

УДК 553.98

НОВАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ НИЖНЕКЕМБРИЙСКИХ КАРБОНАТНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ НЕФТИ И ГАЗА НЕПСКО-БОТУОБИНСКОЙ АНТЕКЛИЗЫ

© 2018 г. | Е.Н. Черепанов

ООО «ИНК», Иркутск, Россия; evgch@yahoo.com

NEW MODEL OF FORMATION OF THE EARLY CAMBRIAN CARBONATE PETROLEUM RESERVOIRS IN THE NEPSKO-BOTUOBINSKAYA ANTECLISE REGION

© 2018 | E.N. Cherepanov

LLC "INK", Irkutsk, Russia; evgch@yahoo.com

Поступила 19.12.2016 г.

Принята к печати 12.12.2017 г.

Ключевые слова: *Сибирская платформа; Непско-Ботуобинская антеклиз; надвиги; осинский горизонт; карбонатные коллекторы; сейсморазведка; гипогенный карст; абиогенная сульфатредукция.*

В данной статье кратко описана новая модель формирования коллекторов нефти и газа в карбонатных породах осинского горизонта усольской свиты нижнего кембрия Непско-Ботуобинской антеклизы, которая сформировалась за счет воздействия на осинский горизонт надвиговых процессов в вышележащей галогенно-карбонатной толще пород. В определенных приразломных и других зонах тектонических деформаций, а также вдоль поверхностей напластования и надвигового смещения деформированные карбонатные породы подверглись масштабному растворению, выщелачиванию и кавернообразованию вплоть до образования крупных (до нескольких метров) полостей. Данные процессы протекали за счет воздействия циркулирующих агрессивных высокотемпературных гидротермальных флюидов, в том числе в результате реакций абиогенной сульфатредукции. Это привело к формированию карбонатных коллекторов с аномально высокими фильтрационно-емкостными свойствами, содержащими углеводороды в промышленно извлекаемых объемах. Дальнейшее изучение и более полное понимание процессов комплексного тектонического и постседиментационного воздействия на карбонатные породы и, соответственно, лучшее понимание строения месторождений подобного типа позволит более правильно прогнозировать зоны развития с высокими фильтрационно-емкостными свойствами в пределах месторождений. Кроме того, это поможет существенно улучшить производственные показатели бурения и добычи в карбонатных коллекторах кембрийского возраста, а также разработать технические стратегии поисков новых аналогичных залежей на Сибирской платформе.

Received 19.12.2016

Accepted for publication 12.12.2017

Key words: *Siberian Platform; Nepsko-Botuobinskaya anteclise; thrusts; osinskiy horizon; carbonate reservoirs; seismic exploration; hypogene karst; abiogenic sulphate reduction.*

This paper describes a new model of petroleum reservoirs formation in the osinskiy carbonate horizon of the Early Cambrian usolskaya suite in the Nepsko-Botuobinskaya Anteclise region. This new conceptual model involves the thrust tectonics processes in the overlying carbonate-salt sequences, influencing the osinskiy carbonates. These processes are related to one of the base detachment surfaces in the carbonate-salt formations, where the carbonate rocks of the osinskiy horizon belong to the intervals, which experienced intensive thrust deformations along this major sub-horizontal detachment surface. In the result, the osinskiy carbonate rocks were subject to very significant tectonic deformations by the tangential compressional forces originating from the Baikal rift zone. These deformations included numerous faults and fracture zones, as well as sub-horizontal slicing of the carbonate rocks into series of small tectonic sheets, layers and blocks, which in some cases experienced lateral sliding and imbrication, compressions and other small-scale tectonic deformations. Later, in the fault zones, fracture corridors, or along major bedding planes and thrust detachment surfaces, deformed carbonate rocks of the osinskiy horizon were subject to extensive dissolution, leaching, and cavern formation, up to large caves of several meters in size, which were filled by carbonate clastic material of different sizes. These processes were result of the circulation and movement of aggressive, high-temperature hydrothermal fluids along deformation zones. They also included the reactions of abiogenic thermochemical sulfate reduction, which were represented by the processes of intensive hypogene (deep, burial) karst of the osinskiy carbonates. All these process then resulted in the formation of carbonate reservoirs with anomalously high porosities and permeabilities, and often they are characterised by huge production rates of hydrocarbons. Further studies and

OIL AND GAS RESERVOIRS

more complete understanding of the complex tectonic and post-sedimentation processes in the carbonate rocks, and therefore, better understanding of the internal architecture of this type of hydrocarbon fields will allow for better prediction of high porosity and high permeability zones within such fields. This will also allow for higher success rates during exploration and production drilling in carbonate rocks of Cambrian age in the region, and will also help developing technical strategies for exploration of similar types of hydrocarbon fields on the Siberian Platform.

Под складчато-надвиговыми поясами обычно понимают краевые части платформ, осадочный чехол которых деформирован вследствие тангенциальных напряжений со стороны горного фронта окаймляющих складчатых областей [1, 4, 8]. Многие наиболее богатые углеводородами регионы мира с гигантскими месторождениями нефти и газа связаны со складчато-надвиговыми поясами (Загрос в Иране и Ираке, Ориноко в Венесуэле и др.). В различных регионах мира при поисково-разведочных работах на нефть и газ в зонах развития надвиговых деформаций основное внимание чаще всего уделяется поискам и разведке именно структурных ловушек, как правило антиклинального типа, когда они располагаются выше плоскостей разрывных надвиговых нарушений в аллохтонной части. В меньшей степени изучаются поднадвиговые структурные ловушки автохтонов. И практически никогда не уделялось внимания ловушкам, которые могут образовываться в результате смешанного тектонического и постседиментационного воздействия на карбонатные породы, залегающие в поднадвиговой зоне. Эволюция ловушек подобного типа может включать существенные структурные деформации осадочных пород, попавших в зону влияния субгоризонтальной поверхности сместителя под надвинутыми частями аллохтона, и последующие масштабные вторичные преобразования карбонатов в местах тектонических деформаций и соответствующего притока гидротермальных или иных флюидов определенного состава и температуры.

Целью данной статьи является описание одного из возможных механизмов образования карбонатных коллекторов нефти и газа, связанных с поверхностями срыва (сместителя или базового надвига, а также деколлементы или детачмента в иностранной литературе) в поднадвиговых зонах, которые формируются при комплексном влиянии процессов тектонических деформаций и последующих вторичных изменениях карбонатных пород, преимущественно развивающихся в ослабленных зонах деформаций под воздействием активно циркулирующих агрессивных гидротермальных растворов.

