

УДК 550.4/543.454

ПОТОКИ ГАЗОВ В ПРИДОННОЙ ЗОНЕ ГЛУБОКОВОДНОЙ ЧАСТИ ОКЕАНА

© 2003 г. В. И. Авиллов, С. Д. Авилова

Представлено академиком А.С. Мониным 20.07.2002 г.

Поступило 02.10.2002 г.

Глубинным потокам газообразных компонентов отводилось заметное место в геохимии природных газов [1]. Они рассматривались как своеобразное “газовое дыхание” литосферы [2] главным образом в виде рассеянных потоков, поступающих к земной поверхности. Прямые измерения рассеянных потоков метана позволили оценить масштаб массопереноса как более значимый, чем дают точечные источники [3]. Главным итогом использования нетрадиционных подходов для интерпретации всей совокупности современных данных стал вывод о существовании локализованных потоков глубинных углеводородно-водных флюидов, пронизывающих разрез осадков и осадочных пород дна морей и океанов [4]. В зоне локальных проявлений глубинных флюидных потоков в результате обобщения комплекса газобиохимических данных обнаружены необычные эффекты, связанные с процессами нефтегазообразования, миграции и накопления газов [5]. В то же время ряд вопросов сохраняет дискуссионность в оценке генезиса углеводородных флюидов и месторождений, в интерпретации изотопных данных и сопоставлении противоречивых результатов геологических и геохимических исследований. Становится все очевиднее необходимость их решения для обновления теоретического базиса в фундаментальных аспектах нефтегазовой геологии [4]. Для более достоверного понимания названных проблем необходимо дополнительно привлекать новые данные биохимических и геоэкологических исследований и использовать результаты широких обобщений [6, 7].

В настоящей работе представлены новые данные натурных исследований по флюидопроявлениям на границе вода–дно в абиссали различных океанов. Измерения были выполнены в придонной зоне: в пробах придонной воды, отобранных в 1.5–3 м от дна специально разработанным герметичным пробоотборником при любых глуби-

нах океана, и образцах грунта из герметичной грунтовой трубки, тяжелых прямоточных геологических трубок и дночерпателей. В пробах придонной воды и донного осадка определяли газообразные компоненты (углеводороды, гелий, водород, двуокись углерода, перманентные газы и биохимические показатели (аденозинтрифосфат – АТФ, биомасса активных живых микроорганизмов по АТФ–БАЖМ, различная ферментная активность, растворенный органический углерод – $C_{орг}^{раств}$, азот карбамида). Методика отбора проб и определения изученных показателей подробно описана ранее [5, 6].

Получен новый фактический материал. Впервые представлены данные по распределению одновременно нескольких показателей в разрезе придонной зоны. На рис. 1 показано вертикальное распределение биохимических показателей по грунтовой колонке на станции, расположенной в Аравийской котловине Индийского океана. По концентрации главенствующего биохимического показателя – АТФ и характеру вертикального изменения его содержания такое распределение относится к категории типичного [6]. Обращает на себя внимание, что распределение и остальных биохимических характеристик также типичное – достигая максимума на горизонте 1–1.5 м, они затем имеют ярко выраженную тенденцию уменьшения содержаний вниз по грунтовой колонке. Аналогичные данные получены также в Сомалийской и Маскаренской котловинах, где в поверхностном слое осадков (0–5 см) величины АТФ достигали 90 нг/г, а в грунтовом растворе $C_{орг}^{раств}$ – 10 мг/л, азота карбамида – 250 мкгN/л. В придонных водах этих же котловин измерены содержания углеводородных газов (УВГ) в пределах $(0.16–2.8) \cdot 10^{-4}$ мл/л, двуокиси углерода – 0.2–0.6 мл/л, кислорода – 4.0–4.7 мл/л, азота – 15–19 мл/л, растворенного органического углерода – 1–3 мг/л, азота карбамида – 30–50 мкгN/л, АТФ (БАЖМ) – 80–100 нг/л (20–25 мкгC/л).

