МЕТОДИКА ВЫДЕЛЕНИЯ ЗОН ВТОРИЧНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ (НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ)

METHODOLOGY OF DISTRIBUTION ZONES OF SECONDARY CHANGES OF RESERVOIR ROCKS (ON THE EXAMPLE OF DEPOSITS IN THE NORTH OF WESTERN SIBERIA)

А.В. Поднебесных
Aleksandr V. Podnebesnykh

Уфимский государственный
нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

В течение последних двадцати лет в основных нефтегазоносных провинциях России наблюдается стабильное снижение уровня добычи углеводородов, не является исключением и Западная Сибирь, где уже на протяжении пятидесяти лет ведётся активная добыча нефти и газа. Основными способами поддержания высокого уровня добычи является вовлечение в процесс разработки новых залежей углеводородного сырья, которые, как правило, характеризуются сложным геологическим строением и наличием одного или нескольких типов вторичных изменений пород-коллекторов. По оценке автора на основании изучения кернового материала более тридцати месторождений, расположенных на территории севера Западной Сибири, вторичным изменениям в той или иной степени подвержено большинство пород-коллекторов юрского и мелового возраста, а в зонах максимальных проявлений вторичных парагенезисов сосредоточено порядка 15-20 % общего объема ресурсной базы углеводородов Западной Сибири. Сложившаяся на сегодняшний день ситуация привела к необходимости проведения научно-технической работы, в результате которой автором предложена методика выделения зон максимальных концентраций вторичных изменений пород-коллекторов.

Результатом предлагаемой методики является возможность определения типа вторичных изменений и степень его влияния на структуру порового пространства на любых этапах проведения геолого-разведочных работ, оконтуривание площади проявления максимальных концентраций вторичных парагенезисов, получение скорректированных рейтинга бурения скважин, программ исследований и оптимизации разработки залежи углеводородного сырья.

Разработанная методика позволит с высокой степенью достоверности выделять зоны вторичных изменений пород-коллекторов, повысить качество геолого-разведочных работ и эффективность поисково-разведочного бурения.

Over the last twenty years, the main oil and gas provinces in Russia have a stable decrease in hydrocarbons production level. Western Siberia is not exception, where oil and gas are active produced over last fifty years. The basic principles of providing a high level of production are involvement in the development process new hydrocarbon deposits, which, as a rule, are characterized by a complex geological structure and the availability of one or several types of secondary changes of reservoir rocks. According to the author's estimation, based on the study of the core material of more than

Ключевые слова

вторичные изменения, керн, цеолитизация, карбонизация, выщелачивание, вторичное минералообразование, седиментологическая модель, Западная Сибирь

Key words

secondary changes, core, zeolitization, carbonation, leaching, secondary mineral formation, sedimentological model, Western Siberia

thirty deposits located in the northern part of the Western Siberia, most of reservoir rocks the jurassic and cretaceous age are affected to secondary changes. In the area of maximum demonstrations of secondary parageneses, there are concentrated about 15-20 % of the overall capacity of resource base in Western Siberia. The current situation has led to the need for scientific and technical work, as a result of which the author has proposed a method for identifying zones of maximum concentrations of secondary changes in reservoir rocks.

The result of the proposed technique is the ability to determine the type of secondary changes and the degree of its influence on the structure of the pore space at any stages of geological exploration, delineating the area of maximum concentrations of secondary parageneses, obtaining corrected drilling rates, research programs and optimizing the development of hydrocarbon deposits.

An effective methodology allows with a high degree of certainty to identify zones of secondary changes of reservoir rocks, as well as improve the quality of geological exploration work and the effectiveness of exploration drilling.

Введение

Отсутствие чёткого представления о вероятных площадях развития вторичных изменений коллекторов, понимания их связи с фильтрационно-ёмкостными свойствами (ФЕС) и степени их воздействия на структуру запасов углеводородного сырья приводит к ошибкам как при прогнозе показателей разработки месторождений, так и при проектировании мероприятий по извлечению запасов нефти [1]. Сложившаяся на сегодняшний день ситуация привела к необходимости проведения научно-технической работы, в результате которой автором предложена методика выделения зон максимальных концентраций вторичных изменений пород-коллекторов. В основе работы лежат данные исследований, выполненных на более чем 30 поисково-оценочных и разведочных скважинах с выносом керна более 60 %, результаты опробования по более чем 100 скважинам и данные ежемесячных эксплуатационных рапортов по 500 скважинам. Полученные результаты легли в основу стратегии геологоразведочных работ, проводимых ведущими нефтегазовыми компаниями России на территории севера Западно-Сибирской плиты, что позволило существенно снизить риски бурения малодебитных скважин, сформировать адресную программу геолого-технологических мероприятий и обозначить критерии поиска невыработанных запасов с целью их последующего извлечения.