Краткое описание геологического строения района исследований

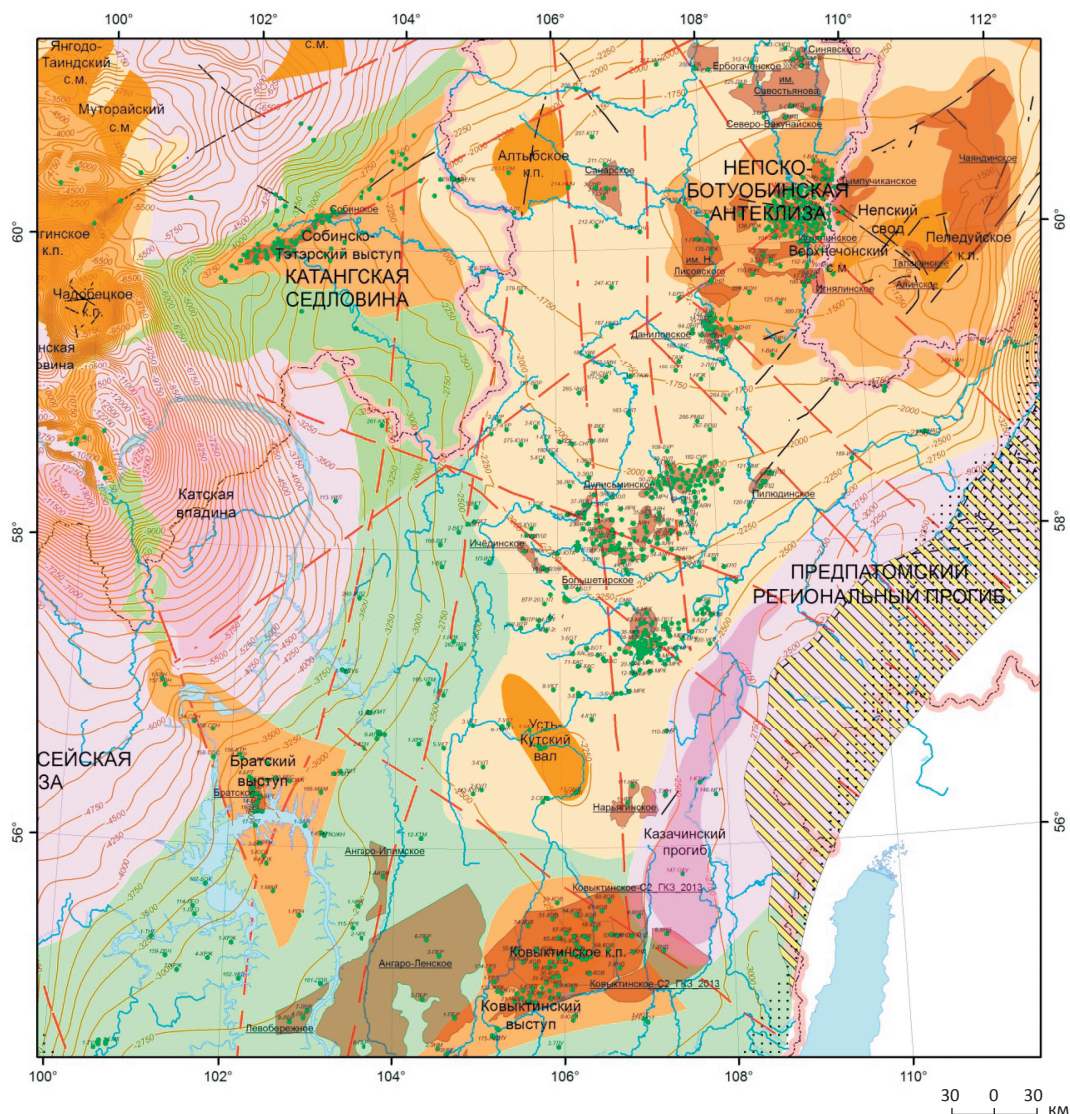
В тектоническом отношении территория исследований расположена в юго-западной части Непско-Ботуобинской антеклизы, в зоне ее сочленения с северо-восточным окончанием Ангаро-Ленской ступени и северо-западным бортом Предпатомского

прогиба, между Непским сводом и Усть-Кутским валом (рис. 1). Кристаллический фундамент вскрыт большим числом скважин на абсолютных отметках от –2000 до –2500 м, и отмечается постепенное региональное воздымание его поверхности с юго-запада на северо-восток.

В строении осадочного чехла рассматриваемой территории выделяется три структурных этажа. Подсолевой структурный этаж залегает на породах кристаллического фундамента и снизу вверх включает отложения непской, тирской и даниловской свит венды, а также низов усольской свиты нижнего кембрия с осинским горизонтом. Состав и детали строения одного из самых перспективных в отношении нефтегазоносности карбонатного осинского горизонта усольской свиты описаны в многочисленных работах ([2, 3, 6] и др.). В целом отложения усольской свиты представлены неравномерным переслаиванием каменных солей с доломитами, глинистыми доломитами и доломитоангидритами общей мощностью 400–500 м. Доломиты серые, темно-серые, мелкозернистые, массивные, часто галитизированные; крупнокристаллические каменные соли разных цветов, иногда присутствует глинистый материал. Перспективный на нефтегазоносность региональный осинский горизонт мощностью 20–100 м выделяется в нижней части усольской свиты и сложен доломитами, известняками серыми, темно-серыми, тонко-мелкозернистыми с незначительными прослоями ангидритодоломитов и глинистых доломитов. Поры и каверны выщелоченных доломитов и известняков часто заполнены галитом и ангидритом. К кровле горизонта приурочен региональный сейсмический отражающий горизонт А. В палеогеографическом отношении территория исследований расположена на юго-западном склоне Непско-Ботуобинской отмели, на которой шло активное формирование биогермов и биостромов с ренальцисово-эпифитоновым и археоциатовым биоценозом. Осадконакопление в нижнекембрийском бассейне происходило в условиях теплого моря нормальной солёности.

Средний соленосный этаж включает отложения большей части усольской свиты выше осинского горизонта, а также бельской, булайской, ангарской и литвинцевской свит нижнего кембрия. Данный комплекс имеет более сложное строение, чем подстилающие его подсолевые отложения. В этом осадочном комплексе интенсивно развиты дизъюнктивные и пликативные дислокации, связанные с проявлением

Рис. 1. Фрагмент структурно-тектонической карты нефтегазоносных провинций Сибирской платформы (по Старосельцеву В.С., 2001)
Fig. 1. Part of the structural-tectonical map of petroleum provinces of Siberian Platform (from Staroseltsev V.S., 2001)



Пликативные структуры палеозоя

Положительные:

Отрицательные:

Промежуточные:

- надпорядковые
- I порядка
- II порядка
- надпорядковые
- I порядка
- крупнейшие (надпорядковые)
- крупные (I порядка)

- региональные глубинные разломы по геолого-геофизическим данным
- разрывы, установленные геологической съемкой, сейсморазведкой и подтвержденные бурением
- зона складчато-надвиговых дислокаций
- зоны интенсивного рифейского прогибания
- месторождения УВС
- изолинии поверхности кристаллического фундамента
- скважины глубокого бурения

OIL AND GAS RESERVOIRS

Рис. 2. Структура осадочного чехла территории исследований [5]
 Fig. 2. Structure of the sedimentary cover of the area of study [5]