Для глубоководных котловин остальных океанов также характерны невысокие величины газо-

*Институт океанологии им. П.П. Ширишова
Российской Академии наук, Москва*

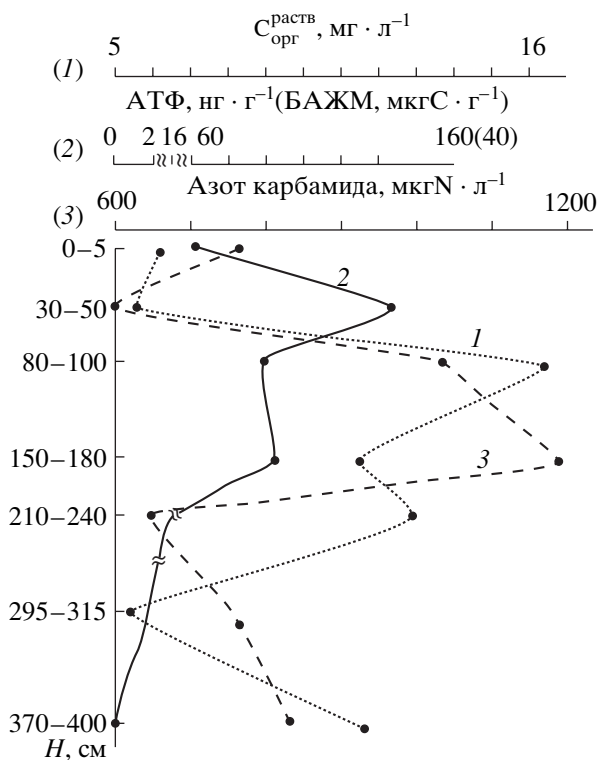


Рис. 1. Вертикальное распределение $C_{\text{орг}}^{\text{раств}}$ (1), АТФ (2), азота карбамида (3) в грунтовой колонке Аравийской котловины в Индийском океане (глубина 4030 м). H – здесь и на рис. 2, 3 интервал отбора проб.

биогеохимических показателей. В придонной воде Северо-Западной и Центральной котловин Тихого океана содержание метана составляло не более $1 \cdot 10^{-4}$ мл/л, кислород определен на уровне 4 мл/л, азот – (17–19) мл/л. В осадках для этих же районов выявлены низкие содержания УВГ как по поверхности из дночерпательных проб, так и по разрезу колонки длиной до 3 м (метана – до $37.3 \cdot 10^{-4}$ мл/кг). В Северной Атлантике в придонной воде Лофотенской котловины концентрация метана не превысила $1.6 \cdot 10^{-4}$ мл/л, а в осадках – $78 \cdot 10^{-4}$ мл/кг. В составе УВГ непредельные углеводороды преобладали над предельными.

На рис. 2 приведены полученные авторами данные на станциях, расположенных в области срединно-океанических хребтов Индийского океана. Во всех грунтовых колонках выявлено аномально высокое содержание АТФ, которое на 1–2 порядка выше, чем таковое в районе глубоководных котловин. И еще одно важное отличие от последних – концентрация АТФ стабильно возрастала вниз по грунтовой колонке к горизонтам 4.1–4.3 м. Такое вертикальное распределение АТФ следует рассматривать как атипичное, аномальное в сравнении с типичными профилями [6]. В придонной воде рифтовых зон Аравийско-Ин-

дийского и Маскаренского хребтов Индийского океана также зафиксированы аномально высокие концентрации: CH_4 $2.08 \cdot 10^{-4}$ мл/л, C_2H_6 $1.8 \cdot 10^{-4}$ мл/л, H_2 $40.3 \cdot 10^{-4}$ мл/л, CO_2 4.62 мл/л, АТФ (БАЖМ) 1520 нг/л (380 мкгС/л), $C_{\text{орг}}^{\text{раств}}$ 2.4 мг/л. Над хребтом Меррея в Аравийском море отдельные показатели еще выше: H_2 $270 \cdot 10^{-4}$ мл/л, CH_4 $15.9 \cdot 10^{-4}$ мл/л, C_2H_4 $8.87 \cdot 10^{-4}$ мл/л. В придонной зоне средней части трансформного разлома Меррей Тихого океана (глубина 5–6.5 км) при фоновых количествах УВГ найдены аномалии He и H_2 : их содержание в осадке возрастает в несколько раз к горизонту 1.5–2 м, достигая $290 \cdot 10^{-4}$ и $210 \cdot 10^{-4}$ мл/кг соответственно.

