (рисунок 1).

Осадочные бассейны как главные области осадконакопления в своей основе являются тектоническими структурами, развитие и видоизменение которых хорошо описываются геодинамической моделью Уилсона. На территории России в ходе тектонической эволюции литосферы возникали платформенные впадины континентов и шельфов, впадины окраинных и внутренних морей, периконтинентальные и передовые прогибы, системы впадин и желобов коллизионных и субдукционных поясов, различного рода орогенные и посторогенные впадины с различными палеогеографическими обстановками и формационными характеристиками углеродистых пород [1–3]. Рассмотрены особенности бассейнового осадконакопления и формирования углеродистых формаций на примере доманиковых и баженовских отложений как наиболее перспективных и широко представленных на территории России потенциально нефтегазоносных пород-коллекторов.

Рисунок 1. Распространение высокоуглеродистых отложений на территории России

Доманиковые отложения Тимано-Печорской и Волго-Уральской провинций формировались в пределах бассейнов пассивной континентальной окраины Уральского палеоокеана. Здесь они образуют широкую полосу, непрерывно прослеживающуюся вдоль восточного края добайкальской Восточно-Европейской платформы от Печорского моря до Самарского Поволжья.

История формирования палеозойской континентальной окраины включает в себя несколько задокументированных событий: заложение в ордовике системы континентальных рифтов, спрединг океанического дна в силуре, коллизию и ликвидацию пассивной окраины в конце девона начале карбона [4]. Накопление осадков в бассейнах и весь ход дальнейшей их эволюции во многом определялись влиянием тектонических и эвстатических процессов, происходящих в прилегающей океанической впадине. Анализ мощностей и перерывов в разрезах осадочных формаций вдоль пассивной континентальной окраины выявляет не только ожидаемую периодичность их смены в течение геотектонического цикла, но и существенные отличия, вызванные латеральной тектонической неоднородностью, что позволяет выделять два суббассейна — северный (Тимано-Печорский) и южный (Волго-Уральский).

Так, в Тимано-Печорском суббассейне палеозойский осадочный чехол начинает формироваться уже с ордовика и обладает большей стратиграфической полнотой и мощностью отложений по сравнению с Волго-Уральским суббассейном, где осадконакопление в основном началось только с раннего девона. Эти хроностратиграфические отличия в осадочном чехле единой континентальной окраины находят объяснение в различной тектонической активности на севере и юге бассейновой океанической впадины. Очевидно, тектонический режим погружения на севере существовал уже в раннем палеозое, был более активным, о чем свидетельствуют неоднократные проявления базальтового вулканизма, и сопровождался не только наращиванием осадочной толщи за счёт интенсивного прогибания и седиментации, но и периодическими тектоническими реорганизациями с инверсионными движениями, перестройкой структуры Тимано-Печорского суббассейна и выведением осадочных толщ на денудационную поверхность.

На юге опускание пассивной окраины и формирование Волго-Уральского осадочного суббассейна началось значительно позже, после длительного периода высокого стояния платформенного фундамента и ограничивалось относительно спокойным тектоническим режимом с преобладающим литогенезом погружения без существенных структурных перестроек.

Следует подчеркнуть, что несмотря на указанные различия, северный и южный суббассейны пассивной континентальной окраины, морфологически выраженные шельфом и материковым склоном, обладают одной и той же широтной батиметрической зональностью, предопределившей закономерное региональное расположение на западе мелководных, а на востоке — относительно глубоководных фациальных типов палеозойских отложений. В осадочных разрезах обоих суббассейнов проявлена крупномасштабная цикличность, обусловленная тектоно-эвстатическими колебаниями уровня моря. Судя по материалам региональных палеогеографических реконструкций [5], в трансгрессивные фазы бассейнов формировались супралиторальная, литоральная и сублиторальная области, переходящие к востоку в средний — глубокий шельф и континентальный склон. В регрессивных фазах фациальные области шельфа перестраивались и включали зоны супралиторали, закрытых и полужакрытых водоёмов (лагун), литорали, сублиторали (с краевыми рифогенными постройками) и открытого шельфа — склона.

Доманиковые отложения обычно приурочены к фазам высокого стояния уровня моря, во время которых большая часть грубозернистой кластики оставалась в пределах континентальных флювиальных систем, а в некомпенсированных впадинах откладывались преимущественно тонковзвешенные фоновые осадки, обогащённые органическим веществом (ОВ).

Подобная впадина с некомпенсированным осадконакоплением образовалась в среднефранское время в северном суббассейне в результате общего регионального прогибания пассивной континентальной окраины. При нормальной солёности морских вод глубина впадины не выходила за пределы нижней сублиторали [5]. В наиболее глубоких её участках в обстановке замедленного водообмена накапливались доманиковые отложения — тонкие илы с большой концентрацией гуму-

сово-сапропелевого материала. В фаменском веке нисходящие движения постепенно затухали, и область некомпенсированного осадконакопления смещалась к востоку, занимая ограниченную площадь в приокеанской части бассейна. В турнейском веке произошло окончательное вырождение морского бассейна в связи с завершением позднедевонского тектоно-седиментационного цикла.

