**НОВЫЕ ДАННЫЕ О ЦЕОЛИТОВОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ
В ПОРОДАХ-КОЛЛЕКТОРАХ СЕВЕРА ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ПЛИТЫ**
NEW DATA ON ZEOLITE MINERALIZATION IN THE WEST SIBERIAN
PLATE RESERVOIR ROCKS

А. В. Поднебесных, В. П. Овчинников

A. V. Podnebesnykh, V. P. Ovchinnikov

ООО «Ойлтим НТЦ», г. Сочи

Тюменский государственный архитектурно-строительный университет, г. Тюмень

Ключевые слова: цеолиты; ломонтит; УЭС; разработка залежей
Key words: zeolites; lomontite; electrical resistivity; deposits development

Актуальность изучения региональных зон распространения пород-коллекторов, осложненных процессами цеолитизации, в том, что месторождения углеводородного (УВ) сырья, попадающие в эти зоны, вмещают в себя около четверти ресурсной базы региона и остаются наиболее перспективными для дальнейших геологоразведочных работ на территории севера Западно-Сибирской плиты. Еще одной причиной для ин-

тенсивного изучения месторождений УВ, попадающих в зоны с вторичной цеолитовой минерализацией, является их скорый ввод в промышленную эксплуатацию. Однако наличие большого количества высокодисперсных минералов, к которым относятся и минералы группы цеолитов, оказывает влияние на качество определения фонового сопротивления среды и на фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) пород-коллекторов. Изучение процессов цеолитизации в разных масштабах (от микроскопического до регионального) в значительной мере может определять успешность выбранной стратегии разработки и направление геологоразведочных работ. Новые данные по исследованию керна Русского месторождения значительно расширяют зону возможной цеолитизации в юго-восточном направлении, что делает исследования влияния этого типа вторичных изменений пород-коллекторов на процесс разработки еще актуальнее.

Начиная с 2012 года, в ходе работ с керновым материалом продуктивных пластов месторождений УВ была выявлена характерная цеолитовая минерализация, которая достаточно часто встречается на территории севера Западно-Сибирской плиты [1–2]. Процессы цеолитизации затрагивают, как правило, определенный стратиграфический интервал, который формировался в схожих геологических условиях и имеет схожий вещественный состав. Поэтому первичный анализ проводился в пределах отдельных пластов, где описывалось процентное содержание цеолитов от общего объема породы, частота встречаемости, размер зерен и т. д. При микроскопическом изучении выполнялось изучение структурных характеристик вторичных минералов, их состав и степень изменчивости.

Далее на выделенных площадях определялись типичные геологические условия формирования пород-коллекторов. Для этого использовался метод построения седиментологических моделей, когда на первом этапе для каждого из рассматриваемых геологических объектов выделялись характерные для них литотипы. На втором этапе литотипы сгруппировывались в фации, для которых идентифицировались условия осадконакопления. Затем фации сгруппировывались в фациальные ассоциации, по принципу особенностей осадконакопления и различий в ФЕС. На заключительном этапе для каждой фациальной ассоциации составлялись типичные каротажные диаграммы, которые использовали выделения фациальных ассоциаций в скважинах, не охарактеризованных керном. После этого был проведен генетический анализ основных типов пород-коллекторов, и выполнена типизация и оценка влияния каждого типа вторичных изменений на ФЕС пород-коллекторов. Результатом обобщения всех материалов явились седиментационные модели, которые легли в основу геологических 3D-моделей, что позволило с высокой степенью достоверности пространственно локализовать зоны наиболее высоких фильтрационно-емкостных свойств коллекторов и выделить литологические ловушки углеводородов.

Состав и особенности генезиса цеолитов в терригенных отложениях.

Испытание продуктивных пластов в определенном стратиграфическом интервале на Восточно-Мессояхском, Яро-Яхинском и Заполярном месторождениях показало наличие воды. Испытанные интервалы характеризуются высокими значениями удельного электрического сопротивления (УЭС) по данным ГИС — 25–45 Ом*м, характерными для продуктивной зоны пласта. Данное явление объясняется наличием в структуре пород-коллекторов минералов группы цеолитов, которые оказывают прямое влияние на фоновое сопротивление среды.

