

УГЛЕВОДОРОДНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ПАЛЕО- И СОВРЕМЕННЫХ НАДСУБДУКЦИОННЫХ ОБЛАСТЕЙ: ТЕКТОНИЧЕСКИЙ, ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ, МИНЕРАЛОГОО-ГЕОХИМИЧЕСКИЙ И БИОХИМИЧЕСКИЙ АСПЕКТЫ

Ю.Н. Разницин, Г.Н. Савельева, М.А. Федонкин

ФГБУН Геологический институт РАН, Пыжжевский пер. 7, г. Москва, 119017

e-mail: razn46@mail.ru

Поступила в редакцию 7 июля 2017 г.

Статья посвящена комплексному анализу сложной междисциплинарной проблемы происхождения углеводородного потенциала надсубдукционных областей. Предложена геодинамическая модель формирования залежей нефти и газа на шельфах мезозойско-кайнозойских задуговых бассейнов на западе Тихого океана. В сравнительном плане приводятся оригинальные данные по тектонике и вещественному составу мантийных перидотитов офиолитовых массивов Полярного Урала. На их основе рассматриваются процессы серпентинизации перидотитов в задуговых бассейнах и в мантийных клиньях над зонами субдукции палеозойского Палеоуральского океана – низкотемпературной лизардит-хризотиловой и высокотемпературной антигоритовой, соответственно. Устанавливается связь с этими процессами абиогенного синтеза водорода и метана. Важное теоретическое и прикладное значение имеют выводы о большой древности процессов серпентинизации в качестве источника водорода, о вероятной связи процессов происхождения жизни и ее ранней эволюции с зонами водородной эмиссии в бентали, о доминанте хемоавтотрофных прокариот с водородным обменом среди первичных продуцентов органического вещества в анаэробных условиях и о высокой вероятности нафтидогенеза на основе прокариотных сообществ в архее и протерозое. Происхождение углеводородов в рамках развиваемой модели рассматривается с позиций полигенетической парадигмы нефте- и газообразования.

Ключевые слова: серпентинизация, перидотиты, абиогенные углеводороды, офиолиты, задуговые бассейны, надсубдукционная обстановка, шельф, океан, океаническая литосфера.

ВВЕДЕНИЕ

Открытые в 90-е годы прошлого столетия ассоциированные с мантийными перидотитами активные гидротермальные поля в осевой части медленноспредингового Срединно-Атлантического хребта (САХ), принадлежащие глубинной циркуляционной системе [3], характеризуются интенсивными эмиссиями водорода и метана, которые рассматриваются многими исследователями в качестве возможных источников углеводородов, например [6, 8, 32]. Эти поля, расположенные в Центральной Атлантике, тяготеют к участкам «сухого» спрединга, где мантийные образования выведены в верхние горизонты коры в сферу седиментации по пологим глубинным срывам (detachment faults) в процессе тектонического расслаивания океанической литосферы [23, 24], с получением доступа к морской воде, которая проникая по трещинам и тектоническим срывам в породы низов коры–верхов

мантии, инициирует серпентинизацию мантийных перидотитов, трансформируясь при этом в углеводородные флюиды, вырывающиеся на поверхность дна в виде факелов «черных курильщиков» на участках разгрузки гидротермальных систем. Такой своеобразный конвейер обеспечивает непрерывную «прокачку» морской воды через толщу ультраосновных пород, давая на выходе огромные количества водорода и метана. Однако накопления этих газов в залежи не происходит из-за отсутствия в осевой части САХ осадочного чехла в качестве флюидоупора.

Иную ситуацию можно предположить для задуговых впадин окраинных морей активных континентальных окраин, представляющих собой «малые» океанические бассейны, в которых «офиолитовый» фундамент вместе с гидротермальными полями и «черными курильщиками» перекрыт мощными толщами осадков, под которыми продолжают процесс

сы серпентинизации. При этом углеводородные флюиды не рассеивались бы в водах океана и в атмосфере, а формировали залежи внутри осадочного чехла этих бассейнов. В такой обстановке серпентинизация ультрамафитов может происходить как непосредственно в задуговых бассейнах, так и в мантийном клине над зоной субдукции. Значительная глубина серпентинизации и, следовательно, мощность ультрамафитов, вовлеченных в процесс, позволяют предполагать более высокую продуктивность надсубдукционных областей по выходу водорода и метана на единицу площади по сравнению с открытой рифтовой зоной САХ.

Целью исследования является разработка новой геодинамической модели формирования углеводородных систем в надсубдукционных областях – в осадочных задуговых бассейнах и в мантийных клинах над зоной субдукции современных и древних активных континентальных окраин – с учетом интенсивной водородной эмиссии и ведущей роли абиогенного синтеза углеводородов, а также прокариотной биоты в качестве первичного продуцента органического вещества.

ФОРМИРОВАНИЕ УГЛЕВОДОРОДНОГО ПОТЕНЦИАЛА ЗАДУГОВЫХ БАССЕЙНОВ – ТЕКТОНИЧЕСКИЙ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ АСПЕКТЫ

Как следует из анализа геологической карты Мира, задуговые впадины окраинных морей окажутся протяженными офиолитовыми поясами, входящими в систему покровов аккреционных структур, шарьированных со стороны впадин на смежные окраины континентов (микроконтинентов). Можно даже сказать, что в данном случае мы имеем закономерно повторяющуюся тектонопару, наподобие пары островная дуга–глубоководный желоб. Такая картина невольно наталкивала на мысль о взаимосвязях становления офиолитовых аллохтонов и образования сопредельных задуговых впадин, что и было показано в работах [2, 22].

Наши исследования тектоники и геодинамики офиолитовых аллохтонов и смежных глубоководных впадин на западной периферии Тихого океана и в Карибском бассейне выявили пространственно-генетические связи между тектоническим становлением офиолитовых аллохтонов, входящих в состав аккреционных структур, обрамляющих впадины, и образованием самих впадин за счет растяжения литосферы под ними. Такое растяжение обусловлено внедрением крупных мантийных диапиров под впадинами [7 и мн. др.]. Было показано, что различные элементы офиолитовых аллохтонов представляют собой фрагменты океанической коры и верхов мантии сопредельных

глубоководных впадин. При этом возраст образования океанической коры впадин устанавливался по возрасту базальтовой части офиолитового разреза. В процессе последующей эволюции новообразованная океаническая кора перекрывается островодужно-океаноморскими вулканогенно-осадочными комплексами, которые формируются также в условиях растяжения.

Растяжение во впадинах компенсируется интенсивным сжатием на их периферии и выплесками фрагментов меланократового фундамента впадин в виде аллохтонных масс на смежные континентальные структуры (микроконтиненты). Этот процесс, протекающий в рамках концепции тектонической расслоенности литосферы, приводит к формированию аккреционных структур в обрамлении впадин в виде центробежно-вергентных складчато-надвиговых поясов с офиолитовыми аллохтонами [7].

Сценарий всех этих событий показан на рис. 1, где предусмотрены два варианта. В первом образовании впадин происходит за счет деструкции континентальной

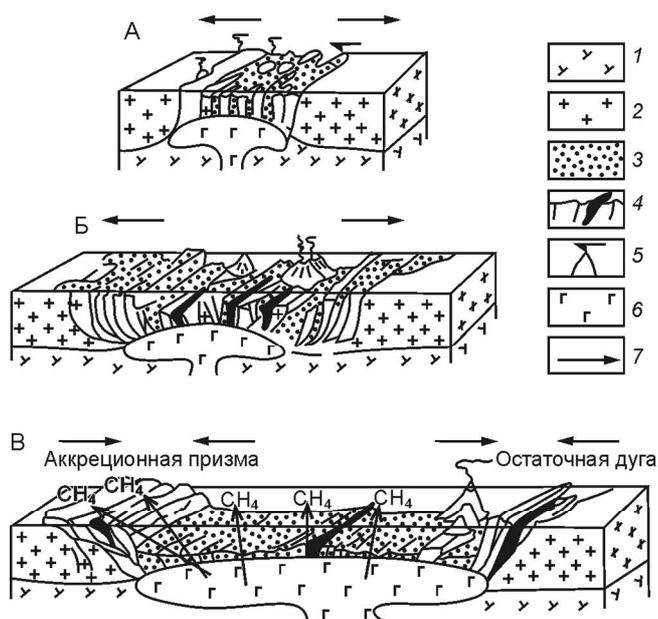


Рис. 1. Принципиальная модель образования задуговой впадины окраинного моря и формирования ее углеводородного потенциала.