Основные типы вторичных изменений пород-коллекторов

По данным изучения кернового материала, рентгеноструктурного анализа и анализа минерального состава коллекторов Западной

Сибири, было установлено, что наиболее распространёнными типами вторичных изменений коллекторов в осадочном чехле Западно-Сибирской плиты являются процессы цеолитизации, карбонатизации, выщелачивания и вторичного минералообразования.

Результаты исследований состава шлифов показали, что практически во всем разрезе осадочного чехла содержание цеолитов в цементе пород-коллекторов не превышает фоновых значений. Однако в определённом стратиграфическом интервале их концентрация в цементе коллекторов может достигать 40 % и оказывать существенное влияние на определение показателей удельного электрического сопротивления, характера насыщения, качества призабойной зоны пласта и т. д. По результатам рентгеноструктурного анализа определено, что минералы группы цеолитов представлены ломонтитом и томпсонитом, которые по своему внутреннему строению относятся как к субцепочечным, так и к слоистым алюмосиликатам.

Процесс цеолитизации пространственно связан с продуктивными отложениями суходудинской, заполярной и мегионской свит нижнего мела [2]. По результатам седиментологического анализа было установлено, что эти отложения формировались на границе фациальных обстановок — морской и континентальной, в условиях мелководного шельфа и дельтового комплекса (рисунок 1).

На территории севера Западно-Сибирской плиты можно выделить несколько основных зон развития цеолитовой минерализации: самая большая отмечена на Хальмерпаютинском, Береговом, Пяяхинском, Южно-Мессояхском

Рисунок 1. Общая концептуальная модель формирования коллекторов, осложненных процессами цеолитизации

и Восточно-Мессояхском месторождениях, а вторая отмечается на ряде площадей в пределах Восточно-Уренгойского, Яро-Яхинского, Русского и Заполярного месторождений.

Согласно данным ряда исследователей [3–6], концентрация вторичных карбонатных парагенезисов в юрских и меловых отложениях севера Западно-Сибирской плиты в среднем не превышает 5 % и соответствует фоновым значениям для этого минерального вида. Однако в тектонически активных районах содержание карбонатных минералов может достигать уровня в 30–35 %.

Появление вторичных карбонатов сильно ухудшает фильтрационно-ёмкостные свойства, а их содержание в значительной степени зависит от первичной сортировки, зернистости песчано-алевритового каркаса, соотношения основных разновидностей вторичных карбонатных минералов, встречающихся в осадочном комплексе севера Западно-Сибирской плиты — сидерита, доломита и кальцита. Гораздо реже в ассоциации с сидеритом и доломитом встречается анкерит.

В результате проведённых исследований реконструированы обстановки осадконакопления, в которых формировались породы коллектора с максимальными концентрациями вторичных карбонатных парагенезисов. Установлены преимущественно фации морской дельтовой системы: продельта, дистальная часть дельты, средняя часть дельты, проксимальная часть дельты (рисунок 2). Прямой связи условий осадконакопления и концентрации вторичных карбонатных минералов не установлено.

Наблюдается отличие в доминирующих условиях осадконакопления, описанных для коллекторов с вторичной цеолитовой и карбонатной минерализацией. Дело в том, что дистальная часть дельтовых комплексов содержит значительно меньшее по сравнению с проксимальной частью количество органического вещества, которое способно продуцировать преимущественно кислые растворы, влияющие на химизм среды.

На территории Западно-Сибирской плиты можно выделить несколько районов с макси-

А — наземная часть дельты; Б — авандельты (подводная часть дельты); В — продельта; Г — мелководное море (шельф)

Рисунок 2. Общая концептуальная модель формирования коллекторов, осложненных процессами карбонатизации

мальными концентрациями вторичных карбонатов. К самой большой относятся площади Восточно-Мессояхского, Западно- и Южно-Мессояхского, Находкинского, Южно-Парусового, северная часть Ямбургского и Новопортовского месторождений.

