

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ КОЛЛЕКТОРСКИХ ТОЛЩ В КАРБОНАТНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ АКВАТОРИАЛЬНОЙ ЧАСТИ ТИМАНО-ПЕЧОРСКОЙ ПРОВИНЦИИ

Условия осадконакопления рассмотрены для нижнепермского нефтегазоносного комплекса Тимано-Печорской провинции. В северной ее части, на акватории Печорского моря, все месторождения нефти и газа связаны с органогенными постройками. И каждый карбонатный коллектор уникален по условиям формирования, составу и, как следствие, по своим емкостно-фильтрационным свойствам. Так, коллектор Приразломного нефтяного месторождения представлен водорослевыми известняками. Коллекторы Южно-Долгинского и Северо-Долгинского месторождений – мшанково-криноидные пак-грейнстоуны и мшанковый баффлстоун. Ключевое значение в формировании петрофизических свойств карбонатной породы имеют ранние стадии ее образования – седиментогенез и диагенез, и анализ исходных условий осадконакопления следует рассматривать как обязательный элемент моделирования карбонатных резервуаров нефти и газа.

Conditions of sedimentation are considered for the Lower Permian oil-bearing complex in Timan-Pechora oil-and-gas province. All offshore oil fields of this stratigraphic level are connected with organic buildups, and each carbonate reservoir is unique by conditions of its formation, composition and, consequently, by its filtration and capacity parameters. Among them, the reservoir rocks of Pirazlomnoye oil field are represented by algal limestones, reservoirs of Southern-Dolginskoye and Northern-Dolginskoye oil-and-gas fields – by bruozoan-echinoderm grainestone-packstones and bruozoan bafflestones. Petrophysical properties of these carbonate rocks were predetermined at the earlier stages of their formation – sedimentation and diagenesis; it means that facial analysis of the primary sedimentation should be included as an obligatory element in the modeling of carbonate reservoirs of oil-and-gas.

Тимано-Печорская нефтегазоносная провинция (ТП НГП) в структурном отношении приурочена к одноименной плите, сформированной на байкальском основании. Прибрежная часть НГП, имеющая продолжение на акваторию, включает Малоземельско-Колгуевскую, Печоро-Колвинскую, Хорейверскую, Варандей-Адъвинскую, Гуляево-Долгинскую, Северо-Предуральскую, Коргинскую нефтегазоносные области (НГО), Северо-Печорскую, возможно, нефтегазоносную область (ВНГО) и самостоятельный Русановский, возможно, нефтегазоносный район (ВНГР). В целом в пределах ТП НГП промышленные залежи углеводородов (УВ) установлены и в терригенных, и в карбонатных отложениях в стратиграфическом диапазоне

от среднего ордовика до среднего триаса. В целом по провинции в карбонатных коллекторах (среднеордовикско-нижнедевонский, доманиково-турнейский, верхневизейско-нижнепермский НГК) сосредоточено больше извлекаемых запасов, чем в терригенных породах (среднедевонско-франский, нижне- и средневизейский, нижнепермский терригенный, верхнепермский триасовый НГК) [2]. На севере провинции большинство залежей нефти и свободного газа приурочены к отложениям верхневизейского-нижнепермского нефтегазоносного комплекса (НГК).

Одним из основных факторов, обуславливающих фазовое состояние генерируемых УВ, является состав исходного органического вещества (ОВ). Повышенным нефтематерин-

ским потенциалом обладают силурийские, верхнедевонские и нижне-среднекаменноугольные отложения, содержащие ОВ сапропелевого типа. Потенциально газоматеринскими являются терригенные верхнепермские и мезозойские отложения с преобладанием рассеянного гумусового ОВ. Для уверенного прогноза и выбора направления поисков нефти и газа необходимо детальное изучение условий, в которых формировались породы-коллекторы и происходили их эпигенетические преобразования. Любой первичный осадок представляет собой продукт закономерного действия гидродинамических, гидрохимических и термодинамических факторов, присутствующих в определенной обстановке. Те же самые факторы контролируют и скорость накопления осадков.

