

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ОКЕАНОЛОГИИ им. П.П. ШИРШОВА

В.И. АВИЛОВ С.Д. АВИЛОВА

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА
АКВАГЕОЭКОЛОГИИ

Издательство «Прима-Пресс»
Москва 2009

УДК 551.35; 504.42; 550.4; 543.454

ББК 26.38

Ш 77

В.И. Авилов, С.Д. Авилова Информационная система аквагео-экологии. – М.: Издательство «Прима-Пресс», 2009. – 142 с.

Информационная система служит механизмом реализации целей и задач аквагеоэкологии – составной части геоэкологии. В их решении наиболее эффективен экосистемный подход, который определил принципы построения, состав и методы информационной системы. Её отличает доминирование существенных информационных признаков, использование экспертных систем и методов экосистемного анализа при оценке состояния природных объектов и формирующих его процессов и явлений. Это позволило авторам за многие годы натурных наблюдений открыть несколько неизвестных ранее явлений в области геоэкологии океана, нефтегазоносности недр, жизнеземлезнаия.

Публикация может быть полезна исследователям в области геоэкологии, экологии, океанологии и других направлениях, а также естествоиспытателям с широким кругом интересов.

Ответственный редактор
Авилов Владимир Игоревич

Рецензент
Серебряков Олег Иванович – доктор геолого-минералогических наук, профессор АГУ, академик МАМР

ISBN 5-87413-125-1

© **В.И. Авилов, С.Д. Авилова, 2009**
© **Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 2009**

ВВЕДЕНИЕ

Книга посвящена отдельным вопросам становления аквагеоэкологии как самостоятельного научного направления. Аквагеоэкология относится к одной из новых дисциплин современной науки и представляет собой объединенное, синтезированное направление, направленное на исследования в смежных областях нескольких наук – экологии, геологии, океанологии и других. Для её успешного развития необходимо среди многих проблем решать и разноплановые методологические задачи, включая создание собственной информационной системы.

Налицо преемственность аквагеоэкологии в опыте натуральных наблюдений различных научных направлений с одной стороны и самостоятельность решаемых задач с использованием специальных методов – с другой. Подобная двойственность накладывает определенный отпечаток на принципы построения рассматриваемой информационной системы. В этом вопросе многое зависит от степени её взаимодействия со смежными науками. В книге проанализированы разные аспекты такого взаимодействия, определено место аквагеоэкологии в системе наук и на основании этого выбрана методология натуральных аквагеоэкологических исследований. Избранная стратегия обосновала цели и задачи по созданию информационной системы, очертила круг проблем в получении достаточного, достоверного фактического материала для принятия квалифицированного решения в аквагеоэкологии.

На базе многолетнего опыта комплексных морских газобиогеохимических исследований созданы технико-методологические основы разработки информационной системы, предложены практические решения по реализации основных этапов её построения. Разработка опирается на результаты анализа и обобщения собственного фактического материала по распределению большого комплекса биологически активных веществ (около 30 компонентов) в воде и осадках, подробно рассмотренных в предыдущей книге авторов (Авилов, Авилова, 2008). Из полученного авторами массива газобиогеохимических данных обосновано выделение главенствующих биохимических (АТФ и ЦФА) и газовых показателей и включение их в качестве существенных информационных признаков в информационную систему аквагеоэкологии. К её отличительным чертам также относим элементный состав информационной системы, комплекс измеряемых показателей, концепцию доминирования свойств и характеристик используемых и

разрабатываемых технических средств и методов. Значительное внимание уделено практике получения достоверной информации в реальных условиях морских экспедиций.

Особое место отведено приемам анализа, обработки и широкого обобщения полученных данных. Применение методов математической статистики дает возможность в поле распределения изучаемых показателей выявить области многофакторного и доминантного воздействия природных или антропогенных факторов, что очень важно в плане внедрения экосистемного подхода к изучению аномальных явлений. Оценку геоэкологического состояния глобальных и локальных экосистем проводим в сопоставлении с разработанными экспертными системами – типичными профилями вертикального распределения основных показателей биологически активных веществ и с номограммами, показывающими степень биологической активности морской воды и донных осадков.

Эффективность применения информационной системы доказана на примере изучения отдельных регионов Мирового океана и неизвестных ранее природных явлений, порождающих необычайно аномальные геоэкологические состояния в гидросфере. Технология получения достоверной газобиогеохимической информации позволяет выявить неоднородности в водной среде и донных осадках, а этапы анализа и обобщения данных приводят к установлению причинно-следственных связей происходящих процессов. Предложена система критериев для распознавания таких состояний природной среды, как токсикация, норма и эвтрофирование воды и осадков, а также для идентификации явлений и сопровождающих их процессов на различных этапах геохимического разреза гидросферы и литосферы: эффекты дегазации Земли, явление хемолитоавтотрофии, генерация и аккумуляция углеродородов, образование органического вещества и другое.

Работа выполнена в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Авторы признательны и благодарны тем, кто способствовал нашим изысканиям.

1. СТРУКТУРА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Информационная система призвана стать надежным механизмом, реализующим цели и задачи аквагеоэкологии – достаточно самостоятельного научного направления, хотя и синтезированного на стыке экологии, геологии и океанологии (смысловое значение основных используемых терминов раскрыто в нашей предшествующей публикации – Авилов, Авилова, 2008). Отдельные вопросы качества вод ставились перед человеком с давних пор. Опытным путем определяли пригодность питьевой воды, возможность рационального водопользования или необходимость проведения природоохранных мероприятий. Не всегда полученные результаты были успешны в силу быстро меняющейся внешней ситуации, связанной с прогрессирующим, наступательным антропогенным воздействием. Известны миллионы биологически активных веществ, извлеченных из природных источников или синтезированных. В широком смысле слова биологически активные вещества – это все химические соединения, в той или иной степени обладающие способностью воздействовать на живую материю. Большинство из них выявлено в прошлом веке. Но самое главное в том, что человек интенсивно производит новые – десятки тысяч биологически активных веществ прибавляются ежегодно. Попадая случайно или планомерно в водную среду, они в определенных условиях могут вызвать нежелательные экологические эффекты, иногда губительные для биоты. Не всегда человек способен защитить себя от собственных техногенных интервенций в природу. Часто это происходит по неопытности, от незнания природных законов. Человек иногда совершает необдуманные поступки и действия, забывая, что является активной частью самой природы. Аквагеоэкология нацелена на изучение и оценку экологического состояния природных экосистем как на одну из важнейших сторон человеческого бытия. Взаимодействие человека и природы разнопланово и многообразно, и это учитывает методология аквагеоэкологии. Соответственно достаточно чувствительной и гибкой должна стать её информационная система.

1.1. Критерии качества вод

Вода выделяется из природного мира своими совершенно уникальными и чрезвычайно разноплановыми свойствами и качествами. О ней написаны книги – целые тома, слагаются легенды и сказки, и

она этого вполне заслуживает. Выделим её отдельные отличительные черты. Вода встречается в природе в жидком, твердом, парообразном, связанном (в составе химических и физических соединений) и внутриорганизменном (в составе живых организмов) виде. В том или ином из этих состояний воду находят в оболочках Земли (атмосфере, гидросфере, литосфере) и в составе некоторых космических тел.

Каждое из этих состояний характеризуется многими свойствами и качествами. Для нашей темы выделим одно из наиболее важных свойств: вода – уникальный растворитель большого числа известных химических соединений. Причем для каждого вещества определены свои коэффициенты растворимости и пределы насыщения, которые в свою очередь зависят от термобарических условий, концентрации конкурентных соединений, наконец, солености. Другими словами каждое свойство воды выражается большим числом показателей, и все они могут служить критерием определенного свойства воды. Для чего все эти рассуждения? Чтобы обратить внимание, что число показателей качества воды гораздо больше количества самих биологически активных веществ, взаимодействующих с водой. Так, вариации состава и содержания веществ в водах Мирового океана только лишь в довольно узком диапазоне природных колебаний температуры, давления и солености сведены в таблицы и составили объемные тома-справочники.

Массив показателей (миллионы) малоприменим для практических целей. Поэтому они систематизированы, на их основе выработаны определенные критерии пригодности вод к использованию в хозяйстве, к потреблению живыми организмами, включая человека. И здесь по своему назначению вода делится на различные категории: питьевая, техническая, природная, в том числе для рекреационных нужд. К настоящему времени для каждой категории службами санитарной биологии, водоканала, техническими отделами разных отраслей промышленности разработаны многочисленные собственные системы критериев качества вод.

К задачам аквагеоэкологии наиболее близки критерии качества природных вод, наиболее распространенных в геосистеме. Чаще всего природные воды делят на шесть классов качества. В качестве объединенного критерия используют содержание в воде нескольких наиболее распространенных, изученных компонентов (органических и неорганических соединений). В единые критерии (Единые..., 1982) введены как отдельные химические элементы (кислород и другие), так и обоб-

щенный показатель целой группы органических соединений (органический углерод – Сорг) – всего более десятка показателей. Для каждого класса качества вод приведены интервалы концентрации каждого компонента. Сложность состоит в том, что по разным параметрам, определенным одномоментно в отдельной взятой пробе воды, она может быть отнесена к разным классам. Например, воду в локальной экосистеме (вполне реально в зоне морского апвеллинга) с активно развивающимся микробиальным сообществом и быстрым, интенсивным потреблением биогенных элементов её формально одновременно наделяют и низким (первым или вторым классом) по биогенным элементам и высоким (пятым или шестым) классом качества по Сорг. Такое формальное использование предлагаемой системы критериев иногда вводит в заблуждение о чистоте исследуемых вод и не дает понимания в познании происходящих в них процессов. Положительная сторона системы со многими показателями заключена в обобщении и систематизации большого по объему, накопленного многими учеными фактического материала, что предопределило на строгой количественной основе деление природных вод на классы, которые по трофности приблизительно соответствуют понятиям «олиготрофные» (1 класс), «мезотрофные» (2 класс), «слабо эвтрофные» (3 класс) воды и т. д.

Из анализа существующих критериев качества вод применительно к задачам наших исследований заключаем следующее. Комплекс включенных показателей главным образом отражает состояние лишь одной компоненты экосистемы – её абиотическую составляющую. Этот комплекс не раскрывает суть происходящих в экосистеме процессов. Критерии качества вод никоим образом не могут составить основу информационной системы аквагеоэкологии, но вполне подходят для решения частных задач.

Наравне с представлением о природных характеристиках для оценки качества вод изучают наличие в них загрязняющих веществ – различных химических элементов и соединений (азот, хлор, ртуть, свинец, фенолы и другое). Загрязняющее действие оказывают те биологически активные вещества, которые, попадая в водную экосистему, пагубно влияют на её биотическую составляющую, в том числе человека. Загрязняющие вещества в массе имеют антропогенное происхождение, а также включают некоторые природные соединения, в том числе добываемые и используемые человеком (газ, нефть), болезнетворные микроорганизмы, вирусы и другое.

Механизм воздействия загрязняющих веществ многообразен и в значительной степени специфичен для каждого из них. Это создает

сложности в понимании их влияния на экосистему и идентификации загрязняющих веществ при экологических нарушениях. Наилучшего понимания общих закономерностей в многочисленных проявлениях негативного воздействия загрязняющих веществ на биоту можно достичь с биохимических позиций. По биохимическому признаку или степени участия в биохимических процессах, авторами разработана классификация загрязняющих веществ, разделив их на три типа (Авилова, Авилов, 1990, 1997).

Первый тип – вещества, включающиеся в обмен веществ организма и участвующие в естественных циклах круговорота веществ в природе (нитраты, фосфаты и другие). Их загрязняющее действие проявляется в поступлении в водный объект в неестественно больших количествах, что приводит к эвтрофированию водной среды.

Второй тип – вещества инородные, чуждые для живых организмов, но влияющие на процессы метаболизма, частично включаясь в обмен веществ (пестициды и другие). Отрицательный экологический эффект проявляется в токсичном воздействии этих веществ на организм. Они обладают кумулятивным свойством. По скорости выведения токсикантов из организма их делим на слаботоксичные (высокая скорость выведения), токсичные и высокотоксичные.

Третий тип – инертные вещества, не включающиеся в обмен веществ организма (синтетические пленки, твердые пластмассы и другие). Они представляют опасность как не утилизирующиеся в природе.

Классификация загрязняющих веществ важна при нормировании антропогенного воздействия на водную экосистему. К веществам первого типа применимо нормирование по предельно допустимой концентрации (ПДК), при этом ограничивается их поступление до концентраций, полностью утилизирующихся. Тогда долговременная (постоянная или периодическая) нагрузка этих веществ на водоем не вызовет кризисных явлений в экосистеме. Вещества второго типа нормируются по двум показателям: ПДК и предельно допустимой суммарной нагрузке (ПДСН) на водную экосистему за определенное время. Преимущественное использование того или иного показателя зависит от степени токсичности вещества. Для высокотоксичных веществ второй показатель ПДСН является главенствующим при всех видах нагрузки (разовой, периодической, постоянной) и при оценке последствий аварий. Для веществ третьего типа важен только количественный показатель. Нормирование должно предупреждать захламление водоемов, что может подавлять развитие бентоса, рыб и т.п.

Метод оценки качества вод по содержанию в них загрязняющих веществ таит в себе определенные трудности и заметные недостатки. Биологически активных веществ миллионы, несколько сотен из них могут играть существенную роль в загрязнении окружающей среды. Даже большие материальные затраты по измерению их содержания не гарантируют безопасного использования воды. Другой не менее важный момент – один и тот же загрязнитель по-разному действует на различные организмы, что увеличивает вариабельность загрязняющего эффекта, ещё более усложняя оценку качества вод. Тогда гипотетически возникает необходимость в создании бесчисленных персональных критериев качества, к примеру, питьевой воды для каждого вида животных и так далее. За примером далеко ходить нет необходимости: собаки пьют воду из лужи на придорожном асфальте, хотя многим другим такое строго не рекомендуется. Для одного живого организма загрязняющее вещество яд, для другого – норма. Среди бактерий существуют формы, устойчивые к общим клеточным или метаболическим ядам (сероводород, фенол и другие), и более того – способны использовать их как источник энергии.

Загрязняющие вещества первого типа создают избыток питательных веществ для определенных микроорганизмов, что вызывает увеличение первичной продукции, эвтрофирование водоема. Химические агенты второго типа замедляют или полностью тормозят рост микроорганизмов. Бактериостатическое действие оказывает вещество, которое подавляет рост бактерий, а после его удаления рост вновь возобновляется. Бактерицидные вещества вызывают гибель клеток. При этом загрязняющие вещества инициируют разнородные процессы такие, как повреждение поверхностных структур или слоев клетки (например, детергенты), повреждение ферментов и нарушение метаболизма тяжелыми металлами, ингибирование химических внутриклеточных реакций (окись углерода подавляет дыхание), нарушение синтеза клеточных компонентов (за счет включения структурного аналога в клеточные компоненты – так называемый конкурентный механизм), подавление синтеза белков и нуклеиновых кислот (вплоть до ДНК) рядом антибиотиков и другое. Многие повреждения, вызывающие гибель клетки, в определенных условиях могут быть обратимы.

Изучение одних только загрязняющих веществ в большинстве случаев не в силах оценить пригодность вод к использованию. При этом опасность одних веществ можно переоценить, а других недооценить. Отсутствие достоверной оценки чревато ошибками в прогнозах

и конкретных планах человеческой деятельности. Зачастую приоритеты в области охраны окружающей среды в конкретном регионе выбираются из общих соображений об опасности тех или иных источников загрязнений, а не из фактической картины действующих факторов.

Принципиально иное направление определения качества вод рассматривается как альтернативное первому, так как состояние природной среды оценивается по другой, биотической составляющей экосистемы. Развита методика биотестирования воды по индикации токсичности среды на биоту. В их задачу входит определение воздействия смесей токсикантов на биологические объекты. Многокомпонентные по составу смеси загрязнителей могут поступать в окружающую среду в виде отходов промышленных предприятий, стоков сельскохозяйственного производства, аварийных выбросов и другое. В качестве тест-объектов используются ракообразные, водоросли, рыбы, мидии и другие. Неопределённость результатов подобного исследования уже обсуждалась выше – действие смеси загрязняющих веществ отличается по степени влияния на разные живые организмы. Кроме того, недостаток методов данного направления заключен в односторонности информации (рассматривается только токсикация) и длительности эксперимента (до 30 суток).

Третье направление связано с активно внедряемым последнее время системным подходом тестирования окружающей среды. Он включает исследование сообщества гидробионтов (например, индексы сапробности, толерантности, видового разнообразия и т.п., бактерии, диатомовые и перидиновые водоросли, жгутиконосцы, инфузории). При этом стремятся, во-первых, получить количественную оценку основных элементов сообщества и, во-вторых, дать для этих элементов качественную оценку, адекватную природному состоянию сообщества (Авилова, Авилов, 1997).

На основании этой системной методики создаются приборы, зондирующие естественные поля биофизических характеристик. Таких как биолюминесценция (люминесценция хлорофилла, люминесценция растворенного органического вещества и другие), биомасса и численность микроорганизмов, взвешенные частицы или другие параметров, связанные с изменением цвета моря.

К недостаткам выше перечисленных системных методик тестирования и, следовательно, приборов на их основе, относятся занижение данных по биомассе и отсутствие прогнозирования направленности развития сообщества. Кроме того, обычное и люминесцентное микро-

скопирование характеризуется отсутствием дифференциации между живыми и погибшими клетками. Определение концентрации хлорофилла не всегда отражает реальную биомассу фитопланктона и совершенно не идентифицирует его живую биомассу. Подсчет частиц и измерение люминесцентного поля даёт ещё более узкую информацию, удовлетворяющую решение лишь ограниченного круга вопросов.

Очевидно, что многообразие применяемых методов только подчёркивает отсутствие достоверных и достаточно эффективных критериев для оценки геоэкологического состояния водных экосистем и не охватывает проблем изучения функциональных характеристик биотического сообщества, определяющих интенсивность процесса. Действующие системы критериев качества вод не способны в полной мере решить задачи аквагеоэкологии, но могут частично входить в её информационную систему. Участие тех или иных критериев в общей структуре информационной системы зависит от степени взаимодействия аквагеоэкологии со смежными науками.

1.2. Место аквагеоэкологии в системе наук

Становление аквагеоэкологии произошло на стыке трех наук – геологии, экологии и океанологии. Её дальнейшее совершенствование протекает в русле взаимодействия, прежде всего именно с этими научными направлениями, но одновременно следует общим тенденциям развития современной науки.

В настоящее время на рубеже тысячелетий многие исследователи констатируют переход современной цивилизации из индустриальной эпохи в постиндустриальную, которую всё чаще определяют как эпоху ноосферных знаний. Основанием для такого вывода служит отмечаемый кризис в развитии традиционных, «чистых» наук, и наоборот – прогресс междисциплинарных направлений. Ноосферная методология, внедряющаяся в мышление и познание, выдвигает на передний план углубленное изучение природных явлений, механизмов их взаимодействия с интеллектуальной и другими сферами деятельности человечества. Ноосферное знание предполагает всеобъемлющее обновление существующих представлений в базисных разделах всех наук. Создание более совершенной парадигмы объединенного направления – синтеза геологии с экологией находится в русле тенденций развития современной науки. В этом смысле первостепенной задачей видим рассмотрение содержания существующих разновидностей общего

геолого-экологического направления, определение их места в общей схеме взаимоподчиненности и взаимосвязи.

Актуальность этой задачи обусловлена высокой значимостью прикладных результатов объединенных геологических и экологических научных исследований по различным направлениям – с одной стороны, с другой – издержками «бурного роста» нового синтезированного направления, его отставанием в формировании собственной фактологической и теоретико-методологической базы. Наиболее заметно отсутствие единой терминологической основы. Зачастую содержание используемых понятий страдает неопределенностью, растекаясь от определения узких конкретных задач и объектов до безликих, широких толкований, не выделяющих главных свойств и качеств каждого направления. Строгость понятий вырабатывается со временем как плод всестороннего обсуждения в научной среде. Рожденное на стыке наук, объединенное геолого-экологическое направление проходит этот сложный период, о чем свидетельствуют многочисленные публикации на эту тему (Отчёт..., 1976; Миркина (Авилова), 1977а; 1979; Авилов, Авилова, 1986; 1987; 1991; 2008; Геодекян, Авилов, Авилова, 1986; 1990, 1990а, 1991; 1992; 1993; 1994; 1997; Геодекян, Авилов и др. 1977; Авилова, 1982; 1986; Avilov, Avilova, 1989а; 1989б; Емельянов, 2003; Трофимов, 2008; Avilova, Avilov, 1989; Keller, 2004 и др.). Считаю возможным, используя накопленный багаж знаний (около 300 публикаций авторов) более чем за 30 лет наших натурных комплексных исследований в области морской геоэкологии, внести вклад в решение обсуждаемой проблемы с исторических, теоретических и экспериментальных позиций.

Вторая половина 20 века ознаменовалась интенсивным расширением собственно науки «экология» и её вторжением в различные области знаний. У человеческого общества по мере экономического прогресса стали всё более востребованы знания о результатах возможного техногенного воздействия на быт и среду обитания биоты, включая человека, то есть то, чем занимается экология. Возникли такие научные направления, как прикладная экология, инженерная экология, морская инженерная геология, ландшафтная экология, экологическая безопасность, экологическое мышление и другие.

Ведения не обошли стороной и геологию, поскольку при оценке техногенного воздействия оказалось, что многие геологические события по масштабу распространения и силе воздействия соизмеримы с техногенными нагрузками или даже превосходят их. Это изменило

мнение о месте геологической науки в жизни общества. Её влияние заметно расширилось и стало выходить за рамки узкоспециализированных задач по обеспечению минеральными ресурсами, нефтью, газом и другое. Стали привлекать научные материалы, добытые традиционными геологическими науками, для решения практических задач по использованию окружающей среды на благо человека. Развился интерес к геологическим, в том числе и планетарным, процессам и явлениям в плане энергетического, экономического, интеллектуального и любого иного рода воздействия на жизнь каждого человека. Факт вызванного общественной необходимостью, определенного взаимопроникновения геологии и экологии состоялся.

Наряду с практической необходимостью, зарождение геолого-экологического направления проходило также под влиянием прогресса научной мысли. Оправдалось представление, что появление и внедрение в практику исследований новых методологий, технических средств и методов зачастую приводит к рождению нового научного направления, особенно на стыке наук. Подобное произошло с геоэкологией. Методология в широком смысле слова объединяет общие философские установки и принципиальные подходы, которые определяют исходные ориентиры и направленность конкретных научно-практических исследований в выбранной области познания Мира. Теоретические предпосылки в области геоэкологии, можно с уверенностью заметить, заложены в учении Вернадского о живом веществе в 20-х годах прошлого столетия (Вернадский, 1978). В той или иной степени его работы послужили толчком к разработке новых методов исследования в нефтегазовой геологии, которые могли привести к становлению нового направления – геоэкологии, но по ряду объективных причин их объединение не состоялось, хотя эти идеи постоянно витали в атмосфере научных знаний, периодически находя своих последователей. В тех же 20-х годах основоположник газовой съемки В.А. Соколов впервые предложил проводить измерение углеводородных газов для индикации залежи нефти и газа. Аналогичный способ запатентовал G. Laubmeyer в 1932 г. Микробиологическую съемку по индикаторной микрофлоре также для поиска нефтегазовых скоплений предложил Г.А. Могилевский в 1937 г. Из-за необеспеченности исследований должной техникой и аналитической аппаратурой и разрозненности этих изысканий не произошло совместного обобщения полученного научного материала. В дальнейшем методологии геологии и экологии соединились при изучении как сухопутных, так и морских объектов, например, в ландшафтной экологии и морской геоэкологии.

Сама экология претерпела заметные изменения в процессе своего становления и совершила стремительный взлет. Термин экология долгое время применяли для обозначения фундаментального раздела биологии о взаимоотношениях между организмами (видами), а также средой их обитания, то есть рассматривалась в единстве некая система. Системный подход отражен в многочисленных публикациях, из которых выделим фундаментальный труд Ю. Одума (Одум, 1975). Во главу угла экологии поставлена экосистема. Она – главный объект исследования общей экологии: экосистема, образованная сообществами организмов различной сложности вместе с взаимодействующим с ними биотопом – местообитанием. В настоящее время экология стала самостоятельной наукой. Существует разнообразие трактовок как самого термина (наука, которая изучает все живущие организмы и все функциональные процессы, делающие среду пригодной для жизни; комплекс наук о природе и взаимодействии природы и общества и другое), так и его производных (экологические проблемы, экологически устойчивое развитие, экологическое мышление и т.п.). Предлагаем использовать широкую трактовку: экология – наука о взаимодействии и взаимосвязи живых организмов со средой их обитания.

Прообразом морской геоэкологии можно назвать первые шаги по объединению морских микробиологических и геолого-геохимических исследований, и это происходило опять же в связи с работами по поиску и разведке нефтегазовых месторождений теперь уже на морском шельфе. Традиционные методы оказались непригодными для прорывных достижений. Воплощение экосистемного подхода нашло в разработке новой технологии проведения комплексных газобиогеохимических исследований, впервые внедренной авторами в океанической экспедиции в 1976 году, (Отчёт..., 1976; Геодекян, Авилов и др., 1977; Миркина (Авилова), 1979; Авилова, 1984; Авилов, Авилова, 1987; 1999; Геодекян, Авилов, Авилова, 1986; Avilova, Avilov, 1989 и др.), положивших начало геоэкологического направления в морских работах (Авилов, Авилова, 1991; 1993; 1997; 1997a; 1999a; 2001; 2002; 2003; 2003a; 2003b; 2005; 2007; 2007a; 2008; 2009; 2009a; 2009b; Геодекян, Авилов, Авилова, 1990; 1990a; 1992; 1994 и др.). Ландшафтная экология видоизменяется вслед за эволюцией экологии. Представление о ландшафте выходит за рамки раздела описательной географии и рассматривается в масштабах глобальных, региональных или локальных экосистем, как результат внутрисистемных экотовзаимодействий (Снакин, Мельчинко, Бутовский, 1992 и др.).

Исторический экскурс приводит к необходимым выводам. Причиной синтеза геологии и экологии стали как общественно-экономическая необходимость, так и поступательное развитие науки в целом. Синтез протекает на фоне динамичного развития основных (геология и экология) и сопутствующих отраслей знаний. Стержнем объединенного направления выбран системный подход, его основные положения широко используются в различных научных направлениях, а истоки можно найти уже в трудах ранних философов. Длительная эволюция, многообразие объектов и методов исследования наполняют геолого-экологическое направление большим числом заимствованных и вновь предложенных терминов. Это нормально, но для дальнейшего успешного развития необходимо выбрать наиболее устоявшиеся термины. Начать следует с рассмотрения современных понятий и формулировок.

К настоящему времени возникли разнообразные подходы к совместному использованию геологии и экологии в решении теоретических и прикладных задач, которые с нашей точки зрения постепенно оформились в три междисциплинарные направления: геология окружающей среды, экологическая геология (экогеология) и геологическая экология (геоэкология). Пути их становления часто пересекались, но по современным представлениям они достаточно самостоятельны, хотя некоторые исследователи продолжают их отождествлять, из-за общих геологических или экологических корней.

Геология окружающей среды (Environmental geology) широко распространена на Западе (Ваганов, 2005; Keller, 2004). В сферу её интересов вошли вопросы из области минералогии, гидрогеологии, инженерной геологии, экономической геологии, имеющие отношение к освоению ресурсов, прогнозированию и разработке эффективного использования земных пространств, например: строительство зданий, транспортных сооружений и коммуникаций, утилизация отходов и другое. По мнению В.Т. Трофимова (Трофимов, 2008) «геологию окружающей среды следует определить так: это общеобразовательная, описательная область геологии, призванная охарактеризовать применение геологических знаний к проблемам окружающей среды, взаимоотношению между обществом и геологической средой». В ней используются понятия и положения традиционных геологических наук. Геология окружающей среды антропоцентрически ориентирована, акцентируясь на воздействии окружающей среды на человека. Её следует считать областью геологии (Трофимов, 2008).

Экологическая геология (экогеология) по объекту исследования,

по собственной теоретической экологически направленной базе значительно шире по сравнению с геологией окружающей среды. В настоящее время «экологическая геология рассматривается как новое направление геологических наук, изучающее экологические свойства и функции литосферы, закономерности их формирования и пространственно-временного изменения под влиянием природных и техногенных причин в связи с жизнью и деятельностью биоты, и прежде всего человека» (Трофимов, 2008). Она исследует эколого-геологические системы типа литосфера – биота, литосфера – инженерное сооружение – биота и функциональные связи в них с позиции влияния геологических условий на биоту, включая человека.

Обе рассмотренные области знаний существенно различаются, как отмечено выше, по основным позициям. Однако кроме различий, геология окружающей среды и экогеология имеют принципиальное сходство. Они оперируют геологической информацией, полученной с использованием методов традиционных геологических наук – геофизики, геохимии, гидрогеологии, сейсмологии, инженерной геологии и других. Их истоком является геология, а сами они – геология окружающей среды и экологическая геология (экогеология) – две её ветви, то есть геологии. В методологии преобладает идентичный геосистемный подход – исследуют совокупность элементов земной коры и природных явлений, находящихся в отношениях и связях между собой и образующих определенную целостность, единство, именуемое геосистемой. Делается акцент на изучение одной из двух составляющих экосистемы – абиотическую. Лишь затем изучают влияние геосистемы на биоту, включая человека. Эти обе ветви геологии не соответствуют термину геоэкологии по определению (геологическая экология). В геоэкологии преобладает экосистемный подход, а не геосистемный.

Геоэкологию часто рассматривали как раздел геологии. Постепенно в центральной концепции геоэкологии стал преобладать экологический аспект, что и отражено в названии – геологическая экология. По современным представлениям геологическая экология (геоэкология) – это новое направление экологии, а не геологии. Базовый принцип и подход геоэкологии вытекает из постулатов экологии. К настоящему времени сложилось наиболее общее представление об экологии как науки о взаимодействии и взаимосвязи живых организмов со средой их обитания (Авилов, Авилова, 2008). В число главных понятий экологии входит экосистема, которая, в широком смысле, трактуется как совокупность растительных и животных организмов, среды

их обитания, находящихся во взаимодействии и взаимосвязи. Вместе с тем геоэкология сужает сферу интересов общей экологии, ограничивая объект экологических исследований геосистемой. Соответственно – геологическая экология (геоэкология) определяется как самостоятельное направление экологии, которое изучает свойство и функции биоты в пределах геосистемы, их формирование и изменение под воздействием условий среды обитания. Геоэкология исследует биотическую составляющую экосистемы, влияние геологических факторов на её состояние, а также их взаимодействие. Последнее предполагает наличие сложных встречно направленных процессов на организменном и клеточном уровне с внешней средой. Большинство подобных превращений протекает в водной среде, и этот факт инициировал рождение обширного раздела геоэкологии – аквагеоэкологии (Авилов, Авилова, 1991; 1997; 1997а; 2008; 2009а; 2009б и др.).

Геоэкологию и аквагеоэкологию отличает экосистемный подход. При исследовании любого природного явления выделяем экосистему, в границах которой заметно влияние этого явления, изучаем свойства биоты и по её функциональному состоянию определяем главенствующие элементы геосистемы, формирующие это состояние, а также получаем количественные характеристики исследуемого явления. Для более достоверной оценки в экосистеме обе её составляющие (биотическая и абиотическая) рассматривают во взаимовлиянии и взаимосвязи, изучают протекающие в ней процессы с точки зрения обеспечения единства экосистемы. В аквагеоэкологии выделяем водную экосистему в целом или отдельные части системы Мирового океана и гидросферы.

На современном этапе аквагеоэкологию определяем как многоцелевую науку о гидросфере, её экологической функции на Земле (Авилов, Авилова, 1997; 2007; 2008; 2009а; 2009б; 2009в и др.). Важное место в аквагеоэкологии занимает геоэкология океана, учитывая главенствующую роль Мирового океана в гидросфере по занимаемому объёму, по наибольшей степени изученности и его планетарной функции в виде уникальной экосистемы с высокой степенью самоорганизации. По этим показателям применительно к океанологии аквагеоэкологию и геоэкологию океана можно считать синонимами. Но такая трактовка не совсем правомерна при изучении геоэкологических процессов в атмосфере и литосфере. Синтезируя в себе многие научные направления, аквагеоэкология объединяет частично цели и задачи отдельных дисциплин океанологии и геологии, но на экологической основе. Однако аквагеоэкология возникла главным образом для поста-

новки собственных целей и решения своих задач. В целом роль аквагеоэкологии состоит в том, чтобы поднять на более высокий уровень теоретические и экспериментальные изыскания и вытекающие практические рекомендации во всех базисных направлениях изучения гидросферы, чтобы дать оценку экологического состояния всего Мирового океана или его составных частей, выявить интенсивность и направленность формирующих это состояние процессов и факторов.