Область палеошельфа в доманиково-турнейском бассейне также имела региональный наклон к востоку, что предопределило фациальную зональность осадконакопления. В западной (прибрежной) части бассейна формировались относительно маломощные мелководношельфовые образования, которые к востоку на окраине аккумулятивных шельфовых террас переходили в более мощные барьерные рифы и далее во впадине замещались изохронными депрессионными осадками малой мощности. Необходимо отметить, что доманиковый бассейн, кроме общего режима погружения в сторону Уральского палеоокеана, характеризовался значительной локальной батиметрической контрастностью, обусловленной наличием рифогенно-карбонатных фаций и обрамлявших их относительно глубоководных депрессий, с которыми и связано основное накопление типичных высокоуглеродистых доманиковых отложений в фазу максимального эвстатического подъёма уровня моря. Депрессионные разрезы доманика известны в Печоро-Колвинском авлакогене, Хорейверской, Ижма-Печорской, Верхнепечорской и Косью-Роговской впадинах. В составе депрессионных отложений в переменных количествах содержатся глинистые компоненты, аутигенный и биогенный кремнистый и карбонатный материал, сапропелевая органика с включениями сингенетичного пирита. На выступах морского дна, склонах рифовых построек и зарождающихся сводовых поднятий разрез доманика становится более разнообразным, появляются отложения радиоляриевых и тентакулитовых известняков, самостоятельное значение приобретают органогенно-обломочные и сферово-водорослевые разности известняков — индикаторы мелководных фаций бассейна. Эти отложения, занимающие периферийное положение по отношению к депрессионным фациям, зачастую имеют сложные заливообразные очертания, обусловленные контурами склонов прилегающих рифовых построек.

Волго-Уральский суббассейн в позднем девоне также обладал расчленённым рельефом морского дна. Здесь существовала Камско-Кинельская система прогибов, образованная на восточной окраине Восточно-Европейской платформы и длительное время (средний франтурне) развивающаяся в режиме некомпенсированного прогибания. Южную её часть на территории Башкирии занимал Актаныш-Чишминский прогиб, в обрамлении которого располагалась обширная область внутреннего шельфа с широким кольцом рифовых массивов, а сам прогиб был заполнен глубоким морем, где в аноксидных условиях с застойным режимом иловой впадины накапливались доманиковые отложения. Судя по материалам палеогеографических реконструкций, максимум трансгрессии со стороны Уральского палеоокеана пришёлся на средне-позднефранское время, что привело к значительному расширению бассейновой впадины к западу и отложению доманиковых фаций не только в пределах глубоких прогибов, но и на склонах Пермского, Башкирского и Татарского сводов, прежде занятых обширными отмелями морского дна.

Наиболее полные разрезы типичного битуминозного кремнисто-карбонатного доманика известны в осевой наиболее прогнутой части Актаныш-Чишминского прогиба, на его бортах они фациально замещаются изохронными глинистыми и органогенными светлоокрашенными известняками с пониженным содержанием органического вещества. В ходе развития пассивной окраины происходило постепенное заполнение некомпенсированного франского прогиба и значительное сокращение в фаменско-турнейское время площади доманиковых отложений.

В турнейское время Актаныш-Чишминский прогиб заполнялся морскими карбонатными отложениями кизеловского и терригенно-карбонатными образованиями косьвинского горизонтов. В течение среднего — позднего турне осевая часть прогиба представляла относительно глубоководную некомпенсированную впадину, заполнение которой происходило путём формирования клиновидных карбонатных и терригенно-карбонатных тел бокового наращивания [6]. Формирование клиноформных комплексов и их проградация от бортов впадины к её центру привели к постепенному сокращению площади впадины, её частичной компенсации и батиметрическому выравниванию ложа и прибортовых

зон. К концу турнейского времени на территории платформенной Башкирии бассейн осадконакопления имел дифференцированное строение. Его узкая и относительно глубокопогруженная область располагалась вдоль осевой части Актаныш-Чишминского прогиба, к нему с двух сторон примыкала более мелководная шельфовая терраса, а вся остальная территория была занята обширной мелководной акваторией.

В радаевское время Актаныш-Чишминский прогиб представлял собой область мелководного морского бассейна, обрамлённого прибрежной равниной. Глубина бассейна постепенно увеличивалась от бортов к его центру, что нашло отражение в стратиграфической полноте и мощности составляющих отложений. На региональных геологических разрезах и временных сейсмических 2D профилях хорошо видно постепенное увеличение количества песчаных пластов и их мощности от периферии к центру прогиба и их последовательное прилегание к выступу турнейских карбонатных отложений по мере заполнения аккомодационного пространства терригенными осадками. Площадь турнейских карбонатов постепенно уменьшалась в ходе перекрытия их радаевскими терригенными отложениями, которые, заполняя прогиб, привели к полному выравниванию морского дна и максимальному обмелению бассейна к началу бобринского времени. На этой выровненной турнейско-радаевской поверхности морского дна единым покровом накапливалась терригенная толща бобринских отложений.