При анализе локализации первичной микрофации с точки зрения стратификации последовательно изучают: 1) вещественный состав – литологические особенности, отражающие физико-химические условия осадконакопления; 2) структурно-текстурные особенности, отражающие гидродинамические условия, колебания уровня моря; 3) комплексы органических остатков – как индикаторов климата и условий осадконакопления. Для идентификации микрофаций применялся метод подсчета порообразующих элементов органогенного происхождения (фрагменты иглокожих, мшанок, брахиопод, спикул губок, фораминифер, водорослей, двустворок, остракод), а также обломочных частиц (кварц, глауконит, пепловые частицы) и хемогенных образований (участки окремнения, развитие гипса и ангидрита, включения аутигенного пирита).

Для характеристики карбонатных пород используется классификация Данхема с дополнениями Эмбри и Кловена [4], затем характеристика фаций привязывается к стандартным фаціальным поясам Л.Дж.Уилсона [5]. Такая последовательность анализа обеспечивает определение условий осадконакопления, глубины и солености моря, газового режима атмосферы и климата. Полученные выводы сопоставляются с характеристиками физических свойств породы, параметрами ее пористости и проницаемости.

Особого внимания заслуживают условия формирования верхневизейского-нижнепермского карбонатного НГК – как повсеместно распространенного и наиболее продуктивного на севере ТП НГП. Его мощность варьирует от 100 м (Малоземельско-Колгуевская моноклиналь) до 700 м – в северной части Печорского моря. Кровля комплекса залегает в прибрежной зоне суши на глубинах от 1000 до 3000 м, на акватории – 2500-3000 м. В разрезе НГК по литолого-фаціальным особенностям выделяют два подкомплекса: средневизейско-верхнекаменноугольный, в составе которого преобладают сульфатно-карбонатные отложения, и нижнепермский комплекс, содержащий органогенные постройки, ограниченные по латерали глинисто-карбонатными образованиями [2].

Нижнепермский подкомплекс представлен карбонатными отложениями ассельского, сакмарского и артинского ярусов, в составе которых органогенные образования широко распространены на приподнятых участках дна ассельско-сакмарского палеобассейна. При этом на относительно погруженных участках накапливались глинисто-карбонатные отложения сезымской свиты.

На севере Тимано-Печорской провинции ассельско-сакмарские органогенные постройки сосредоточены в зонах Шапкино-Юрьяхинского вала, Колвинского мегавала и в северной части вала Сорокина; биостромы раннесакмарского возраста выявлены на Лайском валу. В нижнепермском подкомплексе практически все залежи УВ связаны с органогенными постройками: локализованы в отложениях, представленных продуктами их разрушения (месторождения Приразломное, Долгинское, Медыньское море), или в пластах-коллекторах в толще облекания рифов.

Скважина Приразломная-1 вскрыла продуктивный горизонт на глубине 2377-2450 м. Горизонт-коллектор представлен породами верхнего карбона (гжельский ярус) и нижней перми (ассельский и сакмарский ярусы) и сложен водорослевыми постройками с узорчато-комковатой текстурой (неравномерное распределение тонкодисперсного

глинистого материала), по которой интенсивно развито наложенное выщелачивание. Водоросли зеленые трубчатые, с преобладанием сине-зеленых: *Girvanella*, *Renalcis*, *Tubiphytis* [1]. В целом литологический тип коллектора – фораминиферо-водорослевый пакстоун. Там, где в составе отложений участвуют фораминиферы, пористость представлена их внутрискелетными полостями.

Условия обитания сине-зеленых водорослей весьма разнообразны по глубине, солености, температуре и гидродинамическому режиму; в целом глубина их обитания ограничена зоной проникновения солнечных лучей. Структурно-текстурные признаки (комковатость, отсутствие слоистости и фрагментации) предполагают, что осадконакопление происходило в спокойных гидродинамических условиях, ниже базиса штормовых волн, но при повышенной и даже аномально высокой солености, чем обусловлены частичная доломитизация и некоторое окремнение.

Комковатые текстуры обусловлены улавливанием взвешенных глинистых частиц водорослевыми скоплениями, что свидетельствует о незначительном удалении области осадконакопления от береговой линии. Изредка встречаются фрагменты криноидей и мшанок, еще реже брахиопод, но вверх по разрезу их количество постепенно увеличивается – до чередования прослоев водорослевых известняков с детритовыми мшанково-криноидными [1]. С учетом этих факторов фациальная обстановка может быть определена как умеренно глубоководный шельф открытого бассейна, с небольшим удалением от береговой линии, с достаточно прозрачной водой и небольшим количеством взвешенных глинистых частиц. Совокупность этих признаков означает (по Уилсону) принадлежность ко 2-му фациальному поясу и 9-й стандартной микрофации [5].

