

ГЕОДИНАМИЧЕСКИ ОБУСЛОВЛЕННАЯ МЕТАСОМАТИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ ПОРОД ПЛАТФОРМЕННЫХ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ СТРУКТУР

А.И. Никонов
ИПНГ РАН, e-mail: nikson59@rambler.ru

Введение

На сегодня в науках о Земле существуют альтернативные подходы к решению проблем первоначального состава газового (флюидного) режима планеты, изменения его интенсивности и степени воздействия на структурно-вещественное состояние пород мантии и земной коры в геологическом времени, роли водородной и углеводородной дегазации в формировании нефтегазовых месторождений, а также генезиса углеводородных систем и их локализации в литосфере. В связи с этим, постановка задач для данного исследования предполагает определение степени и роли восстановленных первичных флюидов во взаимосвязи с геодинамическими обстановками, происходящими в верхней мантии и земной коре, являющихся фактором формирования нефтегазовых систем в разных геолого-тектонических условиях. Естественно предположить, что при подъеме флюидов из мантии в верхние горизонты коры и осадочного чехла должны оставаться «следы» физико-химических процессов, зафиксированные в минералогических ассоциациях горных пород, не свойственных их катагенетическим и метагенетическим преобразованиям. Данные «следы» также должны проявляться в концентрациях и пространственном распределении микроэлементов, в гидрогеохимических аномалиях, во включениях флюидов в вакуолях, законсервированных в кристаллах и микротрещинах. Рассмотрение этих флюидов должно воссоздавать последовательность палеофизико-химических процессов преобразования вещества, как на стадии протоплатформенного режима, так и в послекембрийской истории планеты. Эти взаимосвязи позволяют объяснить нахождение различных форм твердого углерода и углеводородов в петрологических системах, метасоматические преобразования пород коры и осадочного чехла, образование соленосных формаций и т.п., что сегодня не удается объяснить с позиции кремний-кислородной модели Земли.

Накопившиеся до сегодняшнего времени данные по глубинной дегазации Земли в пределах территорий нефтегазовых бассейнов, а также материалы по выявлению метасоматических образований в породах нефтематеринских свит и нефтегазовых коллекторах могут быть истолкованы с позиции восстановительно-окислительной

«эволюции» водород-углеводородных газов, характер воздействия которых на преобразование горных пород тесно связан с интенсивностью проявления геодинамических процессов.

Выявленные масштабы метасоматизации горных пород в платформенных условиях в виде локальных зон, имеющих вертикально направленный характер, а также послышное их распространение совместно с залежами углеводородов, не позволяют объяснить их формирование с позиции катагенеза без активного участия глубинных восстановленных газов.

Первичные и вторичные флюиды в литосфере

Современные представления о формировании нефтегазовых месторождений в рамках только осадочно-миграционной теории в процессе преобразования захороненной органики без рассмотрения во времени генетической их связи с глубинной дегазацией Земли и геодинамическими процессами на основе широко распространенных гипотез ее образования, приведенных в обзоре [1], не дают ответа на главный вопрос – каким образом железо-никелевое ядро порождает водород-углеводородные флюиды. Какие процессы осуществляют их транспортировку к поверхности Земли и определяют изменение состава вещества и строение ее оболочек.

Ряд ученых полагают, что основные летучие компоненты магматических и метаморфических процессов, таких, как вода и уголекислота, выделяются из мантийных глубин и проникают в земную кору в виде готовых химических соединений. Существуют также представления о вторичной природе данных флюидов, которые являются продуктами различных химических реакций между водородом, углеводородами и кислородом, протекающих в земной коре в процессе ее формирования. Обзор данных представлений дается в работе [2].

Существующий сегодня фактический материал [3] позволяет определить тенденцию развития Земли с позиции проявления водород-углеводородной флюидизации, сменившейся затем щелочно-кремниевой.

С одной стороны, идея происхождения воды в земной коре принадлежит В.И. Вернадскому, который показал, что синтез и разложение молекул воды может происходить в больших масштабах при взаимодействии горючих газов с магматическими породами, полагая оксид и окись углерода вторичным ювенильным продуктом от чистого углерода (графита).

Последующее развитие эти идеи получили в работах А.И. Кравцова, А.А. Маракушева, Л.Л. Перчука, В.Н. Ларина, П.Ф. Иванкина и др.

С другой стороны, такими исследователями, как Ю. Чемберлен, В. Руби, О.Ю. Шмидт, А.Е. Ферсман, А.П. Виноградов, В.А. Соколов. и другими видными учеными разделялась точка зрения о проникновении воды и углекислоты в земную кору в виде готовых химических соединений с больших глубин (верхняя мантия) на основании изучения магматических и метаморфических процессов. Например, с позиции А.П. Виноградова, процесс дегазации аналогичен механизму зонной плавки, когда при разогревании вещества мантии происходит выплавление легкоплавкой фракции силикатов, обогащенной летучими компонентами, которые при движении вверх увлекают воду и другие плавни. Данные представления, связанные с кремний-кислородной моделью Земли, сегодня не удается увязать с фактами возрастания с глубиной «сухости» магматических пород и повышения активности летучих компонентов в продуктах мантийных выплавов (базитах и ультрабазитах), а также в типичных внутрикоровых образованиях – гранитах [2]. Важным несоответствием является то, что легколетучим компонентам в данной концепции отводится пассивная роль в энергетике геологических процессов, что противоречит основным закономерностям петрорудогенеза и проявлению геодинамических процессов.

Рассматривая доклад А.А. Маракушева и Л.Л. Перчука [4], в котором еще в 1971 г., несмотря на признание ими кремний-кислородной модели Земли, были изложены новые представления о роли первоначально восстановленных глубинных флюидов (CH_4 , H_2 , CO и др.), окисление которых по мере проникновения в верхние части мантии и земную кору происходило по схемам: $\text{CH}_4 \rightarrow \text{CO}$, $\text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$, $\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2$ и прочее. Степень окисления флюида и количество выделяемого при этих процессах тепла зависит от конкретных тектонических и геологических условий. Так, например, в структурах, окаймляющих геоантиклинальные поднятия, должны иметь место «холодные» процессы синтеза воды: $\text{CO} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$. В протогeosинклинальных и эвгeosинклинальных прогибах с базитовым магматизмом восстановленные формы газов (CH_4 , CO , H_2) преобладают над окисленными (H_2O , CO_2), что обуславливает низкие температуры метаморфизма и отсутствие гранитоидного магматизма. В терригенных геосинклиналях, богатых кислородосодержащими осадками, происходит интенсивное окисление флюидов, что

способствует массовому образованию воды и углекислоты и быстрому разогреву данных областей и последующей их гранитизации.

Важным этапом (1976–1991 гг.) создания научных основ, постановки задач и получения новых данных в вопросах изучения газового режима в земных недрах, а также синтеза воды и формирования рудных и углеводородных месторождений было проведение трех всесоюзных совещаний по теме «Дегазация Земли и геотектоника», проводившихся по инициативе и под руководством П.Н. Кропоткина. По данной тематике на совещаниях было представлено большое количество докладов, в которых уже в тот период времени ставились вопросы доминирующей роли глубинных флюидов с целью переоценки традиционных представлений в петрорудогенезе, соле- и нефтеобразовании. Эти совещания были продолжены в ИПНГ РАН под руководством академика А.Н. Дмитриевского и Б.М. Валяева (2008, 2010 гг.).