Теоретической основой аквагеоэкологии является теория биохимического состояния природной среды, в её разработке реализована концепция экосистемного подхода геоэкологии (Авилова, 1982; 1990; Авилова, Авилов, 1990; Авилов, Авилова, 2008; 2009а; Геодекян, Авилов, Авилова, 1990 и многие др.). Теория объясняет проявления жизни в водной среде под влиянием абиотической составляющей экосистемы природного или техногенного происхождения. В теории выделены доминантные элементы геосистемы (по воздействию на биоту) – неоднородности геохимических и геофизических полей, динамические свойства (потоки вещества и энергии). Разработана классификация биологически активных веществ по степени их значимости в индикации проявления жизни. По биохимическому признаку, то есть здесь уже по степени участия во внутриклеточных биохимических процессах, произведена классификация загрязняющих веществ (см. раздел 1.1). Обосновано представление о стационарном состоянии экосистемы и предложена система критериев для его количественной оценки. Теория биохимического состояния природной среды дает возможность установить причинно-следственные связи явлений и процессов в водной экосистеме, служит надежным инструментом познания в аквагеоэкологии (Авилов, Авилова, 2008).

Геоэкология океана (аквагеоэкология), являясь междисциплинарной наукой, в своих исследованиях сохраняет преемственность в использовании некоторых традиционных методов океанологии, биологии, биохимии, геологии и одновременно имеет собственную техническую и методологическую базу. Объединенная технология обеспечила получение достоверной геоэкологической информации в гидросфере (Авилов, 1985; 1997; Авилова, 1990; Авилов, Авилова, 1987; 1991; 1993; 1997; 1999а; 2001; 2003; 2005; 2007; 2007а; 2007б; 2007в; 2008; 2008в; Геодекян, Авилов, Авилова, 1992; 1993; Миркина (Авилова), 1977 и др.). Опыт наших многолетних исследований гидросферы показывает, что на отдельных этапах натурных наблюдений и обобщения фактического материала аквагеоэкология довольно широко привлекает приёмы и методы смежных наук.

Анализ сложившихся синтезированных направлений геологии и экологии позволил получить общую картину их взаимосвязи и взаимоподчиненности и представить схематично на рис. 1.

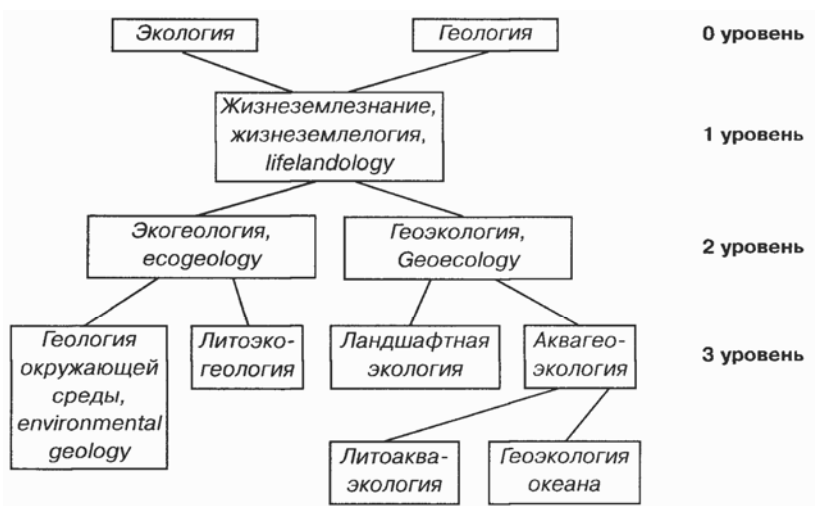


Рис. 1. Схема иерархии синтезированных направлений геологии и экологии

Подобные построения проводили и ранее (Емельянов, 2003; Трофимов, 2008) в основном по глобальным объектам наблюдения, их функциям, что крайне важно. У нас несколько иной методологический подход. Сложившиеся синтезированные научные направления выстроены по иерархическим ступеням, разделяя их, прежде всего по методическим вопросам и лишь затем по изучаемым объектам. Преимущество такого построения в том, что один и тот же природный объект (нефть, газ, гидротермы и другие) могут изучать несколькими научными направлениями с использованием различных методов, что близко к современной практике научных исследований.

Проведенный анализ выявил некоторые пробелы в терминологии. Мы постарались их устранить и дать более точные определения. Термины, связанные с отдельными разделами, не могут быть применены к общему названию объединенного геолого-экологического направления. Предлагаем термин «жизнеземлезнание» или по аналогии с употребляемыми терминами – «жизнеземлелогия». На схеме (рис. 1) внесены оба названия как синонимы и английский перевод. Аналогично даны термины и синонимы по отдельным направлениям.

Жизнеземлезнание (ЖЗЗ) занимает первый уровень на иерархических ступенях синтезированных направлений. ЖЗЗ – наиболее общее понятие. Жизнеземлелогия (ЖЗЛ) объединяет все синтезированные направления, которые в своей методологии используют системный подход. ЖЗЛ (ЖЗЗ) образуется в результате синтеза геологии и экологии, занимающих на схеме исходные позиции – нулевой уровень. На втором уровне находятся две составные части ЖЗЗ, два самостоятельных научных направления, принципиально отличающихся методологией исследований: в одном (экогеологии) – преобладает геосистемный подход, в другом (геоэкологии) – экосистемный подход. На третьем уровне (даны отдельные примеры) показаны самостоятельные научные направления, возникшие при исследовании различных объектов специфическими методами в дополнение к традиционным.

Каждый из разделов ЖЗЗ третьего уровня имеет свои подразделы или разветвления, которые наверняка может достроить специалист в своей области знаний. В качестве примера приведем изучаемый нами раздел «аквагеоэкология». В аквагеоэкологии выделяем по объекту исследования два подраздела: геоэкология океана (ГЭО) и экология гидросферы литосферы или «литоакваэкология» (ЛАК). Они в свою очередь могут дробиться и далее. Так ГЭО включает придонную геоэкологию, геоэкологию контактных зон и другое. Главное, что их объединяет, – изучение свойств, функций объектов и явлений с экосистемных позиций.

Предложенная систематизация позволит более точно определить место любого научного направления в системе ЖЗЛ, найти для него более эффективные методы исследования и повысить достоверность получаемых результатов и выводов. Например, в нефтегазовой геологии рассматриваем два раздела: нефтегазообразование и нефтегазонакопление. Нефтегазонакопление изучает явления, в результате которых образуется залежь, месторождение углеводородов. Экологическая функция нефтегазонакопления заключена в жизнеобеспечении части биоты, главным образом человека, что является двигателем прогресса в поиске, разведке и разработке месторождений. Для этого необходимо знание свойств и характеристик осадочной толщи, отдельных частей литосферы. Изучают геологическую, геофизическую, геохимическую функции литосферы, опираясь в первую очередь на методы таких геологических наук, как тектоника, стратиграфия, геофизика, геохимия, геология полезных ископаемых. Эти разделы относятся к экогеологии (рис. 1), поэтому наиболее эффективным в нефтегазонакоплении является геосистемный подход.

В нефтегазообразовании первостепенным ставится вопрос о генезисе нефти и газа. Большинство исследователей – нефтяников признают наличие неоспоримых корреляционных связей углеводородов в системе «живое вещество – органическое вещество пород – нефть». Биомаркеры нефти однозначно указывают на её органическое происхождение. Правомерен постулат «нефть из жизни», поэтому в нефтегазообразовании необходимо прежде всего изучать жизненную функцию литосферы. Этим занимается литоакваэкология как составная часть аквагеоэкологии и геоэкологии, то есть научные направления другой ветви ЖЗЗ (рис. 1). Следует методологически важный вывод: для решения задач нефтегазообразования наиболее эффективен уже другой – экосистемный подход.

С помощью предложенной иерархической схемы жизнеземлезнаания наглядно продемонстрирована принципиальная разница методологии исследования нефтегазообразования и нефтегазонакопления. Более того, объяснен известный парадокс нефтегазовой геологии – отставание теоретической базы от успехов нефтегазовой промышленности (Авилов, Авилова, 2007; 2008а; 2008б). Суть в том, что в геологических науках главенствует геосистемный подход, он по традиции применяется в исследовании процессов как нефтегазонакопления, так и нефтегазообразования. При этом он хорошо решает прикладные задачи, но мало эффективен для теоретических проблем происхождения нефти и газа – от того теория и отстает от практики. Ситуацию надо менять – в комплексном исследовании проблемы нефтегазоносности земных недр в целом или на региональном уровне следует применить оба методологических подхода (геосистемный и экосистемный) одновременно.

Методология геоэкологических исследований доказала свою эффективность на практике при изучении разнообразных природных явлений в гидросфере. Аквагеоэкология превратилась в самостоятельное синтезированное направление в области естественных наук. Экспериментально подтверждены теоретические предпосылки аквагеоэкологии, способность ставить и успешно решать собственные задачи в познании неизвестных ранее природных явлений. К их решению привлекается разнородная обширная информация, но не всегда одна и та же, а соответствующая тому или иному выбранному направлению исследования. Вместе с тем полученный опыт натурных наблюдений утвердил во мнении, что существует определенный набор исходных сведений и данных, участвующий во всех видах геоэкологических исследований. Выделенные особенности ставят определенные требования к созданию единой информационной системы аквагеоэкологии.

1.3. Принципы создания информационной системы

Создание информационной системы аквагеоэкологии сопряжено с определенными трудностями, рассмотренными и частично уже обозначенными в предыдущих пунктах данного раздела. В качестве главных выделим многоплановость исследований в аквагеоэкологии, многообразие изучаемых объектов, колоссальный по объему массив получаемых единиц информации (результатов измерений) в науках, связанных с аквагеоэкологией. В такой ситуации изучение любой проблемы сводится к решению многопараметрической задачи, где вариант предполагаемого решения зачастую зависит от предпочтений или степени осведомленности исследователя. Никто не застрахован от появления нескольких вариантов решения одной задачи, что зачастую порождает конфликт мнений. В геоэкологии известным примером служит вопрос о переброске северных вод сибирских рек на юг. Очевидно, предусмотреть все возможные вариации возникающих проблем очень сложно. Выход в преодолении трудностей виден только в разработке единообразного подхода к созданию общей информационной системы в аквагеоэкологических исследованиях, базирующегося на нескольких принципах.

В главном, создаваемая информационная система служит действенным механизмом реализации в натурных наблюдениях теоретических предпосылок аквагеоэкологии. Своей структурой информационная система должна соответствовать целям аквагеоэкологии по изучению гидросферы планеты, оценке геоэкологического состояния планетарных и локальных экосистем, выявлению интенсивности и направленности формирующих это состояние процессов и факторов. Назначение информационной системы заключено в практическом воплощении целей и задач аквагеоэкологии, что определяет принципы её построения.

Принцип разумной достаточности получаемой и используемой информации задаёт вектор эффективности натурных наблюдений в аквагеоэкологии. Геоэкологическая информация поступает практически со всех направлений океанологии и многих разделов геологии, включая нефтегазовую геологию, геохимию газов, геофизику и другие. Вопрос заключается в том, какую информацию и в каком объеме выбрать? Прежде всего, следует из потока информации выделить и использовать только научные факты. Не всякое единичное измерение может быть признано научным фактом. Взятые изолированно и полученные случайно единицы информации не могут быть основанием для

анализа и обобщения в достижении поставленной цели. Разумный отбор научных фактов определяет успешность исследования. К научным фактам относим те данные, которые находятся в действительной связи с изучаемым объектом и определенной взаимосвязи между собой. Констатируя такой научный факт, надежно детектируем существование конкретного явления.

На следующем этапе по принципу разумной достаточности выделяем из множества научных фактов существенные информационные признаки. Эта операция проведена на основе изучения функций биологически активных веществ в экосистеме и их классификации по степени значимости для экологической оценки в рамках разработки теории биохимического состояния природной среды (Avilova, Avilov, 1989; Авилова, Авиллов, 1990; 1997; Авиллов, Авилова, 2008 и др.). Методология аквагеоэкологических исследований построена на экосистемном подходе к решению проблем жизнеземлеznания. В качестве главенствующего признака функционирования экосистемы нами введено понятие «активное живое вещество». Для характеристики этого понятия предложен количественный показатель «биомасса активных живых микроорганизмов» (БАЖМ) и обоснован метод измерения БАЖМ по содержанию АТФ (Отчёт., 1976; Avilova, Avilov, 1989, Авилова, 1990; Авиллов, Авилова, 1991; 2008 и др.).

Экосистемный подход предусматривает совместное изучение биотической и абиотической составляющих экосистемы, отдавая предпочтение первой из них. Существенные признаки состояния экосистемы включают фактический материал по концентрации в гидросфере биологически активных веществ, характеризующих обе компоненты экосистемы, а также свойства взаимодействующих с ней элементов геосистемы. Принцип разумной достаточности позволяет установить наиболее значимые показатели, ограничить число измеряемых параметров, определить для практических целей комплекс существенных информационных признаков, входящих в создаваемую информационную систему.

Принцип достоверности используемой информации очень важен в выборе методов исследования для получения данных, пригодных для дальнейших обобщений и правильных выводов. Не случайно, при возникновении упомянутых конфликтов мнений недобросовестные нападки оппонентов следуют в направлении дискредитации получаемых данных, обвиняя в применении «неверных методов», «несовершенных» технических средств и аппаратуры. Этим приемом они пытаются раз и навсегда опорочить конкурента, выбив «почву из-под его

ног». В действительности, достоверность данных является фундаментальным требованием к исходной информации для любых теоретических построений и практических выводов. В последующих главах этому вопросу уделено особое внимание при построении информационной системы.

В связи с достоверностью часто возникает вопрос о сроке давности данных, возможности их использования. Ответ прост – в качестве достоверной информации можно и нужно использовать только научный факт, то есть данные, отражающие свойства изучаемой экосистемы, измеренные с допустимой погрешностью. Примером может служить представление о постоянстве солевого состава морской воды, которое впервые было высказано Р. Бойлем в 70-х годах 17 века после исследования минерализации морских вод, отобранных с поверхности и глубин у берегов Англии. В дальнейшем современные исследования подтвердили этот научный факт, который относим к достоверной информации при обследовании экосистем океана (Авилов, Авилова, 2008).

К понятию достоверной информации относится вопрос о количественных и качественных измерениях. Оба вида измерений по-своему важны, но могут быть признаны достоверной информацией с определенными оговорками, в зависимости от их использования. Если в пробе воды зафиксировано присутствие кого-либо компонента (качественное измерение), то это является достоверной информацией о наличии определенного свойства экосистемы. Но если в пробе воды определено содержание (величина) компонента (количественное измерение), то с достаточной уверенностью можно судить о состоянии экосистемы. Количественные измерения гораздо предпочтительнее и информативнее для принятия решения в аквагеоэкологии, как и во всех естественных науках. Другими словами, без количественной характеристики наблюдаемого объекта или явления невозможна ни одна наука.

Принципиально важное значение имеет методология оценки геоэкологического состояния экосистемы с использованием экспертных систем, а не одного показателя. Наличие какого-либо вещества в экосистеме (например, содержание кислорода) не дает определенного ответа – возможно несколько вариантов её состояния при одном и том же количестве этого компонента. Одинаковая концентрация метана может быть найдена в разных по состоянию экосистемах и обусловлена генетически разными процессами. Поэтому в нефтегазовой геологии метан используют в комплексе с другими показателями (отношение метана к сумме тяжелых углеводородов и другое). Оценка состоя-

ния экосистемы относится к области многопараметрических задач, в решении которых более успешны экспертные системы. Выше уже рассматривали экспертные системы в виде критериев качества вод, одновременно отмечая их недостатки. Создание собственной экспертной системы в аквагеоэкологии нацелено на получение достоверной оценки геоэкологического состояния экосистемы и является обязательным принципом создания эффективной информационной системы.

Минимизация риска принятия верного решения в аквагеоэкологии достигается путем познания природных процессов и явлений. Измеренное состояние экосистемы есть отражение объективной действительности на момент исследования. Оно базируется на научных фактах, существенных признаках, которые отражают конкретные условия взаимодействия в экосистеме. Однако состояние экосистемы – это процесс, и только вдумчивый анализ меняющихся условий позволяет делать выводы о направленности изменений в экосистеме, прогнозировать её состояние. Чем более точно известно о формирующих это состояние процессах, тем меньше риск ошибки в прогнозах и больше вероятность принятия правильного решения. В таком случае в информационной системе должны быть заложены подходы к познанию законов развития изучаемой экосистемы. Создаваемая информационная система на этапе обобщения фактического материала снабжается специфическими методами, обеспечивая объединение эмпирической и теоретической форм натурных наблюдений для выявления причинно-следственных связей и прогнозирования направленности геоэкологических процессов в экосистеме. Принципиальный подход – использование в этих методах как минимально необходимой, так и разумно достаточной информации, включая дополнительные сведения из смежных наук.

Представленные принципы задают общую тенденцию, главную нить в построении информационной системы аквагеоэкологии. Конкретное воплощение этих принципов само по себе многовариантно, зависит от разных факторов, в частности – от появления новых современных методов анализа и приборов. Это свойство находится в согласии с постоянно увеличивающимся кругом проблем аквагеоэкологии и делает информационную систему достаточно гибкой, способной соответствовать новым целям и задачам. С другой стороны соблюдение всех рассмотренных принципов при детальной разработке элементов системы придает единообразие и целостность создаваемой информационной системы и обеспечивает сходимость результатов, а также со-

поставимость выводов для различных экосистем. Предложенные принципы открывают возможность создания современной сбалансированной информационной системы, которая обеспечивает решение всех задач аквагеоэкологии с высокой степенью объективности, приближения к истине.

Заметный положительный эффект продекларированных принципов уже проявился в возможности обоснованно сформулировать элементный состав единой информационной системы аквагеоэкологии, который, как нам представляется, включает следующие позиции:

- существенные информационные признаки;
- достоверная база данных;
- экспертная система оценки геоэкологического состояния природных объектов;
- специфические методы обработки получаемой и используемой информации.

Каждый элемент информационной системы достаточно сложный и емкий, требует значительных по объему экспериментальных и теоретических исследований. Их созданию посвящено основное содержание последующих глав. В разработке элементов системы использован принципиально важный единый подход – доминирование главенствующих информационных свойств и качеств. Наличие всех перечисленных элементов информационной системы является необходимым условием для принятия объективно обоснованного решения по рациональному использованию водной экосистемы и выработке практических природоохранных рекомендаций.

2. ПОЛУЧЕНИЕ ДОСТОВЕРНОЙ ГАЗОБИОГЕОХИМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

В аквагеоэкологии выделены, как показано выше, две главные ветви: геоэкология океана (гидрогеоэкология) и литоакваэкология. Здесь предметы натурных наблюдений заметно различаются, охватывая гидросферу и литосферу, так же как и происходящие в них процессы и явления. Но идентичное решение аквагеоэкологических проблем в обеих сферах обеспечивает единый экосистемный подход. Являясь методологической основой информационной системы аквагеоэкологии, он имеет вполне реальное воплощение в специальных технических средствах и методах исследований. Вопросы их создания рассмотрены в этой главе.

2.1. Объекты натуральных и экспериментальных наблюдений

Исходя из сформулированных целей и задач аквагеоэкологии, определяем объектом изучения всю гидросферу в целом и её отдельные составные части, включая донные отложения. Выделение природного объекта в конечных границах происходит не стихийно, а в силу определенного единообразия и целостности предмета наблюдения по сходным свойствам и качествам. Ответственный выбор объекта служит залогом успешного выполнения исследования. В аквагеоэкологии к выделенному объекту подходят не как к изолированному предмету, а к экосистеме, пространственно ограниченной, но находящейся во взаимосвязи и во взаимодействии с окружающей средой.

Экосистемы разделяем по основным признакам. Определены следующие типы экологического состояния: геоэкологическое, региональное и локальное в пространственно-временной ориентации; нормальное, эвтрофирование или токсикация – по степени развития микробиального сообщества; естественное и загрязненное – по генезису воздействующих факторов на экосистему (Авилов, Авилова, 1990; 1993; 1997; Dmitrievsky, Avilov, Avilova, 1999 и др.).

В литоакваэкологии выделение экосистем обоснованно происходит по пространственно-территориальному признаку на базе сейсмических данных и структурных построений, например, актуальное с позиций нефтегазоносности выявление пограничных структур платформ и плит (Бондаренко, 2009). В геоэкологии океана (гидрогеоэкологии) к обязательным относим объекты, обычно изучаемые в океанологии – вся водная толща и верхний слой донных отложений. Соответственно на них нацелено получение достоверных сведений по главенствующим информационным признакам, составляющим достоверную базу данных информационной системы.

Специального внимания требуют локальные экосистемы в труднодоступных частях океана – на больших глубинах при малых размерах объекта. Для образности подобные эксперименты иногда сравнивают с космическими исследованиями по трудности решаемых технических задач. Не случайно в мировой океанологии накопленное количество океанографической информации в геометрической прогрессии снижается с увеличением глубины обследования водной толщи. В этой связи уместно вспомнить дорогостоящие и опасные проекты погружения на батискафе «Триест» Ж. Пикара и Д. Уолша (10919 м, 1960 г), глубоководные исследования Жака-Ива Кусто и других акванавтов. Чрезвычайно опасная и вместе с тем необыкновенно успешная, филигран-

ная работа продемонстрирована на дне Северного ледовитого океана на двух российских уникальных подводных аппаратах «Мир» в районе Северного полюса Земли, за что двум сотрудникам нашего Института в 2007 году (А.Н. Сагалевичу и Е.С. Черняеву) присвоено звание «Герой России». В свое время за разработку и внедрение этих аппаратов звания «Герой Советского Союза» удостоен И.Е. Михальцев зам. директора также нашего Института.

Для решения проблем геоэкологии океана деление на легко- и труднодоступные участки водной толщи не допустимо, все объекты в океане равнозначны и должны быть охвачены исследованиями. Среди объектов доминируют те, которые непосредственным образом связаны или отражают процессы и явления в изучаемых экосистемах. По данным о генезисе газов известно, что лишь кислород и азот в основном попадают в воду из атмосферы. Другие газы содержат главным образом эндогенную и биохимическую компоненты. Соответственно попадание в океан водорода, гелия, двуокиси углерода, сероводорода, углеводородных и благородных газов обусловлено процессами на границе вода – дно. Учитывая сказанное, выделяем основные объекты газобиогеохимических исследований.

В общем виде объектом наблюдения является вся гидросфера плюс контактные зоны. Детализируя, назовем поверхностные, глубинные и придонные воды, лед, снег, донные отложения, подземные воды, влагосодержащие участки литосферы. На основе опыта морских работ выделены конкретные объекты исследования в океане и представлены на схеме (рис. 2).

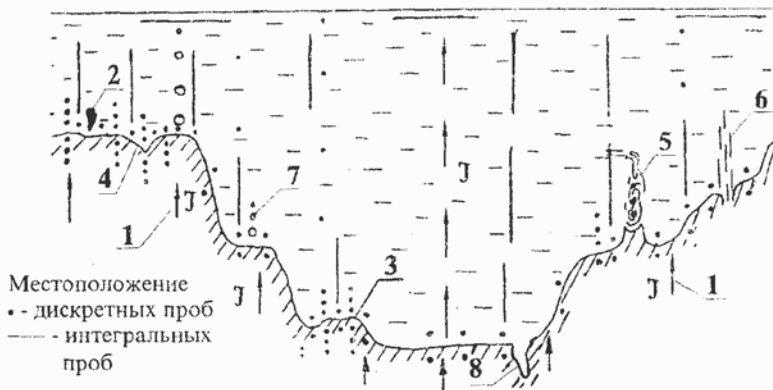


Рис. 2. Схема тестирования объектов водной среды: 1 – рассеянные газовые потоки; 2 – высачивание; 3 – грязевые вулканы; 4 – газовые кратеры; 5 – гидротермы; 6 – фумаролы; 7 – пузырьки; 8 – зоны разломов. Местоположение – дискретных проб; – интегральных проб.

Среди множества взаимодействий указаны явления, отражающие процессы нефтегазообразования под дном акваторий. Они обусловлены соответствующими формами геохимической миграции, то есть перемещением химических элементов в земной коре. Диффузия вызывает в основном рассеянные потоки – 1 (рис. 2) углеводородных и других газов из осадков через водную толщу в атмосферу. Рассеянные газовые потоки обнаруживаются повсеместно и образуют поля фоновых концентраций поступающих компонентов и биологически активных веществ, характеризующих нормальное геоэкологическое состояние водной среды. Фильтрация по системе сообщающихся пор, трещин и каналов в зонах разрывных нарушений, отжатие воды с углеводородами, перенос движущимися пластовыми водами приводит к высачиванию нефти и газа – 2, образованию грязевых вулканов – 3, газовых кратеров – 4, гидротерм – 5, фумарол – 6 (рис. 2) и другое. Прорывы газа, всплывание пузырьков, например, над газогидратами, проявляются в виде свободных пузырьков газа, выделяющихся из осадков в воду – 7. Газовые аномалии наблюдают в зоне разломов – 8. Концентрированные потоки флюидов (2–8) формируют локальные зоны аномально высоких концентраций поступающих веществ и геоэкологическое состояние повышенной биологической активности.

Отмечаем, что объекты газобиогеохимических исследований располагаются на любых океанических глубинах. Размеры объектов широко варьируют от нескольких километров по вертикали водной толщи до десятков метров в придонной зоне, а в плоскости – от метров до сотен километров. Разнотипные объекты предполагают своеобразие методов их изучения. Достоверная информация по крупномасштабным объектам может быть получена путем отбора интегральных проб по поверхностному слою или водной толщи (рис. 2).

Для локальных объектов эффективны серии дискретных проб по горизонтальным и вертикальным профилям с интервалом от одного до десяти метров. Приоритетным является отбор дискретных проб в придонной зоне. В придонном слое воды мощностью 10–15 м рекомендуется водозабор с точностью $\pm 1,0$ м и отбор осадков в колонках длиной 0,2–5,0 метров с плоскостной привязкой ± 10 м и шагом 50 м. По ряду объектов требования ещё более жесткие, например, по газовым кратерам точность плоскостной привязки составляет 5 м и меньше. При наблюдении газовых потоков необходимо обеспечить отбор газовых пузырьков из объекта размером в десятки сантиметров.

Среди множества методов сбора информации по изучаемым объ-

ектам выделен общий методический прием: отбор проб с любых глубин океана с точностью, соизмеримой с размерами самого объекта. Эта составная часть метода газобиогеохимических исследований океана функционально определяет главное свойство комплекса приборов в целом и является доминантным методологическим признаком. Частные методические приемы определяют свойства отдельных приборов или их систем, что рассмотрено ниже в данной работе.

2.2. Выбор существенных информационных признаков

Выбор существенных информационных признаков базируется на теоретических представлениях о состоянии и функционировании экосистемы. Теория биохимического состояния природной среды объясняет суть происходящих в ней явлений и процессов (Авилова, 1982; Авилова, 1990; Авилов, Авилова, 2008). Развитие экосистемы, изменение её состояния зависит от множества биологически активных веществ, участвующих в процессах переноса вещества и энергии, трансформации органического вещества, взаимодействия геофизических, геохимических, микробиологических полей и тому подобное. Информационные признаки, характеризующие экосистемное преобразование, включают концентрацию органического вещества, биохимические и гидрохимические показатели, содержание в воде и осадках растворенных, сорбированных и свободных газов, наличие флюидных потоков, газогидратов, минеральных новообразований и другое. С теоретических позиций показано доминирование газобиогеохимических показателей (Авилов, Авилова, 2008) и к существенным информационным признакам отнесены концентрация АТФ и активность гидролитических ферментов, как главенствующая характеристика биотической составляющей экосистемы, а для абиотической компоненты – содержание наиболее подвижных газообразных компонентов.

Этот выбор крайне важен также и с позиции приборного обеспечения. Он необходим, чтобы ограничить до минимума исходное число измеряемых компонентов в пробах воды и осадков для нужд аквагеоэкологии, сделав её пригодной в эффективном, практическом использовании. Но такой подход в отдельных случаях не исключает привлечение дополнительных информационных признаков. Так что требования к техническим и аналитическим средствам, снабжающим аквагеоэкологические исследования данными, несколько шире – они должны обеспечивать определение не только главенствующих, но и всех необходимых компонентов в наблюдаемых объектах. Это ставит задачу обоснования доминирующих признаков также и с технической точки зрения.

В методике газобиогеохимических исследований выделены следующие основные элементы: вид пробы, отбор (способ захвата), подъём (способ герметизации), хранение, обработка и анализ пробы. Все эти элементы взаимосвязаны, то есть техническое решение по реализации любого из них в той или иной степени влияет на техническое решение для других элементов. Определяющее значение имеет местоположение объекта наблюдения и вид отбираемой в нём пробы, поскольку они во многом задают функциональные признаки приборов, что отвечает концепции функционального доминирования. В пробах из удаленных объектов концентрации компонентов могут сильно меняться после захвата. Не все компоненты равнозначны по степени сохранности во времени и при взаимодействии с окружающей средой. Соответственно сложность технического решения для получения достоверной информации по отдельным показателям также различна. Из этого логично следует, что если будет технически обеспечена достоверность данных по компоненту, подверженного наиболее заметному изменению его содержания в пробе на каждом этапе метода, то по остальным показателям достоверность также будет обеспечена. То есть проблема доминирования распространяется на техническое обеспечение метода в целом и каждой его операции в отдельности.

С этой целью проведен анализ видов распределения всех часто изучаемых показателей в водной толще и донных отложениях по опубликованным данным и результатам наших измерений, выполненных с использованием компенсационных батометров и трубок. Из всего разнообразия выбраны наиболее неблагоприятные для работы приборов случаи вертикального распределения компонентов, чтобы рассматривать их в дальнейшем при создании технических средств, предназначенных для газобиогеохимических исследований. В результате предложена рабочая модель океана с расчетными профилями, представленными на рис. 3 (Авилов, 1985).

Для проведения количественной оценки степени взаимодействия пробы в приборе с внешней средой принята следующая модель водной толщи, в которой перемещается пробоотборник. Её глубина равна 6 км. Такая глубина является приемлемой для большинства океанологических измерений. Градиент вертикального изменения содержания каждого компонента выбран максимальным. Экстремальные значения концентрации компонентов приданы точкам на поверхности и у дна. Для упрощения расчетов, но в запас, принята линейная зависимость изменения содержания компонента с глубиной.

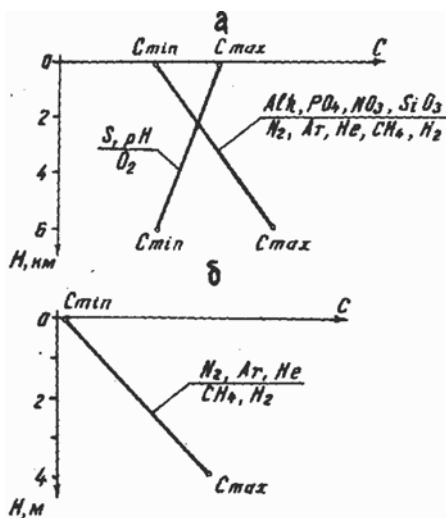


Рис. 3. Расчетные профили вертикального распределения содержаний компонентов.

Условные обозначения: а – в водной толще; б – в современных осадках.

На рис. 3а приведены расчетные профили вертикального распределения основных газовых компонентов, а также наиболее употребляемых показателей и элементов, характеризующих водную массу. Для современных осадков расчетные профили даны на рис. 3б. Минимальные концентрации ($C_{\min}$), максимальные ($C_{\max}$) и средние (C_3) сведены в табл. 1.

По характеру вертикального распределения рассмотренные компоненты разбиты на две группы. К первой относятся соленость, водородный потенциал и кислород. Их содержание уменьшается с глубиной и достигает минимальных значений $C_{\min}$ на глубине 6 км. Остальные компоненты составляют вторую группу, концентрации их возрастают по вертикали от минимальных значений на поверхности до максимальных $C_{\max}$ у дна. Здесь можно выделить биогенные компоненты, метан, гелий, водород, имеющие практически нулевые значения в поверхностном слое морской воды. У газов отмечен наиболее высокий градиент изменения концентрации по вертикали, достигающий 2–3 порядков (табл. 1). Ещё более высокие значения градиентов присущи содержанию АТФ, углеводородных газов, гелия, водорода вниз по длине грунтовой колонки. Использование расчетных профилей позволяет с достаточной точностью провести оценку интенсивности процессов обмена между пробой в пробоотборнике и внешней средой, а также фильтрационных свойств пробоотборника.