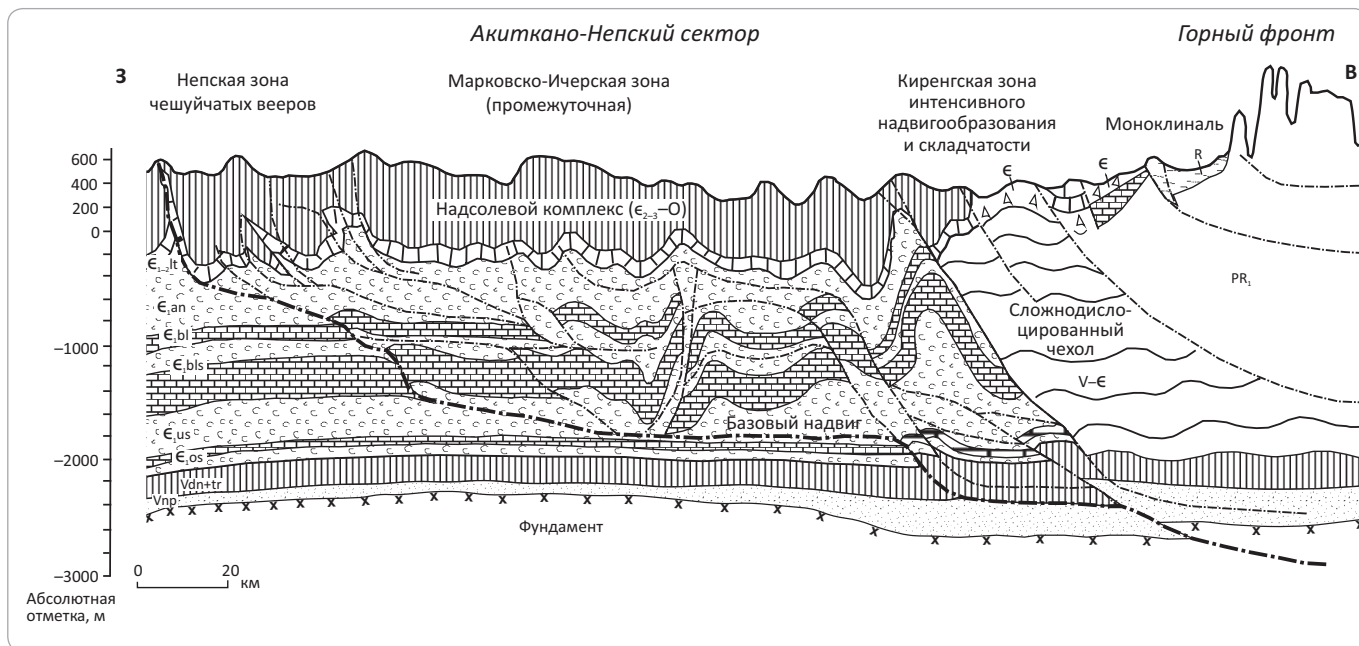
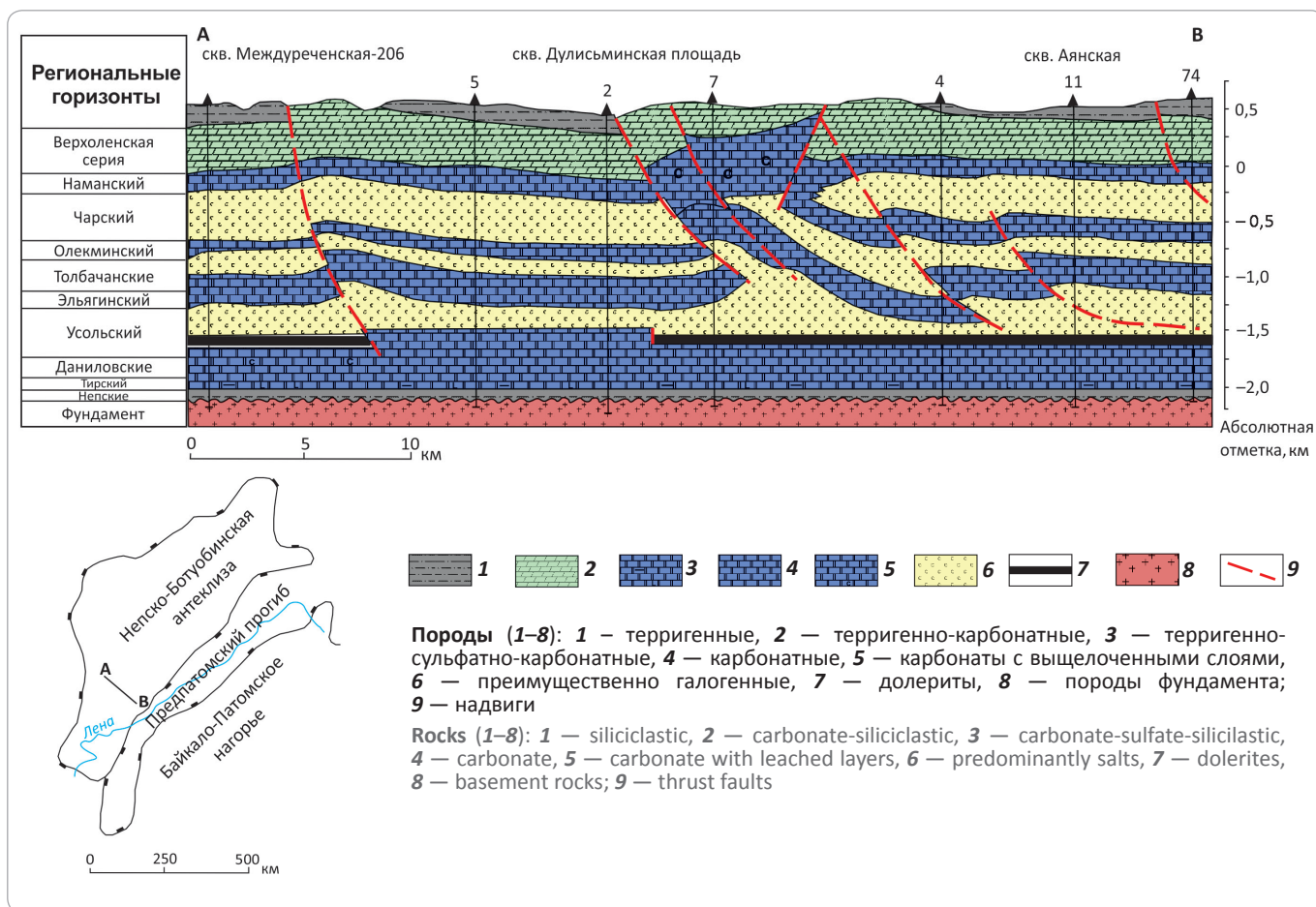


Рис. 3. Геологический разрез юго-западной части Непско-Ботубинской антеклизы [6]
 Fig. 3. Geological cross-section of the south-western part of Nepsko-Botuobinskaya Antecline [6]



соляной тектоники. Отмечены колебания мощностей отложений усольской, бельской и ангарской свит, обусловленные резкими изменениями толщины солей.

Основные изменения связаны с солями ангарской свиты, которые образуют узкие, протяженные, высокоамплитудные складки (часто осложненные разрывными нарушениями), сформированные в условиях компрессионного тектонического сжатия. Верхний надсолевой этаж состоит из отложений среднего, верхнего кембрия и ордовика и выделяется от кровли литвинцевской свиты до дневной поверхности. На данной территории многие скважины вскрыли пластовые интрузии траппов, наиболее вероятно, триасового возраста, которые сложены долеритами темно-серыми до черных, микродолеритами, габбро-долеритами и троктолитовыми долеритами.

Надвиговые деформации широко распространены в зоне сочленения Байкало-Патомской складчатой зоны и Непско-Ботуобинской антеклизы, включая территорию Предпатомского краевого прогиба (рис. 2). Данные деформации происходили, предположительно, в период от позднекаледонской до позднегерцинской фаз складчатости, что примерно соответствует девон-триасовому интервалу. На территории Непско-Ботуобинской антеклизы многочисленными исследователями определялись и картировались надвиговые зоны со значительным горизонтальным смещением в солевом и надсолевом комплексах [5, 6]. Например, на территории исследований юго-западной части Непско-Ботуобинской антеклизы (рис. 3) отмечены многочисленные надвиги в карбонатно-галогенно-сульфатной толще раннепалеозойского возраста. Основная масса соленосных горизонтов начинается выше осинского горизонта в составе усольской свиты нижнего кембрия, а ниже расположена более жесткая карбонатно-сульфатная пачка даниловской и тирской свит венда. Исходя из разреза юго-западной части Непско-Ботуобинской антеклизы, можно сделать вывод о наличии одной из главных поверхностей сместителя на границе перехода от нижнего, более жесткого, преимущественно карбонатно-сульфатного комплекса к верхнему, более пластичному, преимущественно галогенно-карбонатному (см. рис. 3). Это примерно соответствует уровню осинского горизонта усольской свиты, залегающего на основной границе перехода между подсолевым и соленосными комплексами.

Г.Г.Шемин [6], описывая данную территорию, также отмечает значительную дислоцированность отложений соленосного и надсолевого комплексов, которые представлены в виде пластин (чешуй), наклоненных под углом 15–20° и надвинутых друг на друга на расстоянии сотни метров, тогда как корни этих пластин залегают в низах солевого разреза

усольского регоциклита. Также автор приводит другие доказательства широкого развития надвиговых процессов на территории работ, такие как сдвояние разрезов нижнетолбачанского, эльганского (скважины 4, 7) и олекминского (скв. 7) регоциклитов. Отмечено увеличение толщины усольского регоциклита за счет повторения отдельных его участков в нижней части разреза (скважины 7, 11), а также существенно более высокое гипсометрическое положение надвинутых разрезов по сравнению с одновозрастными отложениями, залегающими под сместителем. Увеличение мощности осинского горизонта за счет тектонических процессов надвигового характера, отмеченное Г.Г.Шеминым еще десятилетие назад, представляется крайне важным для практических целей поисково-разведочных работ на нефть и газ в данном регионе. Приводятся такие факты, как интервалы повышенной трещиноватости, крутые углы наклона слоистости (50–90°) и другие многочисленные данные, подтверждающие наличие надвиговой природы деформаций на многих уровнях разреза. Сведения по изучению обнажений и особенностей рельефа территории также подтверждают надвиговую структуру отложений осадочного чехла [6]. Таким образом, в настоящее время на территории района работ многими исследователями доказана существенная дислоцированность осадочных пород разных уровней разреза в результате надвиговых деформаций со стороны Байкальской складчатой области.