Обилие мшанок в верхней части разреза отражает стабилизацию условий и соленость близкую к нормально-морской, а фрагментация осадка и окатывание обломков – изменчивость гидродинамического режима, с чередованием спокойной и актив-

ной гидродинамики. Иначе говоря, осадконакопление происходило при глубинах дна между базисом нормальных ветровых и штормовых волн. Таким образом, ранний диагенез продуктивных отложений проходил в условиях постепенного обмеления бассейна, в 6-м стандартном фациальном поясе и 11-й стандартной микрофации [5]. Доломиты в этом случае накапливались за счет извлечения магния и его соединений из морской воды живыми организмами – сине-зелеными водорослями (или цианеями); интенсивность выщелачивания объясняется неоднородностью их состава и структуры [3].

В разрезе продуктивного горизонта по скважине Южно-Долгинская-1 преобладают мшанковый детрит и слоевища сине-зеленых водорослей *Tubiphites* [1]; фораминиферы, остракоды, брахиоподы и двустворчатые моллюски отмечены в незначительном количестве, присутствуют также неопределимая битая ракушка и водоросли [1]. В целом литологический тип коллектора – мшанковый пакстоун-вакстоун с тонкозернистым рассеянным, аутигенным пиритом. (*Packstone-wackestone*, *пакстоун* – осадочная карбонатная порода, в которой зерна образуют структурный каркас; *вакстоун*, или *ваккит* – илистая осадочная карбонатная порода, содержит более 10 % зерен с поперечником более 20 мкм. – *Прим. ред.*) Такой осадок накапливался в фотической зоне, в условиях нормальной солености, при нестабильном гидродинамическом режиме – ниже базиса ветровых волн, но выше базиса штормовых волн. Об этом свидетельствует слабая волнистая слоистость, литологически она подчеркнута микропрослоями обогащения частицами кварца с алевритовой размерностью и глинистыми частицами. Обстановка в этом случае соответствует 2-му стандартному фациальному поясу, 4-й стандартной микрофации [5].

Вторичные изменения связаны с понижением уровня моря и, как следствие, незначительным засолонением и доломитизацией, которая происходила за счет диагенетического разложения органического материала, что создавало геохимическую среду, благоприятную для осаждения магнезиаль-

ных соединений. Эти процессы происходили в обстановке 4-5-го фациальных поясов.

Диагенетическое доломитообразование описано в различных фациальных типах современных осадков, обогащенных органическим веществом [3]. Предполагается, что этот процесс реализуется через сульфатредукцию и метанообразование, чем обусловлено развитие в этих образцах тончайшего (0,01 мм и менее) рассеянного аутигенного пирита (до 15 %). При перекристаллизации тонкозернистого доломита образуется микропористость рекристаллизации, по которой активно развиваются поры выщелачивания.

В скважине Северо-Долгинская-1 в основании разреза присутствуют фораминиферово-водорослевые грейнстоуны – зернистые известняки без частиц илистой размерности, которые накапливались в спокойных, относительно глубоководных условиях (2-3-й фациальные пояса). Но их диагенез происходил выше базиса штормовых волн, что приводило к фрагментации осадка и окатыванию слабо литифицированных комочков породы. По Уилсону, эти отложения соответствуют 6-му стандартному фациальному поясу [5]; они сцементированы яснокристаллическим спаритом (шпатовидным кальцитом). Выше по разрезу развиты мшанково-криноидные пак-грейнстоуны и мшанковый баффлстоун (*bafflestone* – рифовая порода из тесно или свободно распределенных стоячих, ветвящихся колоний. – *Прим. ред.*).

Эти отложения формировались в условиях нормальной солености, при спокойном гидродинамическом режиме, т.е. в обстановке залива или бухты, защищенной от волнового воздействия, но при свободном водообмене (условия 5-го фациального пояса). Поэтому в разрезе наблюдается чередование отложений относительно мелководных, но отражающих разный гидродинамический режим, колебания солености и pH. Их интенсивная перекристаллизация была обусловлена, вероятно, понижением уровня моря.

