

ХЕМОЛИТОАВТОТРОФИЯ В СФЕРЕ ПРОБЛЕМ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ АКВАТОРИЙ

В. И. Авилов, С. Д. Авилова

(Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН)

Хемолитоавтотрофия в природных системах Мирового океана долгое время оставалась вне поля зрения ученых. Главная причина заключается в том, что это явление довольно сложно детектировать, а устойчиво применявшийся комплекс микробиологических методов был направлен на выращивание бактериальных клеток на разнообразных питательных средах, не входящих в "рацион" хемолитоавтотрофов. Поэтому последние если и находились в испытываемых природных образцах, то из-за отсутствия необходимых для их жизнедеятельности компонентов в традиционно применявшихся агаре, мясопептонном бульоне и других никак себя не проявляли. Методы прямого микроскопирования также не позволяли их дифференцировать. Ситуация в корне изменилась с момента внедрения при непосредственном участии авторов биохимических методов исследования природных экосистем, прежде всего, в морях и океанах [2].

Роль биохимических исследований значительно возрастает и при изучении проблем нефтегазоносности акваторий в связи с обнаружением микроорганизмов на все больших глубинах осадочной толщи. Основа преимуществ биохимических методов лежит в возможности определять существование активных живых микроорганизмов и с высокой точностью (в нашей методологии погрешность составляет не более 5...10 %) устанавливать их количество в изучаемом объекте (вычислять биомассу активных живых микроорганизмов — БАЖМ). Кроме того, биохимические показатели позволяют надежно разделять погибшие и живые клетки, оценивать состояние последних. Эти преимущества весьма существенны при оценке влияния внешней среды на экосистемы акваторий, донных отложений, поскольку сообщество обитающих там микроорганизмов является одним из первых и наиболее быстро реагирующих на происходящие в ней изменения — главным образом на потоки вещества и энергии как из фотической зоны, так и из литосферы. По высказанным соображениям биохимические показатели отнесены к главенствующим при геоэкологических исследованиях в акваториях, в том числе при изучении их нефтегазоносности.

Микроорганизмы с хемолитоавтотрофным типом обмена веществ используют газы глубинных потоков для генерации биогенного метана и концентрирования органического вещества в осадках на горизонтах в сотни метров под морским дном, что приводит к скоплению углеводородов и газогидратообразованию. Явление хемолитоавтотрофии широко распространено в активных геодинамических зонах Мирового океана, таких, как система срединно-океанических хребтов, гидротермальные источники и др.

Chemolytoautotrophic anaerobic bacteria use deep flux gases for biogenic methane generation and organic carbon concentration in sediments on horizons up to hundreds meters under sea bottom that results in accumulation of hydrocarbons and gas hydrate formation. The phenomenon is widely distributed at regions of high geodynamic activity of the World Ocean such as system of the mid-oceanic ridges, hydrothermal zones and etc.

Для большей убедительности проведена систематизация методов океанологии и изучаемых ими групп биологически активных веществ и соединений по вкладу в оценку состояния экосистемы [2]. Гидробиохимические методы определяют состояние биоты. Гидрохимические показатели на 90...95 % характеризуют состояние среды и лишь на 5...10 % — саму клетку. Количественные данные газометрических измерений дают динамическую характеристику среды: наличие или отсутствие потоков газообразных компонентов.

Учитывая высказанную аргументацию, для получения достоверных и наиболее информативных данных при изучении нефтегазоносности акваторий и сопряженных геоэкологических явлений авторами была разработана специальная технология морских газобиогеохимических исследований. К ее главным методическим особенностям следует отнести широкий комплекс изучаемых показателей. В него входят все детектируемые на хроматографе газы: углеводороды от C₁ до C₅, гелий, водород, аргон, двуокись углерода, кислород, азот, а также содержание аденозинтрифосфата (сокращенно АТФ), азота карбамида, витаминов, C_{орг.}, активность гидролитических ферментов (амилолитическая, протеолитическая, липолитическая и щелочная фосфомоноэстеразы). Данный комплекс исследований по составу показателей уникален и по настоящее время. Состав комплекса не случаен. Он включает главенствующие показатели живого (АТФ и ферментная активность) и динамические характеристики среды (потоки легкоподвижных газообразных компонентов).

Другое обязательное требование технологии заключается в получении количественных характеристик по всем изучаемым показателям (погрешность метода в целом не должна превышать погрешность аналитических средств). Это является необходимым условием для изучения процессов в воде и грунте. Для этого разработаны специальные технические средства и методы пробоотбора [1]. На заключительной стадии обобщения фактического материала формируется база данных по результатам натурных наблюдений, осуществляется их интерпретация в совокупности с результатами широких обобщений. Ука-

занные преимущества применяемой разработанной авторами методологии позволяют с высокой степенью достоверности изучать природные явления в области геоэкологии, геохимии газов, имеющих непосредственное отношение к общей теории нефтегазоносности недр. Целостное рассмотрение комплекса собственных данных в аспекте проблем нефтегазовой геологии — цель настоящей работы.