Общими чертами волго-уральского депрессионного доманика являются слабое развитие бентосных форм морской органики, преимущественно кремнистый и карбонатно-кремнистый состав отложений, повышенное содержание органического вещества. Бортовые и шельфовые разрезы характеризуются микститовым кремнисто-глинисто-карбонатным составом с прослоями сгустковатых и шламово-детритовых, а в наиболее мелководной области бассейна органогенно-обломочных известняков.

Баженовские отложения Западно-Сибирской плиты, как и весь её мезозойско-кайнозойский осадочный чехол, накапливались в бассейне синеклизного типа, возникшем под влиянием раннетриасового рифтогенеза [7]. В ходе растяжения в основании нижнеплитного этажа образовалась разветвлённая система

надрифтовых желобов с характерной трапповой формацией континентальных базальтов. Наиболее крупный из них — Колтогорско-Уренгойский, заложился на герцинском фундаменте в центральной части плиты. Рифтовая впадина раскрывалась к северу в сторону Арктического бассейна, её ось пространственно совпадает с современной наиболее прогнутой частью фундамента и общим утолщением осадочного чехла.

Наличие триасовых рифтовых впадин в структуре Западной Сибири способствовало устойчивому погружению мезозойского бассейна, максимум которого пришёлся на волжское время, когда накапливались преимущественно фоновые осадки баженовской свиты, обогащённые органическим веществом. Тонкослоистое строение баженовских отложений с отсутствием следов биотурбации, многочисленные линзовидные включения сингенетичного фрамбоидального пирита, обогащённость урановой минерализацией указывают на глубоководный характер морского бассейна.

Баженовское море было наиболее глубоким в западных и северо-западных районах, многочисленные генетические признаки пород указывают на то, что морские воды имели нормальную солёность, несколько пониженную температуру (не опускавшуюся ниже 15 °C), испытывали периодически возникавшее в придонных слоях сероводородное заражение [8–10]. Осадочные отложения содержат своеобразный набор бентосных и нектонных организмов, фито- и зоопланктона, сложное распределение их по площади. Для пород баженовской свиты характерен многокомпонентный состав, включающий кремнистые, глинистые и карбонатные литотипы, а также переходные между ними разновидности, необычно высокие содержания пирита, биогенного кремнезема и органического углерода.

К востоку и западу глубоководная область бассейна обрамлялась неширокой полосой более мелководных морских осадков нижней сублиторали глубиной до 200 м. Здесь в большом разнообразии и изобилии обитал макробентос (бухтии, гастроподы, брахиоподы), широкое развитие получил микробентос, особенно фораминиферы. Более разнообразным становится состав морских осадков. Наряду с преимущественным развитием глинистых илов, встречаются осадки смешанного глини-

сто-кремнисто-карбонатного состава, имеющие отчётливую связь с палеобатиметрией. Так, глинистые и глинисто-кремнистые (радиолариевые) отложения приурочены в основном к отрицательным формам рельефа дна, тогда как на подводных возвышенностях накапливались преимущественно алевроитистые глины с прослоями пелелиподовых ракушнякаков. По сравнению с глубоководной зоной бассейна, в породах нижней сублиторали отмечается пониженное количество органического углерода, биогенного кремнезема [9]. Всё это указывает не только на высокую расчленённость морского дна нижней сублиторали, но и на близость к ней мелководно-шельфовой области, периодически поставлявшей во внутреннюю часть бассейна кластогенный алевроитовый материал и продукты каолинитовых кор выветривания.

Таким образом, рассмотренные углеродистые отложения, несмотря на принадлежность к различным геодинамическим типам бассейнов, характеризуются общей объединяющей их особенностью — они входят в состав некомпенсированных рифтогенно-депресссионных комплексов трансгрессивных стадий седиментационных циклов и образуют слои и горизонты в ассоциации с кремнисто-карбонатными породами и сингенетичной вкраплённостью пирита, что обычно свойственно локальным впадинам с застойным режимом водообмена.

Условия накопления органического вещества. Доманиковые отложения — собирательный термин углеродистых потенциально нефтематеринских пород — это чёрные битуминозные образования глинисто-карбонатного, кремнисто-глинисто-карбонатного, кремнисто-карбонатного и глинисто-кремнистого состава, содержащие рассеянное органическое вещество сапропелевого типа. По концентрации ОВ [11] их принято относить к доманикоидам (0,5–5 % ОВ) и доманикитам (5–25 % ОВ), а по условиям образования — к типичным депрессионным фациям некомпенсированных прогибов.

Как отмечено выше, настоящие доманикиты обычно локализуются в осевых наиболее прогнутых участках бассейновых впадин с замедленным водообменом и вдали от областей сноса, что исключает разбавляющее влияние обломочного материала и способствует фоновому накоплению илов с большим количеством ОВ. Такие глубоководные некомпенсированные впадины существовали в

позднедевонское время в пределах палеозойской пассивной окраины Уральского океана и в поздней юре надрифтовой синеклизы Западной Сибири.