Данные по распределению показателей в осадках континентального склона в районе подводной дельты Инда приведены на рис. 3. Здесь зафиксированы фоновые концентрации АТФ (БАЖМ) и их снижение вплоть до аналитического нуля к горизонтам 2–3 м. Необычность ситуации усиливается атипичным составом газообразных компонентов: при невысоких содержаниях H_2 и УВГ, иногда полном отсутствии последних, устойчиво определяли He, иногда до аномально высокой концентрации – $11.3 \cdot 10^{-4}$ мл/л, в придонной воде. В ином регионе, у подножья континентального склона Северной Америки, в придонной воде и осадках измерены УВГ до C_5 , He и H_2 , их концентрации при этом увеличиваются вниз по грунтовой колонке в 5–15, а водорода – в 40 раз.

Выявленные различия в пространственном распределении газобиогеохимических показателей указывают на существование трех видов состояния придонных экосистем. Одно из них – состояние нормальной биологической активности, или типичное состояние, которое свойственно экосистемам придонной зоны океана с наиболее стабильным состоянием в его глубоководных котловинах. Оно формируется под многофакторным внешним воздействием: слабыми потоками вещества и энергии как сверху из фотической зоны (низкие скорости осадконакопления), так и снизу (диффузионный массоперенос при малой мощности осадков). Преобладающим фактором является поступление кислорода из воды в осадки, где протекают разнообразные процессы микробиального преобразования органического вещества. Показателем последнего служит фоновое распределение здесь газобиогеохимических показателей (рис. 1).

Состояние низкой биологической активности или угнетения экосистемы отличается почти полным прекращением деятельности микроорганизмов, и возникает подобное состояние в случае приостановления потока кислорода. Такое состояние свойственно восстановленным осадкам и проявляется в буквально исчезающих concentra-

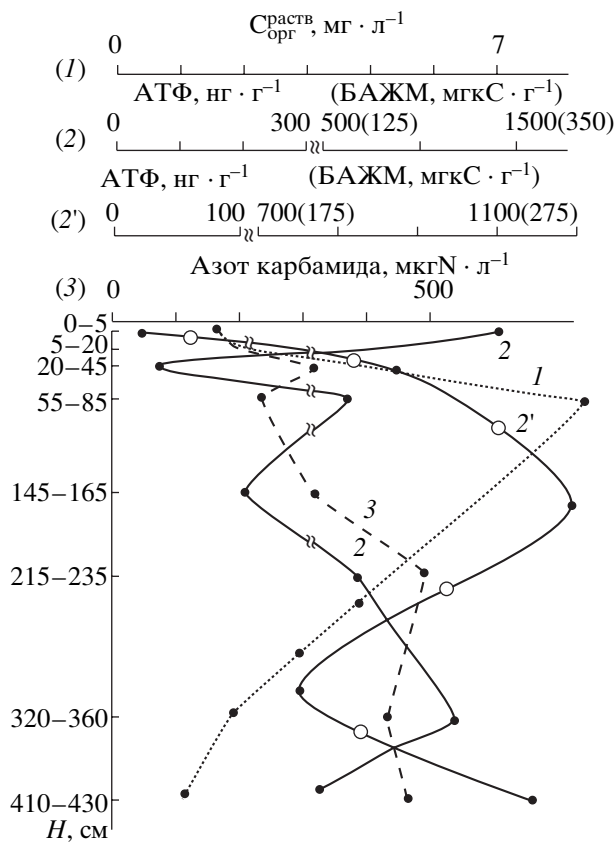


Рис. 2. Вертикальное распределение $C_{\text{орг}}^{\text{раств}}$ (1), АТФ (2) и азота карбамида (3) в грунтовой колонке рифтовой зоны Аравийско-Индийского хребта (глубина 5000 м) и АТФ (2') в районе Маскаренского хребта в Индийском океане (глубина 4600 м).