Проведенный рентгеноструктурный анализ (РСА) показал, что минералы группы цеолитов представлены в основном ломонтином, типичная оксидная формула которого выглядит как $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Кристаллическая структура является переходной от субцепочечных алюмосиликатов к слоистым. Ломонтит образует агрегаты из призматических кристаллов с совершенной спайностью и выполняет роль порового и пойкилитового цемента в породах-коллекторах (рис. 1). На Яро-Яхинском и Заполярном месторождениях кроме ломонтита встречается натриевая разновидность — томпсонит, типичная оксидная формула которого выглядит как $((\text{Na}_2, \text{Ca})\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2,4\text{H}_2\text{O})$ [4–5].

Определение наличия цеолитов в породе не представляет особых трудностей: отдельные зерна ломонтита в виде равномерно расположенных друг относительно друга пятен имеют светло-серый цвет и достаточно хорошо выделяются на фоне темно-серой

основной массы пород-коллекторов. При микроскопическом описании зерна цеолита образуют агрегаты из призматических кристаллов с совершенной спайностью с хорошо выраженной ступенчатой отдельностью кристаллических агрегатов и выполняют в породе роль порового и пойкилитового цемента в песчанике.

*Рис. 1. Структура ломонтита.
Расположение и связи всех
атомов и молекул
в элементарной ячейке [3]:
a, b, c — границы проекции эле-
ментарной ячейки;
Ca — атомы кальция;
Si — атомы кремния;
H — атомы водорода;
Al — атомы алюминия;
H2O — молекула воды;
W(1) — номер элементарной
ячейки*

Установлена зависимость содержания цеолитов от ФЕС пород-коллекторов — чем выше ФЕС, тем больше содержание цеолитов в породах-коллекторах (рис. 2). В первую очередь это связано с обстановками накопления, в которых формировались пласты суходудинской, заполярной и мегионской свит, к которым четко приурочены зоны развития цеолитовой минерализации. По данным изучения кернa установлено, что продуктивные пласты Восточно-Мессояхского, Яро-Яхинского и Заполярного месторождений формировались на границе разных обстановок осадконакопления — морской и континентальной. В нижней части исследуемого интервала пласты формировались на фоне некоторого погружения мелководного бассейна. Затем, в ходе небольшой регрессии, происходила проградация морской дельты вглубь берегового склона в юго-западном направлении, а верхняя часть интервала формировалась в обстановке надводной части дельты.

*Рис. 2. График зависимости коэффициента пористости (Kn) от ФЕС
пород-коллекторов Восточно-Мессояхского, Яро-Яхинского и
Заполярного месторождений*

С установленными обстановками осадконакопления можно связать площадный характер накопления пирокластического материала, возможно ограниченного областями распространения дельтовых комплексов, которые могли являться транзитными зонами для его транспортировки. Наличие пирокластов необходимо для замещения пирокла-

стов цеолитами, которое может происходить в процессе выщелачивания зерен эффузивов кислого состава. Цеолиты в цементе пород-коллекторов достаточно часто встречаются в ассоциации с хлоритом, кальцитом и гидрослюдай. Из этого следует, что в процессе формирования пород-коллекторов на стадии диагенеза и катагенеза химизм водной среды менялся с кислой на щелочную [6]. Наличие цеолитового цемента можно рассматривать, как своеобразный вторичный маркер интенсивной динамики осадконакопления, с которой связано образование высокопроницаемых песчаных разностей. При этом, несмотря на некоторое снижение пористости за счет объема цеолитовых конкреций, уменьшение проницаемости породы в целом менее существенно.

Петрофизическая типизация пород-коллекторов с цеолитовой минерализацией.

Известно, что внутренние полости цеолитовых минералов могут быть заполнены как углеводородными флюидами состава C_1-C_6 , которые адсорбируются из пластовой нефти [7], так и пресной «цеолитовой водой». Анализ показывает, что количество УВ состава C_1-C_6 , запечатанного во внутренних пустотах цеолитов, изменяется в широких пределах и может превышать $200 \text{ см}^3/\text{кг}$ [8]. Это оказывает прямое влияние на показания зондов, завышая значения УЭС среды, что влечет за собой некорректный расчет коэффициента нефтегазонасыщенности и пористости. Кроме этого, наличие остаточной воды в кристаллической структуре цеолитов оказывает прямое влияние на результаты исследований ФЕС при насыщении цеолитизированных пород минерализованной водой. Полученные значения пористости по воде более высокие, чем по керосину — чем выше содержание цеолитов, тем больше разность между пористостью по воде и по керосину.