Эти отложения вновь перекрываются грейнстоунами, которые представлены фрагментами разных организмов: мшанок, криноидей, брахиопод, остракод, гастропод и

фораминифер, с хорошо окатанными комочками фрагментированного слабо литифицированного осадка. Их ранний диагенез проходил при воздействии субаэральных условий, с образованием крустификационных кайм; вторая генерация цемента представлена яснокристаллическим спаритом, чем обусловлена высокая хрупкость и, как следствие, трещиноватость. Иначе говоря, вторичные изменения проходили в условиях 7-го стандартного фациального пояса [5].

В целом приведенные данные показывают, что во всех трех случаях высокая пористость коллектора была обусловлена эпигенетическими изменениями: в скважине Приразломная-1 – перекристаллизацией и выщелачиванием седиментационного доломита, накопленного цианеями; в скважине Южно-Долгинская-1 – выщелачиванием по рекристаллизационной микропористости раннедиагенетических доломитов; в скважине Северо-Долгинская-1 – выщелачиванием по микротрещинам, при высокой хрупкости пород, в условиях вадозной цементации в субаэральных условиях. Во всех трех случаях диагенетические преобразования проходили в условиях более мелководных, чем обстановка осадконакопления.

Покрышками для залежей в ассельско-сакмарских отложениях являются карбонатно-глинистые породы нижней части артинского яруса. В области распространения сезымской свиты ее отложения вместе с артинскими образуют единую покрышку для залежей среднего-верхнего карбона (месторождения Северо-Гуляевское, Коровинское, Кумжинское, и др.). На всей площади продолжения структур Тимано-Печорской провинции на акваторию Печорского моря артинская толща не содержит коллекторов и вместе с глинистыми кунгурскими отложениями образует покрышку-флюидоупор.

Известно, что в карбонатных коллекторах содержится около 55 % мировых запасов нефти и около 45 % газа и что в разработке они гораздо сложнее, чем залежи в терригенных породах. Карбонатные коллекторы имеют сложную внутреннюю структуру, и для них типичны более низкие коэффициенты извлечения нефти, по сравнению с вы-

держанными пластовыми залежами в песчанниках. Пористость и первичная проницаемость карбонатных пород весьма неоднородны: высокопроницаемые слои, разобщенные кавернозные зоны в них часто чередуются с интервалами низкой проницаемости. Такая неоднородность значительно осложняет движение флюидов, снижает продуктивность скважин, и, как следствие, расчетные параметры добычи углеводородов на месторождениях с карбонатными коллекторами часто остаются нереализованными.

Каждый карбонатный коллектор уникален по условиям своего формирования, по составу и, как следствие, по своим емкостно-фильтрационным свойствам. На первом месте в этой последовательности стоят условия образования; их детальное изучение, по стадиям формирования от осадка до карбонатной породы, и учет при интерпретации каротажных материалов являются необходимой базой для оценки прогнозных ресурсов, подсчета извлекаемых запасов углеводородов и выбора режимов освоения зале-

жей в карбонатных коллекторах. Следует подчеркнуть, что ключевое значение в формировании петрофизических свойств карбонатной породы имеют ранние стадии ее образования – седиментогенез и диагенез, а значит, анализ исходных условий осадконакопления следует рассматривать как обязательный элемент моделирования карбонатных резервуаров нефти и газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Атлас структурных компонентов карбонатных пород / Н.К.Фортунова, О.А.Карцева, А.В.Баранова, Г.В.Агафонова, И.П.Офман; Всерос. науч.-исслед. геолого-развед. нефт. ин-т. М., 2005. 440 с.
2. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (новая серия), лист R-38-40 – Печорское море: Объяснительная записка / Всерос. науч.-исслед. геолог. ин-т. СПб, 2001. 165 с.
3. Кузнецов В.Г. Эволюция карбонатонакопления в истории Земли. М.: ГЕОС, 2003. 262 с.
4. Систематика и классификации осадочных пород и их аналогов / В.Н.Шванов, В.Т.Фролов, Э.И.Сергеева и др. СПб: Недра, 1998. 352 с.
5. Уилсон Л.Дж. Карбонатные фации в геологической истории: Пер. с англ. М.: Недра, 1980. 463 с.