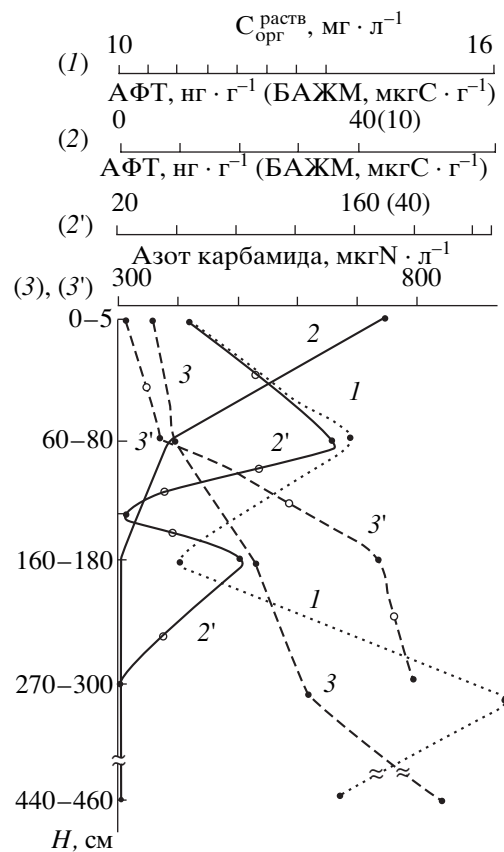


Рис. 3. Вертикальное распределение $C_{\text{орг}}^{\text{раств}}$ (1), АТФ (2) и азота карбамида (3) в грунтовой колонке (глубина 970 м) континентального склона от п-ова Индостан в Аравийскую котловину в Индийском океане и АТФ (2'), азота карбамида (3') там же (глубина 1980 м).

циях газобиогеохимических показателей (нижние горизонты грунтовых колонок – глубже 2–3 м на рис. 3).

Состояние повышенной, высокой биологической активности или аномальное состояние придонной экосистемы абиссали океана развивается, как правило, на интенсивном потоке вещества и энергии из более глубоких слоев осадочных пород. Здесь доминирующим фактором является глубинный поток газообразных флюидов, а преобладающим процессом – хемолитоавтотрофия. Проявление выражается в аномально высоких концентрациях величин газобиогеохимических показателей и характере их распределения (рис. 2).

Геозоологическое состояние придонной зоны океанов обусловлено вполне определенными процессами, поэтому геозоологический анализ и интерпретация новых данных дает важную дополнительную информацию для более достоверной оценки генезиса углеводородных флюидов и месторождений. В случае нормального состояния придонной экосистемы идут процессы образования сингенетических углеводородов и одновременно их окисление.

Глубинные потоки газов отсутствуют, поэтому не обнаруживаются He и H_2 . При состоянии экосистемы второго вида, когда она биологически пассивна, консервативна, новообразование и окисление углеводородов практически не происходят. Однако, если же УВГ найдены в надфоновых количествах, это указывает на их глубинное происхождение; подобное уже было определено нами в отдельных точках глубоководных осадков Черного моря [5]. В аномальных областях с состоянием повышенной и высокой биологической активности придонной экосистемы состав смеси углеводородов, как правило, смешанный. Здесь проявляется многообразие композиций природных явлений и сосуществование протекающих параллельно процессов.

Новые данные показали, что прежде всего в аномалиях присутствуют потоки глубинных флюидов. Измеренные CH_4 , H_2 , CO_2 в придонной среде разломов и на крыльях срединных хребтов Индийского океана, континентального склона Аравийского полуострова в Аденский залив указывают на наличие глубинных потоков из очагов

разгрузки водно-газовых источников в активных геодинамических зонах. Определенная доля метана поступает из глубинных слоев при серпентизации океанической коры [8].

Появление в полигенетической газовой смеси дополнительного компонента – гелия отмечено в придонной среде на севере Аравийского моря и Оманского залива Индийского океана в регионах со сложной складчато-блоковой структурой осадочного чехла, в средней части трансформального разлома Меррей и у подножья континентального склона Северной Америки, отличающихся современной тектонической активностью вблизи приосевой зоны Восточно-Тихоокеанского поднятия (ВТП), в разломах Романш и Сан-Паулу в Атлантическом океане, где также, по нашим наблюдениям, глубинный поток гелия и водорода прослеживается вплоть до поверхностных вод. Наличие гелия более определенно указывает на глубинный генезис компонентов смеси (He , H_2 , CO_2 , CH_4), соединенных в глубинном потоке в процессе разгрузки литосферы в активных геодинамических зонах. Соответственно некоторая часть измеренного в придонной среде метана в зависимости от интенсивности разгрузки поступает в результате глубинной дегазации углеводородов [4].