Судя по составу отложений, главным источником фоновых осадков в некомпенсированных впадинах служили зоо- и фитопланктон. Депрессионные разрезы доманикитов в этих впадинах характеризуются не только высокими концентрациями ОВ, но и повышенной глинистостью, пиритизацией и окремнением. Глинистые частицы, обладая высокими консервирующими способностями, обеспечивали сохранность органики от возможных природных окислителей. В прибортовых зонах прогибов фациальные аналоги доманикитов заметно отличаются — на фоне увеличения мощности в них отмечается существенное снижение содержания ОВ до уровня доманикоидов, появляется всё больше зернистых литотипов или карбонатных рифогенных образований, свидетельствующих о начале компенсации в мелеющем и динамически подвижном бассейне. В отличие от депрессионных отложений, в которых ОВ преимущественно сапропелевое, для прибортовых разрезов установлено присутствие значительного количества аллотигенного гумусового ОВ [12]. Органическое вещество, по-видимому, поступало совместно с глинистыми частицами из близко расположенной континентальной суши, на что указывает, в частности, изменившийся фациальный облик пород.

Для баженовских отложений, кроме латеральной зональности в распределении ОВ, неоднократно отмечалась его ясно выраженная вертикальная избирательная приуроченность. Во многих стратифицированных разрезах зафиксировано упорядоченное чередование разномасштабных обогащённых и обеднённых керогеном прослоев, по своему строению напоминающих обычную седиментационную цикличность. Это позволило предположить, что физико-химические условия в баженовском море, в частности окислительно-восстановительный режим, пульсационно менялись [12]. Не исключается возможность участия в осадконакоплении и турбидитных потоков, периодически поставлявших в некомпенсированную впадину большой объём тонкого глинистого материала, прерывавшего биогенную седиментацию.

Показательно поведение кремнистых литотипов в структуре доманиковой впадины

Волго-Уральского суббассейна. Как отмечено в работе [13], преимущественно кремнистый доманик приурочен к осевой наиболее прогнутой её части, где осаждение коллоидных растворов кремнезема происходило химическим путём в гидродинамически спокойных условиях. Большие объёмы кремненакопления установлены также в восточной более мористой и глубоководной некомпенсированной области бассейна, непосредственно прилегавшей и раскрывавшейся в сторону палеозойского океана. В западных мелководных разрезах количество кремнистых прослоев заметно снижается, и на сводовых поднятиях они полностью отсутствуют. Избирательная приуроченность кремнистых фаций к структурам прогибания предполагает участие в кремненакоплении, наряду с биогенным, хемогенного источника, связанного с вулканической деятельностью. Следы вулканической активности были обнаружены на юге Пермского и на востоке Башкирского сводов вблизи зоны подводного вулканизма, где содержание кремнезема в доманикитах достигает максимальных значений (более 40 %), а сами доманикиты обогащены в надкларковых концентрациях типичными базальтофильными элементами [13].

Кремнистые литотипы характерны и для бажендовской свиты, где они также встречаются в депрессионных разрезах и образуют маломощные невыдержанные прослои радиоларитов. Кроме биогенного кремнезема, здесь установлено присутствие химически осаждённых его форм, представленных халцедоном в ассоциации с пиритом и глауконитом [14]. Хемогенный кремнезем при этом находится в тесном парагенезисе с пепловыми частицами, подвергшимися цеолитизации.

Таким образом, участие эндогенных источников в кремненакоплении подтверждает мнение о формировании доманиковых отложений в обстановке повышенной тектонической активности, сопровождавшейся заложением линейных некомпенсированных впадин и проявлениями конседиментационных вулканических и гидротермальных процессов. С ними в придонный слой могли поступать не только кремнекислота, но и диоксид углерода, метан, фосфаты, нитраты и другие биофильные элементы, что, по мнению авторов работы [15], способствовало расцвету фито- и зоопланктона, увеличению биопродуктивности доманикового моря и периодическому

массовому выпадению ОВ, избыток которого обеспечивал аноксидную обстановку в придонных водах.

Возможная модель коллектора. Рассмотренные углеродистые отложения на многих площадях сочетают в себе свойства как нефтематеринских пород, так и коллекторов с промышленными, в том числе высокодебитными притоками углеводородов. Первоначально эти тонкодисперсные и непроницаемые породы не обладали коллекторскими свойствами, однако в ходе эволюции бассейновой впадины, становления и развития углеводородной системы они испытали ряд сложных преобразований, обеспечивших не только генерацию, но и возможность локализации свободной нефти в образовавшемся вторичном пустотном пространстве.

Модель формирования нетрадиционного коллектора, исходя из современных представлений, предполагает комплексное участие взаимосвязанных процессов внешней и внутренней динамики, включая литогенез погружения, тектоническую активизацию и сопутствующие им термобарические и флюидодинамические изменения органического вещества. Для доманиковых и бажендовских отложений нет необходимости рассматривать вопросы катагенетической зрелости ОВ и возможности генерации углеводородов, поскольку это подробно освещено в многочисленных публикациях и не вызывает особых возражений. Гораздо более проблематичным представляется механизм формирования в этих породах пустотного пространства и локализации в нём свободной нефти.