Интерпретация данных сейсморазведки в зонах надвигов

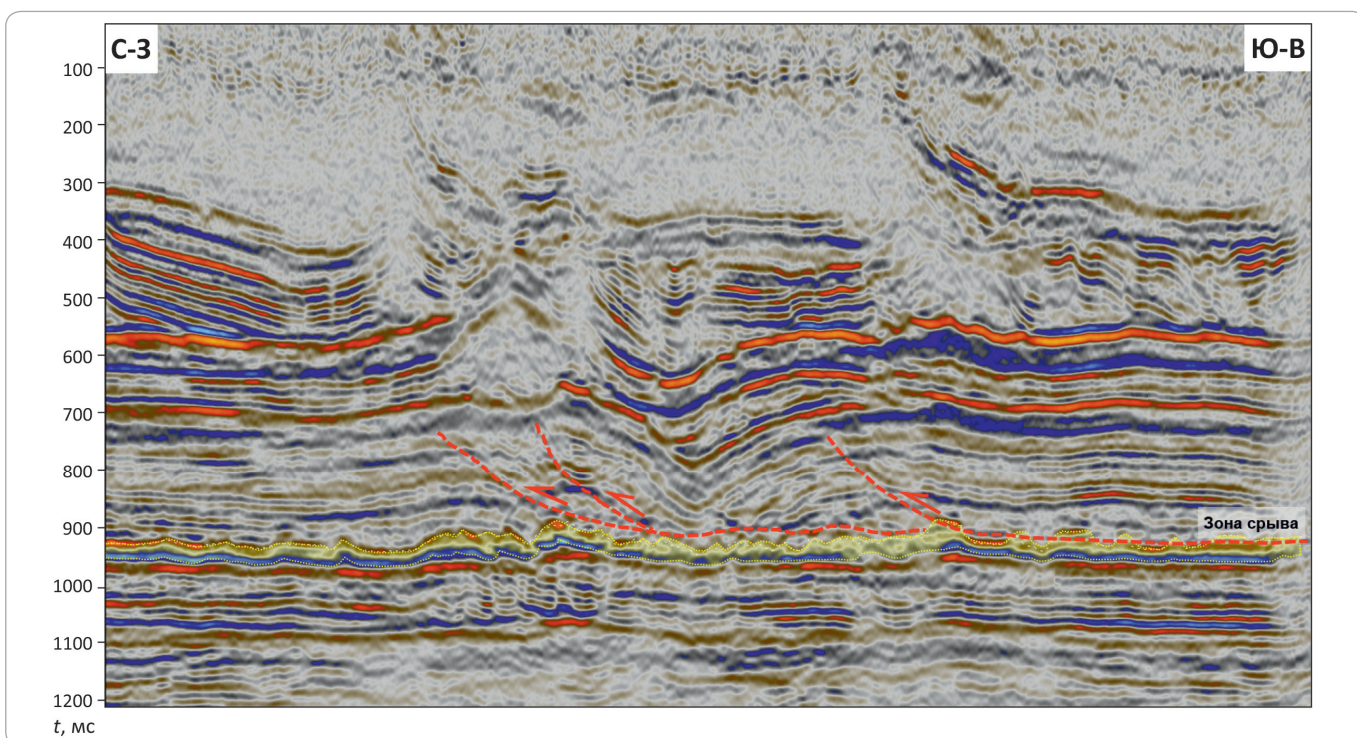
С появлением современных высокотехнологичных методов обработки и интерпретации данных 2D/3D-сейсморазведки, новых инструментов динамической интерпретации и возможности подсчета различных сейсмических атрибутов повысилась точность и детализация исследований данных сейсморазведки. Значительно расширились возможности широкого комплексирования и сопоставления с данными ГИС, грави- и магниторазведки, дешифрирования космоснимков высокого разрешения, включая высокоточные модели рельефа, поверхностной геологии и т.д. Применение современных технологий обработки и анализа геолого-геофизических данных, понимание основных принципов сейсмической сиквенс-стратиграфии систем карбонатного осадконакопления и принципов детальной структурной интерпретации надвиговых систем [4, 8] позволяет интерпретировать данные сейсморазведки исследуемой территории с повышенной точностью. Появляются возможности детальной интерпретации сейсмического волнового поля на уровне и внутри отдельных отражающих горизонтов.

При детальной высокоточной интерпретации данных сейсморазведки на уровне отдельных от-

Рис. 4. Основные элементы геометрии отражений надвиговых деформаций
Fig. 4. Main elements of seismic reflections geometries of thrust deformations



Рис. 5. Надвиговые деформации на временном сейсмическом профиле по линии падения (тангенциальное сжатие справа)
Fig. 5. Thrust deformations on time seismic profile on dip line (tangential compression from the right)



ражений для правильной диагностики воздействия надвиговых деформаций на целевой горизонт следует обращать внимание на фундаментальные принципы структурного картирования, интерпретации надвиговых разломов и соответствующую геометрию сейсмических отражений (рис. 4). Например, на линиях падения, ортогональных фронту надвига, обычно интерпретируются так называемые дуплексы и чешуи; разломы характеризуются крутыми углами падения и выполаживанием с глубиной по типу листрических разломов. На линиях простирания, обычно параллельных фронту надвига, отмечается ковшеобразная, вогнутая форма надвиговых разломов.

В разрезах исследуемых районов Непско-Ботуобинской антеклизы отмечается несколько основных горизонтов скольжения (см. рис. 2), в основном в непской свите подсолевого комплекса, усольской, бельской и ангарской свитах соленосного комплекса, а также на некоторых уровнях надсолевого комплекса [5]. Детальный анализ современных данных 3D-сейсморазведки позволяет заключить, что поверхность базового надвига не является единой плоскостью разлома, а представляет собой зону интенсивных деформаций часто значительной мощности, где происходят масштабные процессы расслоения, сжатия и сминания блоков пород как в аллохтонной,

так и автохтонной частях разреза (рис. 5). Мощность зоны поднадвиговых деформаций предполагается от нескольких до десятков метров в зависимости от состава окружающих пород, объема и структурной конфигурации вышележащего массива пород, наличия разломов различных типов и поверхностей напластования, структурного плана фундамента и т. д.

Осинский горизонт (см. рис. 5; желтый цвет, интервал 900–950 мс) интенсивно деформирован в поднадвиговой зоне в результате структурных деформаций в вышележащей толще, особенно в правой части разреза. Также отмечается интенсивно деформированная и раздробленная поднадвиговая зона непосредственно над осинским горизонтом, которая включает поверхность сместителя и нижнюю деформируемую часть аллохтона. Породы над поверхностью сместителя смяты в складки (интервал 700 – 900 мс), что предполагает существенное сокращение разреза по латерали за счет смещения (скольжения) пород по поверхности сместителя. Деформированные породы поднадвиговой зоны над осинским горизонтом характеризуются волновым полем с более хаотичным характером сейсмических отражений. Осинский горизонт в левой части данного разреза менее деформирован (дистальная часть от фронта надвигов); поднадвиговая зона над осинским горизонтом также менее деформирована, что наблюдается в более выдержанных по горизонтали сейсмических отражениях (см. рис. 5).