В то же время глубинные потоки газообразных флюидов по пути миграции инициируют параллельный процесс – активизацию биохимических преобразований в осадках. В ареале действия потоков создается состояние аномальной биологической активности за счет интенсивного развития сообщества микроорганизмов преимущественно с хемолитоавтотрофным типом обмена веществ [9, 10]. В придонной экосистеме явление хемолитоавтотрофии приводит к образованию автохтонных углеводородов, главным образом метана, которые смешиваются с глубинными газами в верхнем слое осадка и на выходе в воду. Мощные потоки H_2 и CO_2 порождают высокие скорости генерации биогенного метана, который в совокупности с эндогенной составляющей вызывает подъем геохимической границы анаэробно-аэробного раздела к поверхности осадка или ее выходу в воду [5].

Обнаружение хемолитоавтотрофии в грунтовых колонках вплоть до нижней точки опробования ставит вопрос о глубине ее распространения в осадочном разрезе. По результатам экспериментов авторов [11] и изотопных исследований [12] можно прогнозировать ее проявление от дна океана до глубины осадка в сотни и тысячи метров. Другими словами, в абиссали океана с корой океанического типа и маломощным осадочным чехлом (обычно первые сотни метров) явление хемолитоавтотрофии имеет место на всех уровнях осадков при наличии глубинных потоков необходимого компонентного состава. Главным резуль-

татом хемолитоавтотрофии является микробильное образование метана, которое по этому важному геохимическому признаку обычно называют анаэробным метаногенезом. Биогенный метан, генерированный в нижних слоях осадков, участвует в глубинном потоке углеводородов и во всех сопряженных явлениях: сбросе углеводородов в придонные воды и образовании различного рода скоплений углеводородов в осадочном разрезе, включая газогидраты, водно-газовые разуплотнения осадков типа “рокфоровых илов”, газовые пузыри, залежи [11].

Кроме метаногенеза, хемолитоавтотрофия активно включается еще в одно природное явление – обогащение осадочных пород органическим веществом, которое часто расценивается как главный показатель процесса формирования нефтематеринских толщ. Активная жизнедеятельность сообщества микроорганизмов внутри осадков, т.е. *in situ*, приводит к образованию органического вещества: для своей жизнедеятельности они используют неорганические компоненты, синтезируя в клетке органические соединения и обогащая последними среду обитания – сами осадки. В придонных аномалиях оно также сопровождается повышенными содержаниями C_{org} , которые в илах достигали 6–7%, как установлено ранее [13]. По своей сути явление хемолитоавтотрофии связано функционально только с глубинными потоками смеси природных газов и не лимитировано ни глубиной водной толщи, ни соленостью воды, ни широтностью акватории. Роль хемолитоавтотрофии в обогащении осадков органическим веществом *in situ* гораздо выше, чем принято считать [14]. Являясь порождением локализованных глубинных потоков, хемолитоавтотрофия приводит к обогащению органическим веществом (ОВ) ограниченного объема осадков в виде пластов, линз, залежей, генетически не связанных с явлениями на дневной сфере планеты. Эта объемная масса богатых ОВ осадков в дальнейшей геологической истории может стать локализованным скоплением нефти и газа, минуя процессы первичной миграции.

На континентальном склоне и у его подножья в районах, где по геофизическим данным мощность осадочного чехла превышает 1 км, достигая временами 3–5 км, к глубинным потокам флюидов могут добавляться УВГ, водород, двуокись углерода из зоны катагенеза. При этом мощность потоков усиливается, а процессы носят более ярко выраженный характер, как было найдено в районе ВТП у Северной Америки. Необычная картина распределения зафиксирована в пределах подводной дельты Инда по континентальному склону от п-ова Индостан в Аравийскую котловину, где измеренные в придонной зоне гелий и водород являются индикаторами глубинных потоков, но в них отсутствуют метан и им не соот-

ветствует низкий биологический уровень состояния экосистемы (рис. 3). Очевидно, причина кроется в существовании газогидратных толщ в осадках подводной дельты Инда. Слой газогидратов является своеобразным экраном, аккумулируя потоки УВГ, частично водорода, и препятствует активизации микроорганизмов в вышележащих слоях (рис. 3). Нами предложен новый газобиогеохимический критерий идентификации газогидратов при тестировании придонной зоны: наличие гелия при отсутствии или при фоновых количествах УВГ, водорода и биохимических показателей. По этому критерию к газогидратообразующим относятся довольно многочисленные регионы с современной разломной тектоникой, например зона трансформного разлома Меррей и другие рассмотренные выше активные геодинамические системы. Предложенный геохимический критерий хорошо согласуется с геологическими и геофизическими критериями выявления гидратоносных площадей под дном акваторий.