На основе нетрадиционных представлений, связанных с внутренним составом ядра Земли, включающего гидриды металлов, по данным В.Н. Ларина [5] и Н.П. Семеновко [6], снижение первоначальных сверхвысоких давлений и температур приводило к разложению гидридов, сопровождающемуся переходом водорода в протонный газ, осуществляя процесс водородной дегазации. На основе данного процесса, авторами предполагается, что ядро планеты состоит из гидридов металлов.

Присутствие водорода в ядре Земли, по мнению многих исследователей, долгое время вызывало дискуссию. Однако эксперименты, проведенные в 1992 г. Дж. Бэдингом, Х. Мао и Р. Хэмли [7], позволили установить, что гидрид железа FeH может сформироваться при высоких температурах и давлениях и оказывается устойчив при давлениях, превышающих 62 ГПа. Это соответствует глубинам ~1600 км. В этой связи авторы считают, что присутствие значительных количеств (до 40 %) водорода в ядре вполне допустимо и снижает его плотность до значений, согласующихся с данными сейсмогеофизики.

По данным Н.П. Семеновко, состав Земли в целом, вычисляемый как среднее из содержания гранитного и перидотитового слоев, пиролита мантии и гидридов ядра, определяется следующими элементами (%): O (30,6), Si (15,7), Al (4,1), Fe (6,2), Mg (8,9), Ca (2,6), Na (2,7), K (1,8) и H (2,4). В данной модели автор практически не пересматривает традиционное представление о кремний-кислородном составе верхних оболочек Земли, но считает, что в процессе развития Земли происходило ее периодическое сжатие,

приводящее к непрерывной инфильтрации водорода из глубоких недр, окислявшегося с образованием воды и углекислоты [6].

В противовес представлениям Н.П. Семеновко, концепция В.Н. Ларина строится на анализе современных данных космохимии Солнца, состава метеоритов и внешних геосфер Земли, где концентрация элементов на Земле изначально должна соответствовать их относительной распространенности на Солнце, а высокое содержание кислорода во внешних оболочках Земли связано с его перераспределением в процессе водород-углеводородной дегазации легких газов. В.Н. Ларин пересматривает средний состав Земли существенно иначе, чем Н.П. Семеновко, полагая, что он представлен следующими элементами (%): Si (45), Mg (31), Fe (12), Al (2), Ca (3), Na (1,5), O (1) и H (4,4), а другие металлы составляют доли процентов. Исходя из данного состава, автор дает новое толкование различным геохимическим и тектоническим режимам планеты в ранний архейский, протерозойский и рифей-фанерозойский этапы ее развития [5].

Главным в преобразовании вещества планеты В.Н. Ларин считает процесс распада гидридов за счет изменения термобарических условий, при которых происходит постоянная продувка его водородом. Данные потоки водорода на раннеархейской стадии выносили примесный кислород и другие элементы с последующим их накоплением во внешних геосферах с образованием силикатно-окисной верхней части земной коры. Предположения о происхождении повторяющихся пульсаций автор концепции связывает с этапами расширения и сжатия планеты.

Вынос водорода к поверхности приводил к захвату различных элементов и их химических соединений. В постоянно меняющихся термобарических условиях при движении к поверхности Земли происходила физико-химическая дифференциация вещества с последующей стадией его раскristаллизации и удаление из системы неравновесных элементов в виде газонасыщенных растворов и флюидов.

По нашему мнению, накопление в больших количествах растворенного в металлах водорода во внешней части первичной оболочки (в металлизированной части мантии) при последующем постепенном внешнем остывании планеты должно приводить к увеличению внутреннего давления, размягчению (аморфизации) и деформированию данной оболочки. Все это способствует интенсивной дегазации и движению вещества к поверхности Земли в пределах локальных областей, формирующих каналы (зоны проницаемости в мантии)

для продвижения по ним последующих порций водорода. Данные предположения также подтверждаются в работах [8, 9].

Связь процессов дегазации легких газов с составом пород

Наиболее приемлемым процессом дегазации легких газов с больших глубин может являться диффузия.

В данном случае речь может идти только об атомах внедрения: H, He, C, N, B, F, S, P и некоторых других, диффузия которых осуществляется по междоузельному механизму [10]. При этом важным является тот факт, что коэффициенты диффузии H и He на многие порядки превышают коэффициенты диффузии вышеприведенных элементов. Диффузия сложных соединений в кристаллических или аморфных структурах в недрах ниже границы Мохо происходить практически не может.

По мнению И.Л. Гуфельда [10], за геологическое время восходящие потоки легких газов, из которых наиболее активными являются водород и гелий, а также другие атомы внедрения, занимают устойчивые позиции в вакансиях и дефектах структуры мантийного вещества. Процесс растворения и диффузии этих газов в веществе мантии оказывает воздействие на плотностные, прочностные и структурные вариации параметров среды. Коэффициент их диффузии может достигать значений $D \approx 10^{-9} - 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ и существенно более высоких в диапазоне температур 600–200 °С. При движении флюида в направлении к поверхности Земли его температура будет уменьшаться вместе с коэффициентом диффузии, что приведет к образованию разного типа барьерных условий, ограничивающих процесс дегазации по вышеописанному механизму. Данный эффект способствует скоплению легких газов перед различными слабо- или непроницаемыми барьерами, начиная от границы Мохо.

Вышеприведенные представления позволяют создавать окислительно-восстановительные условия в разных пространственно-локализованных частях в пределах границ мантия–кора и земная кора–осадочный чехол.

Предлагаемая модель двухстадийного развития флюидов (1 и 2 стадии флюидной эволюции систем С-Н-О), по А.А. Маракушеву и С.А. Маракушеву [11], характеризуется внедрением водорода в пределы границ мантия–земная кора, далее земная кора–осадочный чехол. Когда водород по тектоническим или геодинамическим причинам не накапливается в слое горных пород, данное диспропорционирование водорода по отношению к другим компонентам приводит к образованию углекислых водных

растворов. Если существуют условия, препятствующие миграции водорода, то есть его накоплению в горизонтах под слабопроницаемыми породами, это приводит к разложению кислотных компонентов флюидов, чем и определяется щелочной характер магматизма.

Мера летучести кислорода как оценка окислительно-восстановительного состояния глубинного вещества

Значение летучести кислорода (fO_2) мантийных пород является отражением фундаментальных представлений, позволяющее судить с химической точки зрения о примитивном составе атмосферы газов, приносимых магмами к земной поверхности, на ранней стадии истории Земли [12, 13].

При рассмотрении разных точек зрения на процессы восстановительно-окислительных условий при образовании астеносферных и литосферных пород мантии (на разных этапах формирования Земли как планеты) значение летучести кислорода будет определять различный характер химической дифференциации магм в зависимости от присутствия в них флюидов, обогащенных H_2 и CH_4 или CO_2 и H_2O .

По данным измерений летучести кислорода, которые основаны на методах фазового равновесия, признается, что на современном этапе литосферные и астеносферные породы верхней мантии практически умеренно окислены [14]. Их значения fO_2 находятся выше условий равновесия с металлической фазой железа. Активность Fe^{+3} компонентов в минералах верхней мантии соответствует значениям fO_2 , которые определяют преобладание CO_2 и H_2O в составе глубинных флюидов и устойчивость карбонатных фаз.

Причины, которые привели к окислению первоначального вещества мантии и смене соотношений CO_2 , H_2O , CH_4 , H_2 во флюидах [14], остаются, во многом, предметом дискуссии.