К настоящему времени существует несколько моделей, объясняющих возможный механизм образования коллекторских свойств в бажендовских отложениях [16]. Все они так или иначе сводятся к общему признанию трещинной природы пустотного пространства с возможным участием флюидодинамических и тектонических процессов. При этом мало внимания уделяется обсуждению физико-химического состояния органического вещества в момент трещинообразования и возможности заполнения углеводородами новообразованных трещин.

Анализ доступных материалов по органической геохимии углеродистых формаций с учётом современных представлений о катагенетических преобразованиях ОВ и генерации

нефти позволяет представить следующую модель коллектора баженовской свиты.

Начиная с нижнего мела (берриасс) битуминозные баженовские осадки постепенно перекрываются вышележащими отложениями и испытывают устойчивое погружение, основная фаза которого пришлась на период палеоген-неоген. Приблизительно в среднем палеогене, судя по модели погружения на территории Широкого Приобья, нефтематеринская толща сформировала нефтяную систему. Общеизвестно, что, когда углеродистые морские осадки поступают в область высоких температур и давлений, происходит термическое разложение органического вещества, а глинистые минералы, прежде всего разбухающий монтмориллонит и метастабильные смешанослойные фазы, замещаются более устойчивыми гидрослюдай, каолинитом, хлоритом. Этот процесс сопровождается дегидратацией, потерей физически связанной воды и снижением пластичности глинистых пород; в органическом веществе возрастает количество углерода, в результате разложения липидов образуются битумоиды.

Важно подчеркнуть, что первичный поликомпонентный углеродистый осадок, состоящий из коллоидного сапропелевого ОВ и водосодержащих глинистых минералов, вплоть до погружения в зону мезокатагенеза, обладал гидрофильными свойствами, что было неблагоприятно для формирования эффективной нефтенасыщенной пористости/трещиноватости и накопления углеводородов. При достижении зоны мезокатагенеза происходила гидрофобизация пород за счёт термодеструкции полимерлипидных компонентов и генерации углеводородов, а также потери водоудерживающих свойств глинистых минералов, что явилось одним из важных факторов, обеспечивающих накопление углеводородов в нефтематеринских толщах [17].

Другая важная черта баженовских отложений — наличие в них зон аномально высокого пластового давления (АВПД). Так, в частности, на Салымском месторождении на глубинах 2800 м зафиксировано внутрислоевое давление, в 1,3–1,5 раза превышающее литостатическое, что вполне достаточно для образования трещин флюидоразрыва. Возникновение подобных трещин хорошо описывается известным механизмом создания избыточного давления за счёт генерации протонефти или внешнего подтока углеводородов

в пластовую полузакрытую систему. Для баженовских отложений возможен также механизм импульсной кавитации, при котором разрядка напряжений и мгновенное раскрытие трещин порождают образование и схлопывание газовых пузырьков, что создаёт ударные волны, высокие локальные давление и температуру [18]. Последнее обстоятельство находит подтверждение при разработке Салымско-Приразломной площади, где при высоком геотермическом градиенте 4,5–5 °С/100 м современные пластовые температуры достигают 130 °С.

Необходимо добавить, что в процессе катагенетической трансформации ОВ в кероген формируется вторичная пористость, а метастабильные минералы матрицы, в частности биогенный опал, преобразуются в халцедон-кварцевый агрегат, улучшая параметры ёмкостного пространства.

Таким образом, модель баженовского коллектора можно представить как сочетание блоков матрицы кероген-карбонат-кремнистого состава со своей пористостью и проницаемостью и разделяющих их трещин флюидоразрыва. Трещиноватость создаёт небольшой объём пустотного пространства, исчисляемый долями, в лучшем случае, первыми процентами (рисунок 2).

При малых размерах поровых пустот в керогене (0,1–2,0 мкм) и кремнисто-карбонатных прослоях (10–15 мкм) и невысокой общей пористости матрицы, в большинстве литотипов, варьирующейся в пределах 5–10 %, возникает проблема объяснения высоких стабильных дебитов некоторых добывающих скважин, в частности Салымского месторождения, не соответствующих реальной ёмкости коллектора.

Нами предполагаются два возможных варианта объяснения этого феномена, не противоречащих наблюдаемым фактам, но требующих дальнейшего уточнения: первый — баженовская свита, залегающая в зоне повышенных давлений и температур, находится в области современной нефтегенерации, что способствует формированию повышенной пористости/трещиноватости и, как следствие, высоких устойчивых дебитов; второй — в баженовской свите имеются тектоно-геодинамические зоны, представленные разломами и трещинами, которые дренируют подстилающие нефтеносные толщи (васюганскую, тюменскую, возможно и палеозойский

а)

б)

Рисунок 2. Микропористость в керогене (а) и микротрещина, заполненная нефтью (б) (Правдинское месторождение, скважина № 5217)

фундамент), обеспечивая устойчивый подток углеводородов. Именно различными источниками можно объяснить наблюдаемые изменения свойств и состава нефти по площади и разрезу баженовской свиты на Салымско-Приразломном участке, где выявлены многочисленные тектонические нарушения, способные обеспечить миграцию углеводородов из подстилающих отложений. На это указывают высокие концентрации CO_2 и наличие в бензиновых фракциях переработки нефти повышенных содержаний n -алканов по сравнению с изоалканами, а также обнаруженные в нефти палеозойские спорово-пыльцевые комплексы.