Стадии развития: А – разуплотнение и деструкция коры с появлением грабенов, выполненных вулканическими породами, Б – диффузный спрединг с образованием офиолитовых комплексов и остаточных островных дуг, В – формирование зрелой впадины с зонами тектонического скупивания в аккреционных призмах; 1 – мантия; 2 – континентальная или океаническая кора доспредигового возраста; 3 – вулканические породы, 4 – офиолиты; 5 – вулканические цепи; 6 – мантийный диапир; 7 – направления растяжения–сжатия. Стрелками CH_4 показаны перемещения углеводородных флюидов.

нентальной коры в условиях растяжения литосферы. Второй вариант подразумевает заложение впадин на океанической коре, также в режиме растяжения.

Схема становления углеводородного потенциала шельфов задуговых впадин сводится к следующему. До своего разобшения и включения в состав аккреционных структур в обрамлении впадин, офиолитовые аллохтоны входили в состав меланократового фундамента впадин. Фундамент формировался в результате диффузного спрединга (упорядоченные полосовые магнитные аномалии во впадинах, как правило, не установлены), имеющего «сухой» характер и протекавшего в условиях низкой продуктивности магматизма. «Сухой» спрединг обусловил вывод мантийных ультрамафитов на поверхность дна рифтовых зон в сферу седиментации по пологим глубинным срывам, приуроченным к границе кора-мантия, с доступом к морской воде. Подобные выводы сделаны на основании постоянного присутствия в составе серпентинитовых меланжей офиолитов и океанского дна включений офикальцитов – тектонических брекчий, состоящих из обломков тектонизированных ультрамафитов в карбонатном цементе [13, 22, 24, 39]. Серпентинизация мантийных перидотитов обеспечивалась за счет их взаимодействия с морской водой и сопровождалась выделением водорода и метана. Но в отличие от САХ, где имеет место спрединг центрального типа, диффузный спрединг во впадинах обеспечил формирование множества каналов инфильтрации морской воды и дренирования водорода и метана из серпентинитового субстрата, что в значительной степени увеличивало выход этих газов на поверхность дна.

Как уже отмечалось выше, растяжение во впадинах компенсировалось сжатием и обдукцией фрагментов верхней мантии и океанической коры впадин в виде офиолитовых аллохтонов на смежные микроконтиненты. Процесс тектонического становления складчато-надвиговых поясов в обрамлении впадин сопровождался тектоническим нагнетанием и накачкой абиогенных углеводородов, дренированных из серпентинитов фундамента впадин, в корневые зоны офиолитовых аллохтонов. Эти зоны, располагающиеся в пределах шельфов впадин, маркируемые интенсивными положительными магнитными аномалиями [26, 27] (рис. 2), сопровождаются серией глубинных надвигов с крутыми падениями в верхних частях осадочного разреза шельфов и выполаживающимися с глубиной при приближении к мантии депоцентов впадин. Существование подобных зон подтверждено гравиметрическими исследованиями в районах остров Новой Каледонии и Палавана и сопредельных глубоководных впадин Новокаледонской и Сулу – макси-

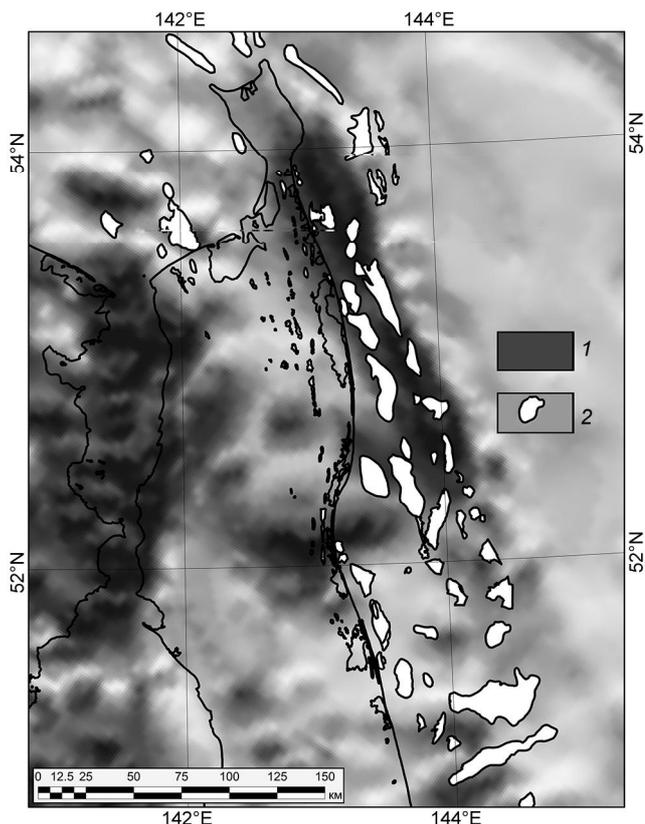


Рис. 2. Местоположение месторождений углеводородов и перспективных структур на шельфе Северо-Восточного Сахалина, с использованием [12, 20].

1 – Восточно-Сахалинская магнитная аномалия; 2 – месторождения углеводородов и перспективные структуры.

мумы положительных гравитационных аномалий Буге смещены в сторону впадин относительно офиолитовых аллохтонов, развитых на островах [52].

Компенсационное горизонтальное сжатие приводит также к латеральной миграции углеводородов (УВ) в сторону фланговых частей впадин и к формированию нефтегазовых месторождений в верхах осадочного разреза шельфов в принадвиговых и поднадвиговых ловушках [26, 34]. Латеральная миграция усиливается благодаря отжиму поровых и связанных вод при уплотнении и разогреве в наиболее погруженных частях впадин. Освобождающиеся таким образом воды вместе с углеводородами перемещаются вдоль напластований осадочных пород от осей впадин к их флангам [6].

Этот процесс постоянно подпитывается миграцией углеводородных флюидов по трещинам и разломам из фундамента центральных частей впадин, где под осадками продолжают происходить серпентинизации. Таким образом, впадины являются нефтегазосборными площадями для залежей углеводородов на их шельфах.

Масштабы генерации углеводородов увеличиваются за счет высокого теплового потока, идущего от приближенных к подошве литосферы впадин горячих мантийных диапиров [7] и активизирующего процессы переработки рассеянной органики, содержащейся в осадочных чехлах впадин, в углеводороды. Таким образом, есть все основания говорить о полигенности и возобновляемости углеводородных ресурсов на шельфах задуговых впадин окраинных морей. В последние годы накоплен обширный фактический материал, свидетельствующий о полигенности нефти и газа, обеспечивающей сосуществование в месторождениях нефти органического происхождения и абиогенных УВ, а также об их возобновляемости [6, 9].

В основе классической осадочно-миграционной модели нефтегазообразования лежит представление о том, что процесс рождения углеводородов медленный, происходит на протяжении миллионов лет. Поэтому залежи нефти и газа сторонники этой модели рассматривают как невозполнимые – другими словами, малая скорость образования залежей УВ несопоставима со скоростью извлечения нефти и газа при эксплуатации месторождений, а углеводороды рассматриваются как невозполняемые минеральные ресурсы.

Возобновляемость углеводородных ресурсов в связи с абиогенным синтезом водорода и метана постулируется исследователями – сторонниками «глубинной нефти». По мнению выдающегося геолога-нефтяника В.П. Гаврилова [6], любая залежь жидких или газообразных углеводородов – это некая динамически равновесная, но в то же время открытая диссипативная система, способная к самовосстановлению в относительно короткое время, измеряемое годами. В качестве иллюстрации возобновляемости ресурсов на конкретном примере приведем результаты мониторинга в области субмаринной разгрузки метана на западном борту впадины Дерюгина, где сосредоточены все месторождения углеводородов в пределах шельфа Северо-Восточного Сахалина. Здесь в придонной воде в 1987 г. было обнаружено резкое увеличение фоновых и аномальных концентраций метана: до этого года фоновые концентрации составляли 30–40 нл/л, а аномальные – 300–400 нл/л; после 1987 г. фоновые концентрации метана увеличились в 2–3 раза, аномальные же в 10 и более раз [17].