Таблица 1

Экстремальные и средние значения содержаний компонентов в морской воде и осадках (для расчетных профилей)

Наименование компонента	Размерность	Содержания компонентов			
		максимальные C _{max}	минимальные C _{min}	средние C ₃	
Водная толща	O ₂	мл/л	4,0	1,0	2,5
	N ₂	мл/л	19,8 ^{x/}	12,0	15,9
	Ar	мл/л	0,37	0,27	0,32
	He	мл/л · 10 ⁻⁴	200 ^{x/}	0,4	100
	CH ₄	мл/л · 10 ⁻⁴	2000 ^{x/}	0,5	1000
	H ₂	мл/л · 10 ⁻⁴	270 ^{x/}	0,08	135
	S	°/оо	36,5	35,0	35,75
	pH	-	8,2	7,6	7,9
	AlK	мг·эquiv./л	2,46	2,30	2,38
	PO ₄	мкг.ат/л	2,5	0	1,25
	NO ₃	мкг.ат/л	30	0	10
	SiO ₃	мкг.ат/л	100	0	50
Осадки	N ₂	мл/кг	13	12,8	12,9
	Ar	мл/кг	0,85	0,2	0,53
	He+H ₂	мл/кг · 10 ⁻⁴	2,6	0,08	1,34
	CH ₄	мл/кг	300 ^{x/}	0,001	150

^{x/} Примечание: $C_3 = \frac{C_{\max} + C_{\min}}{2}$ - средние значения, x - концентрации компонентов, полученные при использовании герметичных компенсационных батометров и трубок.

При решении технических задач наибольшие трудности вызывает обеспечение достоверности данных по газообразным компонентам, концентрация которых в пробах значительно превышает равновесную с атмосферой. Соответственно главенствующий информационный признак – содержание газов в экосистеме. Существенно и то, что содержание, форма или состояние некоторых изучаемых показателей подвержены воздействию меняющихся термобарических условий при подъеме пробы с глубины (наиболее заметно разрушение газогидратов и расширение свободных газов). Следует также учитывать компоненты, активно вступающие в химическое взаимодействие и биохимические реакции.

На основе изучения методов определения и физико-химических свойств изучаемых компонентов выделены, одновременно с теоретиче-

ских и технических позиций, в качестве существенных информационных признаков содержание углеводородных газов, водорода, гелия, двуокиси углерода и биохимические показатели, характеризующие жизнедеятельность, а также присутствие газов в свободной форме, в флюидных потоках и в виде газогидратов. Получение данных по выделенным существенным информационным признакам должно быть обеспечено комплексом специально создаваемых технических средств и методов.

2.3. Принципы построения специальных технических средств

Аквагеоэкология возникла не на пустом месте. Как отмечалось выше, она заимствовала из образующих её наук некоторые цели и задачи, а также, что вполне естественно, отдельные технические средства и методы, традиционно применяемые для их решения. В геоэкологии океана основной приток традиционных приемов исследования влился из многих направлений океанологии. Закономерно возник вопрос о правомерности их дальнейшего применения для газобиогеохимических исследований, доминирующих в создании базы достоверных данных информационной системы аквагеоэкологии.

Методологические основы создания технических средств и методов газобиогеохимических исследований в аквагеоэкологии. Измерение отдельных газобиогеохимических параметров в морях и океанах началось относительно недавно, главным образом в связи с изучением нефтегазоносности акваторий в 60-е годы прошлого столетия. Использовали традиционные океанологические приборы и методы отбора проб морской воды и донных осадков, известные в нефтяной геохимии методы выделения из проб газовой составляющей и современная аналитическая аппаратура – газо-жидкостные хроматографы. Выявленные несоответствия между отдельными разделами технологии газобиогеохимических измерений явились предметом анализа, подробно показанного в книге (Авилов, 1985). Здесь представлены основные направления и выводы исследований. Была проведена сравнительная эксплуатация многих пробоотборников в морских экспедициях, а также изучены другие технические средства аналогичных классов по научным публикациям и патентной литературе. Опыт работы с этими приборами показал, что отдельные недостатки существуют практически у всех типов батометров, грунтовых трубок.

Прямоточные пробоотборники, как правило, имеют недостаточную промываемость, загрязняются при спуске. Батометры с жестким корпу-

сом и крышками не обеспечивают надежной герметизации пробы. Предварительно вакуумированные батометры и грунтовые трубки при их заполнении нарушают структуру пробы и завышают её газовый фактор. Вибрационные трубки наоборот частично дегазируют грунт. Все пробоотборники с неизменяемым объемом внутренней полости подвержены фильтрации, теряют часть пробы при подъеме, более того допускается контакт пробы с атмосферой при переводе её на анализ. Эти недостатки увеличиваются несовершенством методов определения точности взятия пробы и подачи команды на срабатывание приборов. Практически не обеспечен отбор проб в придонном слое воды.

При подготовке проб к анализу наиболее часто используют самые простые, традиционно применяемые в гидрохимических и геологических исследованиях способы – слив морской воды из батометров в анализатор и выталкивание колонки грунта из геологической трубки на лотки. Эти способы мало пригодны для газобиогеохимических исследований из-за контакта проб с атмосферой.

Выделение газовой фазы (дегазация) из полученных проб морской воды и осадков осуществляется разными исследователями следующими основными методами: вакуумной и термовакuumной дегазацией, отбором газов через проницаемые мембраны, фазово-равновесной дегазацией, извлечением компонентов в газовый поток, проходящий через пробы. Последние три метода дают косвенные данные о содержании компонентов в пробах. Установлен общий недостаток этих методов в неполном извлечении газовых компонентов из пробы.

Компонентный состав выделенной газовой смеси измеряют как с использованием хроматографии, так и масс-спектрометрии. Хроматографическая аппаратура, обладая высокой чувствительностью и точностью, относительно небольшими габаритами и весом, широко используется в морских экспедициях. Кроме того, проводят измерение содержания отдельных газов (кислород, метан) *in situ* специальными датчиками, размещаемыми на гидрохимических зондах и спускаемых аппаратах или платформах.

Применение традиционных технических средств и методов зачастую приводило к искажению исходного состава компонентов фактически на всех этапах технологической цепочки получения газобиогеохимической информации, что подчеркивали многие ученые. Исследование погрешностей применяемых методов подтвердили, что ошибки возникают по всем элементам методики, варьируют в широких пределах от 0,05 до 10%, а на некоторых операциях достигают 10–80% для

отдельных компонентов (Авилов, 1985). Снижение погрешности метода в целом и по его элементам ставим в ряд доминирующих функциональных признаков при разработке специальных пробоотборников.

Вопрос о возможности прямого использования традиционных океанологических приборов необходимо решать в каждом случае отдельно, исходя из задач исследования, объекта наблюдения, измеряемого компонента и многого другого. При этом следует руководствоваться установленными закономерностями и принципиальными соображениями. Биохимические показатели существенно меняются под воздействием стресса на микроорганизмы в момент заполнения вакуумных пробоотборников на глубине. При нахождении пробы морской воды в батометре химическое взаимодействие, бактериальная деятельность, каталитическое воздействие материала батометра могут вызвать ошибки, достигающие 0,1–10%. Плохая промываемость батометров может вносить ошибку при исследовании тонкой слоистости вод до 10%. Фильтрация батометра сказывается незначительно при изучении компонента в однородной по его содержанию среде, а при высоких градиентах изменения концентрации компонента по вертикали может привести к ошибкам в десятки процентов. Длительное хранение (2–3 месяца) образцов грунта даже в герметичной упаковке создает ошибки из-за выветривания или новообразования газов до 10–80%. Обработка проб ядохимикатами вызывает изменение состава газов – исчезают непредельные углеводороды. Недостаточная степень извлечения газов из проб при однократной дегазации в вакууме, при различных схемах продувки проб инертным газом или концентрирования вызывает возникновение ошибки в пределах 10–50%.

Аналитическая часть технологии океанологических измерений более соответствует современным требованиям достоверности получаемых данных. Использование хроматографов для определения компонентного состава газовой смеси обеспечивает измерение с точностью 2%. Ошибка биохимических определений составляет 3–10%. При проведении стандартных гидрохимических определений на борту судна относительная ошибка для большинства компонентов не превышает 0,05–1,0%, а для нитратов она выше – до 10%. Современные гидрофизические и гидрохимические зонды при правильной калибровке и настройке выдают данные с удивительной частотой и высокой точностью. Так у датчика метана HydroC/Methane Sensor реакционное время занимает от нескольких секунд до минуты, а точность составляет $\pm 3\%$. Иногда складывается парадоксальная ситуация – определения выполняются с колоссальной точно-

стью, до 6–9 значащих цифр после запятой, тогда как вода попала на анализ с неопределенной глубины или взята вдалеке от изучаемого объекта. Эта высочайшая точность анализа никоим образом не поможет в принятии правильного решения. Проблема проведения высокоточных газобиогеохимических исследований в акваториях решена лишь частично, в основном в аналитической части.

Ученый, применяющий традиционные технологии, в определенном смысле рискует. Применение пробоотборника с некоторыми дефектами для работ в области акватории с малыми градиентами изменения концентрации компонента обеспечивает исследования вполне представительными данными. Но если тот же пробоотборник попадает в зону аномальных концентраций компонента, то ошибка из-за его недостатков неизбежно возрастает и исследователь, сам того не подозревая, получает не количественные, а качественные данные. Это вызывает неопределенность и заметную трудность в интерпретации фактического материала и принятии верного решения в аквагеоэкологии. Используя такой пробоотборник, исследователь теряет уверенность в получаемом результате. Теперь можно понять ученых, которые в свое время отсеивали аномальные данные по пробам воды из гидрологической серии, зная или догадываясь о капризах в работе тех или иных батометров. Выход из такой ситуации виден в правильной подготовке и обслуживании пробоотборника или использовании другого, более совершенного и надежного прибора.

Приверженцами второго пути были многие разработчики океанологической техники. В сотнях авторских свидетельств и патентов, научно-технических публикациях основными объектами совершенствования устройств по отбору и обработке проб явились построочно-технологические элементы и эксплуатационные качества приборов. На базе известных батометров Нансена, Нискина, Ван-Дорна, прямой грунтовой трубки и некоторых других созданы аналогичные устройства, которые повышают надежность и удобства работы, но не меняют принцип действия. Частичная модернизация пробоотборников путем усовершенствования запирающих механизмов (например, замена конических клапанов на шаровые), спусковых устройств и прочих элементов конструкции не решила проблемы получения достоверных проб (Авилов, 1985). Традиционные подходы продолжают использоваться в разработке современной океанологической техники (например, пробоотборники в зондах, погружаемых аппаратах, лендерах и другое), что ограничивает спектр получаемой достоверной информации, особенно по быстро изменяемым компонентам.

Предпринимались шаги по созданию пробоотборников для морских газометрических работ. Разработаны предварительно вакуумированные батометры и трубки с верхним запорным устройством. Эти пробоотборники нарушают структуру пробы и не обеспечивают надежную герметизацию. Были использованы новые технологии получения информации о составе газов в водной толще, основанные на непрерывном заборе воды с глубины и подаче на борт судна, где проводили дегазацию и интервальное измерение состава газа на хроматографе. Эти системы обеспечивают высокую плотность анализа по профилям, но информация носит относительный, а не количественный характер, к тому же ограничена глубина опробования и спектр определяемых компонентов. Изучение получаемой информации указывает, что эти сведения о геохимических аномалиях не могут быть использованы для геоэкологического прогноза, поскольку отсутствует связь с процессами, ответственными за формирование газобиогеохимических полей.

Частичная модернизация традиционных технических средств и внедрение отдельных элементов новой технологии не направлены на получение количественных результатов, при этом ряд вопросов, особенно связанных с процедурами отбора и обработки проб остаются мало изученными. Не учитывается тот факт, что в отдельных пробах присутствуют газы в свободном состоянии, и не принимаются меры для сохранения их до конца анализа.

Становится совершенно необходимой коренная перестройка принципов построения приборов и методических приемов выполнения операций для газобиогеохимических исследований в акваториях. Разработка специальных, функционально новых технических средств является обязательным условием создания достоверной базы данных информационной системы аквагеоэкологии.

Разнообразные направления работ по выполнению новой техники могут быть объединены в два главных подхода к решению этой задачи, наглядно иллюстрируемых известной методологической спиралью. Применительно к задачам аквагеоэкологии спираль трансформирована в вид, представленный на рисунке 4 (Авилов, 1997).

Один из подходов состоит в разработке, выполняемой по направлению от периферии к центру или ядру спирали. Он привлекает своей относительной простотой, начиная непосредственно с поиска конкретного технического решения в надежде, что оно существенно изменит всю технологию получения информации (то есть повлияет на ядро спирали) в лучшую сторону. Обычно это заканчивается модернизацией или частичным совершенствованием имеющихся конструкций

приборов. И как было показано выше, данный путь не привел к достоверной газобиогеохимической информации.

Второй подход диаметрально противоположен первому – разработку ведут от ядра спирали как показано стрелками на рис. 4. Этот путь более длителен и трудоемок, но приводит к принципиально новым положительным результатам. Характерные черты такой методологии прослеживаются в работах ведущих ученых в области океанологической техники. В результате внедрены в практику морских работ новые высокoeffективные технологии получения океанологической информации с помощью обитаемых подводных аппаратов (ОПА) и телеуправляемых аппаратов, измерительных и исследовательских систем, которые могут использоваться либо автономно, либо в виде аппаратурных комплексов. Достигнутые положительные результаты обосновали выбор второго подхода как генерального направления в нашей работе по обеспечению достоверными газобиогеохимическими данными информационную систему аквагеоэкологии.

Технические средства и методы рассматриваем в качестве единой системы, состоящей из совокупности элементов – свойств, качеств, признаков. Для получения высокоточной газобиогеохимической информации из генеральной совокупности выбираем необходимые элементы и реализуем в специальном комплексе приборов. Для осуществления такой выборки используем концепцию функционального доминирования, основанную на изучении и выделении доминантных элементов для всех операций методики газобиогеохимических исследований. При этом методология создания технических средств и методов в аквагеоэкологии задана ходом спирали (рис. 4) от ядра к периферии, руководствуясь принципом доминирования свойств и качеств на каждом этапе разработки.



Рис. 4. Методологическая спираль последовательных этапов исследования по созданию функционально новых технических средств для газобиогеохимических исследований в океане.

Исследование принципов построения комплекса приборов.

Разработка принципов построения технической системы имеет стратегическое значение в создании комплекса специальных приборов. Изучение направлено на обоснование значимости каждого принципа для обеспечения информационной системы достоверными данными, то есть, реализуем концепцию функционального доминирования. В итоге установленная сумма принципов задает технические требования конкретным конструкциям.

Процедура определения доминантных элементов технической системы предусматривает вначале рассмотрения основных её свойств, из которых в последствии делаем обоснованно выборку. Таков общий подход к выполнению поочередно операций, предусмотренных методологической спиралью. С этой целью нами обобщены результаты исследований по анализу характерных черт и параметров разработанных технических средств и методов, а также имеющихся аналогов (Авилов, 1997). Выделенные наиболее значимые элементы метода, свойства и качества систем приборов по 10 основным признакам. Они представлены в виде таблицы (табл. 2). Графа в таблице 2 «Область применения» конкретизирует вид требуемой информации, в нашем случае – это аквагеоэкология. В аквагеоэкологической информации из множества биологически активных веществ выделены существенные информационные признаки (показано выше) в качестве доминирующего изучаемого элемента, а главенствующим качеством технической системы признаем обеспечение измерений концентрации газовых компонентов. Доминирование этого элемента информации определило методологию исследований от центра спирали как доминантный признак (рис. 4).

Обращает внимание функциональная значимость выделенных элементов (табл. 2). Каждый из них несет в себе принципиально новый подход в решении поставленной задачи и требует специального технического решения. Воплощение всех сочетаний элементов практически трудно выполнимо из-за их многочисленности, поэтому разработка принципов построения комплекса состоит в тщательном выборе доминантных элементов, структурирующих создаваемые технические средства. По результатам исследования принципов построения приборного комплекса формируем технические требования. К одному из важнейших относим принцип обеспечения количественных определений, гарантирующих достоверность данных.

Таблица 2

Классификация технических средств и методов отбора проб

Признак	Выделяемые виды
Область применения	газогеохимия*; биогеохимия; гидрохимия
Объект тестирования	водная толща*; придонная среда*; осадки*
Измерения	количественные*; сравнительные
Проба	вода*; вода+грунт*; грунт*; газ*
Способ отбора	дискретный*; интервальный*; непрерывный
Способ захвата	отсечение*; всасывание*; замещение*; вытеснение*; накапливание*
Герметизация	сохранение объема; сохранение давления
Компенсация*	поршневая*; оболочковая*; капиллярно-диффузная*
Исходное заполнение прибора	вакуум; воздух; вода*; без заполнения*
Спуск прибора	на тросе*; автономный*; с подводным аппаратом*

Примечание: – * – разделы, в которых осуществлены новые разработки авторов.

В длительном эксперименте сопоставили два вида измерений – количественные и сравнительные (табл. 2 в графе выделяемые виды). В 12 рейсе НИС «Профессор Штокман» (1984 г) в акватории Карского моря непрерывно работала станция «Прогноз», анализируя воду с горизонта 5 м, и периодически проводили количественные определения водорастворенных газов. При высокой производительности станции – хроматографический анализ проходил каждые 2–3 минуты – выдаваемая ею газово-геохимическая информация носила относительный характер (сравнительный вид). Минимальная и максимальная концентрация оказалась сглаженной в сторону осреднения (ошибка 25–50%), аномалии растянуты по профилю даже при небольших глубинах моря 15–40 м, более того, станция способна определять только один газовый компонент (метан). Количественные данные в пробах из всасывающего батометра с того же горизонта достоверно отражали пространственное распределение метана и других газов, коррелировали с

аналогичной информацией по придонному слою. Проведенные испытания подчеркнули необходимость доминирования количественных определений газобиогеохимических компонентов.

Количественные измерения сопряжены с определенными трудностями – искажение состава компонентов может возникнуть на любой стадии метода. В связи с этим один из главных принципов построения системы приборов состоит в придании приборам свойств и качеств, практически исключающих возникновение погрешности в их работе. Выделяем основные этапы метода количественных газобиогеохимических измерений: спуск прибора, захват пробы, подъем прибора, хранение, обработка и перевод на анализ пробы, собственно анализ компонента. Разделяем метод на две части – аналитическую и техническую. Одна включает анализ компонентов, в другой – объединяем все остальные операции метода, выполняемые технической системой. Тогда общая погрешность метода σ_m определяется двумя причинами: искажением состава компонентов во время анализа (погрешность анализа σ_a) и при операциях в другой части метода, при всех названных взаимодействиях пробы с прибором (погрешность прибора σ_p). В таком случае, как известно в теории ошибок, средняя квадратическая погрешность метода в целом σ_m является квадратической суммой средних квадратических ошибок анализа σ_a и прибора σ_p :

$$\sigma_m^2 = \sigma_a^2 + \sigma_p^2 \quad (1).$$

Предложенное деление метода на две части открывает путь для предметного исследования приборной погрешности σ_p на каждом этапе газобиогеохимических измерений. За критерий взята погрешность анализа изучаемого компонента, с ней сравниваем погрешности на остальных операциях, которые должны быть обязательно ниже. Этот подход позволяет сформулировать определение высокоточным измерениям в информационной системе на количественной основе – количественным измерением следует считать результат технологии, при которой среднюю квадратическую погрешность метода в целом будет в основном определять погрешность анализа, искажение концентрации компонента при отборе проб и в последующих операциях метода практически не допустимо. Таких ошибок, как отмечали выше, не должно быть. Как следует из формулы (1) при $\sigma_p = 0,33\sigma_a$ вычисляем $\sigma_m = 1,05\sigma_a$, то есть влияние приборной погрешности ведет к увеличению ошибки метода в целом лишь на 5%. Такая точность вполне достаточна при решении практических задач по обеспечению достоверной базы данных информационной системы, адекватных со-

временному состоянию аналитических средств и методов. Допустимая величина приборной погрешности ($\sigma_{\text{п}} < 0,33\sigma_{\text{а}}$) задаёт требование для придания необходимых качеств технической системе и обоснования направления новых разработок.

Выявленная система погрешностей в очередной раз подтверждает приоритет принципа функционального доминирования, поскольку формирование требований к новым приборам напрямую зависит от формы нахождения изучаемого компонента в морской среде, местоположения объекта наблюдения, аналитических возможностей по измерению содержания компонента. Поэтому сначала рассмотрены в качестве исходного критерия погрешности анализа $\sigma_{\text{а}}$ известных методов, используемых при определении газобиогеохимических показателей (Авилов, 1985). Выделена небольшая погрешность анализа кислорода (методом Винклера) $\sigma_{\text{а}} = 0,01$ мл/л при его высоком содержании в водной среде. Такое обстоятельство предопределяет жесткое требование к коэффициенту фильтрации пробоотборника. Экспериментально исследовали в судовых условиях среднюю квадратическую ошибку хроматографического анализа газовых компонентов. Использовали калибровочные смеси чистых газов с исходными концентрациями от тысячных долей процента до ста процентов. Для широкого диапазона измеренных концентраций газов средние отклонения не превысили 5%, то есть погрешность хроматографического анализа $\sigma_{\text{а}}$ составляет $\pm 5\%$ от измеряемой величины (Авилов, Троцюк, 1980). Требование по полному сохранению легколетучих и быстротеряемых газовых и биохимических компонентов (потери менее $0,33\sigma_{\text{а}}$) служит определяющим для объединения приборов комплекса в единую замкнутую систему с химически инертной внутренней поверхностью. Таким образом, исследованиями выделен доминантный признак принципов построения комплекса приборов – обеспечение суммарной погрешности метода газобиогеохимических определений на уровне погрешности анализа путем достижения герметичности и инактивности технической системы.

Доминантные подсистемы. Комплекс разрабатываемых приборов в совокупности составляет единую техническую систему, которая снабжает исследование существенными информационными признаками по всем направлениям аквагеоэкологии. Каждое отдельное направление обладает набором специфических задач, для их решения необходимо создавать отдельно приборы со своими специальными свойствами, качествами, признаками, образуя собственные подсистемы. Вы-

деляем подсистемы трех типов: методологические, построечно-технологические и эксплуатационные. Определенным образом они взаимозависимы, так как задают функции управления и структуру приборов. Методологическим подсистемам отдается предпочтение в соответствии с принципом функционального доминирования. В свою очередь методологические подсистемы объединяют специальные свойства, направленные на исполнение определенных, конкретных операций метода. В исследовании подсистем ставим цель – изучение этих специальных свойств и выбор среди них главенствующих с позиции получения достоверной газобиогеохимической информации.

При изучении процессов, сопровождающих спуск приборов на глубину, учитываем такие характеристики пробоотборников, как носитель прибора, вид предварительного заполнения, промываемость, загрязнение внутренней полости, надежность срабатывания пробоотборника. Исследования показали недостаточную промываемость многих прямоточных батометров, что приводит к смешению внутри батометра воды с нескольких горизонтов на пути, превышающем в несколько раз длину самого батометра (Авилов, 1985). По результатам измерения оптической плотности пробы отмечено загрязнение внутренней полости прямоточных батометров веществами органического происхождения при их спуске. Ошибки в определении местоположения точки отбора проб в глубоководных гидрологических сериях достигают десятки процентов. Они могут увеличиваться при несвоевременном срабатывании запорных устройств батометров. Погрешность определения положения точек отбора проб в плоскости зависит от параметров навигационной системы надводного корабля, величины дрейфа, скорости подводных течений и при глубинах более 1 км она может превышать размеры локальных объектов на дне. Подобные ошибки практически исключаются при обследовании придонной среды обитаемыми подводными аппаратами (ОПА).

Обосновываем выбор доминантных подсистем при спуске пробоотборников в зависимости от вида объекта наблюдения. При изучении крупномасштабных объектов в водной толще подсистема включает такие элементы, как спуск на тросе прямоточных батометров без заполнения. В случае исследования тонкой стратификации вод – акустическое срабатывание предварительно заполненных батометров. По придонному слою воды – устройство срабатывания при механическом или акустическом взаимодействии с дном. Локальные объекты в придонной среде на глубинах более 200 м обследуют комплексом прибо-

ров, размещенных на ОПА. Для отбора осадков преимущество отдается прямоточным грунтовым трубкам. При измерении рассеянных и точечных газовых потоков доминантными являются автономно устанавливаемые системы.

Ко второму этапу метода – операции по захвату пробы относим способы отбора проб и виды исходного заполнения пробоотборника. Исследования выявили эффективность дискретных проб, мгновенно отбираемых в заданной точке воды или осадка, при тестировании локальных объектов. Интервальные пробы во времени и пространстве несут более достоверную информацию по сравнению с дискретными при изучении флюидных потоков или крупномасштабных процессов. Непрерывный отбор воды, который имеет место при сравнительных, полупромышленных методах измерения, для количественных исследований малоприменим.

Наиболее распространен захват пробы способом отсечения образца воды или грунта внутри пробоотборника. В прямоточных пробоотборниках запорными устройствами отсекается та проба, которая оказалась внутри на момент захвата, но она уже могла быть испорчена на предыдущей операции при спуске прибора. Достоверность проб, отбираемых путем всасывания, зависит от скорости заполнения и величины исходного «нулевого» объема. Известны случаи подсоса грунта из горизонтальных слоев при заполнении вакуумных и поршневых трубок. Быстрое заполнение (от долей до нескольких секунд) предварительно вакуумированных батометров на глубине происходит при значительных перепадах давления и сопровождается существенными изменениями природных (нативных) свойств морской воды, как бы с взрывом врывающейся внутрь батометра. Пробоотборник вакуумный глубинный при пробое иглой мембраны мгновенно заполняется водой с выделением свободной газовой фазы, завышая содержание легких компонентов, например, гелия в несколько раз. Экспериментальные исследования в Черном море на глубинах 1,5–2,1 км показали, что за счет избирательной дегазации процент содержания водорода в собранной газовой смеси возрос на два порядка, одновременно мгновенный перепад давления создал стрессовую ситуацию, вызвал гибель микроорганизмов и привел к изменениям в составе биохимических показателей (подробнее см. раздел 2.6). Проведенный анализ позволил определить доминантную подсистему для пробоотборников – захват пробы без нарушения её структуры, с исходно достоверным содержанием измеряемых газобиогеохимических показателей. На обеспечение

главного качества при захвате пробы – сохранение исходного состава компонентов – направлена разработка новых способов заполнения пробоотборников.

На третьем этапе изучали процессы взаимодействия проб в пробоотборниках с внешней средой. При подъеме на тросе батометра или трубки скорость относительного перемещения в системе вода – пробоотборник находится в пределах 1–3 м/сек. Набегающий поток воды создает известные эффекты – фронтальное, избыточное давление и разрежение позади прибора. Силовое воздействие на запирающее устройство (крышки, клапаны) может привести к разгерметизации внутренней полости пробоотборника и фильтрации пробы. Этот этап работы также характеризуется интенсивным изменением условий внешней среды. При подъеме гидростатическое давление уменьшается в сотни раз, температура поднимается на 20–30°C, концентрация газовых компонентов изменяется на 2–3 порядка по водной толще.

У пробоотборников без сохранения давления внешние факторы влияют на исходный объем пробы. Из табличных данных (Океанографические таблицы, 1975) следует, что с уменьшением глубины на 1 км вода расширяется на 0,47%, а суммарное увеличение объема пробы морской воды при подъеме с глубины 10 км и повышении температуры на 20°C достигает 5%. При тех же условиях объем проб осадков (влажность 60%) может возрасти на 3%.

Для удержания расширяющейся пробы воды в исходном объеме нужны огромные усилия. Если запорное устройство батометра на это специально не рассчитано, то оно постоянно находится в приоткрытом состоянии, что провоцирует фильтрацию пробы. Избыток воды стравливается наружу. В обычных грунтовых трубках проба, расширяясь, заполняет пустоты. Наибольшие погрешности могут возникнуть при наличии в пробе свободной газовой фазы. Газы в свободном состоянии (не сорбированные и не растворенные) обычно наблюдаются в виде пузырьков в районах фумарол, газовых факелов, подводных грязевых вулканов и другое. В этом случае большая часть газов будет стравливаться вместе с водой и ошибка в их определении достигнет десятков процентов и более (Авилев, 1985).

С перемещением пробы морской воды, насыщенной до 100% каким-либо газом *in situ*, в область более высоких температур, меньших давлений или вдаль от источника насыщения произойдет её естественная дегазация. Ошибки в определении содержания кислорода в воде по методу Винклера из батометров на берегу превысили 20% по

отношению к измерениям, выполненным акванавтами в подводной лаборатории. Экипажем «Гидролаб» установлено, что при подъеме пробы с глубины 14 м до 3,3 м происходит оптически видимая дегазация и содержание кислорода падает на 12%. При отборе пробы под водой из грунтовой колонки выделялись большие пузыри газа после снятия аквалангистом коронки. Авторам также приходилось наблюдать газовые проявления в воде и осадках (Авилов, 1976; 1985; и др. Авилов, Авилова, 2008; и др.). Удержание газов в пробе относим к доминирующему свойству пробоотборников при подъеме на поверхность.

Процесс фильтрации пробы в батометре при его подъеме долгое время оставался практически неизученным. Для количественной оценки негативных фильтрационных качеств батометра введен коэффициент фильтрации Φ и методика его измерения (Авилов, 1985). Коэффициент Φ равен отношению величины замещенного внешней водой объема пробы к исходному, выраженному в процентах.

При измерении его величины удобнее оперировать значениями концентраций компонентов. После несложных преобразований получаем следующее выражение:

$$\Phi = \frac{C_{\text{и}} - C_0}{C_3 - C_0} \times 100\% \quad (2),$$

где: C_0 – концентрация компонента в пробе *in situ*; $C_{\text{и}}$ – концентрация компонента, измеренная в поднятой на поверхность пробе; C_3 – концентрация компонента в замещенном объеме пробы.

Используя формулу 2, получаем выражение для оценки относительной ошибки D измерения содержания растворенных в воде газов и других компонентов от величины коэффициента фильтрации Φ батометра.

$$D = \Phi \left| \frac{C_3}{C_0} - 1 \right| \times 100\% \quad (3),$$

Предложенные формулы дают количественную оценку влияния процесса фильтрации на изменение концентрации компонента в пробе. Эти зависимости хорошо согласуются с качественными моделями. При уменьшении содержания компонента с глубиной фильтрация приведет к превышению его концентрации в пробе и, наоборот. В однородной среде ($C_3 = C_0$) фильтрация батометра не вызовет ошибки. В наибольшей степени фильтрация проявляется при больших градиентах изменения содержания компонентов по вертикали. Величина коэффициента фильтрации вычисляется в процентах для батометров с

любым объемом и вне зависимости от величины исходных концентраций различных компонентов. В то же время, используя предложенную формулу, можно опытным путем измерить величину коэффициента фильтрации любого батометра в реальных условиях работы. Практическое выполнение этого показано далее.

В судовых условиях изучено фильтрационное свойство различных пробоотборников. Фильтрация в той или иной степени найдена у всех типов батометров (Авилов, 1985). Представляем один из примеров. Наиболее рельефно фильтрация проявилась при исследовании термальных рассолов Красного моря (22 рейс НИС «Академик Курчатов», 1976). Отбор проб производили из термальных рассолов с исходной соленостью C_0 порядка 270–275‰, расположенных на глубинах более 2 км. Подъем батометров с пробами происходил в двух километровой водной толще, имеющей практически неизменную соленость $C_z = 41,5\text{‰}$. Это, можно сказать, идеальные условия для измерения коэффициента фильтрации батометров (по формуле 2) из-за очень большого перепада значений солености C_0 и C_z , превышающего 200 промилей. Установлено, что у серии батометров БМ-48 коэффициент фильтрации варьировал в широких пределах от 0,28 до 26,6%, ошибка определений за счет фильтрации составила 0,8–62,0%, а относительная ошибка достигала 18–23%. Явление фильтрации встречается среди широко распространенных батометров и оно вносит заметные искажения в представление о природных закономерностях в распределении компонентов.

Во вновь создаваемых приборах фильтрацию необходимо строго ограничивать. Определяем величину допустимой фильтрации. Найдём наибольшую относительную ошибку измерения концентрации компонентов, выполнив расчёты (по формуле 3) при фильтрации батометра $\Phi = 10\%$, для наиболее неблагоприятных случаев их вертикального распределения (по расчетным профилям, рис. 3). Графическая зависимость представлена на рис. 5.

Относительная ошибка прямо пропорциональна величине коэффициента фильтрации. Минимальная ошибка возникает при определении солености. Ошибки последовательно возрастают при измерении щелочности, рН, аргона, азота, биогенных элементов, метана, гелия, водорода, кислорода.

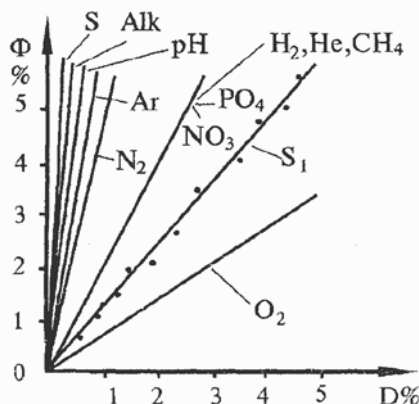


Рис. 5. Относительная ошибка D изменения содержаний компонентов в зависимости от величины коэффициента фильтрации батометра Φ , pH, He и других компонентов водной среды.