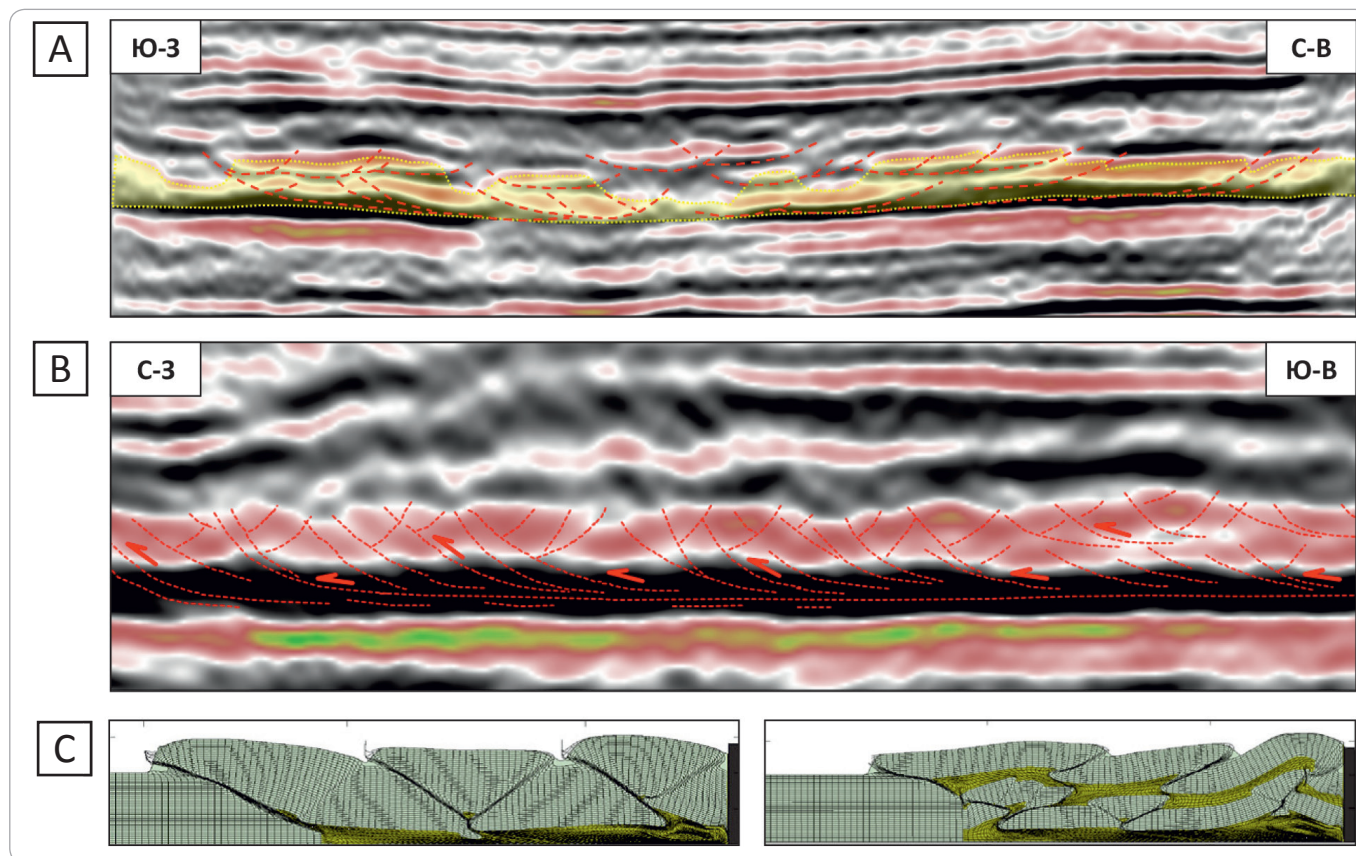
Детальная интерпретация волнового поля на уровне сейсмических отражений осинского горизонта усольской свиты на значительной территории района работ позволяет сделать вывод о сильном влиянии надвиговых процессов, происходящих в вышележащих толщах осадочного чехла, на мелко-масштабную структурную конфигурацию и внутреннее строение осинского горизонта. В определенных районах территории исследований Непско-Ботуобинской антеклизы осинский горизонт попал в зону сильного влияния поверхности базового надвига и, в результате воздействия процессов тангенциального сжатия со стороны Байкало-Патомской складчатой области претерпел значительные внутрипластовые деформации. Они выразились в существенном расслаивании пластов карбонатных пород поднадвиговой зоны на серии отдельных, относительно незначительных по мощности тектонических пластин и блоков пород и в последующем их сминании в результате компрессионного сжатия со стороны Байкало-Патомской складчатой области с юго-востока. Карбонатные блоки пород в виде пластин различной мощности в ряде случаев наслаивались друг на друга с различным горизонтальным смещением и различными углами наклона поверхностей скольжения вплоть до значительного горизонтального смещения

вдоль практически горизонтальных поверхностей. В зонах уже существующих разломов других типов (сбросов, взбросов, сдвигов) происходили наиболее значительные деформации и наслаивание отдельных блоков и пластин карбонатных пород в виде так называемых чешуйчатых вееров, что подтверждается очень крутыми углами падения слоистости в керне, многочисленными зеркалами скольжения, трещинами отрыва и т. д.

Приведем примеры сейсмической интерпретации структурных деформаций осинского горизонта в зоне воздействия надвиговых процессов (рис. 6). Один из сейсмических профилей (см. рис. 6 А) располагается параллельно фронту сжатия (т. е. на линии простирания одного из надвигов). На данном сейсмическом разрезе видна четко выраженная ковшообразная форма поверхностей микронадвигов (отражения черного цвета, отрицательная амплитуда), составляющих единую зону влияния надвигового сместителя над осинским горизонтом. На данном сейсмическом разрезе по линии простирания надвиговых деформаций (тангенциальное сжатие направлено ортогонально линии профиля) изображены элементы интерпретации пластин и блоков осинского горизонта, сформировавшихся при расслоении карбонатного пласта в результате воздействия надвиговых деформаций. Желтым цветом выделен осинский горизонт, красные пунктирные линии показывают зоны микронадвиговых деформаций осинского горизонта в результате расслоения. Данные формы расслаивания отражений осинского горизонта характерны только для тектонически деформированных зон развития надвигов и нетипичны для основной части территории, где осинский горизонт не попал в зону влияния складчатости и надвиговых процессов. На другом сейсмическом разрезе (см. рис. 6 В), расположенном по линии падения (надвиг справа), также показаны элементы интерпретации микронадвиговых деформаций на уровне осинского горизонта. На этом разрезе видны элементы компрессионного сжатия карбонатных пород осинского горизонта, который в данном случае подстилает зону основного сместителя, тогда как другие выше- и нижележащие отражения слабдеформированы и представлены относительно ровными и стабильными, выдержанными по латерали сейсмическими отражениями. Также приведены примеры (см. рис. 6 С) моделирования надвиговых деформаций [11] в условиях бокового сжатия, которые во многих случаях напоминают геометрию сейсмических отражений, наблюдаемых при интерпретации осинского горизонта.

Что касается качества данных 3D-сейсморазведки, то детальный анализ сейсмических профилей в других зонах, наличие недеформированных зон с четкими, выдержанными по латерали отражениями

Рис. 6. Детали строения сейсмических отражений осинского горизонта
 Fig. 6. Structural details of seismic reflections of the osinskiy horizon