В качестве основного объекта рассмотрения выбрано явление хемолитоавтотрофии, играющее узловую роль во многих процессах, происходящих в осадочном разрезе, тем более, что новая технология надежно идентифицирует его в природной среде. Хемолитоавтотрофия характеризуется интенсивной жизнедеятельностью микроорганизмов, которые способны использовать неорганические доноры электронов (прежде всего, водород) и получать почти весь углерод путем фиксации CO_2 . Обычно она сопровождается генерацией метана, и по этому важному геохимическому признаку этот процесс часто называют анаэробным метаногенезом. Из самой сути этого явления вытекают газобиогеохимические критерии его обнаружения.

Впервые в практике морских работ явление хемолитоавтотрофии было зафиксировано авторами в 1976 г. в термальных рассолах Красного моря, что впоследствии было признано открытием [3, 4]. Применение разработанной методологии дало возможность осуществить отбор достоверных проб гидротермальных вод с глубин более 2 км и измерить в них аномально высокие по сравнению с вышележащими аэробными красноморскими водами содержания: АТФ — в 4 раза выше, CO_2 — 5 раз, He, H_2 , углеводородные газы (УВГ) — на 3...4 порядка. Комплекс выполненных измерений явился базой для широких обобщений и выводов. Во-первых, обнаружена жизнь, основанная не на энергии фотосинтеза, а на хемолитоавтотрофии, когда при отсутствии кислорода на недоступных для солнечного света глубинах живые организмы в качестве питательного субстрата используют газы, поступающие ко дну из земных недр. Во-вторых, объяснен генезис необычайно большого количества УВГ как результат жизнедеятельности сообщества микроорганизмов, развившихся на глубинных флюидных потоках газообразных компонентов. Выводы обосновывают важное направление натурных наблюдений нефтегазовой геологии — изучение проявлений глубинных потоков на дне морей и океанов.

С использованием разработанной технологии исследована природная зона различных акваторий: в пробах придонной воды, отобранных в 1,5...3,0 м от дна специально разработанным герметичным проботборником при любых глубинах океана, и образцах грунта из герметичной грунтовой трубки, тяжелых прямоточных геологических трубок и дночерпателей. Во всех исследованных акваториях обнаружены зоны аномально высоких содержаний газобиогеохимических компонентов в придонной воде и донных осад-

ках. При этом концентрации компонентов — индикаторов хемолитоавтотрофии возрастали вниз по геохимическому разрезу.

В Балтийском море найдены высокие значения газобиогеохимических показателей (здесь и далее АТФ — в нг/г, а газы — в мл/кг влажного осадка): АТФ — 690, CH_4 — 300, H_2 — 0,02, CO_2 — 80. Эти зоны диагностировались геофизическими методами как геоакустические аномалии и были выражены морфоструктурными элементами в виде кратеров, воронок или траншей. В Карском и Баренцевом морях аномалии также проявлялись до максимальных глубин опробования, а содержания компонентов достигали АТФ — 170, CH_4 — 43, H_2 — 0,34. В Черном море явление хемолитоавтотрофии было зафиксировано как на шельфе, в "рокфоровых илах", так и в анаэробной глубоководной части. Максимальные концентрации компонентов были измерены в нижних слоях осадков и составили: АТФ — 240, CH_4 — 130, H_2 — 20, CO_2 — 2,2. В рифтовых зонах и на крыльях срединно-океанических хребтов содержание АТФ в осадках превысило 1300, а в придонной воде аномалии зафиксированы на уровне: АТФ — 1520 нг/л, CH_4 — $15,9 \cdot 10^{-4}$ мл/л, H_2 — $270 \cdot 10^{-4}$ мл/л, CO_2 — 4,62 мл/л.

Из рассмотренных материалов логично вытекают некоторые закономерности. В обнаруженных аномальных областях придонной среды акваторий зафиксированы проявления глубинных газовых потоков. В составе газообразных флюидов, как правило, присутствуют УВГ, H_2 , CO_2 , иногда встречаются He и H_2S . 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. Глубинные потоки активизируют состояние придонной экосистемы за счет развития там сообщества микроорганизмов преимущественно с хемолитоавтотрофным типом обмена веществ. Проявление глубинных потоков газообразных компонентов в придонной среде акваторий обнаруживается по комплексу газобиогеохимических показателей: аномально высокие содержания обычно детектируемых компонентов — CH_4 , CO_2 , N_2 , АТФ, 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 вниз по геохимическому разрезу; подъем геохимической аэробно-анаэробной границы к поверхности осадка. По геологическим данным аномальные области размещены в активных геодинамических зонах, а придонная геоэкологическая аномалия служит индикатором процессов глубинной дегазации и разгрузки литосферы, другой геологической активности недр.