Известно, что в природных условиях метан разных генотипов может смешиваться и в результате этого приобретать некий промежуточный изотопный состав, определяемый долей смешиваемых генотипов. Согласно результатам масс-спектрометрических анализов, метан, растворенный в водах присахалинского шельфа, представлен смесью ярко выраженной термо-

генной компоненты ($\delta^{13}\text{C} - 35\text{‰}$) и изотопно-легкого микробиального газа ($\delta^{13}\text{C} - 77\text{‰}$) с преобладанием термогенного (нефтяного) газа [37]. Последнее обстоятельство объясняется приуроченностью выходов пузырей метана и его аномальных концентраций к районам месторождений нефти и газа, из которых по зонам разломов и трещинам мигрирует метан, тяжелые углеводороды и другие газы [19]. Доля же изотопно-тяжелого абиогенного метана ($\delta^{13}\text{C} - 15-18.2\text{‰}$), в рамках нашей модели генерируемого при серпентинизации мантийных перидотитов в смежной впадине Дерюгина, не определяется, вероятно, потому, что при вертикальной и латеральной миграции через толщу кайнозойских осадков, перекрывающих офиолитовый фундамент впадины, абиогенные углеводороды с тяжелыми изотопами углерода могут «облегчаться», меняя тяжелый изотопный состав углерода на более изотопно-легкий. Подобное «облегчение», обусловленное миграцией изотопно-тяжелого метана в осадочные толщи, установлено уже достаточно давно [4].

В рамках рассмотренной выше схемы становления углеводородного потенциала шельфов окраинных морей (задуговых впадин) нашло свое объяснение формирование залежей углеводородов на шельфах мезозойско-кайнозойских глубоководных впадин на западе Тихого океана: Дерюгина в Охотском море, Новокаледонской и Сулу, а также Юкатанской в Карибском регионе [25–27]. При этом на южном шельфе Кубы и в средней и южной частях восточно-сахалинского шельфа прогнозировались новые нефтегазоносные провинции.

Так, сейсморазведка 3D на Киренском блоке позволила получить информацию о строении и свойствах дислоцированного фундамента, предположительно сложенного серпентинитами и серпентинитовым меланжем. Были выявлены многочисленные каналы миграции метана из фундамента. Оценка локализованных ресурсов в ловушках последнего показывает возможность формирования здесь уникальных скоплений УВ [36].

Обнаружение скоплений углеводородов в серпентинитах прогнозируется на всем шельфе Восточного Сахалина [34]. Таким образом, серпентиниты выступают не только в роли «нефтематеринских» пород, но и сами могут содержать крупные скопления нефти и газа. Примером могут служить многочисленные нефтяные месторождения Южной нефтегазоносной провинции Кубы и самое крупное из них – ассоциированное с серпентинитовым массивом месторождение Мотембо, с которого в конце 19-го века и началась добыча кубинской нефти [27, 50].

Заканчивая раздел, посвященный сахалинскому шельфу, необходимо обратить внимание еще на

одно обстоятельство. Изучение состава и физико-химических свойств нефтей месторождений Северного Сахалина – Восточного Эхаби, Эхаби, Колендо и Центральная Оха – показало, что они содержат тяжелую нефть, характеризуются высоким содержанием асфальтенов и смол, являются высоковязкими и требуют для транспортировки смешения с маловязкими нефтями [16]. В то же время, всего в двух-трех десятках километров восточнее, на мелководном шельфе Северо-Восточного Сахалина месторождения проектов Сахалин-1 и Сахалин-2 характеризуются легкими нефтями [34], отличающимися невысокими плотностью и вязкостью, а также низким содержанием серы. Это обстоятельство позволяет предполагать существование двух различных источников УВ. Хотя информация о природе фундамента Северного Сахалина практически отсутствует, все же можно предположить, что источник, генерирующий тяжелые нефти Северного Сахалина, вероятно, связан с мощным разрезом морских верхнемеловых осадков, состоящих из глинистых и песчаных разновидностей, подстилающих кайнозойский нефтегазоносный этаж. Тем более, что при испытании скважин из отложений красноярковской свиты позднемелового возраста в пределах юго-западного Сахалина были получены притоки минерализованных вод с растворенным газом, пленками нефти и притоками сухого газа с содержанием тяжелых УВ, вплоть до бутана (C_4H_{10}) [33].

Второй источник, генерирующий легкие нефти на шельфе Северо-Восточного Сахалина, располагается, как мы показали выше, в пределах впадины Дерюгина – позднемелового задугового бассейна, в котором происходила и происходит сегодня генерация abiогенных углеводородных флюидов за счет серпентинизации мантийных перидотитов.

Доказательства принципиальной возможности существования масштабных процессов генерации abiогенного метана при серпентинизации ультрамафитов на дне окраинных и межматериковых морей получены недавно в спрединговом центре трога Кайман, ограничивающего Юкатанскую впадину с юга. Здесь, в основании западного борга рифта и в верхней части рифтовых гор обнаружены мощные метановые факелы с характерными низкими отношениями Mn/CH_4 [46], являющимися диагностическим признаком присутствия на дне активных гидротермальных полей, ассоциированных с серпентинитами. Наглядный пример в этом отношении представляет островодужная система Тонга в юго-западной части Тихого океана, где выявлены высокие содержания углеводородных газов и водорода во всех ее морфоструктурах, независимо от состава и возраста пород в них – на океаническом склоне желоба, на самой дуге, в преддуговом и задуго-

вом бассейнах. В этих морфоструктурах обнаружены серпентинизированные гарцбургиты, которые могут являться источником abiогенных углеводородов, и известные проявления нефти в этом регионе [18].

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЙ АСПЕКТ СЕРПЕНТИНИЗАЦИИ

В мире существует обширнейшая литература, как отечественная, так и зарубежная, посвященная процессам серпентинизации, которая сегодня стала предметом пристального внимания исследователей. В последние годы появились работы, в которых рассматривается тектоническое значение серпентинизации в различных геодинамических обстановках, например [47].

Ультраосновные породы – перидотиты – составляют основной объем верхней мантии Земли, входят в состав верхней мантии всех современных океанов и окраинных морей активных континентальных окраин, а также древних реликтов океанической коры (офиолитов), вскрытых в складчатых поясах континентов и в аккреционных структурах, обрамляющих задуговые впадины. Перидотиты представляют собой мантийные рститы, т.е. тугоплавкий высокомагнезиальный остаток после отделения базальтов из мантийного вещества. Рститы на 75–80 % состоят из оливина $(Mg,Fe)_2SiO_4$ и 15–20 % пироксенов – орто – $(Mg,Fe)_2Si_2O_6$ и клино – $Ca(Mg,Fe)Si_2O_6$. Акцессорный минерал представлен хромшпинелидом; иногда присутствуют сульфиды никеля и минералы платиновой группы. Оливин легко гидратируется в коровых условиях, и этот сложный многоступенчатый процесс носит общее название серпентинизации.

Роль серпентинизации мантийных ультраосновных пород в геологических процессах огромна:

1) высокая пластичность серпентинитов играет роль смазки при перемещении гигантских масс пород при формировании различных тектонических структур в земной коре – шарьяжей, надвигов, меланжей, протрузий, серпентинитовых «швов» и т.д;

2) пространственная ассоциация рудных гидротермальных полей с выходами серпентинитов на океанском дне наряду с данными о геохимии и минералогии пород и флюидов/гидротерм указывает на генетическую связь серпентинизации с процессами формирования рудных залежей;

3) серпентинизация является причиной эмиссии огромных объемов водорода и метана, участвующих в abiогенном синтезе углеводородов на дне океана;

4) серпентинизация ультраосновных пород в надсубдукционных зонах вносит существенный вклад в формирование петролого-геохимических характеристик магм и пород;

микротрещины внутри зерна, и именно они являются каналами гидратации оливина. Рекристаллизованный оливин с мелкозернистой полигональной структурой не серпентинизируется, в отличие от крупнозернистого оливина в той же породе, что поддерживает представление о связи петельчатой структуры массовой серпентинизации со снятием накопленных дислокаций в крупном зерне оливина. На самом раннем этапе гидратации оливина в петельчатых прожилках образуются железистый бледнозеленый α -хризотил и брусит без оксидов железа; аксессуарный хромшпинелид в перидотитах и дунитах с этим типом серпентинизации остается свежим – он не замещается магнетитом. По мере снижения температуры и дальнейшей гидратации α -хризотил и брусит сменяются бесцветным γ -хризотилом и магнетитом, развитым по центру прожилков; аксессуарный хромшпинелид замещается по периферии зерен и по трещинам магнетитом. Формирование этой новой ассоциации нередко происходит локально, в зонах трещиноватости и циркуляции воды/ флюида в ультраосновных породах. На поздних этапах серпентинизации, сопровождающих надвиговые деформации в коре, агрегаты и прожилки серпентина с магнетитом развиваются, в первую очередь, на границах зерен и по трещинам, пересекающим породу. Этот процесс протекает при более высокой (относительно раннего этапа) фугитивности кислорода. При температуре ниже 300 °С продукты серпентинизации представлены γ -хризотилом, секториальным лизардитом, магнетитом, маггемитом. В ходе всех этих стадий серпентинизации выделяется водород.