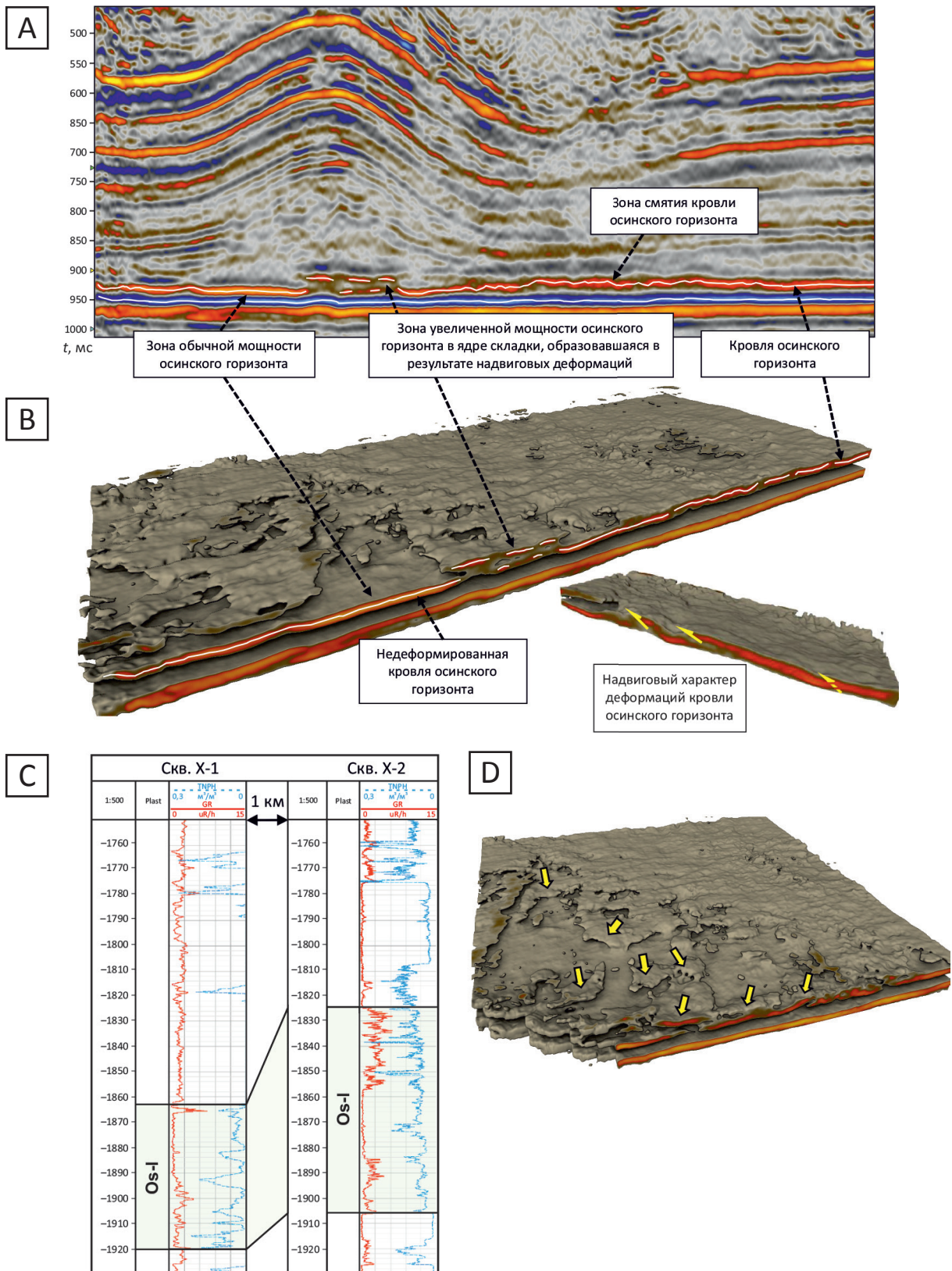


над и под осинским горизонтом, позволяют с полной уверенностью исключить влияние на данную картину отражений верхней части разреза, шумовых помех, кратных или дифракционных волн и т. д. Это подтверждает реальную геологическую природу данных отражений, представляющих собой зону расслоения, субгоризонтального смещения или компрессионного сжатия в пределах зоны влияния поверхности сместителя. Следует отметить, что с точки зрения геологической эволюции карбонатных систем осадконакопления кембрийского возраста, применяя методы детальной сейсмической сиквенс-стратиграфии [12, 13] как на уровне всего разреза, так и отдельных отражений, невозможно проинтерпретировать данную сейсмическую картину увеличения мощностей осинского горизонта практически в 2 раза (до 100 м) как зоны карбонатной аккумуляции и роста биогермных или биостромных тел (часто называемых «рифовых», что не совсем корректно для нижнекембрийских пород).

Для усольской свиты нижнего кембрия данного района характерно развитие археоциат, эпифитоновых и ренальциссовых водорослей, которые в некоторых районах мира могут слагать биогермные массивы мощностью до нескольких сотен метров

(Дроздова Н.А., 1980). Но сейсмические отражения подобных массивов обычно имеют специфический характер сейсмофаций очень хаотической природы волнового поля и четко определяемой геометрии отражений поверхности карбонатов по сравнению с вмещающими породами. В этом районе работ в обычном залегании осинских карбонатов, не затронутых процессами надвиговых или иных деформаций (рис. 7 А; см. зона обычной мощности осинского горизонта), сейсмические отражения на уровне кровли осинского горизонта представлены одной высокоамплитудной положительной фазой (красный цвет); подошве осинского горизонта соответствует высокоамплитудная отрицательная фаза (синий цвет). Картина волнового поля с одной сейсмической фазой на уровне осинского горизонта простирается на значительной части территории работ, где осинский горизонт не был затронут какими-либо тектоническими деформациями. Наличие нескольких фаз, соответствующих осинскому горизонту, и анализ геометрии взаимоотношений между ними, вероятнее всего, свидетельствуют не о росте рифов, а о наличии признаков воздействия надвиговых и складчатых деформаций в зоне влияния поверхности сместителя (см. рис. 7 А, В; зона увеличенной мощности).

Рис. 7. Детали строения осинского горизонта в трехмерной визуализации
 Fig. 7. Details of the osinskiy horizon architecture in 3D visualization



Это также указывает на соответствующее тектоническое расслаивание и сминание карбонатной пачки осинского горизонта и последующее воздействие постседиментационных изменений, вплоть до процессов масштабного глубинного карстового растворения и выщелачивания карбонатных пород.

На трехмерной визуализации положительных амплитуд сейсмического куба, соответствующих кровле осинского горизонта (отпикирована белой линией), отфильтрованы отрицательные амплитуды (см. рис. 7 В, D). Видно, что зоны увеличенной мощности осинского горизонта представляют собой в объеме определенного рода пластинчатые формы, которые никак не могут быть рифоподобными телами, биогермами или биостромами, а больше похожи на пластины (желтые стрелки), образовавшиеся в результате сжатия, сминания и/или выдавливания части осинского горизонта в районе развития ядра складки, таким образом приводя к увеличению мощности осинского горизонта. Осинский горизонт находится на границе раздела деформированного соленосного и недеформированного подсолевого комплексов. Для формирования складки необходимы срыв соленосного комплекса относительно подсолевого комплекса и обязательное его скольжение по поверхности осинского горизонта, приводящее к деформации последнего (см. рис. 7 А). Справа от складки наблюдается зона смятия кровли осинского горизонта (более проксимальная зона относительно фронта надвиговых деформаций с юго-востока), образованная в результате скольжения вышележащего массива пород. В зоне, где наблюдается обычная мощность осинского горизонта, подтвержденная скв. X-1 (см. рис. 7 С; номера и скважины условные), в основании левого крыла складки (более дистальная часть от фронта надвиговых деформаций), кровля осинского горизонта практически не деформирована скольжением вышележащего массива пород.

На рис. 7 С приведен пример разреза через две близлежащие (около 1 км) скважины, которые пробурены в зоне обычной мощности (однофазовая волновая картина) и в зоне увеличенной мощности осинского горизонта (несколько сейсмических фаз). Зона увеличенной мощности осинского горизонта характеризуется скв. X-2, и основное отличие от зоны обычной мощности осинского горизонта состоит в том, что в этой скважине присутствует верхняя пачка карбонатов (-1825...-1855 м), для которой типичны повышенные показания гамма-каротажа (см. рис. 7 С). Автор статьи считает, что повышенные значения гамма-каротажа осинских карбонатов на территории исследований не отражают какие-либо седиментологические или литологические особенности карбонатных пород, а наиболее вероятно характеризуют карбонаты, интенсивно подвергшиеся

вторичным постседиментационным изменениям. По мнению автора статьи, изменчивость гамма-каротажа в осинских карбонатах обусловлена урановой компонентой, которая, вероятнее всего, связана с наличием мелкодисперсного рассеянного углеродистого вещества, появившегося в карбонатах после интенсивной фильтрации агрессивных гидротермальных растворов, несущих те или иные концентрации УВ и других редких элементов. Некоторые интервалы повышенного гамма-каротажа, которые соответствуют черным прослоям карбонатов (рассеянное мелкодисперсное углеродистое вещество), также имеют урановые содержания молибдена, лития, свинца и других редких элементов, что абсолютно нетипично для осадочных карбонатных пород и свидетельствует об их интенсивной проработке гидротермальными растворами глубинной эндогенной природы.