Выводы

1. Потенциально нефтегазоносные углеродистые толщи на территории России формировались в осадочных бассейнах, так или иначе связанных с процессами рифтогенеза, предопределившими устойчивое некомпенсированное погружение земной коры при дефиците кислорода в придонных водах, что обеспечило образование, накопление и сохранность больших объёмов органического вещества.

2. Типовыми чертами углеродистых отложений являются: относительно слабое развитие бентосных форм морских организмов, преимущественно карбонатно-кремнистый

состав с участием продуктов подводного вулканизма и гидротермально-эксплятивных процессов, обилие радиолярий, свидетельствующих о нормальной солёности бассейновых вод, открытости морского водоёма и отсутствии замкнутых морских лагун.

3. Распределение органического вещества в бассейновых впадинах подчиняется площадной зональности и вертикальной цикличности: максимумы концентраций ОВ приурочены к осевым наиболее прогнутым, а минимумы — к бортовым относительно приподнятым участкам; в вертикальном сечении отмечается закономерная стратифицированная последовательность обогащённых и обеднённых ОВ прослоев, что может быть связано с периодическими изменениями биопродуктивности или физико-химических условий седиментации.

4. Формирование природного резервуара с нетрадиционным коллектором обеспечивалось несколькими факторами: катагенетическим преобразованием ОВ и гидрофобизацией матрицы, генерацией углеводородов с формированием зон АВПД и возникновением трещиноватости, инверсией метастабильных фаз биогенного кремнезема и формированием вторичной пустотности матрицы, разломо- и трещинообразованием, как дренажных структур для подтока нефти из нижележащих толщ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Рыкус М.В., Сначев В.И. Особенности палеозойского углеродистого осадконакопления Сысертско-Ильменогорской зоны Южного Урала // Осадочные бассейны: закономерности строения и эволюции, минера-

гения: сб. науч. ст. Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, 2000. С. 112–114.

2. Рыкус М.В, Сначёв В.И., Кузнецов Н.С., Савельев Д.Е., Бажин Е.А., Сначёв А.В. Рудоносность дунит-гарцбургитовой и черносланцевой формаций пограничной зоны между Южным и Средним Уралом // Нефтегазовое дело. 2009. Т. 7. № 2. С. 17–27.

3. Рыкус М.В., Рыкус Н.Г. Седиментология терригенных резервуаров углеводородов. Уфа: Мир печати, 2014. 324 с.
4. Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: Дизайн Полиграф Сервис, 2010. 280 с.
5. Тимано-Печорский седиментационный бассейн. Атлас геологических карт (литолого-фациальных, структурных и палеогеологических). Ухта: Тимано-Печорский научно-исследовательский центр, 2000. 63 с.
6. Лозин Е.В. Глубинное строение и нефтегазонасность Волго-Уральской области и смежных территорий // Литосфера. 2002. № 3. С. 46–68.
7. Сурков В.С. Геологическое строение и нефтегазонасность нижней-средней юры Западно-Сибирской провинции. Новосибирск: Наука, 2005. 155 с.
8. Занин Ю.Н., Замирайлова А.Г., Эдер В.Г. Некоторые аспекты формирования баженовской свиты в центральных районах Западно-Сибирского осадочного бассейна // Литосфера. 2005. № 4. С. 118–135.
9. Шурыгин Б.Н., Никитенко Б.Л., Деятов В.П. Стратиграфия нефтегазонасных бассейнов Сибири. Юрская система. Новосибирск: СО РАН филиал «ГЕО», 2000. 480 с.
10. Конторович А.Э., Конторович В.А., Рыжкова С.В., Шурыгин Б.Н., Вакуленко Н.Г., Гайдебурова Е.А., Данилова В.П., Казаненков В.А., Ким Н.С., Костырева Е.А., Москвин В.И., Ян П.А. Палеогеография Западно-Сибирского осадочного бассейна в юрском периоде // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 8. С. 972–1012.
11. Баженова Т.К., Шиманский В.К., Васильева В.Ф., Шапиро А.И., Яковлева Л.А., Климова Л.И. Органическая геохимия Тимано-Печорского бассейна. СПб.: ВНИГРИ, 2008. 164 с.
12. Конторович А.Э., Меленевский В.Н., Занин Ю.Н., Замирайлова А.Г., Казаненков В.А., Казарбин В.В., Махнева Е.Н., Ямкова Л.С. Литология, органическая геохимия и условия формирования основных типов пород баженовской свиты // Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 11. С. 1477–1491.
13. Зайдельсон М.И., Вайнбаум С.Я., Копрова Н.А., Семёнова Е.Г., Суриков Е.Я., Голодовкина Г.Е., Зинина Е.А., Цлав Л.З., Аширов К.Б., Беллерова В.А. Формирование и нефтегазонасность доманикоидных формаций. М.: Наука, 1990. 79 с.
14. Касьянова Н.М., Клубова Т.Т., Конышева Р.А., Королёв Ю.М., Костинова А.П., Метлова И.Ф., Розникова А.П., Чухрова В.Ф. Поровое пространство и органическое вещество коллекторов и покрышек. М.: Наука, 1986. 95 с.
15. Готтих Р.П., Писоцкий Б.И. К вопросу о формировании нефтематеринских толщ // Георесурсы. 2006. № 4. С. 6–11.
16. Нестеров И.И. Нефть чёрных сланцев // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 1997. № 5. С. 36–51.
17. Лукин А.Е. Природа сланцевого газа в контексте проблем нефтегазовой литологии // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2011. № 3 (25). С. 70–85.
18. Евик В.Н., Бочкарев А.В. Механизм формирования коллекторской ёмкости и залежей нефти в чёрных сланцах олигоцена Центрального Предкавказья // Геохимия, минералогия и литология черных сланцев: сб. науч. тр. Сыктывкар: Академия наук СССР, 1987. С. 115–116.