Предположительно, повышение fO_2 в глубинных слоях мантии является процессом планетарной аккреции, когда создавались условия, соответствующие равновесию силикатного вещества с металлической фазой, где $\Delta\log(FMQ)$ изменяется от -7 до -8. При значениях fO_2 , которые устанавливаются для наиболее восстановленных дериватов архейской литосферы с возрастом 3,5–3,0 млрд лет, $\Delta\log(FMQ)$, изменяется от -3 до -5.

Постепенное повышение значений fO_2 в более позднее время определяется, по мнению [15,16], «эволюцией» металлического ядра, дегазацией и геодинамическими

процессами (формирование плюмов, астеносферных диапиров, погружением литосферных плит).

Существует также другое мнение [17, 18], когда изменение состава летучих и fO_2 определяется спецификой растворения H_2 и C в магматических расплавах при низком значении fO_2 , что соответствует равновесию в слоях верхней мантии с металлической фазой железа. Это мнение обосновывается экспериментами по взаимодействию CH_4 , H_2 и C с силикатными расплавами, когда на ранних стадиях плавления вещества летучие компоненты влияли на состав пород. В них показано, что несмотря на значения летучести кислорода ниже $fO_2(IW)$, равной значениям $\Delta\log(FMQ)$ от -5 до -8, характеризующимся активностью кислорода при установленных давлениях и температуре, устойчивыми компонентами расплавов являются окисленные формы водорода и углерода (H_2O , OH^- , CO_3^{2-}).

По мнению [14], такая особенность взаимодействия CH_4 , H_2 и C с силикатными расплавами позволяет ожидать, что в результате плавления восстановленной углеродосодержащей планетарной мантии будут выплавляться магмы, содержащие более окисленные формы углерода и водорода, чем в самом мантийном источнике. С этой точки зрения переход восстановленной мантии в расплавленное состояние представляется одним из механизмов формирования H_2O и CO_2 в прошлом Земли и их первичного поступления на поверхность планеты.

На снижение fO_2 также оказывает влияние и рост давления. По данным [19], делается заключение о существенном понижении fO_2 на глубинах около 300 км (9 ГПа), когда породы верхней мантии могут быть насыщены флюидами в отношении металлической фазы железа, где доминирующим компонентом С-О-Н флюидов являются метан и водород.

По данным геохимических исследований [16, 20], делаются попытки установить связь повышения fO_2 в глубинах литосферы с метасоматическими преобразованиями ее пород. Большинство перидотитовых ксенолитов с высокими значениями ($\Delta\log(FMQ)$ от -2 до +1) несут признаки метасоматических изменений, которые связываются с этапом развития щелочного магматизма на Земле.

Характер геодинамических процессов на стадии протоплатформенного режима Земли

Геологическое развитие Земли в раннем докембрии определяется формированием ее оболочечного строения и коры континентального типа. Трансформация первичной

базитовой внешней оболочки и постепенное наращивание гранитного слоя в условиях интенсивного теплового потока и высокой мобильности тонкой земной коры обеспечили необратимое, направленное развитие тектоносферы с последовательной сменой своеобразных, неповторимых впоследствии геотектонических режимов: нуклеарного, пермобильного, протогeosинклинального, протоплатформенного.

В результате к началу позднего докембрия, примерно 2 млрд лет назад, в пределах древних щитов и платформ оформилась достаточно консолидированная мощная земная кора, обладающая сложным слоистым строением с концентрацией в верхних частях легких масс гранитоидного состава.

В последующей геологической истории древних щитов, вплоть до начала формирования фанерозойского осадочного чехла, определяющее значение имели интенсивные пульсационные тектонические и магматические процессы, проявившиеся без предварительной геосинклинальной стадии подготовки, эволюционирующие во времени и аналогичные тектоно-магматической активизации фанерозойского этапа развития Земли. Указанные процессы, включающие перестройку глубинных структур земной коры, блоковые движения по зонам глубинных разломов, образование наложенных впадин и грабенов, локальный метаморфизм и ультраметаморфизм, общее омоложение изотопного возраста древних толщ, мощный своеобразный магматизм и формирование разнотипных месторождений полезных ископаемых, могут быть определены как докембрийская тектоно-магматическая активизация [21].

Импульсами для проявления докембрийской активизации являлись преобразования вещества в мантии, сопровождаемые поступлением в земную кору базальтовых расплавов, способствующих переплавлению и интенсивной сиалической дифференциации внешней оболочки планеты при участии восстановленных газов.

Все докембрийские регионы характеризуются широким развитием зрелых продуктов осадочной дифференциации (кварцито-песчаников, кварцевых конгломератов), появлением красноцветных отложений, углеродистых сланцев, шунгитов и мощных пачек карбонатных пород, частью органического происхождения, сложенных стратомолитовыми постройками.

По данным [21], рубеж 2,0–1,9 млрд лет назад ознаменовался резким усилением и качественным изменением геодинамической обстановки, что проявилось в конце раннего

и в позднем протерозое импульсивной вулcano-плутонической деятельностью в интервалах с максимумами 1,9–1,6; 1,4–1,3; 1,0, 0,8–0,78 и 0,68–0,65 млрд лет назад.

Магматические явления осуществлялись на фоне глыбового тектогенеза, которому сопутствовали сводовые воздымания поверхности Мохаровичича и нижних горизонтов земной коры, сформировавших аркогенные поднятия (кратоны), в пределах которых развивались линейные грабенообразные прогибы (зоны растяжения), с образованием контрастных блоков сиалического и фемического типа. Все эти этапы характеризуются постепенным затуханием геодинамической активности, прерываясь периодами относительного покоя.

По мнению Л.В. Григорьевой [21], закономерная эволюция земной коры сопровождалась направленной «эволюцией» эндогенных процессов, что находит четкое отражение в изменении характера геодинамических и магматических процессов в докембрийской истории Земли. Тектонические процессы развивались в направлении возникновения линейных структур и увеличения роли разломов в условиях возрастающей стабилизации земной коры.

Структурное положение областей наиболее яркого проявления тектонических и магматических процессов, выделяемых как области докембрийской активизации, определяются трансрегиональными ослабленными зонами ортогональной и диагональной ориентировки, которые фиксируются системами глубинных разломов, прослеживаемыми в совокупности на сотни и тысячи километров по простиранию.

Хотя процессы активизации носили унаследованный характер, глобальные ослабленные зоны заметно эволюционировали во времени. Для ранней стадии активизации намечается ведущая роль ортогональной системы региональных и трансрегиональных линейных элементов при одновременном широком развитии диагональных структур, интенсивно проявляются процессы магмо- и рудообразования. Во второй стадии активизации повышается значение диагональных разломов с одновременным сокращением размеров активизированных областей, уменьшением объемов и разнообразия магматических и рудных производных. Поздняя стадия активизации отмечается новым импульсом магматической деятельности; для нее типичен глыбовый тектогенез с термальными преобразованиями пород в зонах глубинных разломов, охватывающими иногда целые блоки и выражающимися омоложением возраста древних толщ. Унаследованность данных линейных зон по пространству также хорошо проявлена

в тектоническом строении этих регионов в послекембрийском времени на этапах активизации рифтовых структур.

Возникающие в период $1,9-1,7 \pm 0,01$ и $1,1-0,9$ млрд лет полезные ископаемые обнаруживают тесные пространственно-временные и структурные связи с вулканоплутоническими образованиями, принадлежащими к формациям субщелочных феррогабброидов, габбро-монцит-гранитов, габбро-анортозитов-гранитов рапакиви.