Верхняя пачка карбонатов осинского горизонта в скв. X-2, характеризующаяся повышенными значениями гамма-каротажа, вероятнее всего, сложена не карбонатами, накопившимися *in situ*, а образовалась за счет тектонических деформаций (сминания, срыва и скольжения, выдавливания наверх и т.д.) и последующей интенсивной проработки гидротермальными растворами. Скважина X-1 характеризуется однофазной сейсмической картиной и не имеет верхней пачки с повышенными значениями гамма-каротажа, тогда как скв. X-2 (несколько сейсмических фаз) можно считать примером сдвоенного разреза осинского горизонта, хотя признаки сдвоения разреза часто сильно искажены за счет тектонических деформаций и последующих значительных вторичных изменений перемещенной и нарушенной частей разреза.

Таким образом, можно выдвинуть гипотезу, что осинские карбонаты обычной мощности, образовавшиеся *in situ*, характеризуются низкими показаниями и слабой вертикальной изменчивостью гамма-каротажа. Осинские карбонаты, которые испытали тектонические деформации и/или интенсивные вторичные изменения, имеют повышенные значения гамма-каротажа и сильную вертикальную изменчивость, а также часто увеличенные мощности. В дальнейшем следует детально проанализировать принципы определения так называемого трехчленного строения осинского горизонта, так как, исходя из новых материалов, данные гамма-каротажа следует с осторожностью использовать для корреляции осинского горизонта.

Процессы вторичных изменений карбонатных пород в зонах надвиговых деформаций

Структурно-тектонические деформации карбонатных горизонтов в зоне влияния надвиговых поверхностей срыва являются необходимым, но не достаточным этапом формирования залежей нефти и газа подобного типа. Обнаружение надвиговых

Рис. 8. Схематическое представление реакции абиогенной сульфатредукции
Fig. 8. Schematic representation of the reaction of abiogenic sulfate reduction



смещений и деформаций в карбонатных горизонтах на уровне перспективных отражающих горизонтов в поднадвиговых зонах не является прямым доказательством существования залежей УВ, но служит прямым поисковым признаком потенциальных месторождений УВ.

Следующими важными факторами в формировании поднадвиговых залежей УВ в зоне влияния поверхностей срывов являются процессы вторичных, постседиментационных изменений карбонатных пород. Данные процессы максимально эффективно могут протекать в зонах наибольших тектонических деформаций при обязательном значительном воздействии коррозионно-агрессивных высокотемпературных гидротермальных флюидов, циркулирующих по ослабленным зонам и разломам.

По данным геолого-разведочных и исследовательских работ в некоторых районах Непско-Ботубинской антеклизы как на уровне интерпретации данных сейсморазведки, так и особенно интерпретации данных скважин и керна часто отмечают многочисленные признаки существенного растворения и выщелачивания карбонатных пород. Процессы растворения приводят к формированию зон аномально высоких фильтрационно-емкостных свойств, вплоть до наличия каверн и полостей размером в несколько метров, а иногда достигающих 7–10 м по вертикали. Некоторые скважины в подобных районах развития карбонатных пород со значительными вторичными изменениями имеют дебиты безводной нефти несколько тысяч тонн в сутки на протяжении длительного времени. Естественно, что в пластовых условиях данные полости заполнены различным неотсортированным обломочным материалом. Породы в таких полостях и кавернах представляют собой продукты разрушения и растворения карбонатных пород самого различного гранулометрического состава: от крупных угловатых обломков карбонатных пород до неконсолидированной глинисто-песчаной фракции карбонатного состава (или так называемой доломитовой муки). Тонко- и мелкозернистый обломочный материал карбонатных пород при бурении скважин обычно интенсивно вымывается буровым раствором, его невозможно обнаружить в керне в данных

интервалах. Для подобных интервалов типично существенное поглощение бурового раствора, аварии, провалы инструмента, невозможность записи каротажа, снижение выноса керна, изменение скорости бурения и т. д.

На основе детального анализа данных керна осинского горизонта и наличия сероводорода при бурении отдельных скважин в данных районах природу агрессивных гидротермальных флюидов, влияющих на растворение и выщелачивание карбонатов и приводящих к вторичным изменениям и существенному улучшению их фильтрационно-емкостных свойств, можно объяснять процессами гипогенного (глубинного) карста. В данном случае эти процессы могут происходить в результате масштабной абиогенной сульфатредукции ("Thermochemical Sulfate Reduction" (TSR) в зарубежной литературе). Детали реакции описаны в многочисленных работах отечественных и зарубежных исследователей ([7, 9, 10] и др.).

Реакция абиогенной сульфатредукции схематически может быть представлена в следующем виде (рис. 8). Высокотемпературные (~100–140 °С) гидротермальные флюиды, поднимающиеся вверх или циркулирующие по разломным и трещинным зонам, вступают в реакцию с сульфатными породами (гипсами и ангидритами) парфеновского горизонта тирской свиты венда, залегающего под осинским, и с УВ, ранее находившимися в пластах или мигрирующими также по разломным зонам. Эти процессы приводят к формированию различных продуктов данной реакции, которые могут включать измененные УВ (от битума до мелкодисперсного углеродистого вещества в порах пород, часто интерпретируемого как ОВ или кероген), углекислоту, сероводород, органические кислоты, воду и другие продукты. Сероводород, углекислота и различные органические кислоты, образующиеся при реакциях абиогенной сульфатредукции, протекающих на больших глубинах, являются очень агрессивными растворами. Они воздействуют на матрицу карбонатных пород, приводя к существенному растворению пород осинского горизонта, перекристаллизации, доломитизации, различным изменениям минерального вещества и формированию зон аномальных фильтрационно-

емкостных свойств. Подобные аномальные зоны могут включать интервалы интенсивной кавернозности и часто крупные полости, напоминающие карстовые пещеры, заполненные различным обломочным материалом. По сейсмическим данным часто можно выделять различные кольцевые структуры (воронки), которые подтверждаются по скважинным данным с сокращенным разрезом осинского горизонта и наиболее вероятно являются результатом проявлений процессов гипогенного карста, развивающихся по существующим зонам тектонических деформаций.

При детальном анализе керна также отмечаются многочисленные признаки продуктов данной реакции, такие как наличие вторичного кальцита, ангидрита и галита в трещинах и кавернах пород, пирита, углеродистого вещества (который часто интерпретируют как ОВ или кероген), стилолитовых швов различной направленности с керогеном и глинистым веществом как возможным продуктом химического выветривания в результате протекания процессов данной реакции, наличие битума и других измененных, деградированных УВ и т.д.

Важным представляется предположение, что УВ являются необходимыми элементами данной реакции. Следовательно, наличие предполагаемых продуктов реакции абиогенной сульфатредукции в большом количестве (пирит, вторичные минералы в трещинах, порах и кавернах, углеродистое вещество (или ОВ, так называемый кероген) и признаков процессов данной реакции (перекристаллизация, доломитизация, выщелачивание, приводящие к формированию пор, каверн и полостей различного размера, сульфатизация и т.д.) позволяет относить их к прямым поисковым признакам УВ в данном конкретном месте в настоящее время или в геологическом прошлом.

Зоны максимальных вторичных изменений, растворения и соответственно гипогенного карста в карбонатах обычно ожидаются в местах наибольших тектонических деформаций при наличии возможностей активной циркуляции агрессивных гидротермальных флюидов и УВ, мигрирующих по разломам. Схожие условия могут наблюдаться в том числе и в районах выступов кристаллического фундамента, существование которых предполагает наличие окаймляющих данные выступы глубинных разломов, которые могут являться путями интенсивной миграции УВ и других флюидов. Необходимо также отметить, что масштабные процессы гипогенного карста, приводящие к растворению и сильнейшим вторичным, постседиментационным изменениям карбонатов, часто нивелируют и уничтожают следы трещиноватости (залеченные вторичными минералами трещины) и других тектонических деформаций карбонатов, происходивших на предшествующих этапах формирования месторождений подобного типа. Однако на

некоторых участках, где гидротермальные флюиды были предположительно менее агрессивными, следы тектонических деформаций лучше сохраняются (зеркала скольжения, трещины отрыва и т.д.). Более слабая агрессивность воздействующих флюидов может быть объяснена меньшим объемом УВ, участвующих в реакциях абиогенной сульфатредукции. Соответственно данные участки могут рассматриваться как менее перспективные.