В процессе изучения придонной среды акваторий океана выявлен комплекс газобиогеохимических показателей, характеризующих проявление там глубинных потоков газообразных компонентов: аномально высокие содержания обычно детектируемых компонентов – CH_4 , CO_2 , N_2 , АТФ (БАЖМ), а также высокая ферментная активность; изменение компонентного состава смеси природных газов – появление H_2 , He , H_2S , гомологов метана; атипичное вертикальное распределение показателей в осадках – возрастание концентраций с глубиной; подъем геохимической аэробно-анаэробной границы к поверхности осадка. Установлен ряд закономерностей. Глубинные потоки порождают аномальное состояние повышенной и высокой биологической активности придонной экосистемы главным образом за счет интенсивного развития сообщества микроорганизмов преимущественно с хемолитоавтотрофным типом обмена веществ. В аномалиях поток УВГ состоит из смеси эндогенных и биохимических (в основном за счет хемолитоавтотрофии) компонентов, иногда с добавлением катагенных УВГ. Глубинные потоки проявляются в активных геодинамических зонах, а придонная геоэкологическая аномалия служит индикаторами процессов глубинной дегазации и разгрузки литосферы, другой геологической активности недр. Выявленные отдельные аспекты процессов разгрузки глубинных потоков на дне океана и сопутствующих преобразований в осадочном разрезе вносят

вклад в решение теоретических вопросов нефтегазообразования, генезиса углеводородов и их скоплений.

Гидросфера Земли, особенно глубоководная часть океана, существенно влияет на процессы генерации, миграции и аккумуляции природных газов литосферы. Воздействие гидростатического давления значительно повышает сорбционные свойства донных отложений, способствуя газогидратообразованию. Океан выступает как бы в роли планетарной ловушки глубинных потоков, аккумулируя под своим дном хотя и локальные, но пополняемые скопления углеводородов. Представленные материалы по потокам послужат более достоверным оценкам ресурсов Мирового океана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов В.А. Геохимия природных газов. М.: Недра, 1971. 354 с.
2. Сидоренко А.В., Карус Е.В., Кузнецов О.Л. и др. // ДАН. 1979. Т. 245. № 6. С. 1465–1478.
3. Троцюк В.Я., Авилов В.И. // ДАН. 1986. Т. 291. № 6. С. 1479–1482.
4. Дмитриевский А.Н., Валяев Б.М. В сб.: Дегазация Земли и генезис углеводородных флюидов и месторождений. М.: ГЕОС, 2002. С. 7–36.
5. Авилов В.И., Авилова С.Д. // ДАН. 2001. Т. 376. № 4. С. 522–525.
6. Авилов В.И., Авилова С.Д. Оценка экологического состояния водных объектов по биохимическим показателям (методические указания). М., 1997. 38 с.
7. Dmitrievsky A.N., Avilov V.I., Avilova S.D. PACON 99. Humanity and World ocean. Abstr. Moscow, 1999. P. 265.
8. Dmitrievsky A.N., Balanyuk I.E., Sorokhtin O.G. et al. PACON. Abstrs. Honolulu, 2000. P. 96.
9. Авилов В.И., Авилова С.Д. // Наука в России. 2001. № 3. С. 56–61.
10. Авилова С.Д. // Океанология. 1984. Т. 24. № 3. С. 460–463.
11. Авилов В.И., Авилова С.Д. // ДАН. 1999. Т. 369. № 5. С. 664–666.
12. Валяев Б.М., Тутков Г.А., Чудецкий М.Ю. В сб.: Дегазация Земли и генезис углеводородных флюидов и месторождений. М.: ГЕОС, 2002. С. 108–134.
13. Геодекян А.А., Авилов В.И., Авилова С.Д., Троцюк В.Я. // ДАН. 1988. Т. 299. № 2. С. 449–453.
14. Авилов В.И., Авилова С.Д. Новые идеи в геохимии нефти и газа. К созданию общей теории нефтегазоносности недр. М.: ГЕОС, 2002. Кн. 1. С. 16–17.