На рис. 5 показаны (точки у линии S_1) результаты экспериментальных определений коэффициента фильтрации батометров и относительные ошибки при определении солености термальных рассолов Красного моря (по данным, полученным в 22 рейсе НИС «Академик Курчатов»). Отмечена хорошая сходимость расчетных (линия S_1) и экспериментальных данных, то есть действительно ошибки в измерении солености были вызваны фильтрацией батометров.

Для большинства компонентов (рис. 5) оказалось, что приборная погрешность (батометров) превышает погрешность анализа. На основании изучения графических зависимостей выбран предельный вариант воздействия фильтрации — по кислороду (рис. 5). Используя зависимость (формула 1), по погрешности анализа σ_a (для кислорода) вычисляем допустимую величину коэффициента фильтрации — $[\Phi] = 0,22\%$, при этом приборная погрешность создаваемых приборов будет равна $0,33\sigma_a$, а для других компонентов — она еще ниже. Поскольку в определении кислорода наблюдаем наибольшую погрешность при фильтрации прибора, то, устанавливая предельный вариант воздействия фильтрации по кислороду, тем самым снимаем погрешность и для остальных компонентов.

Диффузионный обмен между морской водой в батометре и внешней средой рассмотрен для наиболее подвижных газовых компонентов. Принято следующее допущение в запас. Обмен идет через отверстие площадью 1 см^2 в стенке батометра толщиной $0,3 \text{ см}$. Диффузионный поток считаем постоянным, тогда его величину вычисляем из уравнения Фика (первый закон диффузии). Расчеты показали (Авилов, 1985), что при подъеме батометра за один час через принятое условие

ное отверстие пройдет кислорода и азота до $6 \cdot 10^{-4}$ мл и на порядок меньшее количество метана. Изменение исходного состава этих компонентов не превышает 0,03%, то есть на порядок меньше погрешности анализа σ_a , а в реальных условиях – ещё ниже. Таким образом, процесс диффузии не является определяющим.

Рассмотренные взаимодействия, приводящие к ошибкам в процессе отбора и подъема проб, возникают из-за несовершенства используемых пробоотборников. Идеально можно было бы представить себе ныряльщика, опустившегося на нужную глубину с пустым стерильным мешком из эластичного, инактивного материала. Там он аккуратно заполняет мешок водой или осадком, надежно завязывает его и поднимает на поверхность. В таком мешке обеспечена сохранность всех компонентов, так реализованы доминантные признаки методики отбора проб. Но человеку морские глубины не подвластны, поэтому все эти операции должны выполнять механизмы. По аналогии разрабатываемые приборы комплекса должны увеличивать при подъеме объем внутренней полости пробоотборника пропорционально расширению пробы, при этом давление в пробе в любой момент времени остается равным наружному. Этим создаются предпосылки для исключения фильтрации, утечек и потери компонентов из пробы. Такие свойства компенсации изменения объема пробы составляют основу доминантной подсистемы метода. Исследования компенсационных свойств как одного из главных и новых принципов построения пробоотборников представлены ниже в отдельном разделе.

Хранение проб рассматриваем за период времени их нахождения в приборах комплекса. Выделены два главных процесса: взаимодействие с деталями конструкций приборов и внутренние преобразования в пробе. В первом случае, как уже отмечалось выше, возможно загрязнение пробы, новообразование или поглощение компонентов при физико-химическом взаимодействии с деталями. С целью исключения ошибок на этом этапе метода выделены доминантные построение-технологические и эксплуатационные подсистемы: инактивность внутренних полостей приборов, простота конструкции и удобство обслуживания для эффективной чистки приборов.

В самой пробе преобладают биохимические процессы, направленные на расходование кислорода, снижение уровня метаболизма и концентраций биохимических показателей. Исследование скорости внутренних преобразований показало, что в первые три часа содержание кислорода в пробе, находящейся в непрозрачном батометре, остава-

лось неизменным, а затем начинало резко падать. Экспериментально установлено снижение концентрации АТФ в воде, налитой в стерильные темные склянки и помещенной в холодильное и морозильное отделение холодильника (Авилов, Авилова, 2008). Время хранения пробы в пробоотборнике на борту судна должно быть ограничено одним часом. Но ту часть пробы, в которой определяем АТФ и другие биохимические показатели, стараемся обрабатывать мгновенно.

Способ обработки проб специфичен для разного вида компонентов. При изучении биогеохимических показателей методика предусматривает обработку проб на открытом воздухе. Контакт проб воды и осадков с атмосферой должен быть исключен при определении легколетучих газообразных компонентов в процессе их обработки и переводе на анализ. Этот признак является доминантным по отношению ко всей системе и входящих в нее приборов в отдельности.

Исследования показали, что при сливе воды из батометров, имеющих жесткий корпус (БМ-48 и др.), часть газов, находящихся в пробе в свободном состоянии, улетучивается и не доходит до анализа (Авилов, 1985). При разборке прямоточных геологических трубок грунт выталкивают, раскладывают на лотки и обрабатывают на открытом воздухе в течение 1–2 часов. За это время происходит интенсивное выделение газов из осадков. Нами было установлено, что при высоком газосодержании грунта через 5–10 мин после выталкивания из трубки в осадках остается 70–80% газов, а через два часа – до 1% (Авилов, Троцюк, 1980). Исключение подобных ошибок достигается в герметичных пробоотборниках с изменяемым внутренним объемом (доминантное свойство). Во время перевода пробы на обработку в дегазатор и далее на анализ внутренняя полость пробоотборника сокращается с сохранением ее герметичности. Это свойство гармонизирует с компенсационными качествами и не вызывает значительного усложнения конструкции.

Другим доминантным признаком является использование на батометрах вентиля, удерживающего как избыточное давление, так и вакуум. Вентиль на входе контактирует с пробой, на выходе – герметично соединен с приемной емкостью дегазатора. Вентиль исполняет роль дросселя. Когда его приоткрывают, воду, создавая небольшое избыточное давление, выталкивают из батометра поршнем или при нажатии на оболочку. Вода за дросселем вскипает и в виде пены попадает в вакуумированную емкость дегазатора, где происходит выделение газов.

В пробах воды и осадков значительная часть газов находится в связанном состоянии. Изучены способы отделения газов: продувка инертным газом, фазово-равновесная и термовакуумная дегазация. Степень дегазации пробы непосредственно влияет на погрешности в определении состава газовых компонентов. При степени дегазации $m\%$ относительная ошибка определений составит:

$$D = (100/m - 1) \cdot 100\%.$$

Процесс дегазации зависит от величины парциального давления газа над пробой, его концентрации в пробе, температуры в пробе и времени дегазации. При дегазации морской воды (в соответствии с законом Генри), концентрация растворенного вещества C_1 прямо пропорциональна его парциальному давлению p в газе, находящемся в равновесии с раствором, и равна $C_1 = \varepsilon p$, где ε – постоянная величина при постоянной температуре, носящая название постоянной Генри.

Явление адсорбции описывается широко применяемыми уравнениями Ленгмюра. При небольших давлениях вещества P в газовой фазе и его концентрациях C при достижении адсорбционного равновесия, что соответствует природным условиям при дегазации образцов грунта, уравнения приобретают вид:

$$\Gamma = \Gamma_{\infty} \cdot K' \cdot P; \quad \Gamma = \Gamma_{\infty} \cdot K \cdot C,$$

где: Γ – количество адсорбированного вещества;

Γ_{∞} – адсорбция при полном насыщении поверхности адсорбента;

K' и K – адсорбционные константы, характеризующие сродство адсорбата и поверхности адсорбента.

Адсорбция и растворимость какого-либо вещества и исследуемого газа пропорциональны давлению P или концентрации C его в газовой фазе над пробой. При уменьшении P и C равновесие нарушается и газ выделяется из пробы в газовую фазу. При различных температурах T изменяются величины постоянной Генри и адсорбционных констант, что сказывается на скорости дегазации пробы.

Варьируя в широких пределах величинами P , C , T и временем t , можно достичь высокой степени дегазации проб. Величину m исследовали при работе с различными батометрами в 53 рейсе НИС «Витязь», 16 рейсе НИС «Академик Курчатов»; экспедициях 1973 и 1974 гг. на НИС «Бакуви» и других (Авилов, 1985). При использовании полевого дегазатора с однократной дегазацией отмечены значения $m = 50\text{--}70\%$. В другом эксперименте пробы из батометров БМ-48 и поршневых компенсационных батометров переводили в предварительно вакуумированную приемную емкость дегазатора, а газовую фазу над пробой неоднократно откачивали

в газосборник. После такой многократной дегазации измеряли содержание остаточного кислорода в пробе методом Винклера. Отмечено наличие остаточного кислорода на уровне 0,1–0,4 мл/л. Эти данные несколько завышены, так как при переливании морской воды из дегазатора в склянки на открытом воздухе в нее могло попасть какое-то количество атмосферного кислорода. В данном случае достигнута высокая степень дегазации порядка $m = 95\text{--}97\%$.

Производили дегазацию проб морской воды непосредственно из переоборудованных батометров «ЧЭНИС», скважинных пробоотборников ПД-3М и «Приз», которые герметично подсоединяли к приемной емкости дегазатора. Газовую фазу над пробой неоднократно откачивали в газосборник. Степень извлечения газов была в среднем вдвое меньше, чем в предыдущем способе. Эксперименты показали, что доминантным качеством процесса дегазации проб является одновременное извлечение всех измеряемых газовых компонентов, а степень дегазации – не менее 98%.

Функционально значимым, эксплуатационным качеством является высокая надежность работы каждого прибора в отдельности и всей системы в целом. Опыт эксплуатации приборов позволил установить возникновение случайных ошибок, а также систематических погрешностей при отклонениях от установленных режимов работы (Авилов, 1985). Выявлены основные причины возникающих изменений в пробах.

Одна из них – превышение допустимой глубины погружения – может вывести пробоотборник из строя или не обеспечить отбор проб в заданных точках (произошло несрабатывание батометров «ЧЭНИС», прорыв шлангов на биологических батометрах и тому подобное). Затрудненный доступ к механизмам приборов приводил к загрязнению пробы и несрабатыванию пробоотборников (батометры вакуумные ВНИИГАЗ, ПД-3М, ЛПГ-2, БМ-48, полевые дегазаторы). Механические повреждения в процессе эксплуатации приводят обычно к разгерметизации приборов, утечкам, фильтрации пробы, натеканию атмосферного воздуха. Для достижения надежности работы комплекса приборов выделены следующие доминантные подсистемы: построечно-технологическая – оптимальные соотношения основных геометрических и силовых параметров узлов и механизмов приборов; эксплуатационная – выбор главенствующих эксплуатационных качеств и организация регламентных проверок их неизменности у систем приборов в процессе эксплуатации (Авилов, 1985). При реализации такого подхода в технических решениях создаются условия для разработки

простых и удобных конструкций, достижения высокой степени надежности работы приборного комплекса в широком диапазоне изменений параметров внешней среды.

Результаты выполненных всесторонних исследований этапов технологии получения достоверной газобиогеохимической информации подчеркивают необходимость планомерного следования разработанным принципам при создании специальных технических средств и методов аквагеоэкологии. Полное соблюдение всех принципов при поиске конкретных технических решений по приборам комплекса и их практической реализации послужит пополнению информационной базы достоверными данными. На основе осуществленного изучения методологических и информационных признаков определяющим для создания океанологических технических средств выбран принцип функционального доминирования. Изученные доминантные подсистемы, свойства и качества служат научной основой для формирования технических требований к создаваемым системам приборов. Выполненные исследования принципов построения функционально новой технической системы аквагеоэкологии обосновали технические требования для разработки специальных приборов. Главные из них представлены в табл. 3.

Таблица 3

Технические требования, предъявляемые к разрабатываемым приборам

Параметр	Величина
Точность определений:	с _а
- газовых компонентов	5%
- биохимических показателей	3–10%
- гидрохимических параметров	0,05–1%
Погрешность отбора и обработки проб	сп < 1/3с _а
Коэффициент фильтрации	<0,22%
Диаметр диффузионного отверстия	1–3 мм
Компенсация объема	5%
Давление компенсации	<0,05атм
Толщина оболочки	0,1 мм
Скорость интегрирования	0,5–5 м/сек
Полнота замещения	98%
Накапливание газов	6–8 час
Объем проб	1 л
Точность захвата	0,5 м
Хранение проб	1 час
Полнота дегазации	98%

В табл. 3 объединены все исследованные параметры, в том числе по новым способам захвата и сохранности проб, которые рассмотрены ниже.

2.4. Разработка новых способов отбора проб

Сформулированные технические требования определили довольно жесткие границы, в которых должны находиться свойства, качества, признаки технических средств и методов, используемых в аквагеоэкологических исследованиях для получения достоверной информации по количественной характеристике изучаемых процессов. Выше также было показано, что большинство традиционных приборов может иметь только ограниченное применение, а часть функций технической системы вообще не выполнима. Возникла необходимость разработки новых приемов в получении достоверной информации. Методологическая основа подобных разработок логично следует из теоретических основ аквагеоэкологии (Авилов, Авилова, 2008) и базируется на исследованном взаимодействии и взаимосвязи (см. раздел 1.2) аквагеоэкологии в системе наук.

Анализ задач и направлений жизнеземлезнаания выдвигает в число приоритетных изучение флюидных потоков, в первую очередь газообразных компонентов на всех этапах геолого-геохимического разреза литосферы и гидросферы. В геоэкологии океана интерес представляют все виды и формы флюидопроявлений как функции глубинных процессов. Поступление в гидросферу флюидов из недр идет в виде двух потоков – сосредоточенного и рассеянного. Первый из них относительно лучше изучен. Существовали способы сбора свободно выделяющихся из недр (дна) газовых пузырьков или высачивающейся нефти при небольших глубинах в водоемах, на морском шельфе. Однако их применение ограничено глубиной погружения, большим расходом потоков флюидов, при этом не учитывали потери компонентов во внешнюю среду. Обоснована необходимость отделения свободной газовой фазы от жидкости при захвате газовых пузырей. При спуске газосборника с воздухом на глубины до 2,1 км в Черном море на ОПА Север-2 при контакте с водой за 5–8 часов объем воздуха уменьшился на 40–50%. Тогда как в герметичном поршневом батометре после спуска-подъема в гидрологической серии на глубину 4 км исходный объем воздуха, отделенный поршнем, не изменился. Второй вид – рассеянные газовые потоки оценивали по косвенным показателям, прямые инструментальные измерения не проводили (Авилов, 1985).

Новые способы захвата проб. *Способ накапливания компонента в пробе.* Потребовалось разработать новый тип проб, названных «накопительными», в отличие от дискретных (одномоментных), и обладающих новым качеством, поскольку они предназначены для изучения протекающих во времени процессов. Разработан новый способ отбора накопительных проб, он включает следующие операции: установку на небольшом расстоянии от дна пробоотборника, заполненного водой с известным содержанием изучаемых газовых компонентов и имеющего входное отверстие, обращенное к осадку; выдержку пробоотборника в таком состоянии в течение n часов; герметичное закрытие входного отверстия пробоотборника в конце выдержки. В процессе выдержки рассеянный газовый поток, попадая внутрь пробоотборника, вызывает повышение концентрации измеряемого компонента в пробе. Экспериментальные исследования на шельфе Черного моря, в Балтийском море позволили определить оптимальную величину удаления входного отверстия от поверхности осадка – 0,5–0,7 м. При меньшем расстоянии возможно загрязнение пробы грунтом в момент постановки пробоотборника.

Способ отбора накопительных проб дает возможность обеспечить реализацию одного из важных доминантных признаков – получить достоверную количественную информацию о рассеянных газовых потоках (рис. 2). Осуществлена разработка новой методики газометрических исследований акваторий, направленной непосредственно на количественное определение параметров газового потока со дна. При этом наряду с традиционными дискретными пробами из придонного слоя водной толщи в тех же точках слоя производится отбор накопительных проб, в которых в течение заданного времени происходил сбор газов, мигрирующих с поверхности дна. Схема реализующего устройства (Авилов и др., авт. св-во № 1164582, 1985) показано на рис. 6.

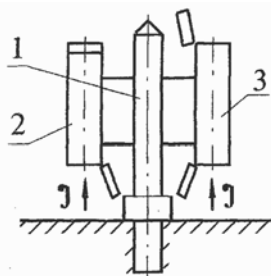


Рис. 6. Схема пробоотборника для сбора газов (ПГС): 1 – грунтовая трубка; 2 – накопительный батометр; 3 – контрольный батометр; $J \uparrow$ – направление рассеянного потока газов.

При постановке прибора для сбора газов (ПГС) на дно грунтовая трубка 1 внедряется в грунт и захлопывается верхняя крышка накопительного батометра 2. За время выдержки на дне (n часов) происходит сбор и накапливание поступающих из осадка в потоке J газов батометром 2, тогда как они беспрепятственно проходят открытый контрольный батометр 3. В конце выдержки крышки обоих батометров захлопывают, соответственно отбираются накопительная и дискретная пробы, и ПГС поднимаем на борт судна. В пробах обоих видов измеряем содержание газов, а по разнице концентраций между ними, отнесенной к продолжительности времени накапливания n , вычисляем скорость газового потока W (см³/час) по формуле:

$$W = (C_{\text{и}} - C_0) \cdot V/n,$$

где $C_{\text{и}}$, C_0 – содержание газового компонента соответственно в накопительной и дискретной пробах, см³/л;

V – объем накопительной пробы, л.

Тогда плотность потока Q составит: $Q = W/S$ (см³/ч м²), где S – площадь входного отверстия в батометре, м² (Авилов, 1985).

Экспериментально установлено оптимальное время выдержки $n = 6-8$ часов. Способ накапливания компонентов в пробе обеспечивает газобиогеохимические исследования информацией нового типа – количественной характеристикой флюидных потоков.

Способ вытеснения при отборе интегральных проб. Доминантное требование получения достоверной информации о крупномасштабных океанических процессах достигалось ранее в основном методами механического или статистического осреднения. В обоих случаях отбирали достаточно большое число дискретных проб (например, для статистической обработки – 36 проб из условия ошибки 5% с вероятностью 95%). Затем пробы воды либо механически объединяли, перемешивали и в смеси определяли содержание компонентов, либо определения выполняли в каждой пробе отдельно и результаты обрабатывали статистическими методами. Кроме большой трудоемкости методов отмечено, что дискретные пробы не охватывают все вариации распределения компонента, особенно в фотическом слое, где наблюдаются высокие градиенты количества микроорганизмов, сезонные, погодные, суточные колебания. Перепады встречаются также в придонном слое воды. Это приводит к значительным ошибкам в измерении газовых и биохимических показателей. Возникла необходимость в разработке нового способа получения более представительных интегральных проб (рис. 2).

Для отбора интегральных проб разработан способ вытеснения, который включает в себя доставку в нужную точку водной толщи батометра с незаполненной приемной емкостью, окруженной жидкостью в жестком герметичном корпусе; воздействие набегающего потока воды при движении батометра на входное отверстие приемной емкости – создание в ней избыточного давления; вытеснение избыточным давлением жидкости из корпуса через дроссель и соответствующее постепенное заполнение приемной емкости морской водой на заданном отрезке пути батометра. Иллюстрацией способа служит схема на рис. 7.

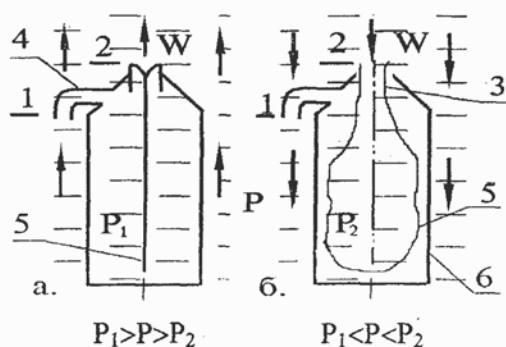


Рис. 7. Схема отбора интегральных проб воды способом вытеснения: 1 и 2 – поверхности на срезе патрубков; 3 – входной патрубок; 4 – выводная трубка; 5 – эластичный вкладыш; 6 – корпус; $\uparrow W$ – направление потока жидкости.

На способе вытеснения основана работа интегрирующего батометра (Авилов и др., авт. св-во № 1170311, 1985 г), содержащего корпус 6, приемную емкость в виде эластичного вкладыша 5, входного и выходного патрубков 3 и 4. В исходном состоянии эластичный вкладыш сжат до нулевого объема и помещен в жидкость внутри корпуса батометра. При спуске интегрирующего батометра на тросе (рис. 7а) набегающий поток W , оmyвая снизу, создает избыточное давление P_1 на поверхности 1 выводной трубки 4 и разрежение P_2 на поверхности 2 входного патрубка 3 по сравнению с внешним гидростатическим давлением P . Эластичный вкладыш 5 сжат и остается незаполненным. Отбор пробы происходит при обратном направлении движения батометра со скоростью W (рис. 7б). Вода за счет перепада давлений $P_2 - P_1$ через входной патрубок 3 равномерно заполняет вкладыш 5 со скоростью Q истечения воды из корпуса через дроссель на трубке 4.

Исследованы отличительные признаки способа. Главными характеристиками являются объем пробы V и интервал отбора пробы H , которые взаимосвязаны определенным образом:

$$V=Q \cdot t; H=W \cdot t; V=Q \cdot H/W,$$

где: t – время движения батометра в изучаемом слое воды. В свою очередь Q нелинейно зависит от W , поэтому на трубке 4 установлен вентиль – дроссель для регулировки величины Q . При его использовании в широком диапазоне вариации Q и W экспериментально подтверждена прямая пропорциональная зависимость между V и H , что является главным признаком способа и служит доказательством равномерного заполнения батометра (Авилов, 1997). Измерена оптимальная скорость подъема батометра – 1–2 м/сек. Минимальная величина перепада давлений определена из условия распрямления вкладыша 5, максимальная ограничена его прочностью. Экспериментально установлено, что вкладыш, выполненный из полиэтиленовой пленки толщиной 0,08–0,10 мм, начинает заполняться при подъеме вручную со скоростью 0,5–0,8 м/сек и выдерживает нагрузки при транспортировке за судном со скоростью 6–9 узлов или 3–5 м/сек, это вполне достаточно для практических целей. Установлен широкий диапазон изменения величины интервала интегрирования от 5–10 м до 1–2 км за счет регулирования дросселем скорости вытеснения Q . Способ вытеснения обеспечивает новый вид осреднения компонентного содержания водной среды на заданном отрезке (слое) в одной пробе, что повышает достоверность данных и одновременно снижает трудозатраты.

Способ замещения для захвата проб морской воды. Детальное изучение локальных объектов, отличающихся активно протекающими микробиальными процессами, выдвигает на первый план получение достоверной информации по биохимическим показателям. Ранее для этих целей применяли микробиологические батометры, которые предварительно стерилизовали и в закрытом состоянии опускали на глубину, где заполняли пробой. Недостатком этого способа является ограничение по глубине погружения и стрессовое воздействие на микроорганизмы при взрывном заполнении батометра. В целях получения достоверных данных по биохимическим показателям, относящимся к категории доминантных информационных признаков, возникла необходимость исследовать более совершенные способы захвата проб.

Разработан новый «Способ отбора проб морской воды для микробиологических и биохимических исследований» (Авилов и др., авт. св-во № 1264032, 1986) на базе захвата морской воды способом замещения. По этому способу осуществляют стерилизацию батометра (промывка 96° спиртом), заполнение внутренней полости батометра стерильной жидкостью (непригодной для обитания микроорганизмов, с удельным весом, меньшим, чем у морской воды), например, – дис-

тиллированной водой. Батометр подвешивают на тросе и опускают на глубину. При спуске происходит компенсация изменения объема дистиллированной воды в батометре за счет выравнивания давления в нем с наружным – гидростатическим. В заданной точке на глубине происходит заполнение батометра морской водой, замещающей дистиллированную воду без смешения и без изменения нативных свойств морской воды.

Исследование основных характеристик способа замещения осуществлено с помощью реализующего устройства – обменного батометра (Авилов и др., авт. св-во № 1490547, 1989). Его принципиальная схема в исходном состоянии на заданной глубине изображена на рис. 8.

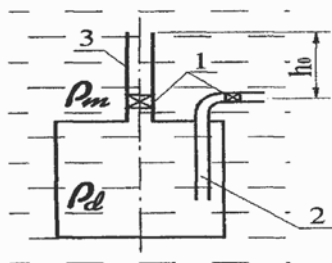


Рис. 8. Схема обменного батометра: 1 – запорные клапаны, 2 – входной патрубок, 3 – выходной патрубок, ρ_m и ρ_d – плотность морской и дистиллированной воды.

По команде извне клапаны 1 открывают, и из-за разности плотностей морская вода по патрубку 2 поступает внутрь батометра, замещая дистиллированную воду, которая «всплывает» – вытекает вверх по патрубку 3. Исследованы главные качества способа – скорость и полнота замещения. Движущей силой является перепад давлений ΔP на границах контакта, определяемый для исходного состояния по формуле:

$$\Delta P = h_0 (\rho_m - \rho_d),$$

где: ρ_m и ρ_d – плотность морской и дистиллированной воды. Перепад давлений расходуется на гидравлические потери, зависящие от геометрических размеров батометра (Авилов, 1997). Оптимальная длина выходного патрубка 3 установлена в пределах $h_0 = 0,8-1,2$ м. При этом в Балтийском море замещение происходило со скоростью 0,12-; 0,14 л/мин, а полнота замещения (по цветности) составила 99%. В Черном море при большей солености воды скорость была еще выше с сохранением нативных качеств пробы. Способ исключает такое нежелательное явление как загрязнение внутренней полости батометра при спуске веществами и микроорганизмами из вышележащих слоев и обеспечивает полное соответствие пробы морской воде в точке ее захвата. Исходя из зависимости по формуле 1, установлена минимально допустимая полнота замещения 98%.

На основе способа замещения разработан также «Способ исследования проб водной среды и устройство для его осуществления» (Авилов, Авилова, патент № 2051355, 1995). Пробу размещают внутри изолированного от внешней среды объема. Устройство снабжено расположенной в корпусе камерой для размещения пробы с входным и выходным отверстиями и гидроблоком для прокачки воды через камеру. Полнота замещения зависит от геометрических размеров камеры и при ламинарном потоке необходимое замещение достигается при прохождении 3–5 объемов жидкости.

Криогенный способ отбора воды производит захват пробы на заданном горизонте и её фиксацию при быстром замораживании *in situ* (Авилов и др., патент №2160891, 2002). Этим достигнута полная сохранность компонентного состава пробы при подъеме, транспортировке в стационарную лабораторию и длительном хранении. Способ дает возможность многократно делить замороженный образец воды на идентичные части и измерить любые показатели, включая газообразные, биохимические, гидрохимические и другие компоненты, с минимальными погрешностями. Новая технология повышает достоверность получаемой информации, что обеспечивает надежность геоэкологических оценок.

Способы замещения и накапливания объединены при отборе проб свободно выделяющихся пузырьков газов в реализующем «Устройстве для отбора газовых проб с обитаемого подводного аппарата» (Авилов и др., авт. св-во № 1627882, 1991). Манипулятором колпак устанавливается на дне над выходом газов. Далее пузырьки по шлангу поднимаются и поступают в емкость, где газ замещает воду и накапливается за время n . После заполнения емкость газосборника закрываем, вычисляем скорость газового потока, а саму пробу газа поднимаем на поверхность для компонентного анализа.

Выполненные исследования позволяют сделать вывод, что разработанные способы захвата проб – накапливание, вытеснение, замещение, – являются теоретической базой создания функционально новых пробоотборников с доминантными свойствами как необходимый шаг на пути повышения информативности и достоверности газобиогеохимических исследований.

Новые способы компенсации изменения объема пробы. *Поршневая компенсация.* Поршневые батометры практически не распространены в океанографии в основном из-за того, что не удавалось решить технически сложную задачу по созданию подвижных герметич-

ных уплотнений поршня для надежной работы при изменении гидростатического давления в широких пределах – на 3 порядка. Грунтовые поршневые трубки, где функции поршня ограничены, используются довольно часто. Сами по себе поршневые схемы обладают определенными преимуществами. Главным с позиции задач нашего исследования является возможность довольно просто найти техническое решение по реализации доминантных признаков – изменение внутреннего объема батометра при компенсации и переводе пробы на анализ, которое осуществляется за счет перемещения поршня.

В Охотском и Каспийском морях, Тихом и Индийском океанах экспериментально исследованы различные типы уплотнения поршня на глубинах от 20 м до 8,5 км. Кольцевые резиновые уплотнения поршня с нажимной гайкой или с гидравлическим затвором теряли герметичность на глубинах более 1 км. При увеличении гидростатического давления происходит всестороннее сжатие резинового уплотнительного кольца, его размеры уменьшаются, образуя щель между поршнем и корпусом (Авилов, 1976). Определено доминантное свойство – постоянство характеристик уплотнительного узла поршня при меняющихся термобарических условиях среды. Выделены и исследованы главенствующие характеристики: усилие прижатия уплотнения к стенке цилиндрического корпуса, давление компенсации, усилие перемещения поршня, степень герметичности батометра. Разработаны и изучены принципиально новые технические решения поджимного уплотнения поршня – жидкостного и резинового (Авилов, 1985).

В первом варианте уплотнение поршня выполнено в виде тонкостенной оболочки, заполненной жидкостью. Прижатие оболочки к уплотняемым поверхностям корпуса и поршня достигается за счет избыточного внутреннего давления в жидкости, создаваемого подпружиненным нажимным элементом. Все характеристики задаются и поддерживаются на постоянном уровне регулируемым усилием сжатия пружины. Определены значительные технологические трудности при изготовлении уплотнения (Авилов, 1985).

Другой самоподжимной уплотнительный узел включает уплотнительное резиновое кольцо, размещенное между тремя деталями: цилиндрическим корпусом, конической поверхностью поршня и подпружиненным нажимным диском. Уплотняется внутренняя цилиндрическая поверхность 1 корпуса батометра, на которую резиновое кольцо давит с силой N , а силу трения при перемещении поршня определяет коэффициент трения k_1 , и коническая поверхность 2 поршня

с углом наклона β и аналогичными параметрами – силой прижатия T и коэффициентом трения k_2 . Для конической поверхности 3 нажимного диска соответственно определены параметры α , Q и k_3 . Осуществлен поиск оптимальных соотношений силовых факторов, построено технологических элементов и главенствующих характеристик уплотнительного узла (Авилов, 1985).

Теоретически исследованы системы уравнений, составленные, исходя из равновесия резинового кольца, для нескольких режимов работы: при уменьшении или увеличении диаметра его поперечного сечения, при возвратно-поступательном движении поршня. Главным выбрано условие необходимого равенства сил N и T для надежной герметизации пробы. Многофакторный анализ систем уравнений позволил установить границы оптимальных расчетных величин: $k_1 < 0,1$; $k_2 < 0,15$; $15^\circ < \beta < 30^\circ$; $k_3 > 0,2$; $80^\circ < \alpha < 85^\circ$. Выявлен достаточно широкий диапазон их возможных изменений. При известной неопределенности реальных значений коэффициентов трения, зависящих от многих причин, это является важным критерием, гарантирующим высокое качество и работоспособность разработанных уплотнений (Авилов, 1985).

Самоподжимной уплотнительный узел реализован в устройствах для отбора проб жидкости (Авилов и др., авт. св-ва № 463891, 1975; 494647, 1975). Экспериментальные исследования характеристик уплотнительного узла были направлены на выбор оптимальных величин давления компенсации по степени герметичности батометра. Их взаимозависимость, полученная из экспериментов на специальном стенде при заполнении батометра воздухом, показана на рис. 9.

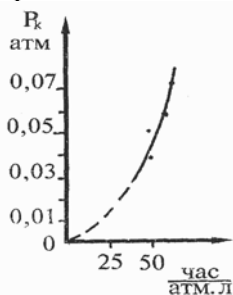


Рис. 9. Зависимость скорости падения давления от величины давления компенсации P_k .

Установлено, что уже при давлении компенсации $P_k = 0,04$ атм. падение искусственно созданного газового давления у поршневого батометра протекает на 2–3 порядка медленнее, чем у батометров БМ-48 с хорошо притертыми и смазанными конусными краповыми затворами. С некоторым запасом установлена оптимальная величина давления компенсации 0,05 атм., регулируемая усилием сжатия пружины и соответствующей ему силой Q . Герметичность водных проб оказалась практически неизменной.

Измеренный запас по давлению $n = 8,37$ попадает в интервал расчетных значений от 4,5 до 16,9, что более чем достаточно для надежной герметизации и одновременной компенсации изменения объема пробы при подъеме батометра на поверхность с любой глубины океана (Авилов, 1985).

Оболочковая компенсация. Известно использование жестких вкладышей в грунтовых трубках (Трубка ГОИНа ТГ-1, 1963) в основном для удобства извлечения керна. С целью удержания части газов в пробках предпринимались попытки помещать поднятую трубку в полиэтиленовый чехол, наполненный гелием, или выталкивать колонку грунта в эластичный рукав. Это был определенный шаг вперед, но полной герметизации пробы не достигали.

