

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ ГЛУБИННОЙ ДЕГАЗАЦИИ КАК ФАКТОР ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ОСАДОЧНЫХ ПОРОД В ГЕОДИНАМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ЗОНАХ АКВАТОРИЙ МОРЕЙ

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

Среди многих теорий формирования нефтегазовых месторождений основными являются биогенная и абиогенная теории происхождения углеводородов (УВ). Сторонники биогенной теории считают, что данные месторождения образовались из преобразованных органических остатков растений и тканей животных в процессе диа- и катагенеза осадочного вещества. Их предположения об образовании месторождений УВ строятся на количественном содержании $C_{орг}$ в породах разреза осадочной толщи бассейнов и постепенном его преобразовании в нефтяные углеводороды с последующей их миграцией в литологические ловушки. Ученые, придерживающиеся абиогенной теории, стоят на позициях синтеза неорганических соединений в результате процессов дегазации Земли. Необходимо отметить, что вторая группа исследователей рассматривает дегазацию углеводород-водородных газов в контексте интенсивности проявления геодинамических процессов (метаморфизм, магматизм, региональный метасоматоз, активность разломных зон и т.п.) в общей истории Земли, а также во взаимосвязи образования региональных и локальных тектонических структур при формировании УВ месторождений.

В данном исследовании не ставится задача подтверждения осадочно-миграционной или абиогенной теории УВ-образования. Ключевое значение, по мнению авторов, имеют процессы, при которых возможно накопление и преобразование органического вещества в нефтеподобные углеводороды на стадиях диагенеза в геодинамически активных осадочных бассейнах.

Согласно осадочно-миграционной теории, нефтегазообразование, по Н.Б. Вассоевичу, является сложной совокупностью процессов, протекающих в масштабе геологического времени [1], т.е. эти процессы в природе непосредственно наблюдать нельзя; можно видеть лишь их фиксированные результаты, запечатленные в некоторых естественных телах, в которых эти процессы протекали. Для того чтобы породы и слагаемые ими формации были обогащены ОВ, необходимо, во-первых, его повышенное накопление в седиментогенезе и, во-вторых, благоприятные условия захоронения в

осадках в диагенезе. Рассмотрим, какие же процессы могут приводить к обогащению ОВ осадочных пород.

На сегодня известно, что в морских акваториях основная масса ОВ разлагается бактериями: более 99% его расходуется на процесс бактериальной сульфат-редукции, идущей с выделением H_2S и CH_4 . Причем большая часть ОВ (до 70%) разлагается в аэробных условиях, т.е. в воде и у самого дна, а около 30% – в анаэробной обстановке, в придонном иле [2].

В работе [3] Е.А. Романкевичем обоснованы баланс разных форм ОВ в Мировом океане и типы его преобразования. Количественной характеристикой процессов поступления, разложения и синтеза ОВ в океане является соотношение растворенного, взвешенного и живого ОВ, равное 100:1 и 7:0,16. В толще вод до минеральных растворимых форм распадается 92–97% аллохтонного (привносимого с суши) и океанического ОВ, в котором содержание аминокислот и белковоподобных соединений уменьшается в 10–100 раз. В форме взвеси дна достигают лишь 3–8% ОВ от его общего валового количества. Последующее его преобразование в донных осадках происходит за счет бентосных организмов, которые способны утилизировать уже глубоко преобразованное (гумифицированное) ОВ. Вследствие этого доля захороненного в осадках ОВ от общей его суммы, поступающей с суши и образующейся в морской воде, характеризуется небольшим коэффициентом его фоссилизации. Для отложений подводных окраин он равен 0,4, для отложений ложа океанов – 0,1%, а для голоценовых осадков – 0,2%.

На последующих этапах диагенеза не происходит накопления в осадках органического вещества, образующегося в аэробных условиях. Среднее содержание ОВ в осадках различных областей Мирового океана [4], на основании которого делается заключение о нефтегазоносности осадочных палеобассейнов, составляет 0,22% во внутренних областях океанов в современных осадках и 0,71% – по их периферии. В различных стратиграфических горизонтах осадочного чехла океанов от плейстоцена до юры среднее содержание ОВ варьирует от 0,2 до 1,5%, при преобладании его в пелитах и снижении – в терригенных отложениях.