Прямые свидетельства выделения водорода при низкотемпературной серпентинизации были получены в эксперименте, проведенном в Университете г. Гренобль, Франция [51]. Порошок лерцолита (оливин + энстатит + диопсид + хромшпинель) в присутствии дистиллированной воды при $T = 300$ °С и $P = 300$ бар (0.3 кб) за 70 дней полностью переходит в серпентин (лизардит). Детальные измерения, включая газовую хроматографию и различные рентгеновские методы, показали, что переход двухвалентного железа в трехвалентную форму в силикатах при серпентинизации обеспечивает до 30 % всего выделяющегося водорода, тогда как другие 70 % водорода выделяются при образовании магнетита.

Высокотемпературная серпентинизация. Образование оливин-антигоритовых пород по перидотитам многими исследователями соотносится с процессами, происходящими исключительно над зонами субдукции. Этот вывод подтверждается наблюдениями в современных океанических структурах – многочисленными находками антигоритовых серпентинитов в

глубоководных желобах и почти полным отсутствием их в срединно-океанических хребтах.

В Войкаро-Сыньинском массиве на фоне преобладающих сравнительно однородных массивных гарцбургитов и дунитов с остаточными структурами высокотемпературных мантийных деформаций зоны ультраосновных метаморфитов амфибол-антигорит-оливинового состава с массивными, ячеистыми, гнейсовидными и сланцеватыми текстурами выделяются очень четко. Метаморфиты образуют зоны резко переменной мощности, от 10 до 500 м, с юго-восточным, реже – восточным падением под углами от 5° до 50° и пологим склонением линейности на восток-юго-восток. Перидотиты со структурами вязко-пластического мантийного течения неравномерно охвачены петельчатой серпентинизацией, не нарушающей текстуры пород. Зоны ультраосновных метаморфитов пересекают эти деформационные структуры и ориентированы субсогласно с залеганием высокобарических метаморфитов в подошве аллохтона. Это обстоятельство указывает на существование причинной связи между образованием ультраосновных метаморфитов и перемещением перидотитов из мантии в кору. Метаморфиты сложены, в основном, антигорит-оливиновыми и сопутствующими им амфибол-оливиновыми и тальк-оливиновыми породами по гарцбургитам. Дуниты, присутствующие среди этих пород, рекристаллизованы, часто с образованием пегматоидных текстур, пироксениты оталькованы и амфиболизированы. Зоны оливин-антигоритовых метаморфитов имеют асимметричное строение: в их кровле присутствуют тела совершенно свежих перидотитов, окруженных массивными амфибол ± тальк-антигорит-оливиновыми породами, а в подошве всегда развиты гнейсовидные, интенсивно развальцованные оливин-(антофиллит)-антигоритовые сланцы. Асимметричная структура зон и резкое усиление сланцеватости пород в их подошве еще раз подтверждает причинную связь транспортировки мантийных масс с гидратацией перидотитов и формированием ультраосновных метаморфитов.

Установлен следующий ряд сменяющихся минеральных парагенезисов: оливин + энстатит + диопсид ± паргасит → оливин вторичный + амфибол (антофиллит, тремолит) + тальк + оливин → тальк + антигорит + оливин ± диопсид → антигорит-оливиновая порода → антигорит-оливиновый сланец. Этот ряд ранее рассматривался в обратном порядке – как прогрессивный, возможно, с полной дегидратацией пород и образованием совершенно свежих перидотитов [28].

Новые аналитические данные показали, что свежие несерпентинизированные гарцбургиты и лер-

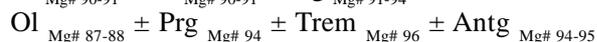
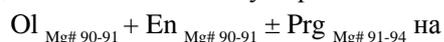
цолиты имеют петрографические и геохимические характеристики типичных абиссальных мантийных перидотитов, а дуниты, пироксенитовые жилы в мантийном разрезе и прилегающие к ним перидотиты – геохимические характеристики пород, сформировавшихся над зоной субдукции [1, 38]. Учитывая эти обстоятельства, а также рассмотренные структурные соотношения пород, например, сетка прожилков талька и антигорита в свежих перидотитах, мы относим свежие гарцбургиты к исходной породе, вовлеченной в регрессивный процесс высокотемпературной гидратации.

Материалы по геологии и геохимии Войкаро-Сыньинского массива [1, 28, 38] свидетельствуют о том, что область формирования мантийных перидотитов Полярного Урала располагалась в преддуговом бассейне. После завершения ранней истории формирования мантийного разреза происходило движение мантийных масс к желобу. Следовательно, вероятной областью начала процесса гидратации могла быть литосферная мантия, расположенная над зоной субдукции.

Стабильность антигорита в системах $MgO-SiO_2-H_2O$ и $MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ (реакция антигорит = форстерит + клиноэнстатит + вода) ограничена в водонасыщенных условиях диапазоном температур 630–650 °С при давлении 1.6 ГПа и 620–660 °С при давлении 2.5 ГПа. В присутствии оксида алюминия эта реакция идет в диапазоне температур 660–700 °С при давлении 2.0 ГПа и 660–680 °С при давлении 2.9 ГПа [40]. Сходные ограничения для условий устойчивости антигорита получены и другими исследователями, например [45, 48, 59], показавшими, что распад антигорита (переход его в хлорит) происходит при температуре 680–710 °С и давлении 1.6–1.9 ГПа. Оценки условий метаморфизма, полученные при изучении реальных геологических объектов, например в [55, 56], хорошо согласуются с результатами экспериментов и численного моделирования условий гидратации ультрамафитов при разных температурах и давлении [45, 48, 59]. Парагенезисы оливин-антигорит и оливин-хлорит формируются и остаются устойчивыми на глубинах до 100 км при температуре до 650–700 °С, представляя (вместе с хлорит- и амфибол-оливиновыми породами) наиболее характерные ультраосновные метаморфиты субдуцирующего слэба. Подобный высокотемпературный метаморфизм перидотитов рассматривается в перечисленных работах как прогрессивный процесс, происходящий в ходе их погружения, сопровождаемого ростом давления и температуры.

Идентификация высокотемпературной гидратации в качестве регрессивного процесса по струк-

турно-минералогическим признакам (см. выше) подтверждается анализами минералов на микрозонде и термодинамическими расчетами и происходила по следующей схеме. Дегидратация серпентинитов и осадков в слэбе обуславливает формирование потока летучих компонентов, основным из которых является вода. Этот поток поднимается в породы мантийного клина над слэбом и вызывает высокотемпературную гидратацию мантийных перидотитов на глубинах 100–20 км. Одна из ранних метаморфических реакций в перидотитах Войкаро-Сыньинского массива представляет собой смену парагенезиса



(анализы минералов выполнила В.Г. Батанова на микроанализаторе JEOL-8230, ISTERre, Гренобль, Франция (символы минералов: Ol – оливин, En – энстатит, Prg – паргасит, Trem – тремолит, Antg – антигорит; Mg# – магнезиальность). На основе полученных составов минералов М.В. Меркуловой [30] были сделаны термодинамические расчеты (метод Терияк-Домино), которые показали, что гарцбургиты и лерцолиты, содержащие редкие зерна паргасита, устойчивы при давлении 1.5–1.2 ГПа и температуре 900–850 °С. При снижении температуры и давления в присутствии паров воды образуются метаморфические парагенезисы, область устойчивости которых ограничена давлением в интервале 1.2–0.9 ГПа и температурой 600–550 °С.

На рис. 4 схематически показано положение областей формирования ультраосновных метаморфитов в мантийном клине над зоной субдукции и нанесены области устойчивости антигоритовых серпентинитов и «хлоритовых гарцбургитов». Принимая во внимание оценки условий гидратации перидотитов и наши данные по Полярному Уралу, можно утверждать, что в исходных перидотитах ранняя реакция гидратации начинается при давлении около 1.5 ГПа (глубина 50–60 км) и температуре в интервале 650–600 °С. Положение мантийного домена, где начиналась гидратация перидотитов в мантийном клине, обозначено цифрами 1 и 2 на рис. 4 и на рис. 5. Сближенное положение доменов 1 и 2 отражает резкую (в пределах нескольких метров) смену метаморфических парагенезисов в кровле зон, где амфибол-антигорит-оливиновые породы сменялись тальк-антигорит-оливиновыми, с различным количеством высокомагнезиального амфибола двух-трех генераций и двумя генерациями оливина.