Глубинное происхождение таких серий определяется мантийными или смешанными соотношениями изотопов стронция и преобладанием восстановленных флюидов в породах конкретных массивов; их интрузивная природа и значительное сходство между собой устанавливаются на основе петрографо-минералогических и петрохимических признаков, подтверждаясь тонкими геохимическими характеристиками, в том числе распределением редкоземельных элементов в породах различных фаз и интенсивным накоплением рубидия в поздних гранитных производных.

Вещественные характеристики метасоматитов свидетельствуют, с одной стороны, о многокомпонентном составе породивших их флюидов, а с другой, – о закономерной эволюции последних, которая проявлялась в последовательной смене хлоридных растворов углекислыми. Обильное отделение фторидных растворов устанавливается для поздних фаз гранитов рапакиви.

Резюмируя данный этап формирования Земли [22] по исследованиям разных авторов, рассматривающих важность вопроса в последовательности преобразований тектонических структур земной коры (Д. Грин, А.Е. Рингвуд, Г.Ф. Салоп, Л.И. Чень-Года, Г.Ф. Мирчик, А.Д. Щеглов, В.И. Казанский, В.В. Белоусов, В.Е. Хаин и др.), можно сказать, что в послекембрийский период в ее истории не было столь интенсивных тектоно-магматических активизаций без предварительной геосинклинальной стадии подготовки, выразившихся в наиболее широком и активном воздействии магматических событий. Проявление этих процессов стало возможным с возникновением мощной стабилизированной земной коры, чтобы в ней мог происходить глыбовый тектогенез, дифференциация магматических расплавов и длительная «эволюция» сопряженных с ним гидротерм. Важно также отметить, что металлогения этих стадий [21], помимо оруденения сидерофильного и халькофильного профиля, связанных с интрузиями основных пород, характеризовалась появлением месторождений литофильных металлов:

олова, вольфрама, и др., а с известково-щелочными сериями и субщелочными комплексами ассоциируют урановое оруденение и редкоземельные рудоконцентрации.

Активизация геодинамических процессов на данной стадии развития планеты за счет высоких температурных градиентов и раздробленности земной коры не способствовала накоплению углеводородных компонентов и формированию их месторождений.

Роль рифтогенеза в глубинной дегазации и в формировании локальных нефтегазоносных структур

Формированию рифтовых впадин посвящено много исследовательских работ как зарубежных, так и отечественных авторов: Л. Пикара, Б.Б. Брока, Дж.А. Томпсона, П.К. Куликова, Ю.Т. Афанасьева, В.С. Бочкарева, И.И. Нестерова, М.Я. Рудкевича, Б.В. Гусева и многих других. Общеизвестно, что рифтогенезом были охвачены все платформенные зоны различных материков. Он оставил следы в виде разветвленной системы грабенов и сети разломов разного порядка, как по их длине, так и проникновению в породы чехла и коры.

Данный этап развития Земли определяется периодами ее последующей унаследованной геодинамической активности, но уже более локализовано, чем в периоды докембрийской активизации.

Рифтовые системы на платформах периодически образовывались, претерпевали изменения в зависимости от геодинамических условий развития данных регионов.

Основные черты строения и истории формирования отдельных рифтов (авлакогенов) описаны в работах Н.С. Шатского, А.А. Богданова, А.А. Борисова, Н.Н. Валеева, П.Н. Кропоткина, М.В. Муратова, В.С. Суркова, Д.В. Наливкина, И.Е. Постниковой, Р.Г. Гарецкого, Р.А. Гафарова, В.Е. Хаина, И.М. Шахновского.

Установлено [23], что авлакогены, также как и рифты, сформированы в результате растяжения земной коры, контролируются глубинными долгоживущими разломами и выражены в рельефе фундамента линейными зонами дифференцированных опусканий. В то же время авлакогены представляют собой специфическую категорию наиболее древних рифтов, завершивших свое формирование в рифей-палеозойское время.

Длительность рифтогенеза в течение всего фанерозоя в работе [24] сильно варьируется, достигая, например, 80–85 млн лет в Скалистых горах и Южной Оклахоме на Северо-Американской платформе. Для Европы – это позднепермский-раннетриасовый период рифтогенеза в районе Северного моря и триасово-раннеюрский для Датско-

Польского рифта. Для Африки – позднеюрско-раннемеловая Центрально-Африканская система, позднемеловой-палеогеновый рифтогенез залива Сирт и палеоген-неогеновый Африкано-Аравийский пояс. На основе анализа этих данных авторами делается вывод, что минимальная длительность комплекса процессов, отвечающих понятию рифтогенеза, около 20, но наиболее типична – около 50 млн лет.

Особенности строения рифтов и авлакогенов характеризуются рядом общих признаков. Под ними обычно отмечается разуплотненный астеносферный выступ (подъем поверхности Мохо) и уменьшение общей мощности консолидированной части земной коры. Структурные особенности четко отражаются в геофизических полях, а в плане им соответствуют линейные и магнитные аномалии.

Рост этого астеналита обуславливает растяжение земной коры, а дальнейшее растекание его в стороны на стадии захоронения приводит к сжатию и проявлению движений в бортовых комплексах пород, имеющих блоковое строение. Разнонаправленный характер вертикальных движений раздробленных блоков фундамента при нахождении их в стесненных условиях приводит к дальнейшему формированию приподнятых и опущенных локальных структур в осадочном чехле.

Особенности эволюции каждого конкретного рифта, очевидно, зависят от длительности, интенсивности и многократности активизаций геодинамических процессов, проявляющихся в верхней мантии, что и определяет результат пострифтовых тектонических изменений и последующих инверсионных движений в их пределах.

На примере ранних авлакогенов, завершивших свое развитие к началу позднего венда, инверсия в них имела место до образования плитного чехла. В связи с этим, платформенный комплекс перекрытия на большей части, например, Восточно-Европейской платформы, начал формироваться после длительного перерыва в осадконакоплении, охватившего кембрийский, силурийский, ранне-среднедевонский периоды. К этому времени рифейские палеорифты «остыли», их сжатие почти полностью прекратилось и инверсионные движения в пострифтовой толще перекрытия проявились слабо [23]. В результате в палеозойско-мезозойском осадочном чехле сформировались лишь малоамплитудные валы типа Рыбинско-Рослятинского в Среднерусском авлакогене, Керенско-Чембарского и Окско-Цнинского – в Пачелмском. Отсутствие активизаций геодинамических процессов в последующей истории данных областей не приводило к

активной дегазации осадочных пород и формированию в этих зонах нефтегазовых месторождений.

В то же время отмирание рифейско-палеозойских унаследованных авлакогенов в пределах территории эпирифейской Печорской плиты, претерпевших второй этап рифтогенеза в девоне, произошло значительно позже, что и обусловило интенсивное проявление пермско-меловых инверсионных геодинамических движений в пострифтовых комплексах перекрытия. Их результатом было формирование в палеозойско-мезозойском чехле высокоамплитудных прибортовых валов – Печоро-Кожвинского-Колвинского, Сорокина и Гамбурцева в Печоро-Колвинском и Варандей-Адзвинском авлакогенах, а также Вятской зоны поднятий над одноименным авлакогеном и формирование в их пределах нефтяных месторождений.