Изучение ОВ донных отложений в акваториях Охотского и Японского морей [5] и анализ проб осадков, отобранных на северо-восточном шельфе Сахалина, шельфе Курил и Камчатки, на склоне Татарского пролива, а также в глубоководной впадине Дерюгина,

позволили получить весьма интересные результаты. Оказалось, что гораздо в меньшей степени изучена битуминозность современных и диагенетически преобразованных осадков этих морей, позволяющая судить о масштабах генерации ОВ в современных приповерхностных условиях.

Битуминозные компоненты ОВ аналитически определяются как битумоиды (в отличие от битумов — природных продуктов преобразования нефти). В компонентном составе битумоидов выделяются те же фракции, что и в нефтях: масла, смолы и асфальтены.

Процесс образования битумоидов в верхней части донных и диагенетически преобразованных отложений и последующего их преобразования в геологическом разрезе связан с вертикальной миграцией глубинных флюидов на всем протяжении формирования осадочного бассейна и с воздействием дегазации на преобразования горных пород и ОВ. Интенсивность поступления глубинных флюидов определяется этапами активизации региональных геодинамических процессов в областях рифтогенеза, к которым относятся и современные зоны морей. По данным [6], современный глубинный углеводородный поток, проходящий через поверхность Земли, составляет $\sim 2.5 \times 10^{14}$ г углерода/год.

К геодинамическим процессам, способствующим дегазации глубинных флюидов при формировании осадочных бассейнов в зонах рифтогенеза, как палео-, так и современных, относятся проявление сейсмичности и активизация зон разломов. На примере Байкальской рифтовой зоны, формирование которой еще не завершилось в настоящее время, и рифтовых впадин Прибайкалья показано [7, 8], что активность глубинных разломов на этих территориях приводит к сейсмическим событиям, предопределяющим поддержание блоковой структуры в породах фундамента. 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 и на инверсионных стадиях развития рифтов [9]. Также давно известны работы Ю.О. Кузьмина по современной геодинамике разломных зон [10] в пределах платформенных и сейсмоактивных регионов. Важно подчеркнуть, что высокоградиентные движения, превышающие на порядок уровень региональных, связаны не с перемещением бортов разломных зон, — т.е. не блоков пород, разделенных разломной

зоной, – а с изменениями физических свойств пород в локальных объемах самих разломных зон, способствующими их флюидопроводности.

В пределах рифтовых впадин процесс дегазации легких газов (H_2 , CH_4 , CO_2 и др.) длится сотни тысяч лет и приводит к метасоматическим изменениям минералогического состава осадочных отложений, цементаобразующих минералов, прочностных и емкостных свойств пород, а также к растворению масел, смол, асфальтенов и других углеводородных компонентов, образовавшихся в породах в периоды активизации и длительного затухания геодинамических процессов [11].

Наличие в залежах нефтяных и газоконденсатных месторождений термогенной составляющей – биомаркеров, представляющих собой сложные органические вещества и сходных по структуре с компонентами, создаваемыми только живыми организмами (липидами, стероидами, порфиринами), позволяет говорить о распространении микроорганизмов в разрезе осадочных пород.

По данным [12], в работах микробиологов последних лет индикаторы активности архей ANME-1, потребляющих метан, были найдены в сообществах микроорганизмов в осадочных породах, как в придонном иле, так и на глубинах до одного километра. Хотя сообщества микроорганизмов, осуществляющих анаэробное окисление метана, по мнению [12], до сих пор не удалось культивировать, секвенирование геномов и липидные биомаркеры позволяют выделять три типа с подтипами архей (архебактерий), составляющих основу таких сообществ. Это типы ANME-1, ANME-2, ANME-3, родственные с культивированной группой архей *Methanosarcinales*. Исходя из данных представлений, можно предположить, что в пределах глубинных слоев горных пород существуют биоценозы древних анаэробных микроорганизмов, взаимосвязанных метаболическими процессами. Их жизнедеятельность, в основном, осуществляется благодаря процессам глубинной дегазации Земли.