Все это в конечном итоге приводит к завышенной оценке ресурсной базы УВ на залежах, осложненных процессами цеолитизации. Выходом из сложившейся ситуации может стать использование при расчетах эффективных объемов пород величины объемной доли содержания цеолитов ($K_{цл}$). В основе данного метода лежит комплексирование двух видов каротажа (акустический каротаж (АК) и гамма-гамма плотностной каротаж (ГГК-П)), на которые процесс цеолитизации оказывает незначительное влияние [9].

Плотностная модель цеолитсодержащего коллектора может быть описана следующим уравнением:

$$K_c + K_{цл} + K_p = 1, \quad (1)$$

где K_c — доля объема скелета коллектора; $K_{цл}$ — доля объема цеолитов; K_p — коэффициент пористости [9].

Используя значения минералогической плотности скелета коллектора, цеолитсодержащих минералов и плотности флюида можно выйти на величину доли объема цеолитов в общем объеме пород-коллекторов, что позволит более качественно подходить к расчету объемов УВ в таком типе коллекторов.

По результатам испытаний скважин на Русском месторождении в стратиграфическом интервале, соответствующем отложениям мегионской свиты, были получены притоки пластовой воды при значениях УЭС, характерных для продуктивной зоны (25–40 Ом*м). Таким образом, зона цеолитизации, контуры которой были определены в более ранних работах [10], имеет гораздо большую площадь. В настоящее время эта зона проходит узкой полосой шириной 15–25 километров через Восточно-Уренгойское, Яро-Яхинское, Заполярное, Хальмерпаютинское, Береговое, Пяяхинское, Южно-Мессояхское, Восточно-Мессояхское и Русское месторождения.

Особенности разработки залежей, осложненных процессами цеолитизации.

Влияние процессов вторичных изменений пород-коллекторов на процесс разработки месторождений практически не изучен. Разработка таких объектов ведется, как правило, без учета их геологических особенностей, что в конечном итоге может сказываться на уровнях нефтедобычи и достижения величины конечного КИН.

В настоящее время все рассматриваемые в рамках данной работы месторождения, осложненные процессами цеолитизации, еще не введены в эксплуатацию и находятся на стадии опытно-промышленных работ (ОПР). Результаты ОПР показали, что наличие в объеме пород-коллекторов таких высокодисперсных минералов, как ломонтит,

томпсонит, каолинит и хлорит, оказывает прямое влияние на стабильность работы скважин. Причиной такого явления служит их место в структурном каркасе пород-коллекторов, где они занимают только поровое пространство. В процессе эксплуатации скважин эти минералы достаточно быстро загрязняют призабойную зону, что негативно сказывается на их работе. Мировой опыт разработки месторождений с наложенной цеолитовой минерализацией говорит о том, что основной проблемой является корректный подбор наиболее эффективных кислотных композиций для очистки призабойной зоны пласта (ОПЗ) [11].

Для улучшения показателей работы призабойной зоны авторы [12], имеющие опыт работы с породами-коллекторами, содержащими в своем составе большое количество цеолитов, предлагают активировать забой воздействием на него соляной кислоты. При этом реакция будет иметь следующий вид:

где Me — ион металла; H_2SiO_3 — гель кремниевой кислоты; $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ — гидроргель с переменным отношением окислов алюминия, кремния и молекул воды.

Хлориты, которые тоже входят в состав цемента, при воздействии соляной кислотой должны довольно легко разлагаться, образуя желатинообразную массу с выделением SiO_2 . Следует отметить, что при достаточно высокой концентрации такой массы (более 30 %) существует вероятность образования твердого коллоида, наличие которого может существенно снизить проницаемость призабойной зоны. Изменить данное явление может использование смеси соляной и плавиковой кислот [12].

где HCl — соляная кислота; HF — плавиковая кислота; CH_3COOH — уксусная кислота [13]. Сама рецептура закачиваемого в пласт раствора будет сильно зависеть от содержания в породе цеолитов, их минеральной формы, а также количества хлоритов, гидрослюд и карбонатов.

Выводы

Установлено, что выделенная ранее региональная зона вторичной цеолитизации, приуроченная к определенному стратиграфическому интервалу суходудинской, мегинской и заполярной свит, имеет распространение в пределах Русского месторождения. Предложен новый способ учета объемов минералов группы цеолитов, основанный на использовании величины объемной доли содержания цеолитов, которая позволяет более качественно подходить к расчету объемов УВ в таком типе коллекторов. Показано, что на основных зарубежных месторождениях, осложненных процессами цеолитизации, для улучшения показателей работы призабойной зоны необходимо использовать раствор соляной кислоты.