Рассмотренные в статье [25] процессы образования локальных зон коллекторов и платформенных структур в рифтовых системах позволяют говорить о преобладающем характере в их формировании вертикальных движений над горизонтальными. Приведенные виды антиклинальных складок [22], образованные в зонах сдвига рифтовых систем, не позволяют по данным лабораторных тектонофизических экспериментов создать складки, амплитуда которых была бы соизмерима с локальными поднятиями. Данные складки имеют размеры в 1,5–2,0 раза меньше, чем выявленные в разных областях нефтегазоносных провинций. В связи с этим можно предполагать, что данные складки представляются структурными неоднородностями вертикальной проницаемости разреза в пределах рифтовых зон, которые претерпели последующее развитие при активизации геодинамических процессов за счет разнонаправленных вертикальных блоковых движений.

Из теории также известно, что проницаемость пород, созданных трещинами отрыва, намного больше, чем созданных сколовыми трещинами. В то же время, как видно из [25], максимальные касательные напряжения могут образовать зоны сдвиговых деформаций, которые при преодолении прочности пород на сдвиг создают сколовые трещины.

В отличие от нормальных напряжений они не способны образовывать трещины отрыва. Образование же горизонтальных трещин отрыва может произойти только за счет проникновения в сколовые трещины флюидов, обладающих расклинивающим действием.

Поступление этих флюидов происходит в периоды активизации движений блоков фундамента по разломам из глубинных источников.

Накопление пород в осадочных бассейнах в геологическом времени на этапах отсутствия активизации в них геодинамических процессов приводит к их охлаждению, при этом интервал температур в пределах глубин 6–5 км изменяется от 120 до 50С °, что способствует резкому уменьшению коэффициентов диффузии легких газов к поверхности. Данный процесс будет приводить к условиям создания АВПД на границах слабопроницаемых пород и, по данным [11], к генерации в них углеводородов (стадия 2: $3\text{H}_2 + \text{CO} = \text{H}_2\text{O} + \text{CH}_4$, $5\text{H}_2 + 2\text{CO} = 2\text{H}_2\text{O} + \text{C}_2\text{H}_6$, $4\text{H}_2 + \text{H}_2\text{CO}_3 = 3\text{H}_2\text{O} + \text{CH}_4$ и др.), где более легкие (метан и этан) образуются на границе мантия–кора, а молекулярно более тяжелые углеводороды – на границе кора–осадочный чехол.

Прорыв в верхние горизонты пород в осадочном чехле флюидов, находящихся на данных глубинах в поле всесторонних сжимающих напряжений, из зон АВПД представляется затруднительным из-за слабой аморфизации пород легкими газами и образования гидроразрыва пластов в горизонтальном направлении. Создание условий продвижения флюидов, находящихся часто в критическом состоянии, вверх и формирование стратифицированных залежей углеводородов возможно только при активизации разнонаправленных вертикальных движений блоков фундамента и образующихся при этом отрывных зон разломов [26].

Роль сейсмических процессов в поддержании блоковой структуры региона и обогащении осадков легкими газами

На примере Байкальского рифта, не закончившего своего формирования в современное время, и рифтовых впадин Прибайкалья продемонстрируем его структурно-тектонические и геодинамические особенности [27].

Представленная на рис. 1, а трехмерная модель Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) проявляет близкое структурное сходство при ее сравнении с картами фундамента рифтовых зон Западно-Сибирской и Печорской плит, а также других регионов.

В работе [28] также показано, что активизации разломов в БРЗ и на ее сопредельных территориях приводит к сейсмическим событиям, оказывающим воздействие на поддержание блоковой структуры в породах фундамента (рис. 1, б). Эти разноранговые разломы на пострифтовой стадии (при нивелировании рельефа поверхности) продолжают оставаться флюидопроводящими каналами и зонами структурной неоднородности, наследующими блоковую структуру в породах осадочного

чехла при активизации геодинамических процессов на инверсионных стадиях развития рифтов.

Рифтовая впадина (депрессия), с одной стороны, представляет единое целое, с другой, – состоит из серии мелких бассейнов, разделенных приподнятыми блоками. Количество этих перемычек, их формирование и размеры могут быть разным, но наиболее часто они либо изометричны, либо вытянуты вдоль оси крупных депрессий, что характерно для условий косоугольного растяжения, действующего ортогонально по отношению к основным предшествующим разломам, совпадающим по простиранию с Байкальским рифтом. Подобная структура формирования разломных зон является типичной для осадочных бассейнов, развивающихся в условиях рифтогенеза.

По данным тех же авторов, для рифтовых впадин Прибайкалья подтверждается вывод о том, что в современном строении приповерхностной части фундамента и осадочных слоев основную роль играют именно разрывные структуры, а не складчатые. Последние могут быть вторичной деформацией, вызванной сдвиговыми смещениями по разломам.

Еще одним важным геодинамическим процессом на этапе рифтогенеза является повышенный уровень сейсмической активности данного региона. На рис. 2 представлены данные, накопленные за 1950–2005 гг., которые характеризуют высокую плотность эпицентров сейсмических событий, магнитуда которых не превышает 5,6. Их концентрация особенно высока в районе полуострова Святой Нос, южнее его в котловине оз. Байкал, а также в северной части Баргузинской впадины и прилегающем горном обрамлении.

Сейсмические процессы, проявляющиеся на современном этапе рифтогенеза, имеют длительный период – сотни тысяч лет и сопровождаются дегазацией глубинных газов, таких как CH_4 , C_2H_6 , CO_2 , H_2 , He и др. Данный процесс приводит к изменению как минералогического состава осадочных пород и цемента, так и к взаимодействию легких газов с органическим веществом, которое преобразуется в более тяжелые соединения – битумоиды на стадии их изначального захоронения.

К настоящему времени выполнены исследования по химико-битуминологическому изучению состава ОВ осадков Охотского моря [29]. Автор данных исследований приходит к выводу о том, что характеристикой современного высокого содержания в осадках

битумойдов и повышенная степень превращения ОВ донных осадков обусловлена, в первую очередь, высокой тектоносейсмической активностью Охотоморского региона.

По данным [30], в сейсмоактивных регионах поступающие во внешние оболочки Земли газы метаморфического и глубинного происхождения способствуют образованию геохимических аномалий, в том числе в верхних структурных ярусах осадочного чехла. В период усиления сейсмической активности недр масштабы дегазации, водного и солевого стока с таких площадей существенно возрастают (от нескольких до десятков процентов). Растет также плотность фоновой дегазации недр.

Образованием геохимических, гидрогеологических и геотермических аномалий в верхних структурных ярусах литосферы сопровождаются все землетрясения (слабые и сильные). При этом геохимические аномалии формируются вне всякой зависимости от того, содержатся или не содержатся в геологическом разрезе скопления углеводородов и других полезных ископаемых.

Также установлено [31], что глубинный флюид находит свое отражение в составе аномальных газогеохимических полей Охотоморского и Япономорского регионов в приповерхностных геологических структурах не только в зонах сейсмоактивных систем разломов, но и в низкосейсмичных зонах. Исследование химического состава природных газов, содержащихся в породах разнотипных осадочных бассейнов и тектонических прогибов Охотского моря и его побережья, указывает, что распределение гелия, водорода, углекислого и углеводородных газов, а также различия в содержании гомологов метана и их изомеров определяются особенностями геодинамического строения этих районов.

Рассмотренные сеймотектонические факторы длительного накопления глубинных флюидов в земной коре, их проникновения в осадочные породы и их преобразования за счет окислительно-восстановительных реакций вообще не рассматриваются в моделях органического происхождения УВ месторождений.