В тектонически активных компоненты CO_2 и SO_2 , поступающие в том или ином объеме в продуктивные пласты, сильно понижают pH среды, увеличивая кислотность растворов. Это приводит к растворению зерен калиевого полевого шпата, кварца и плагиоклаза. При этом значительно меняется первоначальный облик коллекторов, который выражается в существенном улучшении ФЕС. Если тектонические процессы протекали менее активно, то изменение порового пространства коллекторов, как правило, выражается в появлении вторичной альбитовой минерализации, существенно не влияющей на ФЕС.

Результаты исследований стадийности образования вторичных парагенезисов позволили установить, что процесс выщелачивания

и вторичного минералообразования зависит от условий осадконакопления лишь косвенно: наибольшее изменение испытывают отложения с лучшей сортировкой обломочного материала, где в составе минерального скелета преобладают зёрна кварца и плагиоклаза. Изучение условий осадконакопления показало, что отложения с признаками выщелачивания формировались преимущественно в прибрежно-морских условиях осадконакопления и представлены прибрежно-морскими фациями (рисунок 3).

Максимальные концентрации зон выщелачивания отмечены на Западно-Карайском, Карайском, Игольско-Таловом, Крапивинском, Тагайском, Двуреченском, Западно-Карасевском и Западно-Лугинецком месторождениях. Площадь наибольшего проявления вторичной минерализации отмечена на Холмогорском, Карановском, Спорышевском, Муравленковском, Умсейском и Северо-Янгтинском месторождениях.

Рисунок 3. Общая концептуальная модель строения васюганской и сортымской свит

Обобщение результатов исследований вторичных изменений пород-коллекторов

Результаты изучения шлифов показали, что цеолиты в цементе пород-коллекторов в подавляющем большинстве случаев встречаются в ассоциации с хлоритом и гидрослюда, ассоциаций цеолитов с каолинитом практически не обнаружено. Из этого можно сделать вывод о том, что химизм среды на стадии диагенеза изменялся с кислой на щелочную. Еще одним условием формирования высоких концентраций минералов группы цеолитов является наличие в составе неизмененных коллекторов зерен кислых эффузивов:

образование ломонтита и томпсонита происходит при замещении пирокластического материала в процессе выщелачивания. Наличие больших концентраций минералов группы цеолитов в цементе терригенных коллекторов можно рассматривать как своеобразный вторичный маркер интенсивной динамики осадконакопления, с которой связано образование высокопроницаемых песчаных разностей.

Известно, что внутренние полости ломонтита и томпсонита могут быть заполнены углеводородными флюидами состава $\text{C}_1\text{--C}_6$ [7], что в конечном счете приводит к некорректным расчётам объёмов углеводородного

сырья. Для более точного определения подсчетных параметров предложена модель выделения объёмной доли содержания цеолитов ($K_{цл}$) в общем объёме нефтенасыщенных пород. Плотностная модель цеолитсодержащего коллектора может быть описана следующим уравнением:

$$K_c + K_{цл} + K_{п} = 1,$$

где K_c — доля объёма скелета коллектора; $K_{цл}$ — доля объёма цеолитов; $K_{п}$ — коэффициент пористости пласта.

Использование значений минералогической плотности скелета цеолитсодержащих минералов и плотности флюида позволяет определить величину доли объёма цеолитов в общем объёме пород-коллекторов, что позволит более качественно осуществить расчёт объёмов углеводородного сырья в коллекторах с высоким содержанием минералов группы цеолитов.

При изучении фактического материала было установлено зональное доминирование одних минералов группы карбонатов над другими, что подтверждается и данными других исследований [8]. Явное преобладание сидерита, доломита и анкерита над кальцитом можно объяснить повышенным содержанием органического материала, характерным для пород-коллекторов юрского возраста, который обладает способностью к формированию растворов кислого состава с $pH = 6-6,5$. Ещё одним фактором является большое количество корневых разломов, по которым происходит постоянное поддержание концентрации летучих компонентов CO_2 и SO_2 , которые увеличивают кислотность среды. В отложениях мелового возраста наблюдается уже преобладание кальцита над сидеритом, доломитом и анкеритом.

В тектонически активных зонах под воздействием многочисленных дизъюнктивных нарушений формируются зоны уплотнения и разуплотнения пород-коллекторов, по которым внедряются достаточно агрессивные гидротермальные растворы, растворяя часть песчано-алевритового скелета. Этот процесс существенно улучшает ФЕС за счёт значительного увеличения объёма пустого порового пространства. Роль дизъюнктивных нарушений в процессе выщелачивания гораздо более существенна, чем в процессах цеолитизации и карбонатизации. Как и в случае с вторичными карбонатными парагенезисами, большое влияние на структуру порового пространства оказывали поступление флюидов

по разломам, когда компоненты CO_2 и SO_2 существенно понижали pH среды и повышали кислотность растворов. Это значительно ускоряло процесс регенерации зерен кварца, растворение калиевого полевого шпата, плагиоклаза и влияло на конечный масштаб процесса.