Мантийные домены 3 и 4 на глубинах 30–35 км и 20–15 км, соответственно, над погружающимся слэбом сложены, в основном, антигорит-оливиновыми породами: домен 3 – массивными породами с мелкими реликтами свежих перидотитов, домен 4 – оливин-

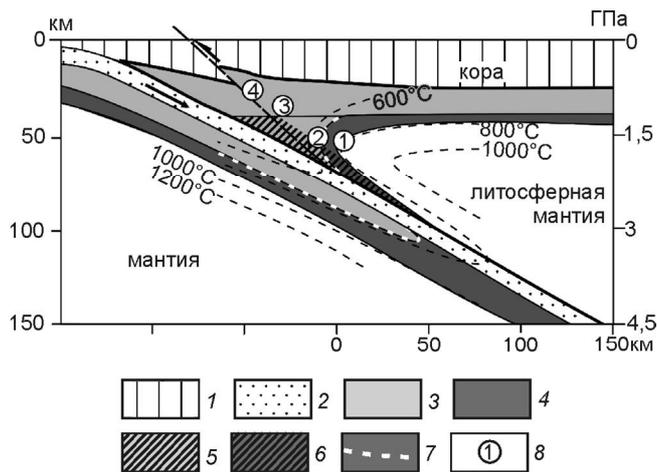


Рис. 4. Положение областей формирования ультраосновных метаморфитов в мантийном клине над зоной субдукции. Области устойчивости антигоритовых серпентинитов и «хлоритовых гарцбургитов» показаны по работам [39, 47, 54].

1 – островодужная кора, 2 – океаническая кора слэба, 3 – серпентинизированные (антигорит) ультрамафиты; 4 – «хлоритовые гарцбургиты» со структурами спинифекс и роговиковыми; 5 – область устойчивости антигорита в мантийных гарцбургитах надсубдукционного клина; 6 – область устойчивости магнезиального хлорита в мантийных гарцбургитах надсубдукционного клина; 7 – граница распада антигорита; 8 – участки литосферной мантии, для которых определены *P-T* условия гидратации.

антигоритовыми сланцами. Образование фронта гидратации сопровождалось увеличением объема пород и повышением температуры. Эти процессы повышали пластичность мантийных масс и способствовали их выведению в кору: пластичные оливин-антигоритовые сланцы служили «рельсами» для выведения мантийных глубинных масс в верхние горизонты коры. В численной модели расслоения океанической коры в надсубдукционной области ведущая роль отводится ослабленному серпентинитовому горизонту [60]. Рассматриваемый нами случай принципиально отличается от этой модели тем, что процесс детачмента на границе кора–мантия происходит не в субдуцируемом слэбе, а в мантийном клине над зоной субдукции. Возможно, именно этим объясняется присутствие гигантских слабо дезинтегрированных масс мантийных перидотитов в полярноуральских офиолитах. По мере выведения перидотитов в кору температура и общее давление гидратации снижаются, но давление флюида и стресс в локальных приподошвенных зонах возрастают.

Обобщенная реакция серпентинизации оливин + энстатит + $H_2O = \text{серпентин} + \text{магнетит} + H_2$ в системе $MgO-FeO-SiO_2-H_2O$ сопровождается выделением водорода как в коровых условиях (низкотемператур-

ная lizardit-хризотиловая серпентинизация), так и в литосферной мантии надсубдукционной области, где образуется антигорит (высокотемпературная серпентинизация). Выделяющийся при серпентинизации водород участвует в абиогенном синтезе метана в присутствии растворенного в воде CO_2 .

Современным примером метаморфизма перидотитов в мантийном клине над зоной субдукции является Марианская конвергентная окраина неаккреционного типа, где, начиная с эоценового времени, Марианская микроплита приведена в непосредственный контакт с субдуцирующей Тихоокеанской плитой [61]. Здесь между осью желоба и вулканической островной дугой в полосе шириной около 100 км располагаются так называемые «серпентинитовые грязевые вулканы». Эти грандиозные горные сооружения конической формы, достигающие 50 км в диаметре и

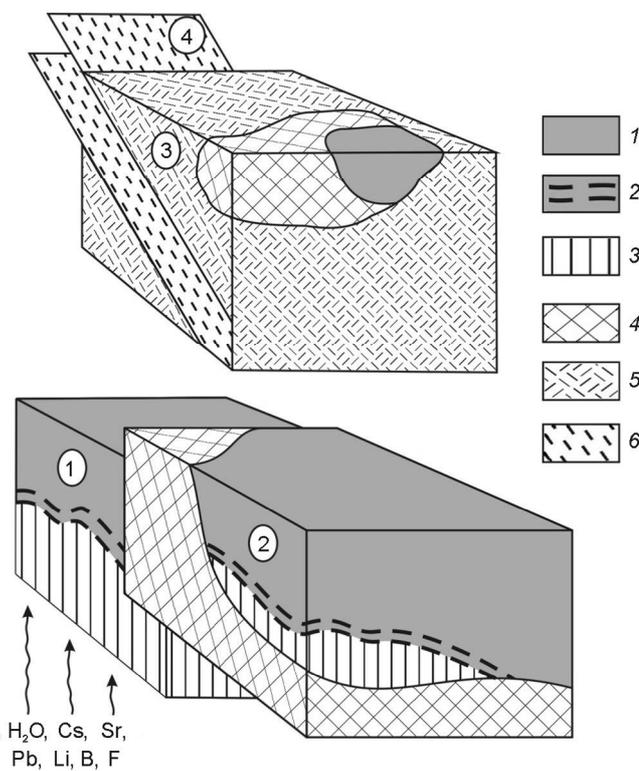


Рис. 5. Схема гидратации мантийных перидотитов, расположенных над зоной субдукции в участках (доменах), показанных цифрами в кружках 1–4 на рис. 4.

1 – свежие перидотиты (гарцбургиты, лерцолиты); 2 – фронт гидратации перидотитов – отдельные прожилки антигорита, талька, амфибола в свежих перидотитах; 3 – густая сеть прожилков антигорит±тальк±амфибол-оливинового состава в свежих перидотитах; 4 – массивные апоперидотитовые породы с двумя генерациями оливина + амфибол+антигорит±тальк; 5 – массивные антигорит-оливиновые породы; 6 – гнейсовидные породы и сланцы антигорит-оливинового, иногда – антофиллит-оливинового состава.

возвышающиеся над дном внутреннего склона желоба почти на 2.5 км, представляют собой протрузии серпентинитов надсубдукционной природы, содержащие обломки и «окатыши» пород Марианской и Тихоокеанской плит: гарцбургитов, антигорит-содержащих перидотитов, хризотиловых, лизардитовых и антигоритовых серпентинитов, голубых, амфиболовых, тремолитовых и хлоритовых сланцев, разнообразных островодужных и океанических метабазитов, меловых кремнистых сланцев [61]. Подводящими каналами для ультращелочных (рН до 12.5) флюидов, выносящих большое разнообразие различных элементов (K, Rb, Cs, Mn, Fe, Co, Eu, Ca, Sr, LREE), а также водород и метан неорганического происхождения, образовавшихся в результате, как полагают авторы [61], реакции дегидратации в погружающемся слэбе и обеспечивающих экстремальные условия существования микробных сообществ Archaea и Bacteria, являются глубинные разломы, проникающие до поверхности срыва (*décollement*), по которому Тихоокеанская плита погружается под Марианскую [42, 44, 61]. Наличие жил хризотила и/или лизардита в антигоритсодержащих образцах говорит о цикличности процесса серпентинизации и свидетельствует о подъеме антигоритсодержащих перидотитов, образовавшихся на глубинах порядка 25 км, к поверхности дна [53].