Рассматривая феномен (Э.М. Галимов), заключающийся в закономерной корреляции расчетного бета-фактора молекул хемофоссилий и их изотопного (по углероду) состава, автор статьи [12] предложил свою реконструкцию процессов биотрансформации углеводородных флюидов, согласно которой биомаркеры образованы микроорганизмами подземной биосферы и не связаны с захоронением организмов наземных экосистем. Другими словами, аномальное размножение глубинных анаэробных микроорганизмов и последующее преобразование их органических остатков в нефтяные

углеводороды в геологическом времени будет происходить непосредственно на тех этажах осадочного чехла, в которые за счет глубинной дегазации поступали питательные компоненты для флюидотрофов. К ним можно отнести локализованные вертикальные зоны разгрузки флюидных потоков и растворов, а также латеральные зоны горных пород, являющиеся промежуточными или конечными объектами их накопления.

Распространение микробиальных сообществ в осадочном разрезе современных морей в пределах иловых отложений и глубоко залегающих пород позволяет также предположить, что источником битумоидов в этих осадках могут являться преобразованные остатки микроорганизмов. Многими авторами (В.В. Вебером, О.К. Бордовским, Е.А. Романкевичем, А.И. Горской, К.Ф. Родионовой, В.А. Успенским, А.И. Данюшевской, Э.М. Галимовым, А.А. Геодекином, Р. Арпино, Дж. Паласом, Б. Симонейтом, Р. Смитом, Дж. Хантом) также подтверждается, что главным источником битумоидов в современных осадках является липидная фракция исходных живых организмов как наиболее близкая по составу к нефти. Преобразование липидной фракции микроорганизмов на стадии погружения осадочных бассейнов происходит за счет тех же глубинных потоков флюидов в форме геополимеров и нефтеподобных углеводородов, которые не стабильны при изменении P–T-условий. Примеры таких геополимеров приведены в работах Н.А. Скибицкой с соавторами. Проведенные ими обширные исследования карбонатного вещества, слагающего залежь углеводородов, показали, что данное вещество имеет глобулярную или фибриллярную структуру и обладает свойствами, характерными для органических полимеров [13].

Нефтеподобные УВ выявляются в широких пределах по всему разрезу осадочного чехла платформенных территорий и межгорных впадин. Только 30% из обследованных более чем 500 осадочных бассейнов отнесены к промышленно нефтегазоносным. В то же время запасы нефти и газа в отдельных крупных нефтегазоносных бассейнах мира существенно превышают потенциалы питающих нефтематеринских толщ [14].

В докладе А.А. Маракушева и Л.Л. Перчука [15] еще в 1971 г., несмотря на общее признание в то время научной концепции о кремний-кислородной модели Земли, были изложены новые представления о роли первоначально восстановленных глубинных флюидов (CH_4 , H_2 , CO и др.) по мере их проникновения в верхние части мантии и в земную кору и окисления по схемам: $\text{CH}_4 \rightarrow \text{CO}$, $\text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$, $\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2$ и т.д. В последующих работах А.А. Маракушевым с соавторами была сформулирована модель

двухстадийного развития флюидов, генерируемых земным ядром через посредство мантийных магматических очагов. В [16] представлена диаграмма, на которой показано, что генерация метана и этана (легких углеводородов) сменяется образованием более тяжелых углеводородов и графита. По представлениям авторов, флюиды, импульсивно выделяющиеся из земного ядра, первоначально имеют водородный состав, тогда как кислородные компоненты в них играют второстепенную роль. Мантийные процессы, приводящие к растяжению силикатной оболочки Земли, обуславливают селективную проницаемость и аномальную миграцию водорода в данных зонах. В этих условиях водород не способен накапливаться, что создает условия для образования углекислых водных растворов (первая стадия – $\text{H}_2 + 2\text{CO} = \text{H}_2\text{O} + 0,5\text{CO}_2 + 1,5\text{C}$), повышающих агрессивность флюидов по отношению к породам гранитного слоя и приводящих к значительным повышениям температуры в этих зонах и образованию в них депрессий.

Процессы снижения геодинамической активности, связанные со сжатием Земли, создают условия, препятствующие миграции водорода, а следовательно, его накоплению в пределах пород верхней мантии. Это способствует генерации в них углеводородов (вторая стадия – $3\text{H}_2 + \text{CO} = \text{H}_2\text{O} + \text{CH}_4$, $5\text{H}_2 + 2\text{CO} = 2\text{H}_2\text{O} + \text{C}_2\text{H}_6$ и др). Под воздействием водорода происходит разложение кислотных компонентов флюидов ($4\text{H}_2 + \text{H}_2\text{CO}_3 = 3\text{H}_2\text{O} + \text{CH}_4$), что определяет щелочной характер магматизма с выносом углеводородных соединений в верхние части коры и осадочного чехла.