Разработана принципиальная схема оболочковой компенсации изменения объема пробы. Проба контактирует с эластичной оболочкой сразу после ее захвата на глубине. Компенсация осуществляется в два этапа – распрямления оболочки до максимальных размеров и дальнейшее увеличение объема за счет ее эластичных свойств. Оболочковые компенсаторы реализованы в виде эластичного вкладыша, эластичного корпуса или диафрагмы (Авилов и др., авт. св-ва № 582473, 1977 г; 626383, 1978 г; 977985, 1982 г и другие). Экспериментально исследованы компенсационные свойства при нагнетании воздуха внутрь оболочки. На первом этапе, как показали эксперименты с оболочками различной конфигурации, давление компенсации при её распрямлении не превышало 0,02 атм. На втором этапе оно ограничивалось прочностью оболочки, а его реальное значение определялось величиной компенсируемого объема, так при большом объеме газа в образце осадков P_k достигало 0,5–1,0 атм. (Авилов, Троцюк, 1980). Для надежной герметизации пробы наиболее рационально использовать первый этап оболочковой компенсации.

Капиллярно-диффузионная компенсация. Основные усилия большинства создателей океанологической техники по герметизации пробы были направлены на устранение утечек из пробоотборника, усложнение и упрочнение запорных узлов и механизмов. На этом пути никто сознательно не сверлил лишних отверстий в корпусе батометра или трубки для диффузионного обмена. Тем не менее, эксплуатировались и продолжают эксплуатироваться грунтовые трубки с негерметичным лепестковым нижним затвором в виде ерша.

На основе результатов выполненных исследований по диффузионному обмену (см. предыдущий раздел), вносящему несущественные

погрешности – менее 0,05%, разработан принцип капиллярно-диффузионной компенсации. После захвата на глубине в батометр проба воды или газа взаимодействует с окружающей средой через капиллярную трубочку с внутренним диаметром d и длиной l . При подъеме батометра избыток пробы, возникающий при ее расширении, постоянно стравливается через эту трубочку наружу. В пограничной зоне, в пределе она распространяется на всю длину l , имеют место процессы диффузионного обмена и растворения компонентов пробы, которые протекают с небольшой скоростью и не искажают состава пробы (Авилов, 1997). Давление компенсации определяется силами натяжения, максимальными на границе жидкости и газа в капилляре. Исследованиями установлено, что оно не превышает 0,01 атм.

Разработанный принцип реализован в интегрирующем батометре и устройстве для сбора газовых проб (Авилов и др., авт. св-ва № 1170311, 1985; 1627682, 1991). Экспериментами на ОПА «Осмотр» установлено, что при выдержке заполненного воздухом сосуда с открытой с обоих концов соединительной трубкой ($d = 8$ мм, $l = 50$ мм) на глубине 12 м в течение нескольких часов уменьшение объема газа не отмечено. Показана необходимость надежной герметизации внутренней полости батометра, чтобы предупредить возможность обратного движения жидкости по соединительной трубке, то есть попадания воды извне в батометр.

Компенсационное свойство является доминирующим для всех приборов комплекса, используемых при газобиогеохимических исследованиях в океане. Его применение создает ряд преимуществ перед существующими аналогами. Как показали выполненные исследования, давление компенсации, а по сути – избыточное внутреннее давление, регулируется, устанавливается на оптимальном уровне и имеет низкие значения – менее 0,05 атм. Его величина не меняется на любых глубинах. Это означает, что на всех этапах спуско-подъемной операции давление внутри и снаружи пробоотборника воды или осадка остается практически одинаковым и не требует специального усложнения или увеличения прочности конструкции. При этом за счет компенсационных свойств пробоотборники наделены принципиально новым качеством – обеспечение полной сохранности захваченных на глубине проб и содержащихся в ней компонентов. Кроме того, использование разработанных способов компенсации дает возможность одновременно снабдить прибор еще одним доминантным признаком – обеспечить перевод пробы на анализ без контакта с атмосферным воз-

духом. Он реализуется либо перемещением поршня вдоль всего корпуса, либо сжатием оболочки, либо заполнением газосборника водой через диффузионно-капиллярную трубку (Авилов, 1985, 1997).

2.5. Техническое решение приборного комплекса

Техническая реализация доминантных признаков и свойств в действующих приборах потребовала осуществить поиск новых технических решений на более высоком качественном уровне развития океанологической техники. Определен состав комплекса приборов для количественных газобиогеохимических исследований океана, исходя из необходимости создания информационной системы аквагеоэкологии, характеризующей природные явления и объекты в любой точке океана (Авилов, 1976; 1985; 1997 и др., защищены более 20 авторскими свидетельствами). Виды приборов и их функциональная принадлежность показаны на рисунке 10.

Комплекс предназначен для проведения натурных наблюдений в экспедиционных условиях, обеспечивая достоверной информацией все направления геоэкологии океана. При этом используем одновременно все приборы, входящие в состав комплекса (рис. 10).



Рис. 10. Состав комплекса приборов для количественных газобиогеохимических исследований океана.

Для решения частных задач и изучения локальных экосистем, например, тестирование придонной среды на нефтегазоносность, выбираем необходимые приборы, объединяя их в специальные системы. Такие специальные системы отличаются в основном составом пробоотборников, тогда как приборы по обработке проб (дегазаторы) и анализа компонентов (хроматографы) входят постоянно в состав комплекса. Иногда обработку и анализ проб проводят не в экспедиции, а переносят в стационарную лабораторию. Все отклонения от общей технологии газобиогеохимических исследований фиксируют в отчете о проделанной работе, так как они могут стать причиной неучтенной погрешности и снизить достоверность данных.

Разработаны принципиальные схемы большинства приборов, входящих в состав комплекса. В каждом из них реализованы доминантные свойства и качества. Эта задача не могла быть решена известными устройствами. Были найдены оригинальные технические решения с элементами новизны, защищенными авторскими свидетельствами и патентами. Вполне естественно, что новации родились при реализации в пробоотборниках новых способов захвата, компенсации и обработки проб.

Все созданные пробоотборники систематизированы по функциональной принадлежности и основным свойствам, как показано на рис. 11.

Пробоотборники распределены по группам, обеспечивающим наиболее эффективным образом отбор проб в разных частях гидросферы, – по водной толще, в придонной воде и верхнем слое осадка. На рис. 11 также отмечены виды компенсации, которые применены в приборах, и номера авторских свидетельств. Все вместе пробоотборники выполняют отбор необходимых проб воды, грунта и газов в любых заданных точках океана.

Для решения специальных задач из всего комплекса выбираем группу приборов, объединенных в систему по функциональному признаку. Так, на рис. 11 выделены система приборов, устанавливаемых на ОПА для обследования локальных объектов, и автономные системы по накоплению газов. Имеются и другие системы приборов для работы с надводных кораблей, например, система придонных пробоотборников (рис. 12).

В состав системы входит грунтовая трубка ГТ-ОК-1, она же выполняет функцию груза-разведчика, придонный батометр БПД-ПК-2 и интегрирующий батометр БИН-3. Главное свойство системы – в одной точке дна одновременно изучаются осадки, придонная вода и вода из

придонного слоя по вертикальному разрезу мощностью 50–200 м. Важность такой информации возрастает при исследовании процессов обмена на границе вода-дно, в том числе потоков флюидов. Также значительно сокращается время заборных работ – за один спуск на тросе отбираются одновременно три вида проб вместо одной, как обычно.

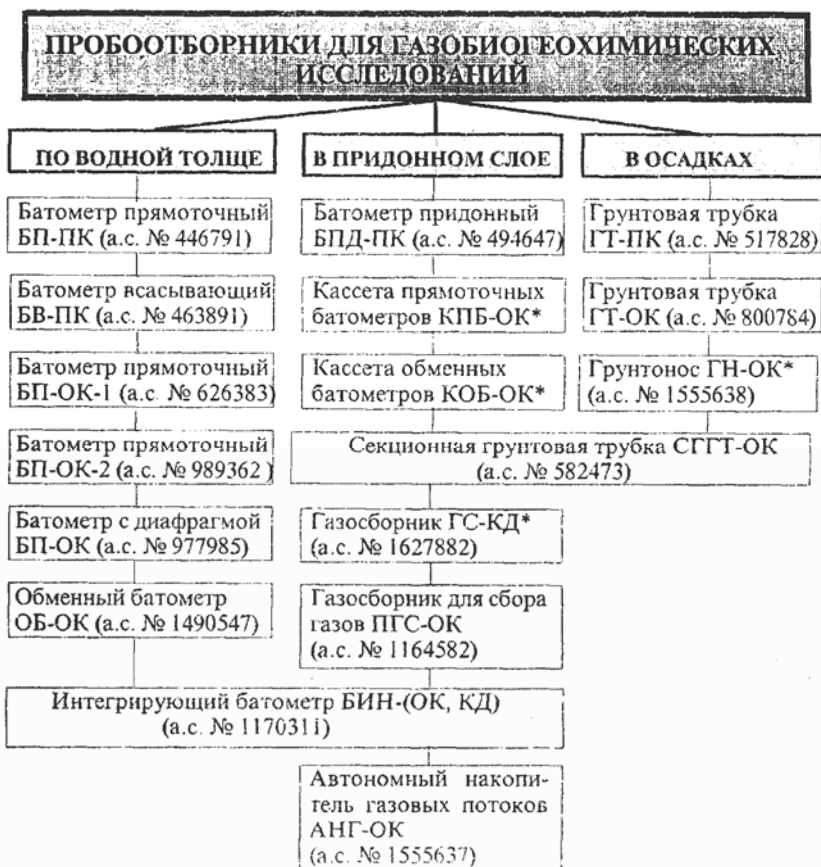


Рис. 11. Системы пробоотбора для газобиогеохимических исследований в акваториях: а.с. – авторское свидетельство, * – система приборов для работы с ОПА. Виды компенсации: ПК – поршневая, ОК – оболочковая, КД – капиллярно-диффузионная.

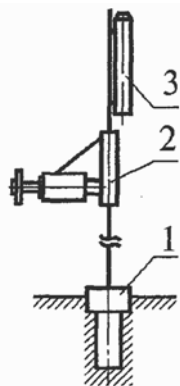


Рис. 12. Система придонных пробоотборников: 1 – грунтовая трубка, 2 – придонный батометр, 3 – интегрирующий батометр.

Разработаны системы, управляющие по акустическому каналу работой пробоотборников для автоматического отбора проб морской воды в водной толще и из придонного слоя (Авилов и др. авт. св-ва № 726469, 1980 г.; 761872, 1980 г.). Они обеспечивают определение местоположения захваченных проб в водной толще с точностью до десятков сантиметров, в том числе в придонном слое на расстоянии 0,5–15 м от дна.

Разработаны системы дегазации проб воды и осадков, содержащие дегазационную автоматическую установку с газосборником (Авилов и др. авт. св-во № 880995, 1981), дегазационные стаканы, соединительные магистрали. Системы обеспечивают герметичное соединение с пробоотборниками, извлечение пробы без контакта с атмосферным воздухом, полную дегазацию, концентрацию всех выделившихся газов в газосборнике и передачу этой газовой смеси под избыточным давлением в хроматографы для анализа.

В качестве вспомогательного оборудования создан испытательный стенд по исследованию компенсационных и других характеристик пробоотборников, а также для регламентных проверок.

Разработаны установки моделирования пластовых условий для изучения процессов миграции и нефтегазообразования в осадочной толще, что крайне важно при интерпретации результатов газобиогеохимических исследований в океане. Установки УМКП созданы в Лаборатории нефтегазоносности акваторий нашего института (ИО АН), возглавляемой член-корреспондентом АН Геодекианом А.А., на базе гидравлических прессов ПСУ-125 и ПСУ-250 (Авилов, 1985). При длительных экспериментах продолжительностью до нескольких суток установки воспроизводят термобарические условия недр до глубин 7–8 км в осадочной толще, воздействуя на испытуемый образец грунта в широком диапазоне изменения температур от 20 до 250°C и давлений от 0 до 2000 атм. Оригинальным является исполнение экспериментальной камеры. Образец помещаем внутрь толстостенной капсулы, изготовленной из фторопласта F4 (тефлона), что обеспечивает инактивность экспериментальной камеры, полную герметизацию образца, его всестороннее сжатие, равномерный по объему прогрев до заданной темпера-

туры. Конструкцией обеспечен периодический отбор на анализ газообразных флюидов – продукт внутрисистемного преобразования (Geodekiyan, Ulmishek, Avilov..., 1977; Авилов, Авилова, 2002 и др.).

Установка по моделированию рассеянных потоков природных газов в осадочной толще (УМРПП) включает специально разработанную экспериментальную камеру и систему поддержания газового давления. В нижней части камеры имитирована газовая залежь в виде емкости, соединенной с внешним источником. Последний осуществляет постоянную подачу газа или смеси газов необходимого состава при заданном давлении. Верхняя реакционная часть камеры (цилиндр) герметично отделена от нижней емкости искусственным фильтром. Цилиндр последовательно заполняли слоями породы, водой и газом, а затем герметично закрывали крышкой с вводом для отбора газовых проб на хроматографический анализ. Стенки цилиндра сделаны из прозрачного материала для визуальных наблюдений (Авилов, Авилова, 1999).

Разработан способ исследования проб водной среды и устройство для его реализации по получению достоверных газобиогеохимических показателей в пробе непосредственно на глубине методами оптико-электронного детектирования (Авилов, Авилова, патент № 2051355, 1995).

Рабочие макеты приборов в большинстве своем созданы и испытаны в Лаборатории нефтегазоносности акваторий ИО Академии Наук. Результаты исследований в виде принципиальных схем (по авторским свидетельствам), ТЗ, технических требований и рабочих макетов переданы в ОКБ океанологической техники (ОТ) при ИО АН. Разработка технической документации и изготовление опытных образцов приборов или мелких серий осуществлено в ОКБ ОТ совместно с Лабораторией. Конструкторская документация (рабочие чертежи) на некоторые приборы передана в ряд организаций СССР (ТОИ ДВНЦ, ИБФМ, ГЕОХИ, ИНМИ, Севморгеология, СахалинНИПИморнефть), а также в ИО НР Болгарии, где осуществлено изготовление и применение отдельных приборов и систем комплекса. Оригинальность технического решения, новые свойства и качества компенсационных батометров прямооточного и всасывающего типа, дегазатора отмечены бронзовыми и серебряной медалями ВДНХ СССР.

В результате колоссального труда создан приборный комплекс и состоялось внедрение всех этих теоретических разработок и технических новинок, защищенных более чем 20 авторскими свидетельствами и патентами, в практику океанологических работ. Отдельные приборы комплекса в различных сочетаниях были применены в многочислен-

ных морских экспедициях (более 20 – при непосредственном участии авторов) и многих лабораторных экспериментах, начиная с 1972 г. Приборами комплекса получены уникальные данные, собрана достоверная информация о разнообразных, неизвестных ранее природных явлениях (три наши открытия). Эта достоверная информация явилась основой более чем 300 публикаций авторов в области жизнеземлезна-ния – геоэкологии океана и литоакваэкологии (аквагеоэкологии), литоэкогеологии (рис. 1). Достоверность полученной газобиогеохимической информации подтверждена проведенными экспериментальными исследованиями доминантных свойств, качеств, признаков созданных приборов комплекса.

2.6. Экспериментальная оценка достоверности получаемой информации

Опытные образцы, серийные экземпляры и рабочие макеты разработанных приборов прошли испытания в лабораторных и экспедиционных условиях. Экспериментальные исследования включали несколько методологических подходов: специальные эксперименты для подтверждения доминантных свойств приборов и их соответствия техническим требованиям, сопоставление качеств созданных приборов с известными аналогами и традиционными техническими средствами и методами, оценку погрешности метода, выполнение требований по функциональной принадлежности приборного комплекса, сравнение результатов эксперимента с теоретическими разработками (Авилов, 1976; 1985, 1997 и др.). Основные результаты проверок и экспериментов изложены ниже, в данном разделе, а также используются в последующих главах в качестве необходимых аргументов.

Компенсационные свойства батометров исследовались в основном на океанических глубинах, а у трубок – при высокой газонасыщенности осадков. В Тихом океане испытания проводили на глубинах до 8,5 км. Отмечено перемещение мембранного (диафрагменного) компенсатора пропорционально глубине погружения в 17 экспериментальных спусках, то есть объем проб возрастал с глубиной их захвата (Авилов, 1976). В Индийском океане измеряли объемы проб, отобранных на глубинах 0–6 км новыми поршневыми компенсационными батометрами, и для сравнения – серийными батометрами БМ-48. Обработка результатов измерений в 60 парных пробах производилась с помощью метода наименьших квадратов. Считаем зависимость объемов проб Y

от глубины X их отбора линейной, тогда приближенная функция имеет вид: $Y = A X + B$. Для проведенных n замеров расчет параметров A и B проведен по известным формулам (Авилов, 1985). На значительном числе сопоставимых измерений показано, что объем приносимых проб из батометров БМ-48 практически не изменялся (часть пробы была потеряна), а из батометров с поршневым компенсатором – увеличивался на 0,5 – 0,7% на километр (проба полностью сохранена). По замерам объема проб воды в компенсационном батометре БПД-ПК для наиболее представительной серии из 20 последовательных спусков на глубины от 0,04 до 4,2 км вычислены параметры приближенной функции – $A = 0,00531$ и $B = 1,0655$. Тогда эмпирическая зависимость численно равна: $Y = B (1 + 0,005 X)$, то есть экспериментально подтверждено увеличение исходного объема B на 0,5% на 1 км, что хорошо согласуется с теоретическими представлениями (раздел 2.4.).

Компенсационные свойства созданных поршневых батометров подтверждены экспериментами по сохранности газовой фазы в пробе. Несколько батометров БВ-ПК заполняли до полного объема атмосферным воздухом на борту судна, закрывали и измеряли расстояние L от поршня до торцевой крышки корпуса (исходное положение поршня). Батометры с воздухом опускали на тросе на различные глубины вплоть до 5 км. После спуска – подъема поршень сохранял исходное положение (размер L оставался практически неизменным), и в батометрах воздух не был потерян, внутрь не попало ни капли воды. Это означает, что при спуске гидростатическое давление возрастало (максимально до 500 атм.) и давило на поршень, который в свою очередь, двигаясь вдоль корпуса батометра, сжимал воздух, а при подъеме, наоборот, воздух расширялся, перемещая поршень в исходное положение. Эксперимент подтвердил постоянство характеристик уплотнительного узла поршня нового типа с пружинным поджатием при почти полном изменении объема внутренней полости батометра в рабочем диапазоне глубин до 5 км. Сохранена герметичность газовой пробы, исключен её контакт с внешней средой. Данное качество ярко проявилось при исследовании газовых факелов в Черном море – придонный батометр БПД-ПК при подъеме на борт судна удержал во внутренней полости несколько кубиков свободного газа, захваченного вместе с придонной водой на глубине 0,8 км (Шнюков, Авилов, Авилова, 2006, 2007).

Сравнительные испытания со многими другими типами уплотнений поршня, которые уже начинали протекать на глубинах более 0,5–1

км, выявили уникальные свойства созданного уплотнительного узла поршня (Авилов, 1985). Уплотнение поршня плавно регулируем поджатием пружины, без труда устанавливаем оптимальную величину давления компенсации $P_k = 0,05$ атм. Эксперименты убедили, что при столь малых значениях P_k (поршень диаметром 10 см сдвигаем вручную) достигнута герметичность пробы (как воды, так и газа) под воздействием колоссального наружного давления до 1000 атм. При длительной эксплуатации величина P_k оставалась неизменной до и после спуска-подъема, а также в сериях спусков в течение нескольких месяцев, что подтвердило хорошую саморегулирующую функцию уплотнения, то есть, исполнено одно из важных доминантных качеств – постоянство характеристик уплотнительного узла.

В грунтовых трубках испытывали работу более эффективного оболочкового компенсатора. Эластичный вкладыш исходно помещаем внутри грунтовой трубки. После внедрения трубки в дно, заполнения грунтом и срабатывания запорных устройств, пробы осадков оказываются герметично упакованными внутри вкладыша. При подъеме на борт судна оболочка вкладыша отслеживает незначительное увеличение объема осадка, в большинстве наблюдаемых случаев лишь слегка распрямляясь. Однако при высокой газонасыщенности грунта, как было зафиксировано в 26 рейсе НИС «Академик Курчатов», компенсация осуществлялась уже за счет эластичных свойств тонкостенного вкладыша из полимерной пленки. Перед началом дегазации пробы № 196 (станция 2679) после 1,5 часов хранения эластичная оболочка секции растянулась, увеличившись в диаметре с 80 до 92 мм, и отошла от осадка на 10-12 мм, надежно удерживая выделившиеся газы, которые создали избыточное внутреннее давление порядка 0,7 атм. Внутри дегазационного стакана натянутая оболочка лопнула при первом прикосновении ножа (Авилов, Троцюк, 1980). Аналогичное явление отмечалось при изучении газонасыщенных осадков в отдельных районах Карского, Балтийского и Черного морей.

Давление компенсации измеряли у всех разработанных пробоотборников. Оно составило менее 0,01 атм. для оболочкового и 0,04--0,06 атм. для поршневого компенсатора, что соответствует расчетным параметрам. Натурные наблюдения подтвердили реализацию компенсационных свойств в разработанных пробоотборниках. При таких незначительных давлениях компенсации работает идея реального выравнивания давления в пробе с давлением окружающей среды. Выравнивание давлений идет без потери части пробы, особенно важно –

её газовой составляющей, за счет чего достигнута высокая степень герметичности пробоотборников.

Исследовано соответствие полученных свойств приборов заложенным техническим требованиям. В первую очередь контролировали выполнение одного из наиболее жестких требований по ограничению допустимой фильтрации батометров, поскольку именно она, как было показано выше, относится к обычным недостаткам многих традиционных пробоотборников. Экспериментальные исследования должны были дать ответ на вопрос о том, насколько компенсационное свойство решает задачу ограничения величины фильтрации. Разработана методика измерения опытным путем величины коэффициента фильтрации любого батометра в реальных условиях работы. Для этого батометр на борту судна заливаем водой, в которой известна концентрация C_0 контрольного компонента, например, солёности. Проводим спуск на рабочую глубину и затем подъем батометра с обычной скоростью. После спуска-подъема измеряем содержание этого компонента C_i в залитой прежде воде. Зная концентрацию контрольного компонента в морской воде C_3 , по формуле 2 вычисляем коэффициент фильтрации батометра. При этом для определения коэффициента фильтрации с наибольшей точностью необходимо создать значительный перепад концентрации компонента в исходной, залитой воде C_0 и внешней морской воде C_3 . В океане заливаем дистиллированную воду, а на Байкале – наоборот, с высокой солёностью. По этой методике измерены величины коэффициента фильтрации у компенсационных батометров, при средних скоростях движения 60–180 м/мин они найдены в интервале 0–0,08%, что ниже допустимых значений с запасом в 3 и более раз. Главный вывод – компенсационное свойство, реализованное в пробоотборниках, снимает проблему фильтрации, у них она просто отсутствует.

Экспериментально исследовали способы захвата пробы воды с точки зрения обеспечения её нативных свойств. В экспедиции на РПС «Ихтиандр», январь – март 1993 г., в Черном море проведено сравнение компенсационных батометров (БПД-ПК и прямоточного батометра с оболочковым компенсатором КПБ-ОК, устанавливаемого на ОПА) с батометрами двух других типов. Первый тип – пневмоаккумуляторный с сохраняемым внутренним газовым давлением 5 атм., выполненный в виде цилиндрического корпуса с разделительным подвижным поршнем – первый вариант этого типа, второй вариант – имеет сферический корпус с встроенной эластичной диафрагмой (разра-

ботка г. Днепропетровск). Второй тип – предварительно вакуумированный батометр с золотниковым клапаном (разработка г. Санкт-Петербург). Проводили отбор параллельных проб в придонном слое воды с помощью груза-разведчика на глубинах более 1,5 км. Все приборы кроме БПД-ПК устанавливали на ОПА «Север-2», и они срабатывали в придонном слое на глубинах до 2100 м при выдвижении лотка одновременно (Авилов, Авилова, 1993).

Результаты сравнительных испытаний этих трех типов батометров экспериментально показали высокое качество компенсационных проб и значительное искажение исходного газового состава при инъекционном способе отбора проб морской воды на глубине. При наиболее жестких условиях взятия пробы – впрыскивание в вакуум, процент содержания водорода в выделившейся газовой смеси в 190 раз больше, чем у компенсационного батометра, а метана, наоборот, – в 40–60 раз меньше. В пневмоаккумуляторном батометре эти изменения меньше на порядок по водороду, но по метану – те же 40–60 раз. Здесь условия впрыскивания газа более мягкие за счет использования лабиринтного дросселя на входе и несколько меньшего перепада давлений. Тем не менее, оба инъекционных способа не пригодны для количественных высокоточных измерений газового состава в воде, а также геоэкологических исследований, поскольку мгновенный перепад давлений создает стрессовую ситуацию и вызывает гибель микроорганизмов в пробе (Авилов, Авилова, 1993; Геодекян, Шнюков, Авилов..., 1995; Авилов, 1997).

Разработанные новые способы захвата проб изучали при экспериментах с рабочими макетами и опытными экземплярами батометров в экспедициях на НИС «Шельф» в Балтийском море, с судна «Акванавт» и ОПА «Осмотр» в Черном море. Результаты исследований использованы при разработке принципов действия и выявления свойств у новых способов отбора проб (раздел 2.4). Новые качества приборов (накопительного, интегрирующего, обменного батометров), приобретенные за счет примененных разработок, обеспечили захват проб с ненарушенными, необходимыми характеристиками морской среды. Как показали эксперименты все компенсационные батометры (без прямоточных) не загрязняются при спуске, исходя из их принципа действия, и отбирают пробы без нарушения её нативных свойств. Отсутствие загрязнения батометров БПД-ПК и БВ-ПК, отсекающего и всасывающего типа соответственно, доказано по измерению оптической плотности пробы в сравнении с традиционным прямоточным ба-

тометром с крышками (Авилов, 1985). Внедрение новых способов захвата проб уменьшило погрешности ниже допустимого уровня, повысив достоверность газобиогеохимических определений.

Созданные приборы комплекса, как показали лабораторные и экспедиционные проверки, соответствуют заложенным при проектировании техническим требованиям. Величина компенсационного объема 5% вполне достаточна для практических целей. Сам факт приращения объема служит индикатором сохранности пробы – у поршневых батометров фиксируется визуально сразу после подъема на поверхность. Детали батометров, контактирующие с пробой, изготовлены из химически инертного материала – нержавеющей стали Х18Н10Т, что обеспечило неизменность состава компонентов в морской воде за время пребывания ее в батометре. В дегазаторе требуемая полнота дегазации достигается, как показала практика, за 6–8 циклов сбора газовой смеси в газосборник (Авилов, 1985). Эта технология обладает заметными преимуществами по сравнению с другими способами дегазациями. Проводили сравнительные испытания вакуумной дегазации (в дегазаторе) с наиболее близким аналогом – фазово-равновесной дегазацией (в склянке). В донных осадках на отдельных горизонтах отобраны параллельно, с одного интервала, образцы осадков на вакуумную и фазово-равновесную дегазацию. Отмечено расхождение данных. Концентрация водорода и метана при вакуумной дегазации определена в 3–5 раз выше содержания этих же компонентов при использовании фазово-равновесной дегазации (Авилов, Авилова, 1993; Геодекян, Шнюков, Авилов..., 1995). Экспериментально подтверждено главное качество системы приборов – сохранность измеряемых компонентов с момента захвата пробы на глубине до анализа.

Экспериментальное изучение эффективности использования систем приборов включало проведение сравнительных испытаний и сопоставление новых данных с результатами, полученными известными аналогами. Среди последних чаще всего использовали хорошо зарекомендовавшие себя серийные батометры БМ-48, «ЧЭНИС», Сусляева, прямоточные грунтовые трубки. Отбор проб этими и испытываемыми приборами проводили практически в одной точке, например новый придонный батометр БПД и серийный БМ-48 устанавливали в метре друг от друга, их механизмы срабатывания были соединены жесткой тягой и пробы отбирались одномоментно. В грунтовых трубках сравнивали герметичные образцы в оболочковом компенсаторе и обычные – из открытых грунтовых трубок. Дополнительно были поставлены

контрольные эксперименты с образцами грунта, отобранными из газонасыщенных осадков герметичной трубкой СГГТ-ОК. Отдельные герметичные секции разрезали, снимали эластичные оболочки и хранили два часа. Затем измеряли содержание газов в открытых и герметичных образцах. Анализ показал, что в герметичных образцах концентрация метана больше как минимум в 10 раз по сравнению с открытыми образцами (Авилов, 1985).

Методика сравнительного эксперимента обладает определенными преимуществами. Погрешность анализа та же одинакова во всех определениях одного компонента, тогда различие концентраций компонента в измеренных парных пробах зависит от погрешности σ_p , которая, напомним (раздел 2.3), определяется свойствами и качествами используемых технических средств и методов. По разнице средних содержаний компонента, вычисленной для достаточного числа парных измерений, получаем статистически достоверную информацию об относительной ошибке метода, которая характеризует причину возникновения приборной погрешности. Здесь необходимо иметь в виду, что газобиогеохимические компоненты относятся к категории теряемых, то есть их концентрация имеет тенденцию уменьшаться, а не наоборот. Сказывается неправильное хранение и обработка, негерметичность приборов и другое. Так что большая концентрация компонента, из двух измеренных в двух парных пробах, объективно достовернее другой – меньшей концентрации. Исследованы и статистически обработаны измерения более чем 500 парных проб (более 30000 анализов по компонентам в воде и осадках). Определяли концентрацию H_2 , He, CH_4 , C_2H_6 , CO_2 , O_2 , Ar, N_2 , SiO_3 , PO_4 , NO_3 , АТФ, активность ферментов (ЩФА и других), оптическую плотность 270 нм и другое (Авилов, 1976, 1985, 1997, Авилова, 1990 и многие др.).

По сравнению с известными аналогами разработанные приборы комплекса обеспечили газобиогеохимические исследования более достоверной количественной информацией. Биогенные компоненты, азот, аргон измерены в количествах на 0,7–7,5% выше, чем в пробах из известных батометров, что, скорее всего, связано с фильтрацией последних. Газобиогеохимические показатели также оказались выше в пробах из приборов комплекса, причем на 0,8–20% при низких содержаниях компонентов и на 30–280% – для высоких концентраций, а в осадках – максимально на $2,9 \cdot 10^4\%$. Выявленные расхождения констатируют, что целесообразность использования разработанных систем приборов возрастает пропорционально увеличению содержаний ком-

понентов в изучаемой среде. Комплекс наиболее эффективен при исследовании аномальных явлений, поскольку традиционные методы не характеризуют их адекватно или вообще не обнаруживают.

Разработанные технические средства испытаны на функциональную принадлежность. Рассматривали факт срабатывания и исполнение необходимой функции прибором при поступлении соответствующей команды от посыльного груза, от касания дна, по акустическому сигналу, команде оператора ОПА и с другой стороны – самопроизвольное срабатывание без команды. Испытания затрагивали различные стороны работы приборов. Их проводили в лабораторных условиях, в экспедициях при спусках в морской среде, при визуальном контроле аквалангистами или акванавтами из ОПА, а также оценивали функциональные свойства приборов по результатам эксплуатации при газобиогеохимических исследованиях. Так, в автономных системах после выдержки на дне содержание газов в накопительных пробах было выше, чем соответственно в контрольных дискретных батометрах. Наблюдали процесс накапливания, причем он шел быстрее над геологическими разломами (Авилов, 1997). В интегральной пробе от дна до поверхности Балтийского моря найдены типичные представители придонной и поверхностной фауны одновременно, что подтверждает четкую работу интегрирующего батометра БИН – его суммирующую функцию. Исследовали процесс захвата проб воды из придонного слоя. Время срабатывания батометра БПД с момента касания грузом-разведчиком дна до отсечения пробы корпусом колебалась в пределах 0,3–0,5 сек. За это время при скорости спуска на низшей передаче лебедки (30 м/мин) батометр опускался на 15–25 см – расстояние, соизмеримое с ходом корпуса по направляющим (15 см). То есть придонную пробу захватывали в заданной точке, а ее удаленность от дна достаточно точно определяла длина стропа.

На основе многочисленных наблюдений в экспедициях 1976–1979 гг. вычислена высокая надежность срабатывания поршневых компенсационных батометров. При числе спусков $n = 190$ вероятность срабатывания находилась в доверительном интервале 0,96–1,0 при доверительной вероятности 0,95 (Авилов, 1985). Дальнейшие экспедиции подтвердили высокую надежность работы созданных приборов.

Разработанные системы приборов и методы использованы, начиная с 1972 г., для натурных газобиогеохимических исследований в большинстве акваторий Мирового океана, а также в водных системах оз. Байкал, лагун, озер, водохранилищ. С их помощью осуществлен

отбор проб и измерение компонентов во всех задаваемых точках (рис. 2). По разрезу водной толщи морскую воду отбирали в соответствии с их назначением (рис. 11) поршневыми и оболочковыми компенсационными батометрами.