СЕРПЕНТИНИЗАЦИЯ – БИОХИМИЧЕСКИЙ АСПЕКТ

В ходе всех стадий серпентинизации мантийных перидотитов происходит интенсивная эмиссия водорода. Водород является субстратом жизнедеятельности разнообразных прокариот, прежде всего метангенерирующих архей [33]. Активному водородному метаболизму способствует высокая концентрация ионов тяжелых металлов (Fe, W, Ni и других активаторов ферментов водородного метаболизма – гидрогеназ) в зонах разгрузки гидротерм и в поровых водах. Таким образом, общий объем генерируемого метана является также результатом водородного метаболизма, а не только реакции водорода с углекислотой, растворенной в морской воде. Это обстоятельство в еще большей степени влияет на увеличение общего количества выделяющегося метана при серпентинизации перидотитов как в открытом океане, так и в надсубдукционной геодинамической обстановке в задуговых бассейнах. Высокая продуктивность прокариотной биоты (биомасса и биогенный метан) указанных биотопов в большой степени определяют углеводородную перспективность пористых горных пород и осадков, залегающих над зоной субдукции. При этом главным фактором преобразования метана, водорода и сероводорода в более сложные углеводороды является именно жизнедеятельность бактерий,

потребляющих метан, водород и сероводород, поскольку abiогенный метан служит пищевой базой для бактерий, а уже последние создают органические вещества, из которых в дальнейшем образуются и нормальные углеводороды [15].

Еще один аспект изучения процессов серпентинизации связан с проблемой возникновения жизни на Земле. Так, в источниках гидротермального поля Лост Сити в САХ были обнаружены представители прокариотных групп Archea и Eubacteria, характерные для древнейшего Хадейского океана (4.5–3.9 млрд лет) [49]. Специфика этого поля определяется его приуроченностью к крупному ультраосновному массиву Атлантис на 30° с. ш., расположенному в районе пересечения рифтовой долины и трансформного разлома Атлантис. Archea и Bacteria обнаружены также в щелочных флюидах серпентинитовых вулканов в преддуговой области Марианской островодужной системы (см. выше). В настоящее время ультраосновные породы (включая серпентиниты) рассматриваются в качестве одного из возможных субстратов зарождающейся жизни в условиях древнейшей Земли [33, 42, 43, 44, 57, 58 и мн. др.].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Данное исследование представляет собой разработку новой геодинамической модели формирования углеводородных систем в надсубдукционных областях современных и древних активных континентальных окраин с учетом интенсивной водородной эмиссии в окраинных морях и ведущей роли abiогенного синтеза углеводородов, а также прокариотной биоты в качестве первичного продуцента органического вещества. Стержневой частью модели является серпентинизация мантийных перидотитов.

Построение модели основано на результатах наших многолетних исследований мезозойско-кайнозойских задуговых бассейнов и обрамляющих офиолитовых поясов на западной периферии Тихого океана: в морских экспедициях в Охотском и Филиппинском морях, в Центральной и Северной Атлантике, во время полевых исследований на Сахалине и Камчатке. По литературным материалам изучались офиолитовые аллохтоны о-в Новой Каледонии, Палавана, Калимантана и смежные глубоководные впадины – Новокаледонская и моря Сулу. В сравнительном плане приводятся оригинальные данные по тектонике и вещественному составу мантийных перидотитов палеозойских офиолитовых массивов Полярного Урала. На их основе рассматриваются процессы серпентинизации перидотитов в задуговых бассейнах и в мантийных клиньях над зонами субдукции Палеоуральского

океана – окраинного моря более широкого Палеоазиатского океана.

Существенными элементами нашей модели являются: пространственно-генетические связи между тектоническим становлением офиолитовых аллохтонов, входящих в состав аккреционных складчато-надвиговых поясов, обрамляющих задуговые впадины, и образованием этих впадин за счет растяжения литосферы в результате внедрения мантийных диапиров и подъема кровли астеносферы, сопровождаемых многоступенчатой серпентинизацией с обильным выделением водорода и метана на всех стадиях этого процесса; идентификация офиолитовых аллохтонов в качестве фрагментов коры и верхней мантии этих впадин; абиогенная генерация углеводородов за счет продуктов серпентинизации мантийных образований, выведенных в верхнюю часть корового разреза впадин в процессе рассеянного «сухого» спрединга; тектоническое нагнетание углеводородов, дренированных из серпентинитов фундамента впадин в корневые зоны офиолитовых аллохтонов по глубинным надвигам, и, наконец, формирование залежей нефти и газа на шельфах впадин, в верхних частях осадочного чехла в принадвиговых и поднадвиговых ловушках.

Необходимо указать и на другие источники водородной эмиссии на дне океана и окраинных морей, помимо ассоциированных с перидотитами, обеспечивающие общий баланс абиогенных углеводородов. В срединно-океанических хребтах, как в медленно-спрединговых (САХ), так и в быстроспрединговых (Восточно-Тихоокеанское поднятие – ВТП), а также в задуговых центрах спрединга широко развиты гидротермальные системы с «черными курильщиками», ассоциированные с базальтами. Они представлены локальными аномалиями в морской воде, связанными с действующими высокотемпературными (до 400 °С) гидротермальными источниками [8, 14]. Однако содержание в них водорода и метана по сравнению с источниками, связанными с серпентинитами, в разы меньше.

Важным аспектом работы является сравнительное изучение тектонических, геодинамических, минералогических и биохимических процессов в литосфере, связанных с молодыми и древними надсубдукционными зонами. Получены чрезвычайно ценные результаты в ходе изучения палеозойских офиолитов Полярного Урала, где пространственно обособлены области с разным типом гидратации (серпентинизации) перидотитов: низкотемпературной и высокотемпературной, протекавших в двух различных геодинамических обстановках, различающихся диапазонами температуры и давления – непосредственно в заду-

говых бассейнах и в мантийных клиньях над зоной субдукции.

В заключение отметим, что последнее десятилетие характеризуется нарастающим числом публикаций, посвященных абиогенному глубинному генезису углеводородов. В частности, в работах уральских геологов на основании экспериментальных данных показано, что наличие в нефтях биомаркеров – углеводородов, сохранивших характерные черты исходных биоорганических соединений, приобретено абиогенными углеводородами при миграции через осадочные породы [10, 11]. Более того, развиваемые авторами этих работ представления дают основания отказаться от такого требования, как обязательное наличие «нефтематеринских толщ» в разрезе конкретного района для его промышленной нефтегазоносности. В этом же контексте был сделан вывод об «ультрабазитовой» геохимико-металлогенической специализации нефти Западной Сибири и Татарстана и поддержано предположение об ее глубинном происхождении [10].

Абиогенный генезис углеводородов был в числе основных проблем, разрабатываемых в рамках крупной международной программы «Deep carbon cycle» (США), результаты исследований по которой опубликованы в обширной коллективной монографии [41]. В России, начиная с 2012 года, проводятся ежегодные Кудрявцевские Чтения в рамках Всероссийских конференций по глубинному генезису нефти, последняя из которых (2016 г.) была посвящена формулировке современного варианта новой парадигмы глубинного абиогенно-мантийного происхождения нефти и газа [5].

Настоящая работа является шагом на пути к созданию такой парадигмы. Основные выводы работы сводятся к следующему.

1. Углеродородный потенциал надсубдукционных областей обеспечивается прежде всего за счет серпентинизации мантийных перидотитов – низкотемпературной коровой непосредственно в задуговых бассейнах и высокотемпературной – в мантийном клине над зоной субдукции;

2. Ранняя высокотемпературная гидратация перидотитов проходила в литосферной области мантийного клина непосредственно над погружающимся слэбом в интервале глубин 50–60 км при температуре 700–800 °С. Основная часть метаморфитов – оливин-антигоритовые породы – формировалась при температуре 600–650 °С и давлении 1.2–0.9 ГПа.

3. Процесс метаморфизма в мантийном клине над зоной субдукции является регрессивным.

4. Низкотемпературная петельчатая лизардит-хризотиловая серпентинизация ультрамафитов в за-

дуговых бассейнах проходила в коровых приповерхностных условиях и вызвана тектоническими процессами, будучи обусловлена механизмом скупивания и горизонтальным тектоническим расслаиванием океанической коры и верхов мантии;

5. Как высокотемпературная, так и низкотемпературная серпентинизация мантийных перидотитов сопровождалась обильным выделением водорода, участвующего в абиогенном синтезе метана в присутствии растворенного в воде CO_2 ;

6. Водород является субстратом жизнедеятельности разнообразных прокариот, прежде всего метангенерирующих архей. Высокая продуктивность прокариотной биоты (биомасса и биогенный метан) в большой степени определяют углеводородную перспективность пористых горных пород и осадков в надсубдукционных областях;

7. Происхождение углеводородов в рамках развиваемой модели рассматривается с позиций полигенетической парадигмы нефте- и газообразования и возобновляемости ресурсов УВ в надсубдукционных областях;

8. Важное теоретическое и прикладное значение имеют выводы о большой древности процессов серпентинизации в качестве источника водорода, о вероятной связи процессов происхождения жизни и ее ранней эволюции с зонами водородной эмиссии в бентали, о доминанте хемоавтотрофных прокариот с водородным обменом среди первичных продуцентов органического вещества в анаэробных условиях и о высокой вероятности нефтидогенеза на основе прокариотных сообществ в архее и протерозое.