Список литературы

1. Поднебесных А. В. Проблемы диагностики цеолитов в продуктивных отложениях Мессояхской группы месторождений / А. В. Поднебесных, Д. А. Решетников // Докл. междунар. науч.-практич. конф. — Тюмень, 2013 [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=67265> (дата обращения: 01.12.2015).
2. Поднебесных А. В. Особенности формирования цеолитов в нижнемеловых отложениях юга Гыданского полуострова / А. В. Поднебесных // Материалы VII Всероссийского литологического совещания. — Новосибирск: ИНИГ СО РАН, 2013. — Т. II. — С. 382-386.
3. Кольцова Т. Н. Анализ структур цеолитов с общей формулой $\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ / Т. Н. Кольцова // Неорганические материалы. — 2007. — Т. 43. — № 2. — С. 218-226.
4. Поднебесных А. В. Цеолиты нижнемеловых коллекторов Мессояхской группы месторождений (Западная Сибирь) / А. В. Поднебесных, Е. А. Жуковская, В. П. Овчинников // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. — 2014. — № 3. — С. 32-39.
5. Поднебесных А. В. Основные типы вторичных изменений пород-коллекторов на территории Западно-Сибирской плиты / А. В. Поднебесных, С. В. Кузнецов, В. П. Овчинников // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. — 2015. — № 2. — С. 26-30.
6. Коробов А. Д. Минеральные ассоциации продуктов гидротермального изменения — ключ к пониманию возникновения зон разуплотнения и фазовой зональности углеводородов (на примере Западной Сибири) / А. Д. Коробов, Л. А. Коробова, Е. Ф. Ахлестина // Известия Саратовского университета. — 2008. — Т. 8. — Вып. 1. — С. 42-50.
7. Шнип О. А. Цеолиты в гранитоидных коллекторах (на примере фундамента Меконгской впадины) / О. А. Шнип, А. Д. Дзюбло // Труды РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. — 2011. — № 4. — С. 97-101.

8. Поспелов В. В. Цеолиты нефтесодержащих пород шельфа Южного Вьетнама / В. В. Поспелов, О. А. Шнип // Геология нефти и газа. – 1995. – № 7. – С. 38-43.

9. Бородина Е. А. Цеолитизация коллекторов: анализ влияния, прогнозы и результаты на примере месторождений севера Западной Сибири / Е. А. Бородина // Мат-лы 8-го Всероссийского литологического совещания. – Москва. – 2015. – Том I. – С. 216-221.

10. Поднебесных А. В. Проблемы диагностики цеолитов и влияние их наличия на разработку продуктивных отложений Мессояхской группы месторождений / А. В. Поднебесных, В. П. Овчинников // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 1. – С. 137-145.

11. Underdown D. R., Hickey J. J., Kaira S. K. Acidization of analcime-cement sandstone, Gulf of Mexico / SPE 20624, 1990, p. 97-102.

12. Белянин Г. Н. Особенности кислотного воздействия на гранитоиды фундамента месторождения «Белый Тигр» / Г. Н. Белянин, М. А. Бабец, Ф. А. Киреев и др. // Нефтяное хозяйство. – 2001 – № 1. – С. 45–51.

13. Поспелов В. В. Некоторые особенности разработки залежей нефти в цеолитсодержащих породах фундамента / В. В. Поспелов // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2008. – Т. 3. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ngtp.ru/rub/12/50_2008.pdf/ (дата обращения 03.12.2015).

Сведения об авторах

Поднебесных Александр Владимирович,
к. з.-м. н., главный инженер проекта ООО «НТИЦ
ОЙЛТИМ», г. Сочи, тел. 8(862)2255447*1030,
e-mail: PodnebesnyhAV@oilteam.ru

Овчинников Василий Павлович, д. т. н.,
профессор, заведующий кафедрой геотехники,
Тюменский государственный архитектурно-
строительный университет, г. Тюмень, e-mail:
BurenieOVP@rambler.ru

Information about the authors

Podnebesnykh A. V., Candidate of Science in
Geology and Mineralogy, project chief engineer of
LLC «STC Oilteam», Sochi, phone:
8(862)2255447*1030 e-mail: PodnebesnyhAV@
oilteam.ru

Ovchinnikov V. P., Doctor of Engineering, pro-
fessor, head of the chair of geotechnical engineering,
Tyumen State Architectural University, e-mail:
BurenieOVP@rambler.ru