REFERENCES

1. Rykus M.V., Snachev V.I. Osobennosti paleozoiskogo uglerodistogo osadkonakopleniya Sysertsko-Il'menogorskoj zony Yuzhnogo Urala [Features of the Paleozoic Carbon Sedimentation of the Sysert-Ilmenogorsk Zone of the Southern Urals]. *Sbornik nauchnykh statei «Osadochnye basseiny: zakonomernosti stroeniya i evolyutsii, minerageniya»* [Collection of Scientific Articles «Sedimentary Basins: Patterns of Structure and Evolution, Mineralogy»]. Ekaterinburg, IGIG UrO RAN Publ., 2000, pp. 112–114. [in Russian].
2. Rykus M.V., Snachev V.I., Kuznetsov N.S., Savvel'ev D.E., Bazhin E.A., Snachev A.V. Rudonosnost' dunitgartsburgitovoi i chernoslantsevoi formatsii pogranichnoi zony mezhdru Yuzhnym i Srednim Uralom [Ore Mineralization of Dunite-Harzburgite and Black Shale Formations in a Transitional Area Between the South and Middle Urals]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2009, Vol. 7, No. 2, pp. 17–27. [in Russian].
3. Rykus M.V., Rykus N.G. Sedimentologiya terri-gennykh rezervuarov uglevodorodov [Sedimentology of Terrigenous Hydrocarbon Reservoirs]. Ufa, Mir pechati Publ., 2014. 324 p. [in Russian].
4. Puchkov V.N. Geologiya Urala i Priural'ya (aktual'nye voprosy stratigrafii, tektoniki, geodinamiki i metallogenii) [Geology of the Urals and Cisurals (Current Issues of Stratigraphy, Tectonics, Geodynamics and Metallogeny)]. Ufa, Dizain Poligraf Servis Publ., 2010. 280 p. [in Russian].
5. Timano-Pechorskii sedimentatsionnyi basseyn. Atlas geologicheskikh kart (litologo-fatsial'nykh, struktural'nykh i paleogeologicheskikh) [Timan-Pechora Sedimentation Basin. Atlas of Geological Maps (Lithological-Facies, Structural and Paleogeological)]. Ukh-ta: Timano-Pechorskii nauchno-issledovatel'skii tsentr Publ., 2000. 63 p. [in Russian].
6. Lozin E.V. Glubinnoe stroenie i neftegazonosnost' Volgo-Ural'skoi oblasti i smezhnykh territorii [Abyssal Structure and Oil and Gas Content of the Volga-Ural Area and Adjoining Territories]. *Litosfera — Lithosphere (Russia)*, 2002, No. 3, pp. 46–68. [in Russian].
7. Surkov V.S. Geologicheskoe stroenie i neftegazonosnost' nizhnei-srednei yury Zapadno-Sibirskoi provintsii [Geological Structure and Oil and Gas Potential of the Lower-Middle Jurassic of the West Siberian Province]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005. 155 p. [in Russian].
8. Zinin Yu.N., Zamirailova A.G., Eder V.G. Nekotorye aspekty formirovaniya bazhenovskoi svity v tsentral'nykh raionakh Zapadno-Sibirskogo osadochnogo basseina [Some Aspects of the Bazhenov Formation Genesis in the Central Parts of the West-Siberian Sedimentary Basin]. *Litosfera — Lithosphere (Russia)*, 2005, No. 4, pp. 118–135. [in Russian].
9. Shurygin B.N., Nikitenko B.L., Devyatov V.P. Stratigrafiya neftegazonosnykh basseinov Sibiri. Yurskaya sistema [Stratigraphy of the Oil and Gas Basins of Siberia.

Jurassic System]. Novosibirsk, SO RAN filial «GEO» Publ., 2000. 480 p. [in Russian].

10. Kontorovich A.E., Kontorovich V.A., Ryzhko-va S.V., Shurygin B.N., Vakulenko N.G., Gaideburova E.A., Danilova V.P., Kazanenko V.A., Kim N.S., Kostyreva E.A., Moskvina V.I., Yan P.A. Paleogeografiya Zapadno-Sibirskogo osadochnogo basseina v yurskom periode [Jurassic Paleogeography of the West Siberian Sedimentary Basin]. *Geologiya i geofizika — Russian Geology and Geophysics*, 2013, Vol. 54, No. 8, pp. 972–1012. [in Russian].