Благодарности. Авторы выражают благодарность академику Ю.М. Пушаровскому за постоянное внимание к данному исследованию, а также Т.Н. Кушнарева за помощь в оформлении рисунков. Авторы признательны рецензентам, замечания и предложения которых способствовали улучшению работы и более четкому изложению материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 12–05–00113, 13–05–00136, 15–05–00497, гранта ведущих научных школ НШ-2981.2014.5 и программы Президиума РАН № 30.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоусов И.А., Батанова В.Г., Савельева Г.Н., Соболев А.В.. Свидетельства надсубдукционной природы мантийных пород Войкаро-Сыньинского массива, Полярный Урал // Докл. АН. 2009. Т. 421, № 2. С. 238–243.
2. Богданов Н.А. Тектоника глубоководных впадин окраинных морей. М.: Недра, 1988. 221 с.
3. Богданов Ю.А. Гидротермальные рудопроявления Срединно-Атлантического хребта. М: Науч. мир, 1997. 167 с.
4. Валяев Б.М., Титков Г.А., Чудецкий М.Ю. О генезисе изотопно-легкого ($\delta^{13}\text{C}$, δD) метана нефтегазовых месторождений // Дегазация Земли и генезис углеводородных флюидов и месторождений. М.: ГЕОС, 2002. С. 108–134.
5. Всероссийская конференция по глубинному генезису нефти и газа. 5-е Кудрявцевские Чтения. Москва, ЦГЭ, 17–19 октября 2016 г. // <http://conference.deerpoil.ru>.
6. Гаврилов В.П. Геодинамика: Учебник для вузов. М.: МАКС Пресс, 2007. 346 с.
7. Гончаров М.А., Короновский Н.В., Разницин Ю.Н., Свалова В.Б. Вклад мантийного диапиризма в процесс формирования новообразованных впадин Средиземноморья и Карибского региона и окружающих центробежно-вергентных складчато-покровных орогенов // Геотектоника. 2015. № 6. С. 80–93.
8. Дмитриев Л.В., Базылев Б.А., Силантьев С.А., Борисов М.В., Соколов С.Ю., Буго А. Образование водорода и метана при серпентинизации мантийных гипербазитов океана и происхождение нефти // Рос. журн. наук о Земле. 1999. Т. 1, № 6. С. 1–13.
9. Дмитриевский А.Н. Полигенез нефти и газа // Докл. АН. 2008. Т. 419, № 3. С. 373–377.
10. Иванов К.С., Федоров Ю.Н., Ерохин Ю.В., Кучеров В.Г., Петров Л.А., Погромская О.Э., Шишмаков А.Б., Битлов К.Ш. Нефть – продукт ультрабазитовой мантии Земли: Материалы третьей междунар. конф. «Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей и связанные с ними месторождения, 28 августа–2 сентября 2009 г.». Тюмень–Новосибирск, 2009. С. 200–202.
11. Иванов К.С. Экспериментальная проверка – является ли наличие биомаркеров в нефтях доказательством их органической природы? (нет, не является!) // 5-е Кудрявцевские Чтения: Всерос. конф. по глубинному генезису нефти и газа. Москва, ЦГЭ, 17–19 октября 2016 г. // conference.deerpoil.ru/images/stories/docs/5KR/Theses/Ivanov_Theses-2.pdf.
12. Карта аномального магнитного поля России и прилегающих акваторий. 1:5 000 000. СПб.: ВСЕГЕИ, 2004.
13. Книппер А.Л. Офикальциты и некоторые другие типы брекчий, сопровождающие доорогенное становление офиолитового комплекса // Геотектоника. 1978. № 2. С. 50–63.
14. Краюшкин В.А. Небиогенная нефтегазоносность современных центров спрединга дна Мирового океана // Геология и полез. ископаемые Мирового океана. 2008. № 3. С. 19–39.
15. Леин А.Ю., Сагалевиц А.М. Курильщики поля Рейнбоу – район масштабного абиогенного синтеза метана // Природа. 2000. № 8. С. 44–53.
16. Насыбуллина А.Ш., Пивсаева Е.В., Хамидулина Ф.Ф. Изучение состава и реологических свойств нефтей Сахалина для решения проблем их транспортировки // <http://cyberleninka.ru/article/v/izuchenie-sostava-i-reologicheskikh-svoystv-neftey-sahalina-dlya-resheniya-problem-ih-transportirovki>.
17. Обжиров А.И., Астахов А.С., Астахова Н.В. Генезис и условия формирования аутигенных карбонатов в четвертичном осадочном чехле района Сахалино-Дерюгинской газовой аномалии (Охотское море) // Океанология. 2000. Т. 40, № 2. С. 280–288.
18. Обжиров А.Н., Пушин И.К., Коровицкая Е.В. Распреде-