Карбонатные коллекторы поднадвиговых зон, попавшие под воздействие крупных поверхностей срыва при определенных тектонических процессах и затем вторичных преобразований, а также при наличии других необходимых условий могут аккумулировать значительные залежи УВ. Например, одно из таких условий — отсутствие непосредственно над осинским горизонтом траппов мезозойского возраста, которые, внедрившись в триасовый период в осадочную толщу на различных уровнях, могли препятствовать надвиговым процессам скольжения вдоль поверхности потенциального сместителя и таким образом блокировать дальнейшее формирование залежей нефти и газа в данном конкретном районе поисков. Либо триасовые траппы, внедрившиеся вдоль различных разломов, поверхностей напластования, в том числе различных поверхностей скольжения или срыва, могли затруднять процессы вторичных изменений карбонатных пород, замедляя полноценную циркуляцию гидротермальных растворов, что блокировало развитие постседиментационных процессов вторичных изменений карбонатов и, соответственно, дальнейшее формирование залежей нефти.

Выводы

Сопоставление всего комплекса геолого-геофизических данных на территории исследования Непско-Ботубобинской антеклизы позволяет сделать вывод, что на некоторых разрабатываемых месторождениях в осинских карбонатах усольской свиты развиты новые, нестандартные типы залежей нефти и газа Сибирской платформы, образующиеся в поднадвиговых зонах. Формирование карбонатных коллекторов осинского горизонта данных месторождений происходило под воздействием различных процессов как тектонической, так и постседиментационной природы. Эти факторы включали как наличие тектонических деформаций в результате влияния масштабных надвиговых процессов на разных уровнях разреза, деформировавших осинский горизонт усольской свиты, так и развитие интенсивных процессов постседиментационных изменений, в том числе процессов гипогенного (глубинного) карста. Эти процессы происходили в результате реакций абиогенной сульфатредукции под влиянием коррозионно-агрессивных, высокотемпературных, гидротермальных флюидов, приводящих к формированию

зон аномально высоких фильтрационно-емкостных свойств, аккумулирующих УВ в промышленно извлекаемых объемах.

В некоторых районах Непско-Ботуобинской антеклизы в кембрийских карбонатных породах значительно развиты карстовые процессы растворения и выщелачивания и, соответственно, различные карстовые формы (карстовые полости и пещеры, воронки, каверны различного размера, зоны усиленного растворения вдоль разломов и зон напластования и т. д.). Гипогенный карст оказывает существенное влияние на пространственное распределение фильтрационно-емкостных свойств карбонатных коллекторов. С одной стороны, наличие карста усложняет изучение и моделирование карбонатных коллекторов, но, с другой стороны, понимание его распределения открывает хорошие перспективы для поисков зон повышенной пористости и проницаемости и объясняет повышенные

(ураганные) дебиты из некоторых пробуренных скважин. Понимание распределения карста в пределах уже разрабатываемых месторождений имеет критическое значение для выбора методов и приоритетов разработки, бурения, гидроразрыва пласта, гидродинамического моделирования и т. д.

Значительные мощности карбонатно-галогенно-сульфатных формаций раннепалеозойского возраста, сочетающие в себе возможности развития карбонатных коллекторов с высокими фильтрационно-емкостными свойствами и идеальных покрышек (соли), наличие многочисленных поверхностей надвигового скольжения на различных уровнях разреза, гигантские площади распространения данных пород и процессов открывают хорошие перспективы для поиска новых подобных типов залежей нефти и газа в пределах зон сочленения Сибирской платформы и складчатых поясов.

Литература / References

1. Александров В.К. Надвиговые и шарьяжные структуры Прибайкалья. – Новосибирск : Наука, 1990. – 100 с.
Aleksandrov V.K. Thrust and overthrust structures in Baikal Lakeside. Novosibirsk: Nauka; 1990. 100 p.
2. Вилесов А.П., Боброва О.В., Максимова Е.Н. Литолого-фациальное строение осинского пласта Верхнечонского месторождения (нижний кембрий, Восточная Сибирь) // Фациальный анализ в нефтегазовой литологии: тр. II регионального совещания, посвященного 100-летию со дня рождения Л.Н. Ботвинкиной. – Томск : Изд-во ЦППС НД, 2012. – 358 с.
Vilesov A.P., Bobrova O.V., Maksimova E.N. Lithofacies of the Osinsk formation in the Verkhnechonsky field (Lower Cambrian, Eastern Siberia). Fatsial'nyy analiz v neftegazovoy litologii: tr. II regional'nogo soveshchaniya, posvyashchennogo 100-letiyu so dnya rozhdeniya L.N. Botvinkinoy. Tomsk: Izd-vo TSPPS ND, 2012. 358 p.
3. Воробьев В.С., Иванюк В.В., Вилесов А.П. Прогноз перспективных зон развития коллекторов в осинском продуктивном горизонте на основе материалов сейсморазведки и реконструкции истории геологического развития // Геология нефти и газа. – 2014. – № 3. – С. 3–16.
Vorobyev V.S., Ivanyuk V.V., Vilesov A.P. Prediction of perspective reservoir zones in the Osinsk formation of the Verkhnechonsky field (Lower Cambrian, Eastern Siberia). Geologiya nefiti i gaza. 2014;(3):3–16.
4. Гайдук В.В., Прокопьев А.В. Методы изучения складчато-надвиговых поясов. – Новосибирск : Наука, 1999. – 160 с.
Gayduk V.V., Prokopyev A.V. Methods for fold and thrust belt investigations. Novosibirsk: Nauka; 1999. 160 p.
5. Сметанин А.В. Предбайкало-Патомский надвиговой пояс // Геология нефти и газа. – 2000. – № 1. – С. 14–20.
Smetanin A.V. Fore-Baikal-Patom thrust belt. Geologiya nefiti i gaza. 2000;(1):14–20.
6. Шемин Г.Г. Геология и перспективы нефтегазоносности венда и нижнего кембрия центральных районов Сибирской платформы (Непско-Ботуобинская, Байкитская антеклизы и Катангская седловина). – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2007. – 467 с.
Shemin G.G. Geology and petroleum potential of Vendian and Lower Cambrian of the central Siberian Platform regions (Nepsey-Botuobinsky, Baikitsky antecises, and Katangsky saddle). Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2007. 467 p.
7. Юсупова И.Ф. Глубинный карст и геодинамическая дестабилизация недр [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://hydropetroleum.ru/conference/teoret/teo62.pdf> (дата обращения 23.09.2016).
Yusupova I.F. Deep karst and geodynamic destabilization of the subsurface. Available at: http://hydropetroleum.ru/conference/teoret/teo62.pdf (accessed 23.09.2016).
8. Boyer S., Elliot D. Thrust systems. *AAPG Bull.* 1982;66(9):1196–1230.
9. Chunfang Cai, Richard H. Worden, Simon H. Bottrell, Lansheng Wangd, Chanchun Yanga. Thermochemical sulphate reduction and the generation of hydrogen sulphide and thiols (mercaptans) in Triassic carbonate reservoirs from the Sichuan Basin, China. *Chemical Geology.* 2003;(202):39–57.
10. Machel H.G. Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings — old and new insights. *Sedimentary Geology.* 2001;140(1):143–175.
11. Nilfouroushan F., Pysklywec R., Cruden A. Sensitivity analysis of numerical scaled models of fold-and-thrust belts to granular material cohesion variation and comparison with analog experiments. *Tectonophysics.* 2012;(526–529):196–206.
12. Tcherepanov E.N., Droxler A.W., Lapointe P., Mohn K. Carbonate sequence stratigraphy of the Gulf of Papua mixed depositional system: Neogene stratigraphic signature and eustatic control. *Basin Research.* 2008;20(2):185–209.
13. Tcherepanov E.N., Droxler A.W., Dickens G. R., Bentley S. J., Peterson L.C., Beaufort L., Daniell J. Neogene evolution of the mixed carbonate-siliciclastic system in the Gulf of Papua. *Journal of Geophysical Research.* 2008;113(1). Doi:10.1029/2006JF000684.