11. Bazhenova T.K., Shimanskii V.K., Vasil'eva V.F., Shapiro A.I., Yakovleva L.A., Klimova L.I. Organicheskaya geokhimiya Timano-Pechorskogo basseina [Organic Geochemistry of the Timan-Pechora Basin]. Saint-Petersburg, VNIGRI Publ., 2008. 164 p. [in Russian].

12. Kontorovich A.E., Melenevskii V.N., Zanin Yu.N., Zamirailova A.G., Kazanenko V.A., Kazarbin V.V., Makh-neva E.N., Yamkova L.S. Litologiya, organicheskaya geokhimiya i usloviya formirovaniya osnovnykh tipov porod bazhenovskoi svity [Lithology, Organic Geochemistry, and Formation Conditions of Basic Rocks in the Bazhenovka Formation]. *Geologiya i geofizika — Russian Geology and Geophysics*, 1998, Vol. 39, No. 11, pp. 1477–1491. [in Russian].

13. Zaidelson M.I., Vainbaum S.Ya., Koprova N.A., Semenova E.G., Surovnikov E.Ya., Golodovkina G.E., Zi-nina E.A., Tslav L.Z., Ashirov K.B., Bellerova V.A. Formirovanie i neftegazonosnost' domanikoidnykh formatsii [Formation and Oil and Gas Potential of Dominoid Formations]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 79 p. [in Russian].

14. Kasyanova N.M., Klubova T.T., Konysheva R.A., Korolev Yu.M., Kostikova A.P., Metlova I.F., Roznikova A.P., Chukhrova V.F. Porovoe prostranstvo i organicheskoe veshchestvo kollektorov i pokryshek [Pore Space and Organic Matter of Collectors and Tires]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 95 p. [in Russian].

15. Gottikh R.P., Pisotskii B.I. K voprosu o formirovanii neftematerinskikh tolshch [To the Question of the Formation of Oil Source Strata]. *Georesursy — Georesursy*, 2006, No. 4, pp. 6–11. [in Russian].

16. Nesterov I.I. Neft' chernykh slantsev [Black Shale Oil]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Neft' i gaz — The Journal «Oil and Gas Studies»*, 1997, No. 5, pp. 36–51. [in Russian].

17. Lukin A.E. Priroda slantsevogo gaza v kontekste problem neftegazovoi litologii [The Nature of Shale Gas in the Context of Oil and Gas Lithology]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana — Geology and Mineral Resources of World Ocean*, 2011, No. 3 (25), pp. 70–85. [in Russian].

18. Evik V.N., Bochkarev A.V. Mekhanizm formirovaniya kollektorskoi emkosti i zalezhei nefti v chernykh slantsakh oligotsena Tsentral'nogo Predkavkaz'ya [The Mechanism of Formation of Reservoir Capacity and Oil Deposits in the Black Shales of the Oligocene of the Central Ciscaucasia]. *Sbornik nauchnykh trudov «Geokhimiya, mineralogiya i litologiya chernykh slantsev»* [Collection of Scientific Papers «Geochemistry, Mineralogy, and Lithology of Black Shales»]. Syktyvkar, Akademiya nauk SSSR Publ., 1987. pp. 115–116. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Рыкус Михаил Васильевич, канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры «Геология и разведка нефтяных и газовых месторождений», УГНТУ, эксперт, ООО «РН-БашНИПИнефть», г. Уфа, Российская Федерация

Mikhail V. Rykus, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Assistant Professor of Geology and Exploration of Oil and Gas Field Department, USPTU, Expert, RN-BashNIPIneft LLC, Ufa, Russian Federation

e-mail: RykusMV@bnipti.rosneft.ru

Огнева Александра Сергеевна, ведущий специалист отдела технологического аудита и комплаенса, ООО «РН-БашНИПИнефть», г. Уфа, Российская Федерация

Aleksandra S. Ogneva, Leading Specialist of the Technology Audit and Compliance Department, RN-BashNIPIneft LLC, Ufa, Russian Federation

e-mail: OgnevaAS@bnipti.rosneft.ru

Смолянец Евгений Федорович, канд. техн. наук, старший эксперт, ООО «РН-БашНИПИнефть», г. Уфа, Российская Федерация

Evgeniy F. Smolyanec, Candidate of Engineering Sciences, Senior Expert, RN-BashNIPIneft LLC, Ufa, Russian Federation

e-mail: Smolyanec@bnipti.rosneft.ru

Антонов Максим Сергеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Цифровые технологии в разработке и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений», УГНТУ, начальник управления развития инноваций и сопровождения ТРИЗ, ООО «РН-БашНИПИнефть», г. Уфа, Российская Федерация

Maksim S. Antonov, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Digital Technologies in Oil and Gas Fields Development and Operation Department, USPTU, Head of the Innovations Development and the Hard-to-Recover Oil Reserves Support Department, RN-BashNIPIneft LLC, Ufa, Russian Federation

e-mail: AntonovMS@bnipti.rosneft.ru