Для общей оценки процесса преобразования битумоидов в осадочном разрезе платформенных отложений коротко коснемся вопросов растворения углеводородов в сжатом газе. По данным [17], растворяющая способность газа по отношению к углеводородам (жидкие, смолы и асфальтены) уменьшается в ряду: пропан, двуокись углерода, метан, этан. Растворяющая способность CO_2 значительно превышает таковую у метана начиная с температур 110–120 °С. Газовые потоки последовательно извлекают из породы разные по групповому составу УВ – сначала преимущественно парафиновые, затем нафтенные, ароматические, смолистые вещества, асфальтены. Также, помимо жидких углеводородов, смол и асфальтенов, в сжатых газах растворяется вода. Растворимость воды в метане в интервале давлений 10–50 МПа и при температуре 100 °С изменяется в пределах 875–1344 г/м³, а при температуре 204 °С и давлении 50 МПа достигает 13448 г/м³. Эти данные позволяют говорить о том, что в природных условиях в сжатом газе находится водоуглеводородная смесь. Высокая растворимость воды в газе

снижает растворимость углеводородных газов. Поэтому для миграции жидких углеводородов и асфальтено-смолистых соединений в верхние горизонты осадочного чехла в газовой фазе требуется огромное количество легких газов.

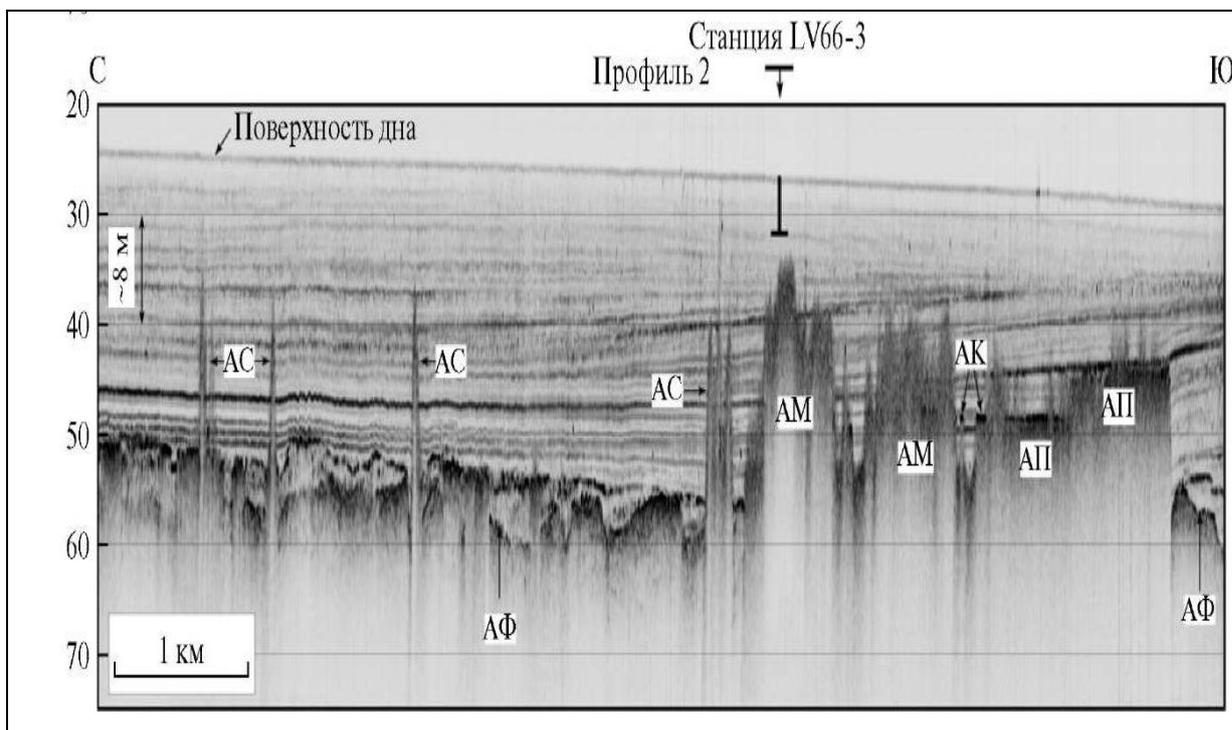
Внедрение большого объема критически сжатой водогазовой смеси с глубин 5–8 км в осадочные породы в пределах локальных структур платформенных территорий может осуществляться только за счет длительной геодинамической активности в областях рифтогенеза по зонам тектонических нарушений, которые являются унаследованными в фундаменте и осадочном чехле.