Методика выделения зон вторичных изменений пород-коллекторов

В основе методики лежит оценка литологических, петрофизических и тектонических критериев, которая проходит в несколько этапов (рисунок 4).

Первый этап включает в себя анализ исходных данных на основе системного анализа керна, данных геофизических исследований скважин (ГИС) и геофизических параметров. На этом этапе описываются особенности минерального состава пород-коллекторов, включая вторичные парагенезисы, определяется текстурно-структурная характеристика отложений, выполняется поиск возможных месторождений-аналогов, проводится анализ выполненного комплекса ГИС, промыслово-геофизических и гидродинамических исследований скважин.

На втором этапе выполняется обработка первичной информации, включающая в себя выделение характерных для каждого геологического объекта литотипов, охватывающих достаточно широкий спектр пород — от чистых тонкослоистых глин до чистых песчаников с различными текстурами. Литотипы группируются в фации, для которых идентифицируются условия осадконакопления. Фации на основе палеогеографического и палеоморфологического анализов группируются в фациальные ассоциации по принципу различий коллекторских свойств, возможности определения фациальной ассоциации по коротким данным и особенностей осадконакопления отложений. Палеотектонический анализ и оценка характера волновой картины разреза помогают отнести район исследований к тектонически активным или тектонически пассивным зонам.

На третьем этапе происходит обработка полученных данных для более точного выделения зон вторичных изменений пород-коллекторов. На основе выделенных фаций и фациальных ассоциаций создаются фациальная и петрофизическая модели продуктивных отложений. Динамический анализ сейсмических данных позволяет определить макси-

Рисунок 4. Схема реализации методики выделения зон вторичных изменений

мально проницаемые зоны, основной причиной появления которых являются, как правило, многократные структурные перестройки. В ходе этого процесса породы-коллекторы существенно меняют первоначальный облик структур.

Четвёртый этап — анализ полученных результатов, которые представляются в виде различных карт: зон вторичных изменений, фаций и фациальных ассоциаций, проницаемостей, эффективных толщин и остаточных запасов углеводородного сырья. Эти карты в дальнейшем могут использоваться в качестве трендов для создания трёхмерных геологических и гидродинамических моделей, расчёта основных показателей разработки месторождения и планирования проведения на них необходимых геолого-технологических мероприятий.

Результатом предлагаемой методики является возможность определения типа вторичных изменений и степени его влияния на структуру порового пространства на любых этапах проведения геологоразведочных работ,

оконтуривание площади проявления максимальных концентраций вторичных парагенезисов, получение скорректированных рейтинга бурения скважин, программ исследований и оптимизации разработки залежи углеводородного сырья.

Выводы

Реализация стратегии ведущих российских нефтедобывающих компаний, нацеленной на существенное улучшение эффективности поисково-оценочного и разведочного бурения, требует получения более качественной информации о геологическом строении перспективных объектов уже на ранних стадиях геолого-разведочных работ. Разработанная методика прогноза и выделения зон вторичных изменений коллекторов может существенно повысить целесообразность бурения скважин, использоваться для определения типа вторичных изменений, степени их влияния на структуру порового пространства ещё на стадии оценки ресурсного потенциала лицензионного участка.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Поднебесных А.В., Овчинников В.П. Основные типы вторичных изменений пород-коллекторов осадочного чехла Западно-Сибирской плиты // Вестник Томского государственного университета. 2015. № 400. С. 393–403.
2. Поднебесных А.В., Овчинников В.П. Проблемы диагностики цеолитов и влияние их наличия на разработку продуктивных отложений Мессояхской группы

месторождений // Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 324. № 1. С. 137–145.

3. Коробов А.Д., Коробова Л.А., Ахлестина Е.Ф. Минеральные ассоциации продуктов гидротермального изменения — ключ к пониманию возникновения зон разуплотнения и фазовой зональности углеводородов (на примере Западной Сибири) // Известия Саратовского университета. 2008. Т. 8. Вып. 1. С. 42–50.