Метасоматическая зональность пород нефтегазовых месторождений и их связь с зонами разломов

На основе имеющихся данных о геолого-минералогических особенностях платформенных локальных структур можно сказать определенно, что периоды активизации геодинамических процессов характеризуются разнонаправленными вертикальными движениями блоков фундамента, сопровождающимися внедрением гидротермальных растворов, приводящих к метасоматическому преобразованию пород [32]. Выделение таких периодов формирования локальных структур позволяет объяснить

разупрочненность горизонтов пород и проявления в них вертикальной и горизонтальной миграции флюида, а также образование вертикальных отрывных зон разломов [33]. Воздействие газов и растворов, внедряющихся по механически ослабленным зонам трещиноватости позволяют объяснить в разрезах осадочных бассейнов образование «столбов вторичной карбонатизации», образование дайковых тел песчаникоподобных кварцевых метасоматитов в терригенных породах, метасоматический характер изменения пород в зоне катагенеза [3], унаследованный стратифицированный характер нефтегазовых пластов в разрезе, а также обогащение пород чехла металлами мантийного происхождения, такими как ванадий, никель, уран, ртуть, медь, золото, и восстановленными ювенильными газами – H_2 , CH_4 , CO , H_2S [34].

К особенностям флюидодинамики осадочных бассейнов относят преобразования пород, где ведущими факторами являются катагенетические и регионально-метаморфические процессы. Так как критериев, позволяющих отличать эти процессы от метасоматических, не разработано, а в методическом плане могут быть предложены лишь общие принципы их различия, включая и углеродистые осадочные породы, как в геосинклинально-складчатых областях, так и в осадочных бассейнах, то преобладающие представления катагенетического и метаморфического преобразования пород (глубина погружения, различие температур и давлений) становятся все более несостоятельными без учета воздействия на них глубинной дегазации.

Сегодня определенно можно говорить, что главнейшими факторами в разделении катагенетических и метасоматических процессов являются различия геолого-структурных и геодинамических обстановок, определяющих характер проницаемости в земной коре ювенильных флюидов и их физико-химическое изменение состояния и состава при взаимодействии с литосферной средой. В связи с этим, такие метасоматические процессы, как доломитизация, сидеритизация, пиритизация, ангидритизация и огипсование пород, выявленные на уровне различных зон катагенеза за счет привноса глубинных флюидов, могут сопровождаться полным утрачиванием осадочной породой ее первичного структурно-текстурного облика. Таким образом, процессы метасоматического преобразования пород в большинстве случаев носят локализованный характер и приурочены к проницаемым зонам вертикального и горизонтального типа.

Подобные процессы широко распространены в пределах локальных поднятий платформенных территорий, приуроченных к краевым зонам рифтовых структур,

формирование которых связано с разнонаправленными вертикальными движениями блоков фундамента.

Локальные поднятия III и IV порядков выявлены во всех осадочных бассейнах, таких как Западно-Сибирский, Восточно-Сибирский, Восточно-Европейский, Прикаспийский, Печорский и др., и в зависимости от стадий инверсий рифтогенеза и формирования в них флюидного режима могут являться нефтегазовыми месторождениями разных уровней расформирования, а также структурами, в которых существуют вторично преобразованные коллектора.

По мнению [35], разработка литогеохимического анализа нефтегазоносных бассейнов способствовала существенному изменению традиционного понимания НГБ как нефтегазоносного осадочного бассейна. Сегодня становится ясным, что речь идет о гораздо более глубокой, объемной и сложной системе.

Из обобщения материалов разных исследователей (Р.П. Готтих, Б.И. Писоцкий и др., 2002, 2009; А.Е. Лукин, 2008; Беленицкая Г.А., 2008; Е.А. Предтеченская, О.В. Шиганова, А.С. Фомичев, 2009; А.Д. Коробов, Л.А. Коробова, 2010, 2011; Е.Е. Карнюшина, 2012; Ф.А. Летников, 2013, М.В. Багдасарова, 2014 и др.) можно сделать вывод, что, практически, все изученные породы-коллекторы НГБ являются метасоматитами гипогенно-аллогенетического происхождения. Независимо от возраста, формационной и фациальной принадлежности, петрографических, петрофизических и физико-химических особенностей исходного породного субстрата, во вторичном поровом пространстве установлен, в целом, единый, хотя и существенно различный по конкретным количественным соотношениям набор сингенетических минералов, характеризующих их метасоматическое образование. Состав, представленный триклинным каолинитом и диккитом, гидрослюдами и смешаннослойными фазами типа «слюда–монтмориллонит», альбитом и калиевым полевым шпатом, эпидотом, цеолитом, карбонатом, фосфатом, дисульфидом железа и сульфидом, ангидритом, галитом, сильвином и разнообразными самородными металлами, указывает на участие в метасоматозе как гидротерм, так и безводных металлоносных флюидов – сверхсжатых газов на водородно-метановой основе.

Для обоснования процессов метасоматической зональности в пределах нефтегазовых платформенных территорий, считающихся неактивными с позиций геохимических представлений и формирования которых, в основном, связано с медленным накоплением в них осадков и последующим их погружением, роль разломов

также считается пассивной. Большинство из вышеперечисленных в предыдущем абзаце авторов признается роль разломных зон в процессах метасоматического преобразования пород как зон флюидопроводности, но никто из авторов не показывает пространственно-временных закономерностей физической природы их проницаемости в пределах платформенных территорий.

На сегодня Ю.О. Кузьминым в работах по фундаментальным тектонофизическим исследованиям современных деформаций в разломных зонах обосновано существование нового класса тектонических движений – современные суперинтенсивные деформации (СД-процессы) в зонах разломов [36].

Рассматривая физическую природу возникновения импульса СД, необходимо иметь ввиду следующее [37]: геологическая среда в современном нам (реальном) масштабе времени находится под воздействием системы внешних и внутренних (экзогенных и эндогенных), квазистатических (глобальное и/или региональное поле напряжений) и динамических (приливы, неравномерное вращение Земли, процессы подготовки землетрясений, взрывы, сейсмические волны, техногенные нагрузки и т. д.) воздействий. В разломных зонах постоянно присутствуют и перераспределяются динамически активная и химически агрессивная флюидные системы. Взаимодействие и совокупное влияние этих факторов реализуется, в первую очередь, в зонах разломов с неустойчивыми механическими характеристиками, посредством кратковременных флуктуаций жесткостных характеристик горных пород в локальных объемах. Следствием этого процесса и является возникновение СД-деформаций.

На основе анализа повторных геодезических, геофизических и геохимических данных, полученных на геодинамических полигонах, расположенных как в сейсмичных, так и в асейсмичных регионах, показано, что в зонах разломов имеют место интенсивные локальные аномалии вертикальных и горизонтальных движений земной поверхности. Эти движения высокоградиентны (свыше 50 мм/год), короткопериодичны (от 0,1 года до первых лет), пространственно локализованы (от 0,1 км до первых десятков км), обладают пульсационной и знакопеременной направленностью.

Исходя из вышесказанного, становится понятным, что, с одной стороны, эндогенные региональные процессы имеют длительность порядка миллионов и сотен тысяч лет, а, следовательно, определяют, в первую очередь, региональный фон и характер напряженного состояния, которое задают граничные (внешние) условия при описании

локальных деформационных аномалий. С другой стороны, полученный экспериментальный материал, несомненно, указывает на локальную пространственно-временную нестабильность (неустойчивость) процессов деформирования, имеющих место в пределах собственно разломных зон.