- ние водорода и угледородных газов в системе Тонга // Тихоокеан. геология. 2012. Т. 31, № 4. С. 87–92.
19. Обжиров А.Н., Шакиров Р.Б., Мальцева Е.В., Гресов А.И., Сырбу Н.С., Окулов А.К. Распределение мептана в воде и донных осадках на восточном сахалинском побережье, шельфе и склоне Охотского моря // Вестн. ДВО РАН. 2012. № 6. С. 32–41.
20. Объяснительная записка к тектонической карте Охотоморского региона. 1:2 500 000. М.: Ин-т литосферы окраинных и внутренних морей РАН, 2000. 193 с.
21. Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.
22. Разницын Ю.Н. Офиолитовые аллохтоны и сопредельные глубоководные впадины на западе Тихого океана. М.: Наука, 1982. 105 с. (Тр. ГИН РАН; Вып. 371).
23. Разницын Ю.Н. Роль тектонического расслаивания литосферы в образовании гидротермальных полей и метановых факелов в Атлантическом океане // Геотектоника. 2003. № 6. С. 1–15.
24. Разницын Ю.Н. Тектоническая расслоенность литосферы молодых океанов и палеобассейнов. М.: Наука, 2004. 270 с. (Тр. ГИН РАН; Вып. 560).
25. Разницын Ю.Н. Геодинамика тектонопар офиолитовые аллохтоны – сопредельные глубоководные впадины и формирование месторождений угледородов на западе Тихого океана: Материалы IXX Междунар. конф. (школы) по морской геологии. М.: ГЕОС, 2011. С. 101.
26. Разницын Ю.Н. Геодинамика офиолитов и формирование месторождений угледородов на шельфе Восточного Сахалина // Геотектоника. 2012. № 1. С. 3–18.
27. Разницын Ю.Н. Перспективы нефтегазоносности и геодинамическая модель формирования угледородных залежей на южном шельфе Кубы // Докл. АН. 2014. Т. 456, № 6. С. 699–702.
28. Савельева Г.Н. Габбро-ультрабазитовые комплексы офиолитов Урала и их аналоги в современной океанической коре. М.: Наука, 1987. 243 с. (Тр. ГИН АН СССР; Вып. 404).
29. Савельева Г.Н., Соболев А.В., Батанова В.Г. Океанические комплексы Полярного Урала в складчатом обрамлении Западно-Сибирского бассейна: Материалы Всерос. науч. конф. с участием иностранных ученых «Фундамент, структуры обрамления Западно-Сибирского мезо-кайнозойского осадочного бассейна, их геодинамическая эволюция и проблемы нефтегазоносности, 29 сентября–2 октября 2008 г.». Тюмень–Новосибирск, 2008. С. 179–181.
30. Савельева Г.Н., Разницын Ю.Н., Меркулова М.В. Метаморфизм перидотитов в мантийном клине над зоной субдукции: гидратация в литосферной мантии // Докл. РАН. 2016. Т. 468, № 1. С. 62–64.
31. Силантьев С.А., Мироненко Н.В., Новоселов А.А. Гидротермальные системы в перидотитовом субстрате медленно-спрединговых хребтов. Моделирование фазовых превращений и баланса вещества: нисходящая ветвь // Петрология. 2009. Т. 17. С. 154–174.
32. Сорохтин О.Г. Жизнь Земли. М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»; Институт компьютерных исследований, 2007. 452 с.
33. Федонкин М.А. Роль водорода и металлов в становлении и эволюции метаболических систем // Проблемы зарождения и эволюции биосферы. М.: Кн. дом «Либроком», 2008. С. 417–437.
34. Харахинов В.В. Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: Науч. мир, 2010. 276 с.
35. Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов (год 2000). М.: Науч. мир. 2001. 606 с.
36. Черепанов В.В., Рыбальченко В.В., Гогоненков Г.Н. Мезозойский фундамент – перспективное направление поисков угледородов на шельфе Сахалина // Геология нефти и газа. 2013. № 6. С. 34–45.
37. Шакиров Р.Б., Сырбу Н.С., Обжиров А.И. Изотопно-геохимические особенности распределения метана и углекислого газа на о. Сахалин и прилегающем шельфе // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. Вып. 20. № 2. С. 100–113.
38. Batanova V., Belousov I., Savelieva G., Sobolev A. Consequences of channelised and diffuse melt transport in supra-subduction mantle: evidence from Voykar ophiolite (Polar Urals) // Jour. Petrol. 2011. V. 52, N 12. P. 2483–2521.
39. Bonatti E., Emilliani C., Ferrara G., Honnorez J., Rydell H. Ultramafic-carbonate breccias from the Equatorial Mid-Atlantic Ridge // Mar. Geol. 1974. V. 17. P. 83–102.
40. Bromiley G.D., Pawley A.R. The stability of antigorite in systems MgO-SiO₂-H₂O-(MSH) and MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O (MASH): The effects of Al³⁺ substitution on high-pressure stability // Amer. Mineralogist. 2003. V. 88. P. 99–108.
41. Carbon in Earth. Reviews in mineralogy and geochemistry // Miner. Soc. Amer., Geochem. Soc. 2013. V. 75. 698 p.
42. Curtis A.C., Wheat C.G., Frier P., Mayer G.L. Mariana forearc serpentinite mud volcanoes Harbor Novel Communities of extramorphic Arhaea // Geomicrobiol. Jour. 2013. V. 30. P. 430–441.
43. Evans B. E. Lizardite versus antigorite serpentinite: Magnetite, hydrogen, and life (?) // Geol. 2010. V. 38. P. 879–882.
44. Fryer P., Gharib J., Ross K., Savov I., Mottl M.J. Variability in serpentinite mudflow mechanisms and sources: ODP drilling results on Mariana forearc seamounts. // Geochem., Geophys., Geosyst. 2006. 7. Q08014, doi:10.1029/2005GC001201.
45. Gerya T. V., Yuen D. A. Rayleigh-Taylor instabilities from hydration and melting propel «cold plumes» at subduction zones // Earth Planet. Sci. Lett. 2003. V. 212. P. 47–62.
46. German C.R., Bowen A., Coleman M.L., Honig D.L., Huber J.A., Jakuba M.Y., Kinsey J.C., Leroy S., McDermott J.M., Mercier de Leping B., Nakamura K., Seewald J.S., Smith J.L., Sylva S.P., Van Dover C.L., Whitcomb L.L., Yoeger D.R. Divers styles of submarine venting on the ultraslow spreading Mid-Cayman Rise // PNAS. 2010. V. 107, N 32. P. 14020–14025.
47. Guillot S., Schwartz S., Reynard B., Agard Ph., Prigent C. Tectonic significance of serpentinites // Tectonophysics. 2015. V. 646. P. 1–19.
48. Hacker B. R., Peacock., Abers G.A., Holloway S.D. Subduction factory. 2. Are intermediate-depth earthquakes in subducting slabs linked to metamorphic dehydration reactions? // Journ. Geophys. Res. 2003. V. 108, N B1. 2003. doi:10.1029/2001JB001129.
49. Kelley D.S., Karson J.A., Früh-Green G.L., Yoerger D.R., Shank T.M., Butterfield D.A., Hayes J.M., Schrenk M.O., Olson E.J., Proskurowski G., Jakuba M., Bradley A., Larson B., Ludwig K., Glickson D., Buckman K., Bradley A.S., Brazelton W.J., Roe K., Elend M. J., Delacour A., Bernasconi S.M.,

- Lilley M.D., Baross J.A., Summons R.E., Sylva S.P. A serpentinite-hosted ecosystem: the Lost City hydrothermal field // *Science*. 2005. V. 307, N 5714. P. 1420–1422.
50. Levis J.W. Occurrence of oil in igneous rocks of Cuba // *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.* 1932. V. 6, N 8. P. 809–818.
51. Marcaillou C., Munoz M., Vidal O., Parra T., Harfouche M. Mineralogical evidence for H₂ degassing during serpentinization at 300 °C/300 bar // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2011. V. 303. P. 281–290.
52. Milsom J., Barretto J., Aguda N., Bringas D., Ho R., Aitchison J. The gravity fields of Palawan and New Caledonia: insights into the subsurface geometries of ophiolites // *Jour. Geol. Soc.* 2009. V. 166. P. 985–988. doi: 10.1144/0016-76492009-067.
53. Murata K., Maekava H., Yokose H., Yamamoto K., Fujioka K., Ihii T., Chiba H., Wada Y. Significance of serpentinization of wedge mantle peridotites beneath Mariana forearc, western Pacific // *Geosphere*. 2009. V. 5. P. 90–104. DOI: 10.1130/GES00213.1
54. Nicolas A., Boudier F., Bochez J. Interpretation of peridotite structures from ophiolitic and oceanic environments // *Amer. Jour. Sci.* 1979. V. 279. P. 192–210.
55. Padron-Navarta J.A., Sanchez-Vizcaino V. L., Garrido C.J., Gomez-Pugnaire M-T. Metamorphic record of high-pressure dehydration of antigorite serpentinite to chlorite harzburgite in a subduction setting (Cerro del Almirez, Nevado-Filabride Complex, Southern Spain) // *Journ. Petrol.* 2011. P.1–32.
56. Rossetti F., Glodny J., Theyec T., Maggi M. Pressure–temperature–deformation–time of the ductile Alpine shearing in Corsica: From orogenic construction to collapse // *Lithos*. 2015. N 218–219. P. 99–116.
57. Schulte M., Blake D., Hoehler T., McCollom T. Serpentinization and its implications for life on the Early earth and Mars // *Astrobiology*. 2006. V. 6, N 2. P. 364–376.
58. Sleep N.H., Meibom A., Fridricsson Th., Coleman R.G., Bird D.K. H₂-rich fluids from serpentinization: Geochemical and biotic implications // *PNAS*, 2004. V. 101, N 35. P. 12818–12823.
59. Trommsdorff V., Lopez Sanchez-Vizcano V., Gomez-Pugnaire M.T., Muntener O. High pressure breakdown of antigorite to spinifex-textured olivine and orthopyroxene, SE Spain // *Contrib. Miner. Petrol.* 1998. V. 132. P. 139–148.
60. Vogt K., Gerya T. V. Deep plate serpentinization triggers skinning of subducting slabs // *Geol.*, pub. online on 30 June 2014 as doi:10.1130/G355656.1.
61. Wheat C.G., Fryer P., Takai K., Hulme S. Spotlight 9: South Chamorro Seamount // *Oceanography*. 2010. V. 23, Is.1. P. 174–175.

Рекомендована к печати А.Н. Диденко

Yu.N. Raznitsin, G.N. Savelieva, M.A. Fedonkin

The hydrocarbon potential of paleo- and modern suprasubduction zones: tectonic, geodynamic, mineralogical-geochemical, and biochemical aspects

The paper deals with the integrated analysis of an interdisciplinary problem concerning the genesis of hydrocarbon potential of suprasubduction zones. A geodynamic model of formation of hydrocarbon potential in the Mesozoic backarc basins in the western Pacific is offered. A comparison is made on the original data obtained on tectonics and material composition of mantle peridotites of the Polar Ural ophiolite massifs. Based on these data, the serpentinization processes of the mantle peridotites in the backarc basins and in the mantle wedges above the subduction zones in the Paleozoic Paleo-Ural are considered, such as low-temperature lizardite-chrizotile and high-temperature antigorite processes. It was established that the abiogenic synthesis of hydrogen and methane is associated with these processes. Of great theoretical and applied importance are conclusions made on high antiquity of serpentinization processes as a hydrogen source, plausible connection of life origin on the Earth with zones of hydrogen emission in benthal, and high probability of naftidogenesis on the basis of prokaryotic communities in the Archean and Proterozoic. The origin of hydrocarbons within the model under consideration is discussed from a polygenetic paradigm of oil and gas generation.

Key words: serpentinization, peridotites, abiogenic hydrocarbons, ophiolites, backarc basins, suprasubduction setting, shelf, ocean, oceanic lithosphere.