Наиболее часто использовали систему придонных пробоотборников (рис. 12) или отдельно придонный батометр БПД – ПК. Совокупность новых качеств позволила стабильно производить отбор достоверных проб на одном и том же расстоянии от дна при любых глубинах океана. Обычно использовали строп длиной около 2 м, при слабо уплотненных осадках – 3–3,5 м. Осуществлен массовый отбор придонных проб как в шельфовой зоне, так и на океанических глубинах максимально 7,4 км в Императорском разломе Тихого океана. Уникальные пробы отбирали при минимальных затратах времени на заборные работы. Время спуско-подъемной операции составляло в среднем 0,5 час при глубине 2 км и 1,5 час при 5 км. По сумме свойств у системы придонных пробоотборников практически нет близких аналогов в мировой океанологии.

На тестирование придонной среды были нацелены также другие приборы комплекса. Трубка СГТТ-ОК успешно отбирала одномоментно пробы грунта и воды, разделенные на секции непосредственно на дне, в Черном, Балтийском, Карском морях, Тихом океане до глубин 7,4 км (трубка взята в ложе упомянутого Императорского разлома). Автономные системы ПГС-ОК и АНГ-ОК выполнили заложенную в них функцию по накоплению газов, обеспечив инструментальные измерения рассеянных газовых потоков в отдельных районах Черного и Балтийского морей. Системы приборов для ОПА использовали в Черном море на РПС «Ихтиандр», наряду с придонной системой, для изучения придонного слоя на глубинах 1,7–1,9 км (Авилов, Авилова, 1993; Геодекян, Шнюков, Авилов..., 1995 и др.). Модифицированную систему придонных пробоотборников для работы с малых плавсредств применяли при исследовании водохранилищ, водоемов присахалинского шельфа (Геодекян, Авилов, Авилова, 1993; Авилов, Авилова, 1993; 1995 и другие). Интегрирующий батометр обеспечивал изучение эвфотической зоны оз. Байкал, водной массы Черного, Балтийского морей, Атлантического и Тихого океанов (Геодекян; Авилов, Авилова, 1990; 1990а; 1997; Авилов, Авилова, 1993; 1999а; 2003; 2005; 2007в; 2008; 2009 и др.).

Установка УМКП дала возможность смоделировать процессы катагенетического преобразования органического вещества в осадочных

толщах. Проведены эксперименты – более 100 – с образцами, существенно различающимися по физическим свойствам: уплотненными породами (кернами), раздробленными грунтами и влагонасыщенными морскими осадками. Температурные режимы изменяли от 20 до 300°C и с интервалами через 25°C, давление – от 0 до 1500 атм. Длительность выдержек образцов составляла 7–8 час, 36 час, 76 час. Получены экспериментальные данные о новообразовании газов: метана и его гомологов до C₅ включительно, водорода, двуокиси углерода (Авилов, 1985). На установке УМРПГ имитировали процессы рассеяния газов из их скопления, порождаемые движением газов вверх по осадочной толще. Измерены скорость и плотность потока газов He, H₂, CO₂, N₂, O₂, CH₄, а в образцах воды и грунта определяли концентрацию АТФ. Обнаружено новое явление концентрирования газов внутри слоя осадков (Авилов, Авилова, 1999 и другие). Применение моделирования открывает большие возможности в исследовании процессов, происходящих в литосфере, является эффективным методом для прогноза особенностей нефтегазообразования и нефтегазоаккумуляции в осадочных толщах акваторий. Полученные данные имеют большое значение для выявления геохимических критериев при оценке нефтегазоносности акваторий.

Практическое использование нами комплекса приборов более чем в 20 экспедициях повысило информативность газобиогеохимических исследований за счет получения нового вида проб и наблюдения ранее недоступных объектов. Возросла эффективность натурных исследований.

Выполненные эксперименты зафиксировали наличие у разработанных систем приборов заложенных доминантных признаков и свойств, гарантирующих новые функции приборов, что создает уверенность у исследователя в получении достоверных количественных данных, какими бы необычными они на первый взгляд не показались.

3. ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

База достоверных данных, содержащая существенные информационные признаки состояния природной экосистемы, а также необходимую дополнительную информацию о компонентах среды, может быть получена специальными техническими средствами и методами, представленными выше в предыдущих разделах и главах. В функцию ин-

формационной системы входит решение задачи о том, как воспользоваться полученным массивом данных наиболее эффективным образом. Встает вопрос об оптимизации количества используемых показателей на различных этапах геоэкологической экспертизы, о разработке экспертных систем, то есть объединение разрозненных данных в единую систему, имеющую определенную геоэкологическую значимость. Некоторый опыт и положительный эффект, как отмечали выше, имеется в естественных науках, но наиболее близкий аналог следует искать в медицине. Это справедливо по целому ряду обстоятельств.

Собственно вся наука, в том числе и аквагеоэкология, создана людьми, чтобы приносить им пользу, в чем медицина имеет богатый опыт. Кроме того, человек выступает в роли активного элемента большинства природных экосистем. Его самочувствие во многом связано с экологией окружающей среды и поэтому может в свою очередь характеризовать состояние экосистемы. На здоровье человека всегда обращали внимание и тогда, когда понятие экологии даже не существовало, а среду обитания воспринимали как естественный фон. Соответственно подходы в оценке состояния человека разрабатывали и совершенствовали с давних пор в медицине. Чисто исторически медицинская наука по методологии находится впереди всех наук в изучении свойств человека, в том числе с позиции его функции в качестве биотической составляющей природной экосистемы. Вместе с тем, нельзя упускать из виду, что человек как биологический объект сам представляет собой локальную экосистему, что также лежит в русле задач медицины. Изучение состояния человека – это исследование состояния локальной экосистемы, то есть задача, близкая к экспертизе локальной природной экосистемы. Многие разделы методологии, апробированные в медицине, могут быть эффективны в природной геоэкологической экспертизе.

Именно в медицине в связи с диагностикой и лечением разнообразных болезней отработаны и прошли проверку временем многочисленные показатели состояния человека в целом или его отдельных органов, которые могут быть определены как своеобразные экспертные системы. Например, следует назвать знакомые всем несколько компонентов, измеряемых при анализе крови, или группу электрических импульсов, снимаемых при электрокардиограмме, и другое. Или единственный, но от этого не менее важный обобщенный показатель, – температура тела. Простота операции по измерению температуры не умаляет значимость этого показателя – на практике он позволяет опреде-

лить состояние индивидуума (отделить здорового от больного). Он по своей сути (для специалиста) характеризует интенсивность и направленность процессов внутри организма, поскольку биохимические преобразования на внутриклеточном уровне протекают в узком температурном диапазоне.

Теория биохимического состояния природной среды (Авилов, Авилова, 2008) с учетом накопленного авторами опыта помогает сформулировать понятие экспертной системы для задач информационной системы аквагеоэкологии как комплекс газобиогеохимических показателей, содержащий существенные информационные признаки в количестве достаточном для достоверной оценки состояния природной экосистемы или её отдельного характерного свойства. Памятуя о принципе разумной достаточности, определяем, что число показателей в экспертной системе должно быть минимальным, в идеале – один.

Данная глава посвящена разработке экспертных систем для эффективного применения в информационной системе аквагеоэкологии. К первоочередной задаче относим определение нормального состояния природной экосистемы.

3.1. Оценка нормального состояния природной экосистемы

Разделение на количественном уровне естественного, природного состояния экосистемы от состояния, вызванного техногенным воздействием, относим к одной из сложных задач аквагеоэкологии. В её решении значительную роль играет представление о нормальном геоэкологическом состоянии природной экосистемы. Биотическая составляющая экосистемы обычно оценивается разнообразными показателями, к наиболее ёмким относим величины органического углерода (C_{орг}) и биомассы (В). Оба показателя часто используют, так как они отражают результат многочисленных промежуточных преобразований и характеризуют состояние экосистемы в окончательном обобщенном виде. В медицине по биомассе (весу) индивидуума (локальной экосистемы) в зависимости от роста судят о его нормальном состоянии, либо об отклонениях: дистрофии, ожирении и других. Биомасса живых организмов экологически значима, поскольку несёт определенную информацию о природной экосистеме. Например, вес отдельных особей омуля в оз. Байкал достигал нескольких килограмм (до 5 кг по данным середины прошлого века), в конце 70-х годов вес омуля основных промысловых возрастных групп 4–8 лет уменьшился в 2–3

паза, сигнализируя об угнетенном состоянии его естественных популяций. Это характеризует постепенное ухудшение геоэкологического состояния экосистемы уникального природного объекта под натиском антропогенного воздействия.

В природных экосистемах подсчет биомассы ведут разными методами. В гидробиологической практике определение биомассы микроорганизмов осуществляют в основном весовым или объемным способами. Простое взвешивание применяют в исследовании макрофлоры. В другом случае по прямому микроскопированию в пробе измеряют размеры микроорганизмов, по которым, используя номограммы, рассчитывают их объем, а потом и вес. Средние размеры клеток варьируют в зависимости от уровня трофности вод, поэтому данные о числе клеток в единице объема пробы (N) менее представительны, чем величина биомассы. Наиболее распространен подсчет сырой биомассы (B_c , мг/м^3) путем умножения числа клеток на их средний вес.

В биогеохимии для характеристики микробияльного сообщества и водной массы определяют взвешенный и растворенный органический углерод (Сорг , мкгС/л) методом мокрого сжигания. В морской биохимии нами введено понятие биомасса активных живых микроорганизмов (БАЖМ), измеряемой АТФ-методом (Авилов, Авилова, 2008).

Отображая свойства одного и того же объекта, все эти показатели численно связаны между собой. Хорошо изучена и экспериментально неоднократно нами проверена прямая пропорциональная зависимость между биомассой (B), определяемой по взвешенному Сорг , и содержанием АТФ, измеряемым в устойчивых стабильных во времени (стационарных) сообществах микроорганизмов или молодых популяциях отдельных видов. Получен коэффициент пропорциональности $250: B=250 \text{ АТФ}$, где B – в мкг С/л , а АТФ – в мкг/л . Для такого сообщества биомасса B идентична количеству углерода в живых клетках, соответственно правомерно равенство показателей $B = \text{Сорг} = \text{БАЖМ}$. Для угнетенного или стареющего сообщества этого равенства не может быть, так как биомасса B измерена по Сорг , находящемуся не только в живых, но и в погибших клетках, которые могут даже преобладать в этом стареющем сообществе.

Для перевода величины сырой биомассы B_c в единицы углерода умножаем её на 0,1, поскольку содержание органического углерода в сырой бактериальной массе близко к 10%. В зависимости от трофности вод и структуры микробияльного сообщества эта величина может меняться, опускаясь до 7%.

В силу различия методов определения биомассы микроорганизмов, рассмотренные показатели имеют разную степень экологической значимости. В разработанной авторами классификации биологически активных веществ (Авилова, Авилов, 1990 и др.) биомассу БАЖМ помещаем на первый уровень экологической значимости, где основная роль принадлежит содержанию АТФ. Все остальные показатели биомассы, получаемые в гидробиологии, соответствуют более низкому четвертому классификационному уровню, в котором объединены вещества, характеризующие биомассу, не разделяя живые от погибших клеток. Выделяем биомассу активных живых микроорганизмов (БАЖМ) и её определитель – содержание АТФ как главенствующий, обобщенный показатель состояния экосистемы.

Приведенные доводы указывают на необходимость соблюдения осторожного подхода в сопоставлении данных АТФ с сырой биомассой, а тем более с числом клеток (N). Тем не менее, для решения отдельных задач оно может быть полезно. Примером служат обобщенные нами (рис. 13) литературные данные о диапазонах природных изменений сырой биомассы микроорганизмов в водных объектах (Авилова, Авилов, 1997). Учитывая установленные выше расчетные закономерности, вычислены содержания АТФ, соответствующие величинам B_c и дана их шкала (рис. 13).

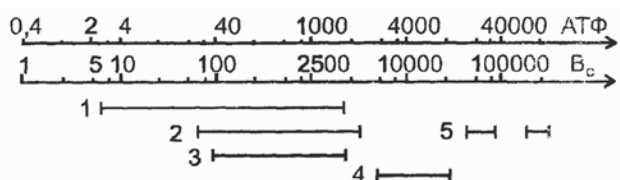


Рис. 13. Вариации сырой биомассы микроорганизмов (B_c мкг/л) в водах различных водоемов и соответствующие расчетные величины АТФ (нг/л): 1 – лагуна, 2 – река, 3 – озеро, 4 – рыбоводные пруды, 5 – выростные пруды с удобрением.

Получено наглядное представление о существовании некой границы между биомассами микроорганизмов в водоемах с естественным природным развитием экосистем (линии 1, 2 и 3 на рис. 13) и водоемах, куда вносят подкормку для рыб (линии 4 и 5), вызывая переход экосистемы на более высокий уровень биологической активности (на 2–3 порядка выше, чем естественное состояние). Граница просматривается в районе значений $B_c = 2500\text{--}3000$ мкг/л и расчетных величин

1000–1200 нг АТФ/л. Это важный вывод, так как в морской микробиологии достаточно неопределенно разделение мезотрофных и эвтрофных вод. Расчетные величины не входят в противоречие с натурными наблюдениями авторов и других исследователей. Многочисленные измерения АТФ не дали значений больше, чем 1000 нг/л, в акваториях, которые рассматривались как экологически чистые на момент исследования. Таким образом, с достаточно высоким приближением к реальности количественным показателем эвтрофирования вод служат концентрации АТФ выше 1000 нг/л.

Аналогичный результат дает сопоставление с критериями качества природных вод (раздел 1.1). Среди комплекса используемых там показателей выбираем наиболее близкий к АТФ в характеристике биомассы – органический углерод (Сорг, мг/л). Для каждого класса качества вод (всего 6 классов) даны диапазоны изменения Сорг. По сумме показателей каждый класс приблизительно соответствует определенному уровню трофности вод. Интересующая нас граница проходит между вторым классом (мезотрофные воды) и третьим классом (слабо эвтрофные воды). Теперь, используя выше приведенные переводные коэффициенты, вычисляем АТФ по Сорг и получаем, что граница между мезотрофными и эвтрофными водами определяется также величиной 1000 нг/л. Подтверждающие друг друга совпадения позволяют заключить, что с достаточной для современных методов точностью находим по АТФ верхнюю границу нормального состояния природной экосистемы на уровне 1000 нг АТФ/л.

В результате анализа разнообразных подходов к оценке состояния природных вод выделяем наиболее значимый обобщенный показатель – содержание АТФ. Его вводим первым в экспертную систему как главный критерий геоэкологического состояния водного объекта. В определенном смысле он подобен используемому в медицине обобщающему критерию – температуре тела. Если в воде измерена концентрация АТФ менее 1000 нг/л, то в первом приближении, с высокой долей вероятности можно говорить о нормальном состоянии этой экосистемы. При более высоких значениях АТФ наблюдаем отклонения от нормы – своеобразное «болезненное» состояние. В таком контексте – для приближенного или предварительного определения геоэкологически нормального состояния природного объекта, содержание АТФ выступает в роли самостоятельной экспрессной экспертной системы. Для более детального исследования экосистемы и оценки её состояния используем более сложные экспертные системы.

3.2. Графические экспертные системы

Усложнение структуры экспертной системы идет по нескольким путям: увеличение числа значений одного компонента, использование нескольких показателей одновременно или последовательно, добавляя их по мере надобности, применение системы показателей, придавая им табличный, графический или иной вид, и другое. Во всех случаях исследователь, попав на изучаемый природный объект, стремится выполнить как можно больше измерений. В результате образуется массив данных, которые необходимо обобщить и понять их экологическую значимость.

В океанологии наиболее часто ведут сбор информации по вертикальному разрезу водной толщи и донных осадков при остановках корабля (на станциях) или на ходу судна – по профилям. При обработке полученных данных обычно строят графики распределения содержания компонентов по пройденным разрезам и профилям. Соответственно для анализа фактического материала будут полезны именно графические экспертные системы.

Их отличает используемый при создании экосистемный подход, который проявляется в систематизации разрозненных данных, прежде всего по принципу экологической однозначности. Учитывают показатели только одного геоэкологического состояния изучаемого объекта. По каждому компоненту включают все измеренные величины. Графическую зависимость содержания компонента от расстояния (глубины) строят, задавшись четким правилом (по осредненным величинам, максимальным или минимальным значениям и т.п.). Такая графическая экспертная система сводит массу единичных измерений к одному показателю, например виду кривой линии, наглядно демонстрирующей одно из свойств наблюдаемого геоэкологического состояния природного объекта.

Такой экосистемный подход авторы применяли на практике при газобиогеохимических исследованиях, обобщая собственные многочисленные данные по распределению биохимических и газово-геохимических показателей в морской среде. В качестве экспертной системы использовали графики вертикального распределения отдельных, чаще – нескольких компонентов в тех частях водного объекта, которые соответствуют экологической норме. С ними сравнивали данные по всей изучаемой акватории и делали вывод о её геоэкологическом состоянии. К универсальной экспертной системе относим по-

строенные типичные профили вертикального распределения одновременно шести биохимических показателей, измеренных нами в океане (Авилова, 1982; 1990; Авилов, Авилова, 1986; Геодекян, Авилов, Авилова, 1990; Миркина (Авилова), 1977а и другие). Их приводим в качестве примера (рис. 14 и 15).

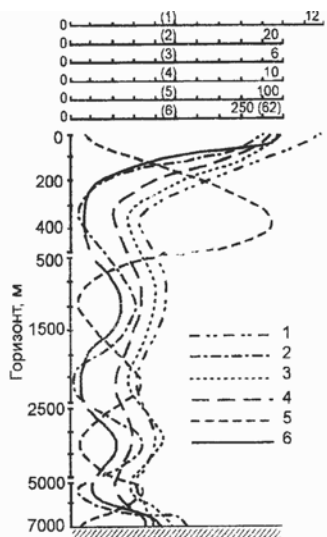


Рис. 14. Профиль вертикального распределения биологически активных веществ в водной толще океана (типичный профиль): 1 – щелочная фосфомоноэстераза, Е/л; 2 – липолитическая активность, $\text{Ед}/\pi 10^{-2}$; 3 – протеолитическая активность, $\text{Ед}/\pi 10^{-1}$; 4 – амилолитическая активность, $\text{Ед}/\pi 10^{-4}$; 5 – мочевины, $\text{мкг N}/\text{л}$; 6 – АТФ (биомасса активных живых микроорганизмов), $\text{нг}/\text{г}$ ($\text{мкг C}/\text{г}$).

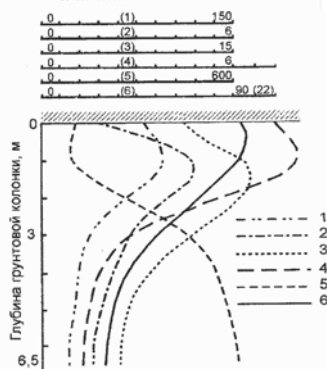


Рис. 15. Профиль вертикального распределения биологически активных веществ по грунтовой колонке (типичный профиль): 1 – щелочная фосфомоноэстераза, Е/л; 2 – липолитическая активность, $\text{Ед}/\pi 10^{-2}$; 3 – протеолитическая активность, $\text{Ед}/\pi 10^{-1}$; 4 – амилолитическая активность, $\text{Ед}/\pi 10^{-4}$; 5 – мочевины, $\text{мкг N}/\text{л}$; 6 – АТФ (биомасса активных живых микроорганизмов), $\text{нг}/\text{г}$ ($\text{мкг C}/\text{г}$).

В результате обобщения фактического материала выделены типичные профили вертикального распределения биологически активных веществ биохимического ряда в водной толще и донных осадках (рис. 14, 15). В них нашло отражение стационарное состояние живых организмов в экологически чистых районах Мирового океана и адек-

ватный этому состоянию уровень внутриклеточных биохимических реакций, выраженный количественно через биохимические показатели. Эти профили имеют большое теоретическое и практическое значение. С биохимических позиций установлена граница между биологически активной и биологически пассивной средой.

Биологически пассивные воды характеризуются содержанием биохимических показателей ниже фоновых, то есть меньше концентраций, показанных на рис. 14 (например, для АТФ – 20 нг/л). Дана им экологическая оценка: в биологически пассивной среде микроорганизмы находятся в угнетенном состоянии под влиянием неблагоприятных факторов среды (загрязнение, стрессовые ситуации и другое). Более высокие величины биохимических показателей свойственны биологически активной среде.

Типичные профили являются эталоном экологически чистого состояния водной среды, которое характеризуется приведенными на типовых графиках количественными значениями концентраций и активности биологически активных веществ и их соотношениями как между отдельными веществами на одном горизонте, так и в различных слоях. По сравнению с ними производят оценку геоэкологического состояния разнотипных водных объектов. Универсальность типичных профилей проявляется также в том, что они несут одновременно графическую и цифровую информацию.

Типичные профили дают возможность конкретизировать понятие геоэкологической нормы в отношении водного объекта. В это понятие не включаем биологически пассивные воды, так как их происхождение вызвано не естественными процессами, а загрязнением в связи с техногенной нагрузкой или катаклизмами. Минимальные концентрации компонентов образуют нижнюю границу геоэкологической нормы. Используя выведенный главенствующий показатель (раздел 3.1) – содержание АТФ, координируем нормальное состояние природной экосистемы с концентрациями АТФ от 20 до 1000 нг/л.

Графические экспертные системы обладают ещё одним неоспоримым преимуществом – наглядностью. Однако при необходимости, имея в виду прогресс в компьютерной обработке информации, они могут быть оцифрованы и использованы как аналоговые модели или в ином качестве. Это особенно полезно при исследовании водной среды различными зондами и профилографами. И в цифровом варианте экспертная система сжимает многочисленную информацию до минимума, и служит как обобщенный показатель в информационной системе для решения задач в аквагеоэкологии.

3.3. Номограммы геоэкологического состояния

Оценка геоэкологического состояния экосистемы водных объектов основана на индикации происходящих в ней процессов. Максимально приближенное представление даёт углубленное изучение причинно-следственных связей комплекса взаимодействий биотической и абиотической составляющих экосистемы. Пониманию внутри системных процессов и явлений способствует теория биохимического состояния природной среды. Исходя из её постулатов, разработаны номограммы, которые служат как экспертные системы, содержащие несколько показателей.

Выбраны главенствующие биохимические показатели: содержание АТФ (первый высший уровень значимости) и активность щелочной фосфомоноэстеразы – ЩФА (второй уровень значимости). Создана 2-мерная номограмма с двумя параллельными осями АТФ и ЩФА (рис. 16 и 17). Определяющим показателем в геоэкологической оценке является АТФ, поэтому на её оси нанесены реперные точки, в которых значения АТФ устанавливают границы между различными стационарными состояниями микробного сообщества в экосистеме.

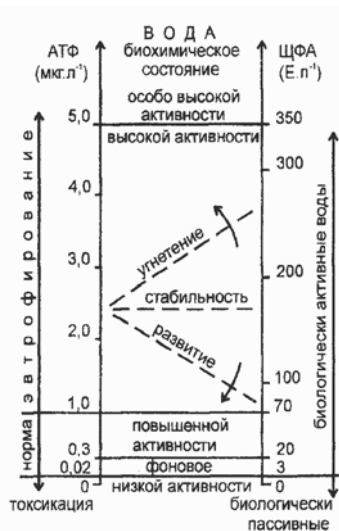


Рис. 16. Номограмма для оценки биохимического состояния водной среды.

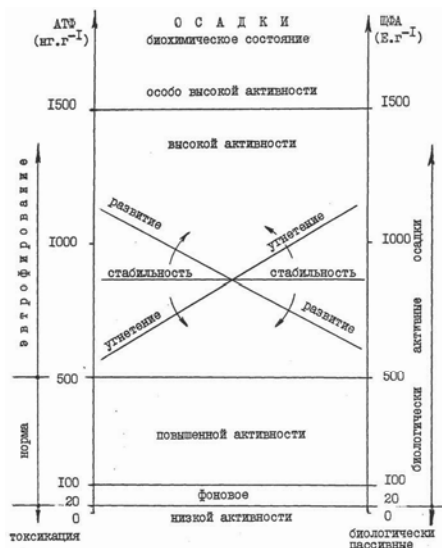


Рис. 17. Номограмма для оценки биохимического состояния современных осадков.

На основе выполненных авторами многолетних наблюдений выделены точки 20 и 1000 нг АТФ/л в воде (рис. 16) и 20 и 500 нг АТФ/г в осадках (рис. 17). Концентрации АТФ между этими точками соответствуют нормальному геоэкологическому (по биохимическим показателям) состоянию водного объекта и на номограммах обозначено словом «норма». На основе изученных природных стационарных состояний, приведенных в виде типичных профилей, определены наиболее устойчивые и часто встречающиеся соотношения показателей АТФ и ЩФА, по которым установлены значения ЩФА в соответствующих реперных точках – 3 и 70 Е/л для воды (рис. 16) и 20 и 500 Е/г для осадков (рис. 17).

Горизонтальные линии, соединяющие на шкалах два измеренных значения АТФ и ЩФА, означают стабильное состояние микробияльного сообщества и на номограммах отмечены словом «стабильность». Для таких устойчивых экосистем на номограммах выделены градации биохимического состояния водной среды. «Фоновое» состояние, сформировавшееся в результате долговременного взаимодействия естественных многофакторных процессов и характеризующееся типичным вертикальным распределением биохимических показателей, как на рисунках 14 и 15, свойственно олиготрофным водам в центральных районах океана. Оно в принципе соответствует первому классу качества вод. Но необходимо отметить, что границы фоновых значений по содержанию АТФ более точны и экологически значимы. В 1 классе качества вод верхняя граница по органическому углероду завышена, а нижняя – вообще отсутствует. Положение последней очень важно, так как нижняя граница разделяет биологически активную и биологически пассивную среду, как показано на рис. 16 и 17.

Состояние «повышенной биологической активности» возникает под влиянием естественных процессов, например, сезонных. Оно свойственно мезотрофным водам (2 класс качества вод). Биохимическое состояние «фоновое» и «повышенной биологической активности» определяется нормальным развитием экосистемы и отражает геоэкологически нормальный тип водного объекта. Биохимическое состояние «высокой биологической активности» на обеих номограммах характеризуется более высокими значениями биологически активных веществ. Формируется оно либо мощными, аномальными природными воздействиями типа апвеллинга, гидротерм, грязевых вулканов и другими, либо загрязнением веществами в основном первого типа (раздел 1.1., классификация загрязняющих веществ). В результате та-

кого влияния возникает эвтрофирование водного объекта первой стадии. Если обратиться к критериям качества вод, то к этой стадии относятся воды 3 класса – слабо эвтрофированные, расчетное содержание АТФ при этом составит 1000–1600 нг АТФ/л, 4 класса – сильно эвтрофные 1600–2430 нг АТФ/л, 5 класса – политрофные 2400–4000 нгАТФ/л (по нашим данным верхняя граница политрофных вод несколько выше расчетных и составляет 5000 нгАТФ/л, рис. 16).

Биохимическому состоянию «особо высокой биологической активности» соответствует более сильное эвтрофирование второй стадии, развивающееся в основном от антропогенного воздействия загрязняющими веществами первого типа. Оно относится к 6 классу качества вод, называемому «гипертрофный».

Биохимическое состояние «фоновое», «повышенной биологической активности», «высокой биологической активности», «особо высокой биологической активности» отражает различную биологически активную водную среду. При значениях биохимических показателей ниже фоновых, воду и осадки относим к биологически пассивным, при этом отмечается пониженная интенсивность биохимических процессов, вызванная токсикацией водной среды загрязняющими веществами второго типа.

Номограммы дают возможность определить направленность развития микробиального сообщества на момент исследования. Если линия, соединяющая два показателя, отклонится от горизонтали по часовой стрелке, то это свидетельствует о растущем микробиальном сообществе (линия «развития»). И наоборот, если линия отклоняется против часовой стрелки, то это свидетельствует о деградации и старении, и, возможно, стрессовом состоянии микробиального сообщества (линия «угнетение»). Чем больше угловое отклонение от горизонтали, тем более ярко выражена динамика этих процессов и нестабильность биохимического состояния экосистемы.

Разработанные номограммы дают количественные критерии оценки геоэкологического состояния водных объектов по биохимическим показателям, содержат принципиально новые подходы для геоэкологического нормирования.

Приведенные примеры раскрыли лишь часть возможностей, заключенных в идее применения экспертных систем в аквагеоэкологии. В примерах отражены наиболее общие закономерности, используемые при экспертизе геоэкологического состояния природных объектов. В этом плане их можно назвать «глобальными». Кроме них авторы часто

строят и так называемые «локальные» экспертные системы, отражающие специфические свойства конкретных водоемов. Они были разработаны в том или ином виде практически для всех исследованных акваторий, включая Балтийское, Черное, Охотское и другие моря, оз. Байкал и т.п. (Авилов, Авилова, 1987, 1997 и многие др. – раздел – литература).

Экспертные системы могут принимать различные формы – численные значения, линии, графики, плоскостные и объемные изображения, модели в реальном и виртуальном формате и другое. Их построение – не самоцель, а достижение эффективности и качества обобщений в аквагеоэкологии. Соответствовать целесообразности экспертные системы будут в том случае, если при их разработке исследователь руководствуется всеми указанными принципами создания информационной системы аквагеоэкологии.

4. ТЕХНОЛОГИЯ АКВАГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эта технология отличается от простого сбора всевозможных данных по наблюдаемому природному объекту. Специфика аквагеоэкологических исследований заключена в определенной последовательности выполнения работ. Она включает единый методологический подход к решению любых задач по тестированию природного объекта путем выполнения следующих разделов работ: наполнение информационной системы существенными информационными признаками; оценка геоэкологического состояния изучаемой природной экосистемы; выявление формирующих это состояние процессов и явлений; экспертное заключение о геоэкологической особенности объекта, его пригодности для практических целей; прогнозирование изменений в его состоянии и необходимость природоохранных мероприятий. Отсутствие информации по какому-нибудь из разделов снижает достоверность геоэкологической оценки и выводов, а иногда уводит исследователя за рамки аквагеоэкологии в область решения узких специальных задач.

4.1. Методика тестирования водного объекта

Тестирование направлено на формирование базы данных по объекту наблюдения и проведение геоэкологической экспертизы (Авилов,

Авилова, 1997). Мы уже говорили, что правильный выбор природного объекта является залогом успеха в изучении его свойств и качеств. Тогда правильная методика его тестирования занимает второе место по значимости в успешности исследований.

Учитывая многообразие целей изучения водных объектов, а также различия и особенности последних, устанавливаем пять основных этапов тестирования с последовательным усложнением задач и увеличением числа проб и параметров наблюдения.

1 этап – определение геоэкологического состояния на момент исследования.

2 этап – выявление отклонений от нормы.

3 этап – изучение факторов среды, влияющих на состояние водной экосистемы.

4 этап – поиск очага загрязнения.

5 этап – площадная съемка и картирование объекта.

Первый этап тестирования является обязательным, с него необходимо начинать любые геоэкологические исследования. Работы должны обеспечить получение характеристики экосистемы водного объекта и оценку её состояния. Выявляем соответствие этого состояния геоэкологической норме. Достаточно использовать минимально необходимую экспрессную экспертную систему – содержание АТФ (БАЖМ).

Второй этап тестирования следует проводить в водных объектах, где установлено отклонение от геоэкологической нормы – их эвтрофирование или токсикация. Необходимо определить величину отклонения от нормы и стабильность этих отклонений во времени, для чего проводить мониторинг – повторные определения в точках, где были зафиксированы отклонения. В качестве экспертной системы используем номограммы, а компонентный состав информационной системы расширяем, как минимум, до двух показателей – АТФ и ЩФА.

Третий этап необходим в случае загрязнения водоема. На этом этапе следует выявить вещество или группу веществ, вызвавших экологическое нарушение. Последовательно расширяем круг изучаемых веществ в загрязненных пробах. Задача эта многотрудная, так как состав информационной системы увеличивается по числу измеряемых компонентов вплоть до нахождения загрязняющего вещества.

Четвертый этап следует проводить параллельно с третьим, поскольку ставятся те же задачи. Но снижаем трудозатраты на поиск очага загрязнения, осуществляя отбор дополнительных проб в направлении ухудшающейся экологической ситуации по существенным ин-

формационным признакам. То есть поиск загрязнителя более эффективен при оптимальном составе компонентов информационной системы, что соответствует принципу разумной достаточности.

Пятый этап требует тщательного предварительного планирования работ для обеспечения оптимального количества проб воды и донных осадков, необходимых для составления карт геоэкологического районирования всего водного объекта или отдельных его частей. Возможно предварительное составление локальной экспертной системы. Компонентный состав информационной системы ограничиваем газобиогеохимическими показателями.

Как видно требуемая емкость информационной системы различна, в чем реализован принцип разумной достаточности созданной информационной системы. Рациональное размещение точек тестирования не менее важно.

Положение точек, где производят измерение прибором или отбор образцов воды и донных осадков для определения различных компонентов, должно отвечать требованию о представительном фактическом материале. С этой целью точки тестирования (отбора проб на станциях) располагают равномерно по исследуемому водному объекту. Их не следует размещать непосредственно у границ объекта, избегая тем самым краевого эффекта.