Важным также является результат идентичности в сравнении пространственно-временных характеристик аномальных движений, как для сейсмоактивных, так и для асейсмичных разломных зон. При этом интенсивность деформационного процесса в разломах асейсмичных регионов (платформенных) выше, чем в сейсмоактивных.

Наличие в геологической среде разломной зоны большого количества механических дефектов при ее образовании способствует накоплению на них напряжений, приводящих к возникновению мягких (с пониженной жесткостью) включений, а, как известно, именно при фиксированных (региональных) напряжениях происходит накопление энергии и формирование локального поля деформаций в окрестности включений данного типа [36]. Также из теории колебаний хорошо известно, что любую систему вывести из состояния равновесия (возбудить систему) можно двояким образом: либо посредством внешнего силового воздействия на систему в целом, либо путем возмущений внутренних параметров системы, предварительно нагруженной извне. Такой тип вывода системы из состояния равновесия назван в физике *параметрическим* возбуждением [36]. В рамках этих представлений становится очевидным происхождение СД-аномалий в разломной зоне.

Рассматривая большой объем накопленных данных по современным движениям в разломных зонах [38], можно определенно сказать, что их флюидопроницаемость на современном этапе является кратковременной, но в течение геологического времени, в разных геодинамических обстановках, данный процесс позволяет создавать большие по объемам вертикальные потоки глубинных флюидов в осадочных породах на всех стадиях их диа- и катагенеза. Влияние и воздействие этих потоков на всех стадиях захоронения и преобразования органического вещества при воссоздании в различных моделях органического синтеза нефтяных и газовых УВ в геологическом времени сегодня никаким образом не учтено, что не может с натурфилософских позиций оставаться определяющим критерием их формирования.

Выводы

1. Обобщенные представления гидридной гипотезы незаслуженно забыты и не являются сегодня распространенной точкой зрения на процессы образования Земли, но позволяют обосновать этапы ее расширения и сжатия, дать оценку водород-углеводородной дегазации с позиции первичных и вторичных флюидов в литосфере при формировании тектонических структур континентов и океанической коры, а также процессов и условий образования рудных и нефтегазовых месторождений.

2. Исходя из рассмотренных геодинамических обстановок «эволюции» Земли, глобальные физические и геохимические процессы до сегодняшнего времени являются унаследованными по пространству (мантия – земная и океаническая кора – осадочный чехол) и определяются уменьшением степени их энергетического потенциала во времени.

3. Геодинамически обусловленная метасоматическая зональность пород платформенных и нефтегазоносных структур предопределяется деформацией мантийного вещества при его аморфизации легкими газами и движением его вверх при увеличении давления в этих зонах за счет процессов дегазации ядра. Породы земной коры и нижней части осадочного чехла, представленные кристаллическим веществом, за счет глубинных процессов в верхней мантии формируют разломно-блоковую структуру, где по зонам разломов осуществляется подъем мантийно-коровых растворов разного состава в зависимости от геодинамических условий.

4. Зоны разломов отрывного типа являются основными системами флюидопроводности в земной коре и осадочном чехле, а также зонами унаследовано развивающимися (параметрически активизирующимися) в геологическом времени за счет региональных полей напряжений, которые постоянно существуют и перераспределяются в Земле.

5. Формирование осадочного бассейна в пределах рифтовой зоны в процессе повторных инверсий разнонаправленных вертикальных движений блоков фундамента длительное время подвергается сейсмическому воздействию, что приводит к разгрузке глубинных флюидов в данных областях и их взаимодействию на всех стадиях формирования бассейна с гидродинамическими системами, минералами пород и захороненным в породах органическим веществом.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Научное обоснование новых экологически чистых технологий разработки месторождений углеводородов в сложных горно-геологических условиях на основе 3D-компьютерных экспериментов», № АААА-А16-116022510270-1).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Холодов В.Н.* Постседиментационные преобразования в элизионных бассейнах (на примере Восточного Предкавказья). М.: Наука. 1983. 150 с.
2. *Иванкин П.Ф., Иншин П.В.* О взаимосвязи углерода и воды в петрорудогенезисе // Сов. Геология. 1977. № 1. С. 35–46.
3. *Иванкин П.Ф., Назарова Н.И.* Глубинная флюидизация земной коры и ее роль в петрорудогенезе, соле- и нефтеобразовании. М.: ЦНИГРИ. 2001. 206 с.
4. *Маракушев А.А., Перчук Л.Л.* Происхождение и эволюция трансмагматических и метаморфических флюидов // Международ. Геохим. Конгресс: Тез. докл. М. 1971. Т. 2. С. 513–514.
5. *Ларин В.Н.* Гипотеза изначальной гидридной Земли. М.: Недра, 1980. 216 с.
6. *Семенов Н.П.* Кислородно-водородная модель Земли. Киев: Наук. Думка, 1990. 248 с.
7. *Пуцаровский Д.Ю., Пуцаровский Ю.М.* Состав и строение мантии Земли // Соросовский образовательный журнал. 1998. № 11. С. 111–119.
8. *Румянцев В.Н.* Водород во внешнем ядре Земли и его роль в глубинной геодинамике // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7. № 1. С. 119–135.
9. *Гуфельд И.Л.* Геологические исследования аморфизации структуры литосферы и верхней мантии, вызванные водородной дегазацией // Геодинамика и тектонофизика. 2012. Т. 3. № 4. С. 417–435.
10. *Гуфельд И.Л.* О глубинной дегазации и структуре литосферы и верхней мантии // Глубинная нефть. 2013. Т. 1. № 2. С. 172–189.
11. *Маракушев А.А., Маракушев С.А.* Образование нефтяных и газовых месторождений // Литология и полезные ископаемые 2008. № 5. С. 505–521.
12. *Кусков О.Л., Хитаров Н.И.* Окислительно-восстановительные условия в мантии Земли и на ее границе с ядром // Геохимия. 1974. № 1. С. 18–29.
13. *Kasting J.F., Egglar D.H., Raeburn S.P.* Mantle redox evolution and the oxidation state of the Archean atmosphere // Jour. Geol. 1993. Vol. 101. № 2. P. 245–257.