4. Price N.J., Cosgrove J.W. Analysis of Geological. New York: Cambridge University Press, 2005. 502 p.

5. Riding J.B., Fedorova V.A., Ilyina V.I. Jurassic and Lowermost Cretaceous Dinoflagellate Cyst Biostratigraphy of the Russia Platform and Northern Siberia, Russia // American Association of Stratigraphic Palynologists Contributions Series. 1999. No. 36. P. 1–179.

6. Williams I.S. U-Th-Pb Geochronology by Ion Microprobe // Reviews in Economic Geology. 1998. Vol. 7. P. 1–35.

7. Шнип О.А., Дзюблo А.Д. Цеолиты в гранитоидных коллекторах (на примере фундамента Меконгской впадины) // Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина. 2011. № 4. С. 97–101.

8. Коробов А.Д., Коробова Л.А., Колотухин А.Т., Мухин В.М., Гордина Р.И. Об участии рассолов в гидротермальной альбитизации, сопровождающей формирование продуктивных коллекторов чехла (Западная Сибирь) // Известия Саратовского университета. 2013. Т. 13. Вып. 2. С. 61–68.

REFERENCES

1. Podnebesnykh A.V., Ovchinnikov V.P. Osnovnye tipy vtorichnykh izmenenii porod-kollektorov osadochnogo chekhla Zapadno-Sibirskoi plity [The Main Types of Secondary Alteration of Rocks of the Sedimentary Cover of the West Siberian Plate]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta — Tomsk State University Journal*, 2015, No. 400, pp. 393–403. [in Russian].

2. Podnebesnykh A.V., Ovchinnikov V.P. Problemy diagnostiki tseolitov i vliyaniye ikh nalichiya na razrabotku produktivnykh otlozhenii Messoyakhskoi gruppy mestorozhdenii [The Problems of Zeolites Detection and their Influence on Development of the Productive Reservoirs in the Messoyakha Group of Fields]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, Vol. 324, No. 1, pp. 137–145. [in Russian].

3. Korobov A.D., Korobova L.A., Akhlestitina E.F. Mineral'nye assotsiatsii produktov gidrotermal'nogo izmeneniya — klyuch k ponimaniyu vozniknoveniya zon razuplotneniya i fazovoi zonal'nosti uglevodorodov (na primere Zapadnoi Sibiri) [Mineral Associations Hydrothermal Change Products is the Key to Understanding the Occurrence of Zones of Decompression and Phase Zonality (by the Example of Western Siberia)]. *Izvestiya Saratovskogo universiteta — Saratov University News*, 2008, Vol. 8, Issue 1, pp. 42–50. [in Russian].

4. Price N.J., Cosgrove J.W. *Analysis of geological*. New York, Cambridge University Press, 2005. 502 p.

5. Riding J.B., Fedorova V.A., Ilyina V.I. Jurassic and Lowermost Cretaceous Dinoflagellate Cyst Biostratigraphy of the Russia Platform and Northern Siberia, Russia. *American Association of Stratigraphic Palynologists Contributions Series*, 1999, No. 36, pp. 1–179.

6. Williams I.S. U-Th-Pb Geochronology by Ion Microprobe. *Reviews in Economic Geology*, 1998, Vol. 7, pp. 1–35.

7. Shnip O.A., Dzyublo A.D. Tseolity v granitoidnykh kolektorakh (na primere fundamenta Mekongskoi vpadiny) [Zeolites in Granitoid Reservoirs (on the Example of Mekong Basin Basement)]. *Trudy Rossiiskogo gosudarstvennogo universiteta nefi i gaza im. I.M. Gubkina — Proceedings of Gubkin Russian State University of Oil and Gas*, 2011, No. 4, pp. 97–101. [in Russian].

8. Korobov A.D., Korobova L.A., Kolotukhin A.T., Mukhin V.M., Gordina R.I. Ob uchastii rassolov v gidrotermal'noi al'bitizatsii, soprovozhdayushchei formirovaniye produktivnykh kolektorov chekhla (Zapadnaya Sibir') [Brine Contribution to Hydrothermal Albitization Concomitant to Productive Reservoir Formation Within the Cover (West Siberia)]. *Izvestiya Saratovskogo universiteta — Saratov University News*, 2013, Vol. 13, Issue 2, pp. 61–68. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ ABOUT THE AUTHOR

Поднебесных Александр Владимирович, канд. геол.-минерал. наук, докторант УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Aleksandr V. Podnebesnykh, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Doctoral Candidate of USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: PodnebesnykhAV@mail.ru