К настоящему времени также выполнены исследования по химико-битуминологическому изучению состава ОВ осадков Охотского моря. Автор [8] приходит к выводу о том, что современное высокое содержание в осадках битумоидов и повышенная степень превращения ОВ донных осадков обусловлены, в первую очередь, высокой тектоносейсмической активностью Охотоморского региона.

По данным [18], 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). 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.

В работе [5] установлено, что глубинный флюид находится в составе аномальных газогеохимических полей в приповерхностных геологических структурах Охотоморского и Япономорского регионов, не только в сейсмоактивных зонах, но и в низкосейсмичных зонах. Результаты исследования химического состава природных газов, содержащихся в породах разнотипных осадочных бассейнов и тектонических прогибов Охотского моря и его побережья, свидетельствуют о том, что распределение гелия, водорода, углекислого и углеводородных газов, а также различия в содержании гомологов метана и их изомеров определяются особенностями геодинамического строения этих районов.

Результаты работы [19] по выявлению сейсмоакустических аномалий в северной части Амурского залива указывают на процессы глубинной миграции метана и его накопления под флюидонепроницаемыми горизонтами голоценовых отложений. Формы накопления метана проявляются в разных акустических аномалиях в зависимости от литологического состава осадков (рисунок).



а)



б)

Примеры сейсмоакустической записи, иллюстрирующей строение голоценовых осадков и акустические аномалии в Амурском заливе:

а) АФ – акустический фундамент; АП, АМ, АС, АК – типы акустических аномалий, соответственно – «покров», «мутность», «столбы», «колонны»; б) территория исследования (прямоугольник, закрашенный серым цветом)

Из рисунка видно, что аномалии типа «столбы» на отдельных участках сливаются, образуя аномалии типа «мутность». В некоторых случаях последние прослеживаются до поверхности дна, что свидетельствует о поступлении метана в водную толщу. При наличии в разрезе флюидонепроницаемого слоя свободный газ, скапливающийся под ним, формирует сильноотражающие горизонты и (или) акустические аномалии горизонтального простирания.

Подобные геохимические и сейсмоакустические исследования проведены в Южно-Баренцевской впадине, в пределах Штокмановской структуры и показывают корреляцию процессов сипинга и ароматичности ОВ в донных осадках. Подобные процессы также отмечаются в норвежском секторе Баренцева моря в зоне распространения покмарок.

Выводы

Приведенные данные о процессах современной дегазации, связанные с территориями проявления сейсмических событий, относящихся к областям рифтогенеза, позволяют сделать вывод о том, что эти области в геологическом времени периодически испытывали активизацию геодинамических процессов. Их проявление на современном этапе в пределах шельфовых зон морей способствует миграции глубинных флюидов и растворов в пределы земной коры и осадочного чехла по зонам разломов отрывного (раздвигового) типа. Локализация процессов дегазации в породах осадочного чехла, с одной стороны, создает локальные формы накопления УВ в виде месторождений, с другой – является способом доставки питательных веществ для флюидотрофов и развития их биоцинозов.

Современные данные о процессах преобразования ОВ морского и террегенного генезиса в аэробных условиях и их захороненного количества в осадочных породах не позволяют говорить об их определяющей роли в формировании месторождений УВ.

Участие ОВ в процессе формирования нефтеподобных углеводородов может быть обусловлено в основном существованием анаэробных микроорганизмов, аномальные содержания которых будут приурочены к зонам активной дегазации, в которых и происходит преобразование их органических остатков в битуминозные компоненты.

Исходя из периодичности проявления геодинамических процессов в рифтогенных впадинах, можно предположить, что образование битумоидов в горных породах в процессе формирования осадочных бассейнов происходит в пределах всего разреза, где существуют зоны разгрузки флюидов.