Количество станций должно, прежде всего, определяться задачами исследования по каждому из этапов тестирования. Кроме того, оно зависит от типа самого водного объекта, от применяемых технических и плавсредств, возможностей измерительной и аналитической аппаратуры. По высказанным соображениям, а также из опыта работ, для паспортизации водоема, которая проводится на первом этапе, достаточно 3 – 5 станций. Так, даже для Байкала по трем глубоководным станциям, пройденным в южной, центральной и северной котловинах, удалось составить надежное представление о геоэкологическом состоянии основной массы его вод. На последующих этапах тестирования число станций увеличивают в основном за счет исследований на притоках и оттоках из водного объекта, поиске загрязнителя и других задач.

Отбор проб должны осуществлять в любое необходимое время в водоемах, как с открытых акваторий, так и покрытых льдом. Отбор проб обеспечивает достоверность определения газобиогеохимических показателей (существенные информационные признаки) и представительность получаемого фактического материала. Геоэкологическое состояние является обобщенной характеристикой водного объекта,

Поэтому более представительными следует считать интегральные пробы воды и осадков. Отбор проб недопустим в сильно взмученной воде, например, на реках сразу после ледохода или на мелководье после шторма, так как при этом наблюдается повышение концентрации газобиогеохимических показателей в воде.

На каждой станции следует отбирать:

- а – пробы воды
 - из поверхностного слоя с горизонта 0–1 м;
 - из фотического слоя с горизонта 0–50 м;
 - в промежуточных водах по слоям мощностью 50–200 м на различных глубинах;
 - из придонного слоя в 1–1,5 м от дна;
- б – пробы осадков
 - из верхнего слоя в интервале 0–5 см;
 - из глубоких слоев до 5 образцов на 1 м.

Общее количество проб на станции должно обеспечить построение вертикального распределения газобиогеохимических показателей по аналогии типичным профилям.

Отбор проб осуществляем герметичными пробоотборниками, исключающими фильтрацию пробы и стрессовые нагрузки на микроорганизмы в ней. Для этих целей используем разработанные в ИОРАН компенсационные пробоотборники, обеспечивающие сохранность нативных свойств пробы. К ним принадлежат надежные, хорошо зарекомендовавшие себя на практике герметичная грунтовая трубка ГТ-ОК, интегрирующий БИН-ОК и придонный БПД-ПК батометры, работающие как по отдельности, так и в единой системе (раздел 2.5). Система предназначена для отбора проб в придонном слое при любых глубинах. Для получения интегральных проб воды по вертикали необходимо использовать батометры БИН или погружной модуль опико-электронного прибора.

При отборе проб воды и донных осадков на станции последовательно выполняют следующее:

- подготовка пробоотборников к спускам (проверка их работоспособности, очистка и стерилизация внутренней полости);
- спуск-подъем батометра БИН на заданную глубину на тросе;
- спуск системы пробоотборников на тросе до дна и подъем на борт судна;
- визуальный контроль отобранных проб и передача их на анализ (для биохимических определений воду сливаем из батометров через

фильтр «газ» размером пор 200 мкм в посуду из темного стекла, грунт извлекаем из трубки на лотки и разрезаем вдоль, из середины стерильным шпателем отбираем образцы осадков по заданным интервалам и помещаем в стерильную емкость; отбор газовых компонентов проводим по специальной методике – раздел 2.4);

– чистка и высушивание пробоотборников.

Пробы воды и донных осадков, отобранные в заданных точках водного объекта и доставленные на борт плавсредств, немедленно обрабатывают и анализируют для получения информации о содержании газобиогеохимических показателей – существенных информационных признаков, и заносят в базу данных по тестируемому объекту. Методы отбора и обработки проб, их последующего анализа должны удовлетворять требованиям получения достоверной газобиогеохимической информации (глава 2).

По результатам тестирования водного объекта получаем массив данных о концентрации и распределении газобиогеохимических показателей, который требует специального дальнейшего обобщения и анализа по канонам информационной системы. Это необходимо для установления причинно-следственных связей при изучении явлений и процессов, происходящих в водном объекте.

4.2. Пространственно-временное распределение показателей

Актуальной задачей аквагеоэкологических исследований является выявление пространственно-временной неоднородности поля концентраций газобиогеохимических показателей в пределах изучаемой экосистемы. Методы и объем работ соответствуют пятому этапу тестирования водного объекта и предполагают определение одновременно комплекса показателей – существенных признаков геоэкологического состояния как биотической, так и абиотической составляющих экосистемы. В информационную систему вводим до семи показателей биологически активных веществ биохимического ряда (1–4 уровней значимости) и до девяти компонентов газового состава (7 уровень значимости, Авилов, Авилова 2008; Авилова, Авилов, 1997 и др.). Параллельно решаем вопросы 1–4 этапов тестирования. Анализ и обобщение фактического материала идет по следующим направлениям:

– определение фоновых содержаний главенствующих показателей и оценка геоэкологического состояния;

– выявление аномалий, картирование объекта;

- поиск источника поступления веществ, их отбор и анализ;
- обобщение данных с целью установления генезиса аномальных проявлений.

По каждому направлению разрабатываем адаптированные к аквагеоэкологии методы анализа и обобщения данных. Все вместе эти направления представляют заключительный элемент информационной системы (раздел 1.3). Для изучения различных экосистем с конкретной задачей возможно ограничение объема работ, используя то или иное направление исследований.

Понятие фоновое содержание какого-либо компонента проистекает из смысла корневого слова «фон» и охватывает множество часто встречаемых величин, преобладающих в пространстве экосистемы. Так были построены типичные профили (рис. 14 и 15) по входящим в их поле концентрациям компонентов биохимического ряда. Характер вертикального распределения и концентрации компонентов в типичных профилях названы фоновыми, поскольку они свойственны чистым, пока наиболее распространенным водам глобальной экосистемы океана. За этим подходом стоят глубокие взаимодействия. Многофакторные процессы определяют и поддерживают фоновое геоэкологическое состояние воды и осадков. Фоновые содержания компонентов колеблются в незначительных пределах в зависимости от множества периодических и непериодических причин – характеристик морской среды, скорости течений, диффузии, колебаний температуры, солёности и т.п. То есть распределение и концентрация компонентов внутри фонового диапазона относим к случайным величинам, поэтому к массиву фоновых данных применимы методы анализа случайных величин. Статистические закономерности справедливы только для ансамблей явлений, но не для одного, конкретного явления.

Случайные величины при многофакторном воздействии подчиняются нормальному закону распределения. По известным формулам для выборки из n измерений вычисляют среднее содержание компонента, среднюю квадратичную погрешность, квадратичное отклонение, вариационный коэффициент и другое. Статистические характеристики с высокой долей вероятности (достаточной для практических целей при $n \geq 35$) обрисовывают поле фоновых содержаний компонента. Специфика объектов аквагеоэкологических исследований накладывает ограничения на применимость методов статистической обработки данных (Авилов, 1985).

Необходимо делать выборку с учетом геоэкологических особенно-

стей природного объекта. Нельзя закладывать все полученные данные по воде в одну выборку, то же касается осадков. Следует объединять данные только из экологически однородных областей или частей экосистемы. Сделать корректную выборку – относим к той же категории успеха, как и правильный выбор объекта наблюдения (раздел 2.1). Правомерность выборки естественных показателей проверяем по критерию согласия (Пирсона). Работа сложная и кропотливая, но результат стоит того.

Фоновые величины газообразных компонентов изучали в различных акваториях. Использовали результаты измерения содержаний азота, аргона, кислорода, двуокиси углерода, гелия, водорода, углеводородных газов от C_1 до C_3 включительно, выполненных в пробах воды из герметичных пробоотборников, в образцах донных осадков из грунтовых трубок и кернов глубоководного бурения. Выборки делали раздельно для фотического и придонного слоев водной толщи, а также в осадках раздельно по интервалам 0–2 м и 2–4 м. Для всех газовых компонентов установлены диапазоны фоновых значений (Авилов, 1985). Наиболее детально изучено распределение углеводородных газов. Для них выборки дробили по региональным экосистемам, приуроченным к крупным морфоструктурным элементам дна акваторий. Также изучали частоту встречаемости различных концентраций УВГ по двум выборкам: регионы Мирового океана с осадочным чехлом менее 1 км и более 1 км.

Анализ данных по всем выборкам привел к хорошо сопоставимым результатам. Наиболее часто встречались (максимальные значения по сводной диаграмме) из общего числа измерений n (около 500 проб) содержания метана (2–4) 10^{-4} мл/л в придонной воде, (64–128) 10^{-4} мл/кг в верхнем слое осадка и (32–64) 10^{-4} %об в кернах. По параметрам нормального распределения (средняя величина, квадратичное отклонение) отбита верхняя граница поля фоновых содержаний метана в придонной воде (8–16) 10^{-4} мл/л и (250–500) 10^{-4} мл/кг – в верхнем слое осадка. Более высокие концентрации метана считаем аномальными, также и для других компонентов.

Такое разделение фоновых и аномальных значений на количественном уровне несет важную геоэкологическую информацию. Существенные информационные показатели, найденные в аномально высоких или низких количествах в экосистеме служат индикаторами воздействия на неё отдельного доминантного фактора – природного явления. Чем ярче выражена аномалия, тем сильнее и масштабнее внеш-

нее воздействие. Комплекс измеренных газобиогеохимических показателей (существенных информационных признаков) открывает путь к идентификации аномальных явлений, установлению причинно-следственных связей процессов, происходящих в самой экосистеме и пограничных областях. Здесь в качестве достоверной информации выступают только количественные измерения.

Обобщение данных по другим, названным выше направлениям, также требует использования всех элементов информационной системы (раздел 1.3), в чем проявляется её функция в виде механизма реализации целей и задач аквагеоэкологии. Геоэкологическое состояние водного объекта вначале оцениваем по результатам биохимических определений на станциях, используя номограммы в качестве экспертной системы (рис. 16, 17). По каждой пробе воды и осадков полученные значения биохимических показателей следует нанести на соответствующие шкалы номограммы и соединить линией, а затем сопоставить с градациями в номограммах и определить категории биохимического состояния (нормальное, эвтрофирование или токсикация) и динамические характеристики (стабильность, развитие или угнетение).

Кроме того содержания биохимических показателей должны быть сведены в таблицу. Они являются паспортными данными водного объекта. Если результаты оценок по всем образцам воды и осадков сходны, то состояние водного объекта относим к соответствующей категории по номограммам. При большом разбросе данных необходимо выделить аномальные зоны с различным биохимическим состоянием, служащим экспертной системой для оценки геоэкологического состояния объекта. В аномальных зонах добавляем в паспортные данные характеристики абиотической составляющей экосистемы. Затем следует перейти к следующему этапу – устанавливаем причины аномального биохимического состояния. Данные по биотической и абиотической составляющей, а также выявленные причинно-следственные связи их взаимодействия, в совокупности определяют геоэкологическое состояние водного объекта. Отнесение водного объекта или его частей к той или иной категории геоэкологического состояния на количественной базе составляет основу экологического нормирования. При регистрации загрязнения или аномального природного явления необходимо провести мониторинг и выявить возможность включения данного природного объекта в систему природопользования. При отрицательном заключении следует дать рекомендации по восстановительным мероприятиям.

Как видно, одним из самых ответственных моментов обобщения геоэкологической информации является оценка геоэкологического состояния экосистемы и объяснение выявленных отклонений от нормы. Приводим примеры оценки геоэкологического состояния отдельных акваторий с использованием экспертных систем – разработанных нами номограмм (Авилова, Авилов, 1990 и др.).

По двум биохимическим показателям АТФ и ЩФА с помощью номограмм определяем биохимическое состояние водной среды на станции, а по серии станций оцениваем геоэкологическую обстановку всей акватории в целом или отдельного района. Номограммы дают возможность определить биохимическое состояние водной среды в каждой исследуемой точке водоема.

Заключение об геоэкологическом состоянии всего водоема или его значительной части составляем по результатам анализа биохимических состояний во всех точках опробования. При этом учитываем как непосредственно количественные показатели по АТФ и ЩФА, так и распределение их во времени и пространстве. Геоэкологически нормальные акватории характеризуются стабильными процессами, формирующими содержание и активность обоих показателей во всех точках водоема в пределах нормы (далее приведены примеры в этом разделе).

Усредненные значения были нанесены на номограммы и получены линии состояния для различных регионов. Некоторые результаты приведены на рис. 18 и 19. «Фоновое» биохимическое состояние (геоэкологическая норма) установлено для всей водной массы центральной части Индийского океана. Геоэкологический мониторинг в Балтийском море показал достаточно устойчивое геоэкологическое состояние в отдельных регионах. Эвтрофирование первой степени прослеживали в прибрежных водах от Нида до Лиепая. Причем степень эвтрофирования увеличивалась по направлению к берегу, где геоэкологическое состояние вод на глубинах 5–6 м на расстоянии 2 мили соответствовало высокой активности. Эвтрофирование второй степени найдено в водах Куршского залива у острова Свиной. Аналогичное состояние отмечено в поверхностных водах акватории, прилегающей к устью Куршского залива и порту Клайпеда. Экологически чистые воды установлены юго-западнее о. Саарема, отнесенные к «геоэкологической норме». На Байкале отмечены признаки эвтрофирования водной среды 1 стадии.

Фоновое биохимическое состояние донных осадков обнаружено в центральной части Балтийского моря (в заповедной зоне около острова Саарема). К биохимическому состоянию особо высокой активности

(эвтрофирование 2 степени) отнесены донные осадки в районе газовых кратеров Балтийского моря и в районе Перуанского апвеллинга. Эвтрофирование 1 степени современных осадков наблюдали в глубоководной части Черного моря, что обусловлено процессами в редокс-зоне. Донные осадки вблизи порта Клайпеда найдены биологически пассивными из-за техногенного загрязнения.

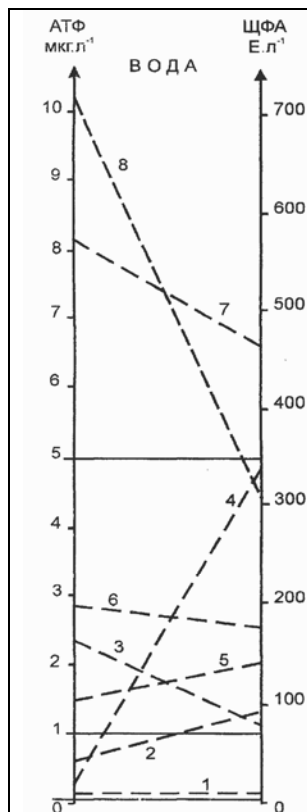


Рис. 18. Номограмма биохимического состояния вод акваторий: - - - - - линия состояния, 1 - центральная часть Индийского океана, 2 - 4 - Перуанский апвеллинг вне пятна «цветения» (2), в пятне (3), в разрушающемся пятне (4), 5 - 6 - прибрежная зона Балтийского моря, 7 - Куршский залив, 8 - район порта Клайпеда.

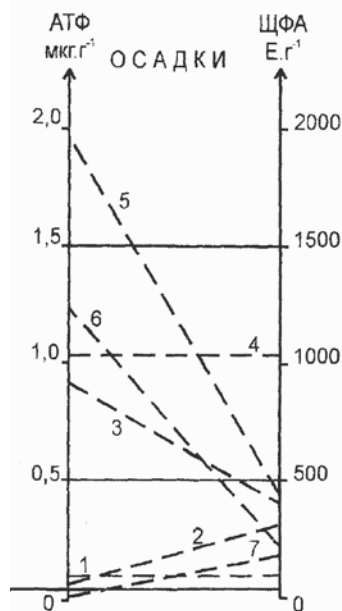


Рис. 19. Номограмма биохимического состояния осадков в акваториях: - - - - - линия состояния, 1 - 2 - Открытые районы Балтийского моря, 3 - 4 - газовые кратеры Балтийского моря, 5 - Перуанский апвеллинг, 6 - переходная зона Черного моря, 7 - район порта Клайпеда.

Методология позволяет идентифицировать атипичное биохимическое состояние, вызванное естественными процессами, от антропогенных воздействий. Природные влияния, такие как апвеллинг, газовые кратеры, подводные гидротермы и другие, отличаются достаточной стабильностью во времени или, по крайней мере, определенной цикличностью (например, выявленная авторами цикличность в районе Перуанского апвеллинга), а также локальным эвтрофированием вод и осадков. Загрязняющие вещества вызывают непереносимое изменение биохимического состояния водной среды. Загрязняющее действие веществ первого типа (раздел 1.1), участвующих в естественных циклах круговорота веществ в природе, проявляется в поступлении их в водный объект в неестественно больших количествах, что приводит к эвтрофированию водной среды. Отрицательное действие увеличивается в большей степени по мере приближения к источнику загрязнения (при достаточной емкости водоема таким способом возможен поиск источника загрязнения). В первые две недели, в зависимости от водной массы объекта, эвтрофирование будет обусловлено вспышкой развития всего имеющегося здесь микробного сообщества (высокой концентрацией биомассы активных живых микроорганизмов по АТФ, высокой ферментной активностью и низкой концентрацией мочевины) при этом сохранится даже соотношение биологически активных веществ по слоям. Биохимическое состояние водной среды достигнет особо высокой активности, но оно не будет стабильным (рис. 18 и 19).

Сигналом к загниванию сообщества является падение активности щелочной фосфоэстеразы как ответ на субстрат (накопленные продукты метаболизма в водном объекте) и как следствие – нарушение типичного соотношения биологически активных веществ. Это предкризисная ситуация. Вслед за падением активности ЩФ уменьшается концентрация АТФ, что указывает на биохимическое истощение сообщества, изменение его разнообразия и энергетического потенциала. Усугубится нарушение соотношения БАВ в водных слоях и отдельном слое вод (то же относится к осадкам) Это признаки загнивания водного объекта. Пагубное воздействие этих процессов выражается в «цветении» воды, образовании слизи (разрушенные клетки и др.), оказывающих отрицательное влияние на всю биоту, в том числе на человека в рекреационной зоне. В зависимости от экологической емкости водного объекта, индекса самоочищения кризисное воздействие поправимо в те или иные сроки, максимум до трех недель с условием прекращения поступления загрязняющих веществ.

Загрязняющие вещества второго типа вызывают стрессовые явления, которые отличаются от естественных шоковых действий тем, что ухудшение биохимического состояния природной среды проявляется в снижении концентрации АТФ, БАЖМ не в узком слое (как наблюдали авторы в Аравийском, Балтийском морях и Байкале), а в интегральной пробе водной толщи. Кроме того, загрязняющие вещества второго типа вызывают стрессовые явления наибольшей продолжительности.

Примеры получения линий по конкретным данным приведены на рис. 18 и 19. В северо-западной части Индийского океана на станции № 1913 в воде на горизонте 50 м содержание АТФ составило 0,22 мкг/л и активность ЩФ – 16,9 Е/л (Авилова, Авилов, 1990; 1997 и др.). По этим данным на номограмме получена линия 1 (рис. 18), показывающая «фоновое» биохимическое состояние, которое по номограмме определяется как «геоэкологическая норма», а горизонтальное положение линии 1 указывает на стабильное состояние микробиального сообщества. Аналогичное биохимическое состояние получено на станции № 1935, где для слоя 5–50 м среднее содержание АТФ составило 0,07 мкг/л и активность ЩФ – 6 Е/л. «Фоновое» биохимическое состояние установлено для всей водной массы центральной части Индийского океана и подтверждено не только этими двумя биохимическими показателями – АТФ и ЩФА, но и определениями комплекса биологически активных веществ (более 20 – витамины: кобаламины, биотин, тиамин; ферменты четырех групп, белок, азот карбамида и др.) практически всех уровней значимости (Миркина (Авилова), 1977а; 1979; Авилова, Авилов, 1990; 1997; Авилов, Авилова, 1986; 2008; 2009; Авилова, 1982; 1982а; 1983; 1984а; 1986; 1990 и др.).

В районе Перуанского апвеллинга в юго-восточной части Тихого океана выполнены работы по нескольким широтным разрезам (Миркина (Авилова), 1982). На станции № 1653 111-го разреза на горизонтах 0 и 18 м установленные величины биохимических показателей нанесены на номограмму в виде линии 2 (рис. 18). Ее положение определило нормальное экологическое состояние на исследованных горизонтах, что хорошо согласуется с обычным состоянием вод вне пятна интенсивного подъема холодных вод. Линия 3 нанесена по данным, полученным для вод с горизонта 40 м на станции № 1647 11-го разреза, и она указывает на эвтрофирование вод внутри пятна «цветения», пятна апвеллинга (рис. 18), вызванного бурным развитием микробиального сообщества.

Линия 4 отвечает биохимическому состоянию разрушающегося

сообщества на заключительной стадии расплывания пятна, когда доля живого вещества уменьшается, а преобладают погибшие клетки – детрит (рис. 18). Высокая динамика процесса (значительный угол отклонения линии 4 от горизонтали) затрудняет оценку геоэкологического состояния (в таком случае необходим мониторинг). Оно может остаться в норме, как показано на рисунке, или при дальнейшем продолжении процесса перейти в область токсикации в результате угнетения микробного сообщества продуктами метаболизма. Токсикация вероятнее, во всяком случае, в более глубоких слоях 50–150 м, где апвеллинг уже прошел, здесь концентрация АТФ понизилась до 4–10 нг/л, констатирующая слабую биохимическую активность этих вод Перуанского апвеллинга. Номограмма биохимического состояния водных масс в апвеллинге показала высокую динамику развития микробного сообщества от зарождения (геоэкологической нормы) до «цветения» (эвтрофирования I стадии) и гибели (токсикации) и ожидаемую цикличность в несколько недель. Этим подтверждается необходимость проведения повторных исследований в водоеме (II этап тестирования) через 2–3 недели. Биохимическая оценка по номограмме хорошо совпадает с геоэкологическим состоянием вод, установленным ранее и подтвержденным анализом данных о распределении комплекса биологически активных веществ – вне- и внутриклеточной ферментной активности, концентрации витаминов, мочевины, общего белка, углеводов, фосфора и других (Миркина (Авилова), 1977а; 1979; 1982; Авилова, 1982; 1982а; 1983; 1984; 1984а; 1986; Авилова, Авилов, 1990; Авилов, Авилова, 2008; 2009; Геодекян, Авилов, Авилова, 1986; 1986а; 1988 и многие другие. Раздел – литература).

Геоэкологический мониторинг в Балтийское море (Авилова, 1984; Геодекян, Авилов, Авилова и др., 1988; Геодекян, Авилов, Авилова, 1990 и др.) дал возможность проследить достаточно устойчивое экологическое состояние вод в отдельных районах. Наблюдения проводили в 1982 г. (после аварийного разлива мазута в порту Клайпеда), 1986 и 1988 гг. Эвтрофирование прослеживали в прибрежных водах (15–20-мильной зоне) от Ниды до Лиепая – линия 5 (рис. 18). Причем степень эвтрофирования увеличивалась по направлению к берегу, где состояние вод при глубинах 5–6 м на расстоянии около 2 миль от берега соответствовало линии 6 (рис. 18). Экологически чистые воды отмечены (как указывалось) юго-западнее о. Саарема в Балтийском море с концентрацией АТФ 150–700 (в среднем 450) нг/л, соответствующей экологической норме. Эвтрофирование II стадии установлено

в водах Куршского залива у о. Свиной, недалеко от порта Клайпеды – линия 7. Наибольшее эвтрофирование этих вод наблюдали в 1986 г, когда содержание АТФ достигло 20–22 мкг/л. В поверхностных водах акватории, прилегающей к устью Куршского залива, и в порту Клайпеды также отмечено эвтрофирование II стадии – линия 8 (рис. 18). Причем большой угол отклонения линии 8 от горизонтали указывает на нестабильность процесса – наблюдается интенсивное развитие микробиального сообщества. Такая неустойчивость характерна для взаимодействия пресных вод Куршского залива с солеными морскими водами. Именно из этого района полученные данные по биологически активным веществам использованы для построения линии 8 (рис. 18). При небольших глубинах до 10 м отмечена неоднородность их концентраций по вертикали: в придонном слое содержание АТФ изменялось от 1 до 4,2 мкг/л (до 5,5 мкг/л в 1986 г), а в интегральной пробе разброс не столь велик – в 1986 и 1988 гг. он составил 2,5–3,6 и 2,2–2,7 мкг/л соответственно.

Для осадков подобные построения показаны на рис. 19. Линия 1 и 2 проведены по данным биологически активных веществ, полученным в осадках в интервале отбора проб 0–60 см на станциях №№ 4967 и 4969 в Балтийском море (Геодекян, Авилов, Авилова и др. 1988). Такое положение линий характерно для «фоновое» биохимического состояния осадков, которое наблюдали в большинстве точек опробования по различным районам данной акватории, а также в Баренцевом и Карском морях (Геодекян, Авилов, Авилова, 1986). То же «фоновое» биохимическое состояние осадков отмечалось нами и в заповедной зоне около о. Саарема. «Фоновое» биохимическое состояние относится к геоэкологической норме. Аномально высокие содержания АТФ и ЩФА обнаружены в осадках газовых кратеров Балтийского моря. Линии 3 и 4 показали состояние высокой биологической активности осадков, взятых в центре такого кратера на станции № 4972 в интервалах отбора проб 20–27 и 70–72 см (рис. 19). Вертикальное распределение БАВ в осадках кратеров является аномальным. Наблюдали в отличие от типичного распределения понижение содержания и активности БАВ в поверхностных горизонтах осадков и повышение концентраций – до 0,3–0,4 мкг АТФ/г и 2000–3000 Е ЩФА/г – с глубин 1,6 м.

Возрастание концентрации АТФ до 2,3 мкг/г зафиксировано на глубине опробования 3–4 м на станции № 1950 в северо-западной части Индийского океана. Эти осадки отнесены к биохимическому состоянию «особо высокой активности». Аналогичное состояние явля-

ется доминирующим в верхнем 0–5-см слое осадков в районе Перуанского апвеллинга по измерениям на станции № 1632 (рис. 19, линия 5). На отдельных станциях содержание АТФ было еще выше и достигало 9 (станции №№ 1635, 1650), 12 (станция № 1638) и 19 мкг/г (станция № 1653). «Высокая биохимическая активность» осадков Черного моря маркировалась на горизонте грунтовой колонки 70 – 80 см в глубоководной части Черного моря на станциях № 25–31 (1,07 мкг/г АТФ), на горизонте 17–20 см в переходной зоне на станции № 16 (рис. 19, линия 6) и на горизонте 70–76 см в рокфоровых илах на станции № 57 (Авилов, Авилова, 1987). Биохимически пассивные осадки (биологически пассивные) в верхнем слое 0–5 см обнаружены вблизи порта Клайпеда.

Разлив мазута вблизи порта Клайпеда зимой 1981 г. вызвал угнетение микробиального сообщества, как отмечалось весной 1982 г. Однако, воды и донные осадки в районе разлива в дальнейшем восстановились до нормы. В Черном море ниже редокс-зоны биологически пассивные воды образовались в результате сероводородного заражения. В водах Аравийского моря на горизонтах 500 и 1380 м установлено биохимическое состояние низкой активности, что связано с естественными процессами, вызвавшими стресс в живых организмах из-за быстрого опускания высоко соленых вод Персидского залива. Эти воды биологически пассивны. Аналогичное состояние осадков наблюдали на горизонтах более 2–4 м, соответствующее заключительной стадии переработки захороненного органического вещества.

Оценка геоэкологического состояния водной среды (вод и осадков) дает возможность обосновать причинно-следственные связи целого ряда явлений в акваториях.

4.3. Область применения информационной системы

Разработанная информационная система предназначена для использования при проведении исследований в столь же широком спектре проблем, сколь разнообразны цели и задачи аквагеоэкологии. Преимущество информационной системы в её гибкости – состав её элементов может меняться в зависимости от сложности задач, но базовый подход остается неизменным – оперировать достоверными количественными данными в качестве существенных информационных признаков. Авторы сочли нужным акцентировать внимание на основных направлениях исследования, чтобы раскрыть возможности и особенности применения информационной системы.

Проблемы рационального природопользования находят адекватные решения при геоэкологической экспертизе состояния водных экосистем, последовательном проведении рассмотренных выше пяти этапов тестирования. Исчерпывающую информацию дают существенные информационные признаки. Памятуя о принципе разумной достаточности, усложняем применяемые экспертные системы – от однокомпонентной на первом этапе, до двух и многокомпонентной на последующих этапах тестирования. При поиске загрязняющего вещества, для его идентификации в обнаруженном очаге загрязнения привлекаем дополнительные информационные признаки.

Изучение геоэкологической обстановки в районах захоронения объектов на дне Балтийского моря выявило по номограммам аномальное состояние морской среды, используя существенные информационные признаки. В таком случае в систему вводим дополнительные информационные признаки для изучения причин высокой биологической активности водной среды и донных осадков. Сезонная изменчивость биологической активности водной среды в исследованной акватории по многолетнему мониторингу показала, что обнаруженные аномалии не связаны с захороненными объектами. Другими словами – естественное захоронение объектов не наносит экологического ущерба окружающей среде. Однако высокая биологическая активность части экосистем в придонной зоне (в грунте и воде), вызванная потоком глубинных флюидов, может в определенных условиях стать причиной геоэкологических рисков (Авилов, Авилова, Пака, 2008; Авилов, Авилова, 2007в; 2008в; Avilov, Avilova, 1989б;).

В сумме работы по всем пяти этапам тестирования дают основу для разработки программы эколого-экономического развития региона с целью обеспечения чистоты окружающей среды, сохранения здоровья населения, осуществлении рационального природопользования. Так в водах озера Байкал зафиксированы аномально высокие концентрации АТФ, БАЖМ, выходящие за пределы нормы. Причем в приповерхностных и глубинных водах установлено преобладание мелкой фракции микроорганизмов, что способствовало распространению вирусной инфекции среди нерп, вызвавший падеж и снижение численности, как стало известно, на момент наших исследований. Аномалия распространена равномерно по всей акватории и вызвана высокими техногенными нагрузками. Сделан главный вывод – для улучшения геоэкологической обстановки необходимо снизить интенсивность хозяйственной деятельности на оз. Байкал и прилегающих территориях

(Геодекян, Авилов, Авилова, 1990а, Avilov, Avilova, 1989; 1989а; 1989в).

Прямо противоположный вывод сформулирован для Черного моря. Аномально низкое биологически пассивное состояние основной массы черноморских вод сопровождается аномально высоким содержанием в них метана и сероводорода. Подключили изучение геологического строения недр по геофизическим данным, геолого-геохимических процессов в осадочной толще и объяснили возникновение и развитие аномалии наличием мощного природного источника поступления этих газов из недр Земли. Обоснован прогноз – для улучшения геоэкологического состояния экосистемы Черного моря поощряется активная хозяйственная деятельность, направленная на откачку углеводородов, сероводорода из глубин и на препятствие обратному процессу. Поэтому следует обеспечить безопасность газовых трубопроводов по дну акваторий и ограничить сброс бытовых отходов в глубоководную часть Черного моря (Авилов, Авилова, 2001а; 2002а; 2007б и др.).

Для проведения геоэкологического контроля используем периодическое тестирование водного объекта. Такой мониторинг наиболее эффективен, если применять не только общие, но и специальные экспертные системы, зафиксировав в них исходное состояние объекта. В качестве примера приводим графическую экспертную систему для мониторинга геоэкологического состояния Мирового океана, разработанную авторами в середине 80-х годов прошлого века (Геодекян, Авилов, Авилова, 1993) и представленную в виде карты на рис. 20.

Картирование водных объектов выполняем на заключительном, пятом этапе работ. С учетом степени биологической активности водной среды и связанной с ней биологической продуктивности эвфотической зоны выделены (рис. 20) районы фоновые (1), повышенной активности (2) и высокой активности (3). В карте отражено исходное геоэкологическое состояние Мирового океана, имеющее большую ценность в качестве экспертной системы при последующем мониторинге океанической среды. В океанических экспедициях в Тихий и Атлантический океаны 1994, 1995 гг. исследованиями водной среды уточнили границы акваторий с повышенной и высокой биологической активностью, примыкающих к побережью Эквадора и стран Центральной Америки, которые стали более узкой полосой, чем в исходном положении.