14. *Кадик А.А.* Восстановленные флюиды в мантии: связь с химической дифференциацией планетарного вещества // *Геохимия*. 2003. № 9. С. 928–940.
15. *Kadik A.A.* Evolution of Earths redox state during upwelling of carbon-bearing mantle // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1997. Vol. 100. P. 157–166.
16. *Ballhaus C.* Redox states of lithospheric and asthenospheric upper mantle // *Contrib. Mineral. and Petrol.* 1993. Vol. 114. P. 331–348.
17. *Taylor W.R., Green D.H.* Measurement of reduced peridotite-C-H-O solidus and implications for redox melting of the mantle // *Nature*. 1988. Vol. 332. P. 349–352.
18. *Kadik A.A., Pineau F., Litvin Y.* et al. Formation of carbon and hydrogen species in magmas at low oxygen fugacity // *Jour. of Petrology*, 2004. Vol. 45. No. 7. P. 1297–1310.
19. *Ballhaus C.* Is the upper mantle metal-saturated? // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1995. Vol. 132. P. 75–86.
20. *Mattioli G.S., Baker B., Rutter M.G., Stolper E.M.* Upper mantle oxygen fugacity and relationship to metasomatism // *Jour. Geol.* 1989. Vol. 97. P. 521–536.
21. *Григорьева Л.В.* Докембрийская тектоно-магматическая активизация (геология и металлогения). Л.: Недра, 1986. 222 с.
22. *Никонов А.И.* Роль рифтогенеза в формировании месторождений углеводородов и их структурной неоднородности // *Вести газовой науки*. 2012. № 1(9). С. 101–112.
23. *Шахновский И.М.* Некоторые дискуссионные проблемы нефтяной геологии // *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. 2003. № 2. С. 14–22.
24. *Хаин В.Е., Сеславинский К.Б.* Глобальные ритмы в фанерозойской эндогенной активности Земли // *Стратиграфия. Геол. корреляция*. 1994. Т. 2. № 6. С. 40–63.
25. *Никонов А.И.* Роль геодинамических процессов в формировании анизотропии физических свойств пород локальных поднятий // *Геология, геофизика и разведка нефтяных и газовых месторождений*. 2006. № 12. С. 23–33.
26. *Никонов А.И.* Совершенствование геолого-фильтрационных моделей подземных хранилищ газа на геодинамической основе // *Геология, геофизика и разработка нефтегазовых месторождений*. 2017. № 12. С. 28–35.
27. *Лунина О.В., Гладков А.С., Неведрова Н.Н.* Рифтовые впадины Прибайкалья: тектоническое строение и история развития // *Новосибирск: Акад. изд-во «Гео»*, 2009. 316 с.

28. *Шерман С.И.* Новые данные о закономерностях активизации разломов в Байкальской рифтовой системе и на соседних территориях // Доклады Академии наук, 2007, Т. 415. № 1. С. 110–114.

29. *Захарова С.С.* Влияние тектоносейсмической активности на процессы преобразования органического вещества донных осадков Охотского моря // Альманах современной науки и образования. Тамбов: Грамота, 2008. № 11(18). С. 69–71.

30. *Осика Д.Г., Черкашин В.И.* Изучение условий формирования гидрогеологических и геохимических аномалий в пределах сейсмоактивных нефтегазоносных регионов – основа дальнейшего совершенствования теории и практики прямых методов поисков месторождений полезных ископаемых // Труды института Дагестанского научного центра РАН. 2003. № 49. С. 105–116.

31. *Шакиров Р.Б., Обжиров А.И., Шакирова М.В.* Газогеохимические поля Охотоморского и Япономорского регионов // Технические проблемы освоения Мирового океана. 2017. Т. 7. С. 257–261.

32. *Никонов А.И.* Метасоматическая зональность в пределах локальных нефтегазоносных структур и их связь с глубинной дегазацией Земли // 1-е Кудрявцевские чтения, Всерос. конф. по глубинному генезису нефти: Сб. тр. М.: ЦГЭ, 2012. С. 161–165.

33. *Никонов А.И.* Тектонофизические аспекты структурного дешифрирования линеаментных систем // Современная тектонофизика. Методы и результаты. М.: ИФЗ, 2011. Т. 2. С. 78–93.

34. *Шахновский И.М.* Происхождение месторождений рудных и горючих полезных ископаемых. М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2005. 64 с.

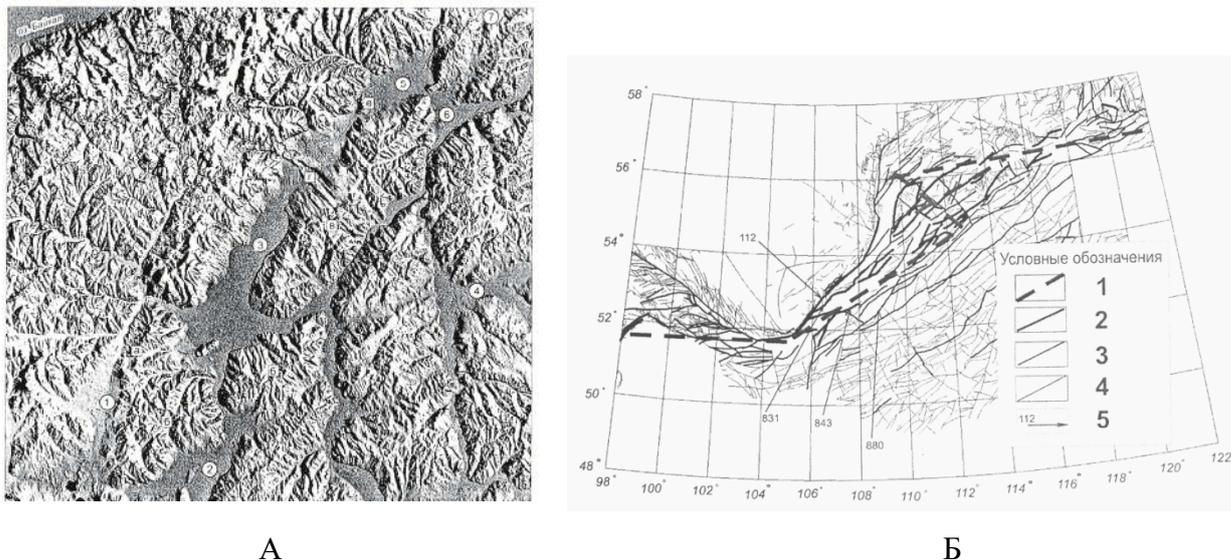
35. *Лукин А.Е.* Основные проблемы нефтегазовой литологии // Геол. журн. 2008. № 4. С. 17–25.

36. *Кузьмин Ю.О.* Современные суперинтенсивные деформации земной поверхности в зонах платформенных разломов // Геологическое изучение и использование недр. 1996. № 4. С. 43–53.

37. *Кузьмин Ю.О.* Тектонофизика и современная геодинамика // Физика Земли. 2011. № 11. С. 44–59.

38. *Кузьмин Ю.О.* Современная геодинамика разломных зон: разломообразование в реальном масштабе времени // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 2. С. 401–443.

ПРИЛОЖЕНИЕ



- Рис. 1. Положение мезозойских рифтовых впадин в трехмерной модели рельефа земной поверхности (А) и карта активных разломов Байкальской рифтовой системы (Б) по количественному индексу сейсмичности на базе сейсмических данных за 1960–2000 гг. [7]:
- А) Цифры в кружках – впадины: 1 – Боргойская, 2 – Усть-Джидинская, 3 – Гусиноозерская, 4 – Тугнуйская, 5 – Верхне-Оронгойская, 6 – Нижне-Оронгойская, 7 – Удинская; буквы в квадратах – горные хребты: а – Хоруха, б – Боргойский, в – Моностойский, д – Хамбинский; межвпадинные перемычки: г – Загустайская, е – Нижне-Убукунская, ж – Безымянная;
- Б) Условные обозначения: 1 – ось зоны современной деструкции литосферы, 2 – индекс сейсмичности >1.0 (весьма активные разломы), 3 – индекс сейсмичности $0,1-0,99$ (активные разломы), 4 – индекс сейсмичности $< 0,09$ (неактивные разломы), 5 – разломы и их номера



Рис. 2. Сейсмичность района Баргузинской впадины и полуострова Святой Нос за 1950–2005 гг. [27]:

1 – основные региональные разломы, активизированные в позднем кайнозое; 2 – впадины, заполненные кайнозойскими осадками (а) и выходы кристаллического фундамента (б); 3 – землетрясения разных энергетических классов; цифрами обозначены разломы: 1 – Мондинский, 2 – Тункинский, 3 – Южно-Тункинский