Все эти факты свидетельствуют о накоплении легких и тяжелых углеводородов в процессе всей геологической и геодинамической истории формирования осадочного бассейна за счет глубинной дегазации, осуществляющей регулирование численности анаэробных микроорганизмов и преобразование их остатков в нефтеподобные соединения. Впоследствии эти соединения вносят свой вклад в дополнительный объем нефтегазовых залежей.

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. *Баженова О.К., Баженова Т.К.* Происхождение нефти – фундаментальная проблема геологии (современное состояние проблемы) // Литология и полез. ископаемые. 2008. № 5. С. 541–552.
2. *Романкевич Е.А.* Геохимия органического вещества в океане. М.: Наука, 1977. 256 с.
3. *Романкевич Е.А., Ветров А.А.* Цикл углерода в арктических морях России. М.: Наука, 2001. 302 с.
4. *Троцюк В.Я., Марина М.М.* Органический углерод в отложениях Мирового океана. М.: Наука, 1988. 256 с.
5. *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.
6. *Валяев Б.М.* Углеводородная дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений // Геология нефти и газа. 1997. № 9. С. 30–37.
7. *Лунина О.В., Гладков А.С., Неведрова Н.Н.* Рифтовые впадины Прибайкалья: тектоническое строение и история. Новосибирск: Гео, 2009. 316 с.
8. *Шерман С.И.* Новые данные о закономерностях активизации разломов в Байкальской рифтовой системе и на соседних территориях // ДАН. 2007. Т. 415, № 1. С. 110–114.
9. *Никонов А.И.* Роль рифтогенеза в формировании месторождений углеводородов и их структурной неоднородности // Вести газовой науки: науч.-техн. сб. 2012. № 1(9). С. 101–112.

10. Кузьмин Ю.О. Современные аномальные деформации в зонах разломов: сдвиг или раздвиг? // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2018. Т. 9, № 3. С. 967–987.
11. Никонов А.И. Геодинамически обусловленная метасоматическая зональность пород платформенных нефтегазоносных структур [Электрон. ресурс] // Актуальные проблемы нефти и газа: науч. сет. изд. 2018. № 1(20). 27 с. – Режим доступа: <http://www.oilgasjournal.ru> (Дата обращения 10.11.2018).
12. Чудецкий М.Ю. Микробильный генезис изопреноидных хемофоссилий – ключ к расшифровке полигенности и вертикальной зональности нефтей // Дегазация Земли и генезис углеводородных флюидов и месторождений. М., 2002. С. 152–170.
13. Скибицкая Н.А., Яковлева О.П., Кузьмин В.А. Ресурсный потенциал минерально-органического полимера залежей углеводородов и его связь с дегазацией Земли // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезы: материалы Всерос. конф., 22–25 апр. 2008 г. М., 2008. С. 455–458.
14. Авилов В.И., Авилова С.Д. Хемолитоавтотрофия в сфере проблем нефтегазоносности акваторий // Геология, геофизика и разраб. нефт. и газовых месторождений. 2002. № 10. С. 7–9.
15. Маракушев А.А., Перчук Л.Л. Происхождение и эволюция трансмагматических и метаморфических флюидов // Международный геохимический конгресс: тез. докл. М., 1971. Т. 2. С. 513–514.
16. Маракушев А.А., Маракушев С.А. Образование нефтяных и газовых месторождений // Литология и полез. ископаемые. 2008. № 5. С. 505–521.
17. Высоцкий И.В., Высоцкий В.И. Формирование нефтяных, газовых и конденсатногазовых месторождений. М.: Недра, 1986. 228 с.
18. Захарова С.С. Влияние тектоносейсмической активности на процессы преобразования органического вещества донных осадков Охотского моря // Альм. соврем. науки и образования. 2008. № 11. С. 69–71.
19. Акуличев В.А., Астахов А.С., Карнаух В.Н., Аксентов К.И., Артёмова А.В., Босин А.А., Верещагина О.Ф., Вологина Е.Г., Иванов М.В., Калинин В.В., Суховеев Е.Н. Геоакустические признаки миграции метана субаквальных угленосных толщ в голоценовый осадочный чехол (Амурский залив Японского моря) // ДАН. 2015. Т. 460, № 5. С. 589–594.