Для большей убедительности своих оценок авторы имитировали процесс хемолитоавтотрофии в лабораторных условиях. Действительно, в экспериментах на потоке водорода и двуокиси углерода в мор-

ских илах размножились хемолитоавтотрофы, генерирующие метан [5]. Однако остался вопрос о масштабах этого явления. При современном уровне развития морской техники аналогичные проявления обнаружены на локальных участках морского дна, и их доля в общем объеме поступающей органики вроде бы незначительна. Более детальные исследования опровергают этот тезис. Кардинальные различия обнаружены в вертикальном распределении компонентов в осадках. В аномальных районах наблюдается картина, обратная закономерностям, установленным для фоновых районов. В этих аномальных зонах содержание газов, АТФ и ферментная активность возрастают с глубиной осадка, вплоть до забоя грунтовых трубок. А что происходит глубже? В образцах керна при бурении на Сахалинском шельфе АТФ фиксировался до максимальной глубины опробования — 23,3 м. В экспериментах на альбских глинах при моделировании термобарических условий недр (геостатическое давление $P = 500$ МПа и $T = 95$ °C) измерено содержание АТФ в количестве 43 нг/г. Детальные работы на полигонах в Черном море позволили выделить аномальные образования в виде погребенных пирамид с вершиной у поверхности осадка и корнями, уходящими в осадочную толщу. Глубинное распространение аномалий подтверждается как экспериментально, так и отдельными натурными наблюдениями [6].

Явление хемолитоавтотрофии может развиваться при благоприятных условиях по большому объему осадочной толщи. Необходимые газовые компоненты (H_2 , CO_2) присутствуют в составе гидротермальных и фумарольных природных газовых смесей, эндогенных газов, поступающих из очагов разгрузки водно-газовых источников и литосферы в активных геодинамических зонах, а также в составе потока газов из зоны катагенеза. В ареале действия глубинных потоков создается состояние аномально высокой биологической активности. Жизнедеятельность сообщества микроорганизмов приводит к направленным преобразованиям в окружающей среде, непосредственно в осадках. Биогенный метан, генерированный в нижних слоях осадков, соединяется с глубинным потоком газов, в том числе углеводородов, и участвует 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 "рокфортовых илов", газовые пузыри, залежи [5, 6].

Кроме метаногенеза, хемолитоавтотрофия активно включается еще в одно природное явление — обогащение осадочных пород органическим веществом, которое часто расценивается как главенствующий 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 $C_{орг.}$, которые в илах достигали 6...7 %, на порядок превышая фоновые значения. По своей сути явление хемолитоавтотрофии связано функционально только с глубинными потоками полигенетической смеси природных газов и не лимитировано ни глубиной водной толщи, ни соленостью воды, ни кислородным насыщением, ни широтностью экваторий. Масштабность этого процесса приводит к формированию глубинных нефтематеринских толщ непосредственно в недрах. Являясь порождением локализованных глубинных потоков, хемолитоавтотрофия приводит к обогащению органическим веществом ограниченного объема осадков в виде пластов, линз, залежей, генетически не связанных с явлениями на дневной сфере планеты. Это объемная масса богатых органикой осадков в дальнейшей геологической истории может стать локализованным скоплением нефти и газа, минуя процессы первичной миграции.

Роль хемолитоавтотрофии в процессах нефтегазообразования и нефтегазоаккумуляции гораздо существеннее, чем она оценивается по современным представлениям. Современные процессы метаногенеза, скопления углеводородов, формирование нефтематеринских толщ на базе хемолитоавтотрофии протекают в осадках регионов с разломной тектоникой, активных геодинамических систем Мирового океана, включая отдельные области окраинных морей, срединно-океанических хребтов, континентальных склонов, желобов и трансформных разломов.

Новые представления о вкладе хемолитоавтотрофии в процесс образования нефти и газа способствуют созданию общей теории нефтегазоносности недр и дают выход в практику поиска и разведки месторождений углеводородов при реконструкции палеобстановок, идентичных современным условиям распространения хемолитоавтотрофии, привлекая методы теории литосферных плит.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авилов В.И. Технические средства и методы газобиогеохимических исследований океана: Дис. в форме науч. доклада ... д-ра техн. наук. — М.: РЭФИА, 1997. — 74 с.
2. Авилов В.И., Авилова С.Д. Методические указания по оценке экологического состояния водных объектов по биохимическим показателям. — М.: Минэкология, 1997. — 34 с.
3. Авилов В.И., Авилова С.Д. Явление существования сообщества морских организмов в глубинных подводных гидротермах // Научные открытия. — М., СПб., 2000. — С. 56—57.
4. Авилов В.И., Авилова С.Д. Жизнь на океанском дне // Наука в России. — 2001. — № 3. — С. 56—61.
5. Авилов В.И., Авилова С.Д. Экспериментальное исследование рассеянных потоков природных газов // Докл. РАН. — 1999. — Т. 369, № 5. — С. 664—666.
6. Авилов В.И., Авилова С.Д. Проявление флюидных потоков со дна в глубоководной части Черного моря // Докл. Академии наук. — 2001. — Т. 379, № 4. — С. 522—525.