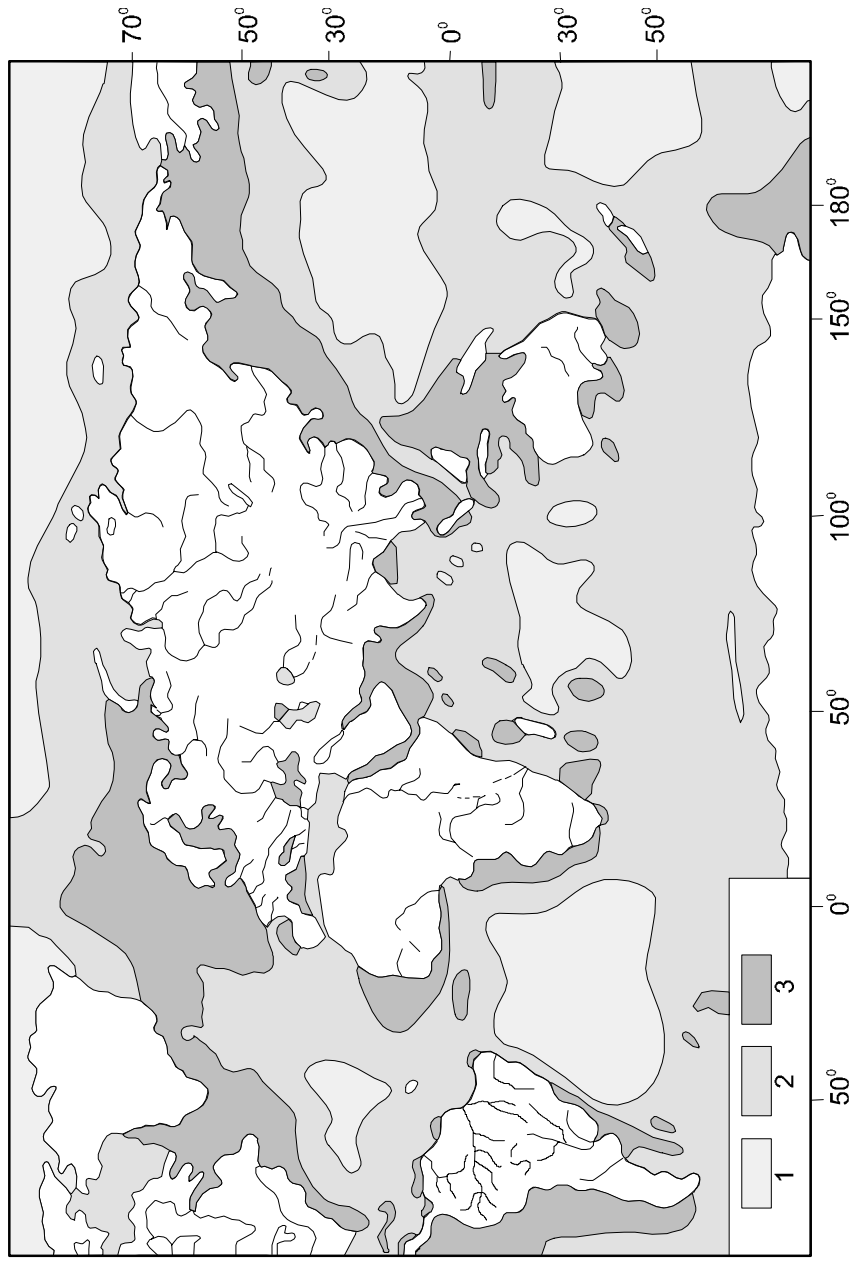


Рис. 20. Геоэкологическое районирование Мирового океана.

Газобиогеохимические показатели адекватно отражают все заметные явления в океане. Пространственно-временная изменчивость поля концентраций в экваториальной зоне Тихого океана вблизи Американского континента является надежным диагностическим признаком приближения экологически кризисного, печально известного явления Эль-Ниньо. Отмечено изменение границ геоэкологического районирования Средней Атлантики, когда биологически активные воды оттеснили фоновые на юг, на 10–15° с.ш. (Геодекян, Авилов, Авилова, 1997; Авилов, Авилова, 1990; 1999а; 2000; 2002; 2003а и др.).

Карта служит также практическим целям. Она необходима при оценке последствий аварийных загрязнений (разливов нефти и другое), для принятия решения о применении химических средств борьбы с загрязнением (в районе 3 наиболее нежелательно), планирования мероприятий по природопользованию и охране природы в масштабах Земли (Авилов, Авилова, 1990; Avilov, Avilova, et al, 1999). Мониторинг также следует включать при управлении естественными и производственными процессами, например, для оценки эффективности природоохранных мероприятий на загрязненных водоёмах, для участия в непрерывных технологических процессах, где применяются биологические способы производства, в частности, при очистке сточных вод. Методы и подходы информационной системы аквагеоэкологии продемонстрировали высокую пригодность в решении проблем рационального природопользования.

В области геоэкологии океана (рис. 1) наиболее актуальна проблема пограничных зон. Именно здесь чаще всего встречаются аномалии, где развиваются основные события. В большинстве случаев достаточную информацию поставляет комплекс газобиогеохимических показателей. С их помощью обнаруживаем область аномального геоэкологического состояния. Показатели комплекса вполне самодостаточны для установления главных причинно-следственных связей взаимодействия биотической и абиотической составляющих экосистемы. Однако, на отдельных этапах экосистемного анализа для поиска причин, формирующих аномалию, иногда требуется пополнение информационной системы сведениями из биогеохимии, геологии океана и других необходимых научных дисциплин.

В Красном море по данным гидрогеологии, гидрохимии и морфоструктурным особенностям строения дна выделены термальные рассолы впадины Атлантис 2 в качестве природного объекта для аквагеоэкологических исследований. Постановка такой задачи казалась дос-

таточно спорной, поскольку предшествующими исследованиями иностранных ученых эти термальные рассолы названы безжизненными, не была найдена биотическая составляющая, то есть считали, что в них отсутствует экосистема как таковая. Но настойчивость авторов была вознаграждена. Удалось убедить выполнить несколько спусков герметичных компенсационных пробоотборников БПД и БВ в одной точке (на станции) и тем самым отобрать достоверные параллельные пробы из термальных рассолов с глубины более 2 км. Таким образом обеспечены полные параллели биохимических определений, что составляет доказательную базу экологической однозначности этих результатов, которые оказались чрезвычайно неожиданными и более того – аномальными по газобиогеохимическим показателям. Их нельзя назвать случайными. Положительные свойства компенсационных пробоотборников минимизировали погрешность сп, поэтому погрешность метода в целом см осталась практически на уровне погрешности анализа са. Концентрации АТФ в параллельных пробах различались менее чем на 10%, то есть в пределах погрешности са. Авторы остановились подробно на первых шагах технологической цепочки газобиогеохимических исследований, чтобы показать как на практике реализуется принцип достоверности формируемой базы данных информационной системы аквагеоэкологии.

При изучении термальных рассолов Красного моря принцип достоверности данных оказался, как нельзя, кстати, и сыграл положительную роль. Полученные авторами данные шли вразрез с господствовавшими представлениями о безжизненности этих вод. Используя герметичные, компенсационные пробоотборники и современные, высокоспецифичные методы анализа, авторы были уверены в своих результатах. Анализ распределения газобиогеохимических показателей по различным слоям водной толщи доказал, что экосистема в термальных рассолах существует. Состояние её биохимической активности аномально высокое по сравнению с вышележащими промежуточными водами Красного моря. Также необычной найдена абиотическая составляющая этой экосистемы – в отсутствии кислорода зафиксированы аномально высокие концентрации водорода, двуокиси углерода, гелия, углеводородных газов. На следующем этапе экосистемного анализа – поиске причин возникновения аномалии, по существенным информационным признакам (газобиогеохимическим показателям) выявили доминантное природное явление, формирующее эту аномалию. В экосистеме термальных рассолов развито сообщество микро-

организмов с хемолитоавтотрофным типом обмена веществ, которые способны использовать неорганические доноры электронов (прежде всего водород) и получать почти весь углерод путем фиксации CO_2 , при этом образовывать метан. Таким образом установлено неизвестное ранее «Явление существования сообщества морских организмов в глубинных подводных гидротермах» (диплом открытия № 56 с приоритетом от 1976 года). Использование элементов, подходов и методов, заложенных в информационную систему, привело к открытию, что само по себе очень важно, но одновременно подтвердило эффективность экосистемного подхода аквагеоэкологии, когда традиционные методы бессильны.

При изучении Перуанского апвеллинга решающей была экспертиза геоэкологического состояния водной среды по биохимическим показателям – в данном случае только части существенных признаков. Тем не менее, двухмерная экспертная система (номограммы) была достаточной для выявления локальных аномалий (пятен) в водной толще и тенденций развития биохимического состояния внутри них. Обнаружена высокая интенсивность встречных процессов угнетения и развития микробияльного сообщества аномалии, установлена цикличность процессов в экосистеме с периодом 3–4 недели (Авилова, 1982а). Наши измерения параметров среды, включенные в информационную систему как дополнительные признаки, способствовали интерпретации результатов биохимических определений, повысили надежность выводов. Связь процессов в аномалиях апвеллинга с планетарными явлениями нашла объяснения на основе широкого обобщения собственных данных с гидрологической и метеорологической информацией (Авилов, Авилова, 2003а).

Вопрос о продукционных возможностях оз. Байкал имеет, как уже упоминали выше, заметную геоэкологическую окраску. В исследовании по этой проблеме высокую информативность продемонстрировали биохимические показатели – содержание АТФ, величина БАЖМ. В фотическом слое (0–200 м) найдена высокая вертикальная стратификация этих вод по АТФ (100–10000 нг/л) на всей акватории. В такой ситуации можно было ожидать пятнистость в распределении БАЖМ по площади. Коррективы внесли измерения, выполненные в интегральных пробах по фотическому слою из батометра БИН. В осредненных пробах зафиксирована удивительная однородность содержания АТФ 1290 ± 30 нг/л по всей акватории озера. Установленная картина количественно характеризует максимальную величину продук-

ционных возможностей эвфотической зоны в период «цветения» (Avilov, Avilova, 1989a; 1989b; Геодекян, Авиллов, Авилова, 1990a). Наши исследования объяснили причину редко встречающейся одноцветной карты озера, полученной иностранными учеными при зондировании его вод из космоса.

В геоэкологии океана (рис. 1) не менее значимы глобальные аспекты процессов и явлений в единой экосистеме Мирового океана. На первый взгляд проблемы неисчерпаемы, но они могут быть познаны с максимальным приближением к истине подходами и методами информационной системы аквагеоэкологии. Экосистемный подход относим к тому звену, за которое вытаскивается вся цепь. Наибольшие трудности вызывает столкновение с непонятным природным явлением. Часто выделенных существенных признаков бывает не вполне достаточно для его идентификации. В таком случае постулаты, принципиальные положения информационной системы задают верное направление поиска, подсказывают, из какой области знаний следует черпать дополнительную информацию.

Проблема образования органического вещества в океане постоянно находилась в центре внимания океанологов. По мере вовлечения в её орбиту ученых разных специальностей число привлеченных информационных признаков перманентно возрастало, но актуальность углубленного познания процесса не исчезает и по сей день. Наши исследования в этой области полностью соответствовали разработанной технологии. В морских экспедициях, в соответствии с 5 этапом тестирования, измеряли комплекс газобиогеохимических показателей в океанической среде, впервые в 22 рейсе НИС «Академик Курчатов» (1976 г.) по акватории северо-западной части Индийского океана (Отчет, 1976). Сформирована база достоверных данных, характеризующая обе составляющие экосистемы в фотическом и придонном слоях, ядре вод и донных отложениях океана. Среди фоновых значений по существенным информационным признакам выявлены локальные аномалии в экосистемах. В частности, в ядре вод на отдельных горизонтах найдены аномально высокие содержания АТФ (БАЖМ), атипичные виды их вертикального распределения, то же – по активности четырёх групп гидролитических ферментов. Экосистемный анализ необычной активности биоты ориентировал на углубленное изучение обменных процессов в экосистеме. Из комплекса наших измерений были выбраны в качестве дополнительных сведения по распределению концентраций взвешенного Сорг, белка, общего фосфора, азота

карбамида одновременно определенных в тех же пробах, использовано соотношение БАЖМ к Сорг.

Анализ существенных и дополнительных информационных признаков привел к выводу об образовании активного живого вещества в промежуточных и глубинных водах океана. Тем самым обнаружено неизвестное ранее явление, которое не находится в прямой зависимости от фотосинтетических процессов на дневной поверхности океана. Образование собственного ОВ в этих водах связано с жизнедеятельностью сообщества микроорганизмов преимущественно с хемолитоавтотрофным типом обмена веществ и обусловлено потоками вещества и энергии при дегазации Земли или на структурных внутренних неоднородностях водных масс. Позднее это было зарегистрировано как открытие – «Явление образования взвешенного органического вещества в промежуточных и глубинных водах Мирового океана» с приоритетом от 1976 г. (Диплом открытия № 92). Наши открытия несколькими годами позже подтверждены иностранными учеными (Авилов, Авилова, 2008).

Проблемы литоаквэкологии (рис. 1) находят решение наиболее эффективным образом методами и подходами информационной системы аквагеоэкологии. Биотическая составляющая природных экосистем литосферы, включая донные отложения и осадочную толщу, чаще всего связана с явлением хемолитоавтотрофии, активная роль которого установлена авторами при исследованиях в области геохимии газов, нефтегазовой геологии, дегазации Земли (Авилов, Авилова, 1986; 1987; 1991; 1999а; 2001а; 2002; 2003; 2003б; 2006; 2007 2007г; 2008; 2008а; 2008г; 2009 и многие др.).

Явление хемолитоавтотрофии авторы изучали во многих природных объектах литосферы. Выявление хемолитоавтотрофии традиционными методами сопряжено со значительными трудностями, однако они легко преодолимы в рамках информационной системы, и по принципу разумной достаточности используем лишь существенные информационные признаки. Развитие хемолитоавтотрофов в экосистеме переводит её в аномальное состояние, которое фиксируем, применяя экспертные системы, по биохимическим показателям – содержанию АТФ и ЩФА. Особенность заключена в том, что аномалия биотической части экосистемы сопровождается одновременно аномальными проявлениями в окружающей среде, прежде всего высокими концентрациями метана, водорода, двуокиси углерода (прямые индикаторы), а также характерным изотопным составом углерода и не-

которыми другими косвенными признаками. Для надежной идентификации явления хемолитоавтотрофии в природных условиях в океане необходимо применить комплекс газобиогеохимических показателей, измеренных в придонной среде акваторий. Использование одного показателя, будь то какой-либо один параметр из биохимических, газометрических, либо микробиологических определений, существенно снижает вероятность обнаружения явления хемолитоавтотрофии. Исследование только одного верхнего слоя осадка также занижает оценку масштаба распространения хемолитоавтотрофии в природной среде (Авилов, Авилова, 1991; 2001; 2001а; 2002; 2007г; 2008г; 2009 и др.). Экосистемный подход распространяем на изучение процессов и явлений в более глубоких слоях литосферы.

Заметное место в литоакваэкологии занимает экспериментальное исследование процессов преобразования ОВ в осадочной толще. В серии экспериментов имитировали глубинные потоки газов H_2 и CO_2 через искусственные слои – фильтр, донные отложения и воду с выходом в атмосферу, воспроизводящие природную среду акваторий в среде инертного газа Аг. Сначала в экспериментальную камеру поместили осадки из Балтийского моря с фоновым содержанием всех газов. Под действием глубинных потоков в них развилось сообщество микроорганизмов (хемолитоавтотрофы). Они генерировали метан, создавая аномалию, с максимум на 7–9 сутки.

В другой серии эксперимента в камеру поместили черноморские осадки и воду, в которых периодически измеряли концентрацию АТФ (БАЖМ). От исходных фоновых значений 110 нгАТФ/л на 7 сутки получили аномалию по содержанию АТФ – 1230 нг/л – развились микроорганизмы с хемолитоавтотрофным типом обмена веществ, используя газовый поток.

В последующем эксперименте на установке УМКП в специальной экспериментальной камере в анаэробных условиях при температуре 95°C и геостатическом давлении 500 атм. после выдержки образцов альбской глины в течение 36 ч в ней установлено содержание АТФ 43 нг/г. При этом из образца зафиксирован выход газообразных компонентов – CH_4 и его гомологов, H_2 . Анализ экспериментального материала на основе существенных информационных признаков подтвердил существование и развитие явления хемолитоавтотрофии в придонной воде, верхнем слое осадков, внутри осадочной толщи на глубинах 2–3 км.

Существенные информационные признаки вполне самостоятельны для обнаружения хемолитоавтотрофии в доступных для тестирования природных экосистемах литосферы. Эти признаки мы относим к прямым. Но при исследованиях в литоаквэкологии (рис. 1) для экосистем в земных недрах, где прямые измерения биотической составляющей трудно выполнимы, кроме прямых показателей приходится использовать косвенные признаки. В информационную систему вводим геофизические данные, указывающие на геологические условия, способствующие продвижению потоков газообразных флюидов вверх по разрезу литосферы при дегазации Земли, преобразовании ОБ в катагенезе и метагенезе и других процессах. Многочисленные места обнаружения хемолитоавтотрофии приурочены к регионам, в которых происходит разгрузка литосферы в геодинамически активных зонах. Анализ прямых и косвенных признаков убеждает, что явление хемолитоавтотрофии в придонной среде и осадочной толще распространено на 20–30% площади дна Мирового океана.

Сделанный вывод обязывает по-новому оценить роль хемолитоавтотрофии в природных процессах. По своей сути она активно участвует в процессах нефтегазообразования, и здесь её роль явно недооценивается. Кроме признанного анаэробного микробного метаногенеза в придонной зоне, глубинная хемолитоавтотрофия в осадочной толще (до глубин сотни и тысячи метров) преобразует поток эндогенных газов, генерируя углеводороды в процессе утилизации диоксида углерода и водорода. Активное живое вещество, образованное в результате жизнедеятельности хемолитоавтотрофов, включается в один из этапов эволюции органического вещества внутри осадочных пород, например, в виде биополимеров. Получив дополнительную информацию по термофилам, предлагаем концепцию хемолитоавтотрофного цикла нефтегазообразования (Авилов, Авилова, 2003б; 2007г; 2008; 2008а; Шнюков, Авилов, Авилова, 2007 и др.). В ней объединены современные представления о неорганическом и органическом происхождении нефти, обобщены геолого-геохимические и геофизические материалы из нефтегазовой геологии, создана единая схема нефтегазообразования. При дегазации Земли запускается хемолитоавтотрофный цикл. Хемолитоавтотрофы активно развиваются в подводящих каналах кристаллического фундамента, на всех этажах осадочной толщи и в самом месторождении. В результате своей жизнедеятельности они производят углеводороды и воду, их останки обогащают биополимерами материнскую породу и тут же включаются в процесс нефтегазобра-

зования. Хемолитоавтотрофный цикл может носить локальный или масштабный характер, геолого-геохимические процессы протекают уже в реальном, а не геологическом времени. Предложенная концепция хемолитоавтотрофного цикла нефтегазообразования вписывает оба источника ОВ (в результате фото- и хемосинтеза) в единую схему образования УВ из активного живого вещества. Детализация общей теории нефтегазообразования будет продолжена, но её главный постулат в принципе сохранится: «нефть из жизни, жизнь на потоках из лито- и фотосферы». Через хемолитоавтотрофный цикл реализуются неисчерпаемые резервы внутренней энергии Земли и восполняются запасы углеводородов. Концепция объясняет многие непонятные прежде стороны процессов нефтегазообразования и накопления углеводородов и этим приближается к статусу теории. Подобное сложное построение объединительной теории стало возможно за счет включения большого числа косвенных информационных признаков в информационную систему и их интерпретация с позиций главного методологического экосистемного подхода (рис. 1), доминирующего в геоэкологической ветви жизнеземлезнания.

Проблемы эколитогологии (рис. 1) рассмотрены в связи с процессами нефтегазонакопления. Авторами изучены некоторые конкретные стороны массопереноса в осадочной толще. В методологии более эффективен геосистемный подход и на первый план выходят другие существенные информационные признаки – газовые компоненты и их потоки, характеризующие абиотическую составляющую экосистемы. На установке УМП (раздел 2.5) имитировали рассеянные потоки газовой смеси с преобладанием гелия до 80 %об из глубинного источника (залежи) под воздействием перепада давления и концентрации. В природных объектах такое вертикальное перемещение газов относят к третичной или повторной вторичной миграции.

В течение длительного эксперимента визуально и инструментально отмечали аномальное состояние донных отложений. В экспериментальной камере через прозрачную стенку наблюдали поэтапно возникновение пузырьков газа (гелия) в однородном слое ила в нескольких точках, их постепенный рост, видоизменение круглой формы газового пузыря на многополостную каверну, практически одномоментный прорыв газа (на 42 сутки эксперимента) через верхнюю часть слоя ила в воду и далее в воздушную подушку, где концентрация гелия мгновенно выросла на один – два порядка. Далее цикл неоднократно повторялся. Было установлено неизвестное ранее явление кон-

центрирование рассеянных газовых потоков в свободную форму внутри слоя глинистых отложений при достаточном перепаде давлений. Открытое явление имеет выход в экогеологию и геоэкологию. Оно объясняет рождение вторичной газовой залежи, цикличность газопроявлений и разгрузок, возникновение геоэкологических рисков, образование геоэкологических аномальных состояний осадочной экосистемы и другое (Авилов, Авилова, 1998; 1999; 2003; 2008г; 2008а; 2009; 2009б; и др.).

Как видим, проблемы двух ветвей жизнеземлезнания (рис. 1) часто тесно переплетаются. Комплекс таких проблем поднимается до уровня емких наиболее общих задач жизнеземлезнания, например, рациональное природопользование, нефтегазоносность недр и другое. К одной из таких глобальных, можно сказать, вселенских проблем относим появление жизни и её проявление. Методология исследования в этой области знаний остается прежней – строим собственную информационную систему, измеряем существенные информационные признаки, среди которых главенствующие биохимические показатели, и находим проявление жизни, заявляя о её существовании в экосистеме. Это делается относительно просто в тех объектах, в которых возможно отобрать образцы и выполнить биохимические определения. Так авторы проделывали множество раз в различных акваториях и, что крайне важно, всюду находили концентрации АТФ и соответственно БАЖМ, подтверждая расхожий тезис о том, что «микроорганизмы вездесущи».

Но встречаются и другие объекты, где невозможно провести прямые измерения, а человек желает знать – «есть ли жизнь на Марсе?». Похоже, что современное человеческое общество категорически настроено разобраться в вопросе о происхождении жизни на Земле. Человечество ведет познание всеми доступными способами, проблема интересует и затрагивает все слои общества. Инженеры и ученые с одобрения налогоплательщиков расходуют огромные денежные средства на создание и запуск космических аппаратов с главной целью обнаружить следы проявления или условия существования жизни на планетах. Журналисты освещают перипетии событий, подогревая интерес публики. Фантасты совершают шаг в неизведанное, придумывая разновидности инопланетян и космические драмы. Экстрасенсы говорят о реинкарнации, а богословы настаивают на вечной жизни. Граждане внемлют, гадают о своей прошлой и будущей жизни, рассказывают о необычайных событиях и появлениях НЛО, чувствуя что-то

необычное. Совместными усилиями образовано информационное пространство, вобравшее в себя многочисленные и многосторонние суждения о жизни и её проявлениях.

Ученые постоянно обращаются к этой теме, но с более строгих позиций, пытаясь оперировать только научными фактами. Предмет настолько многогранен, что для его обсуждения привлекается всесторонняя информация различных научных направлений. В 2008 году вышла объемная (на 69 печ. л.) коллективная монография, написанная с участием более 120 авторов, «Проблемы зарождения и эволюции биосферы» под редакцией академика РАН Э.М. Галимова. В предисловии говорится «о том, что эта книга в затронутых вопросах отражает позицию Российской научной школы». А во вступительной статье этого сборника Э.М. Галимов приводит наиболее общее определение жизни: «жизнь – это явление возрастающего и наследуемого упорядочения, присущее при определенных условиях химической истории соединений углерода».

Разнообразие мнений и взглядов заставляет нас сделать вывод, что явление «жизнь» далеко ещё до полного понимания и относится к слабо изученным, мало известным явлениям. Исследование жизненных проблем вводим в число первостепенных задач жизнеземлезнания. В методологическом плане выбираем экосистемный подход, поскольку под пристальным вниманием находится биотическая составляющая экосистемы. То есть проблема жизни входит в круг интересов аквагеоэкологии и решается эффективным образом с использованием её механизма – разработанной информационной системы.

Строим информационную систему для изучения проблем жизни в соответствии с разработанными принципами. Поскольку прямые измерения биохимических показателей возможны не во всех экосистемах, то, пользуясь преимуществами экосистемного подхода, включаем в информационную систему по принципу разумной достаточности в первую очередь те показатели состояния среды, которые отражают проявления жизни в экосистеме, связанные с главными функциями и специфическими свойствами живой материи. Назовем их признаками проявления жизни.

Основные признаки живой материи тщательно исследованы в биологии, биохимии, медицине и выражены в кратком виде – как форма существования белковых тел. Обобщая современные представления, рассмотрим главные отличительные черты живого и поддерживающие их физико-химические процессы. Прежде всего – это высокий уровень

структурной организации (упорядоченность). Обычно в качестве примера приводят клетку, живой организм, включая человека. Обнаружение их самих или их останков в природном ландшафте является неоспоримым проявлением жизни. Но упорядоченность не единственная суть жизни, она входит составной частью в комплекс показателей, и только этот комплекс дает полное понимание явления «жизнь».

Живые организмы представляют собой открытую неравновесную систему. Это означает, что для поддержания структурной упорядоченности они постоянно расходуют энергию, которую получают из внешней среды – потоки вещества (хемолитоавтотрофы, например, потребляют водород и двуокись углерода) или энергии (фототрофы получают её в виде квантов света). Соответственно к признакам проявления жизни относим существование в окружающей среде потоков вещества и энергии.

Открытые неравновесные системы обладают способностью эффективно обмениваться веществом с внешним миром. Используя поступившие извне вещества для внутренних превращений (например, постоянного обновления структурных композиций), живой организм выводит продукты этих превращений во внешнюю среду. Продукты обмена, найденные в абиотической составляющей экосистемы, также применимы как признаки проявления жизни, например, метан, который выделяется в результате жизнедеятельности хемолитоавтотрофов, метанобразующих бактерий и другое. Эффективность внутренних превращений обеспечена высокой скоростью процессов, например, ферменты способны в течение миллисекунд осуществить сложные многоступенчатые внутриклеточные реакции, для проведения которых химику потребовались бы дни, даже месяцы работы. Соответственно высокоскоростные процессы в природе относим к признакам проявления жизни.

Живой природе свойственно передавать и воспринимать информацию, то есть обмениваться информацией. Наиболее показательным и хорошо изучено свойство передачи наследственной информации. Так в живых организмах генетическая программа заложена в ДНК, обеспечивая уникальную способность к самовоспроизведению – копированию себе подобных. Поэтому обнаружение в природе двух и более одинаковых объектов, должно насторожить: не является ли это проявлением жизни? Например, удивляет развитие совершенно схожих, но одновременно уникальных, необычных по составу биоты, подводных экосистем на глубинах 2–4 км в районах «черных курильщиков», удаленных друг от друга на тысячи километров.

Рассмотренные характерные качества живой материи и соответствующие им признаки проявления жизни во внешней среде создают теоретические предпосылки для разработки информационной системы специально по проблеме жизни. По составу эта система сложнее всех предыдущих. В неё входят существенные информационные признаки, а также вводим дополнительную информацию – факты, сгруппированные вокруг названных выше признаков проявления жизни, сведения о необычных, аномальных событиях, наблюдаемых в Природе. Задачи такой системы также несколько шире – исследовать любые экосистемы, а не только те, в которых возможны прямые измерения биохимических показателей. Усложняется и анализ массива данных, когда к имеющимся методам добавляем логические построения. Соответственно результаты исследований носят оттенок предпочтительности суждений, свойственной новым идеям и концепциям.

Экосистемный анализ прямых и косвенных проявлений жизни приводит к некоторым общим заключениям, изложенным тезисно. Разные стороны явления «жизнь» находят отражение в конкретных проявлениях в окружающей среде и соединены с ними определенной логической связью. Жизнь может существовать и развиваться только в экосистеме. В экосистеме материя становится живой и в результате экосистемного взаимодействия приобретает разнообразные формы жизни. Все формы жизни и их проявления находятся в постоянном взаимодействии и взаимосвязи. Степень жизненности материи обнаруживаем и измеряем по интенсивности её проявления в экосистеме. Жизнь, подобно материи, не возникает ниоткуда и не исчезает, а переходит из одной формы в другую.

Опираясь на современный уровень знаний, выделяем как минимум четыре формы жизни (в порядке возрастания их сложности и уменьшения изученности): вещественную, белковую (углеродную), информационную и космическую.

Вещественная – включает вещества в виде физико-химических соединений и их структурных образований.

Белковая (углеродная) – объединяет живые существа с ведущей ролью белков в процессах жизнедеятельности.

Информационная – содержит сведения, выполняя роль памяти живой материи.

Космическая – является накопителем и преобразователем вещества и энергии.

Каждая форма жизни имеет множество сосуществующих видов и

требует постоянной подпитки для сохранения собственной структурной организации.

Высказанные тезисы все вместе составляют концепцию существования живой материи. Она рассматривается авторами как некий этап в познании Мира и как назревшая необходимость систематизации накопленных знаний. Адмирал С.О. Макаров высказывал мнение, что обобщение никогда не бывает преждевременным. Соглашаясь, от себя добавим, что фантазии, на момент публикации, некоторых писателей и ученых со временем превратились в реальный факт и даже стали достоянием цивилизации (подводная лодка, космические аппараты, лазеры и другое). Предложенная концепция, мы надеемся, задаст определенный ход мыслей и вектор исследования в области жизнеземлезнания.

Информационная система по проблеме жизни обладает своими плюсами и минусами. В биотической составляющей экосистемы учитываем кроме белковой все остальные формы жизни. Это повлечет увеличение объема существенных информационных признаков и количества измеряемых компонентов, а также методов измерения, включая разработку новых. Косвенные признаки проявления других необычных форм жизни могут быть включены в базу достоверных данных. За ростом элементной базы информационной системы последует вовлечение в анализ новых связей и взаимодействий всех видов и форм жизни. К плюсам следует отнести незыблемость принципов её построения. Они вполне пригодны и действенны и в этой усложненной информационной системе, что подтверждает её высокую гибкость и практичность. Указанные свойства позволяют уже сейчас применить разработанную информационную систему и предложить решение многих проблем жизни, хотя бы на концептуальном уровне. Приведем тезисно отдельные примеры по взаимодействию форм жизни и их проявлений в экосистеме.

Все виды и формы жизни обмениваются между собой веществом, энергией и информацией. Выделяем преобладающее направление обменных процессов. Вещественная и белковая формы жизни воспринимают и передают различные виды информации, поступающие от информационной формы жизни, в частности, вещественная принимает информацию от белковой формы жизни. Вещественная форма жизни передает вещество и энергию белковой субстанции, а та, в свою очередь, транспортирует информацию и энергию в информационную и космическую формы жизни, соответственно. Космическая форма жизни при содействии информационной формы преобразуется в веществ-

венную форму жизни, порождая звезды, планеты и тому подобное. Взаимодействие форм жизни осуществляет круговорот жизни, а значит и материи, во вселенной.

Отдельные штрихи такого взаимодействия находят проявление в различных экосистемах, многие из которых установлены как научный факт. Вода меняет свою структуру в зависимости от высказываемой информации (речевой, эмоциональной и другое) и, сохраняя, запоминает её. Крупный драгоценный камень (лунный камень, бриллиант), попав в экосистему с участием человека, нарекается именем собственным и живёт своей жизнью, становясь источником радости или человеческой трагедии. То же с золотом – вспомним классику: «Люди гибнут за металл...» Разные виды всех форм жизни также вступают во взаимодействие.

Информационная форма жизни широко представлена разными видами в той же экосистеме – человеческом обществе. Ежедневная информация в виде общения, радио, литературы перерабатывается человеком каждой ночью и накапливается. Она периодически трансформируется в вид энергии (эмоциональный всплеск), который улетает в космическую форму жизни. При смерти белковое образование переходит частями в вещественную, информационную и космическую формы жизни (измерено мгновенное уменьшение веса на десятки граммов у человека). Множественная информация накапливается в информационной форме жизни и распространяется с колоссальной скоростью (выше скорости света за счет «искривления пространства») во вселенной, распределяясь равномерно по всем другим формам жизни.

Разные виды живой материи воспринимают из массива информации ту, которая приемлема и может быть реализована в конкретных условиях экосистемы. Так, в упомянутых гидротермах в районе «черных курильщиков» жизнь, находясь в идентичных условиях, выбрала одинаковый вид информации, затем по заложенной матрице создала уникальную для океанических условий биосферу (хемолитоавтотрофы, вестиментиферы и другое) в удаленных друг от друга локальных экосистемах. Точно также из заложенного в вещественную форму жизни массива информации на каждой планете начинает управлять процессами генерации белковой жизни тот вид информации, который адаптирован к конкретным условиям состояния абиотической составляющей их экосистемы. Соответственно около четырех миллиардов лет назад взаимодействие вещественной и информационных форм живой материи привели к появлению белковой жизни на Земле. Даль-

нейшая эволюция живого также протекала при содействии информационной форы жизни, когда биота шаг за шагом воспринимала к действию все более сложную информацию.

Вытекают некоторые практические рекомендации для космических поисков белковой жизни – для доказательной базы необходимо использовать существенные информационные признаки, измерять их (АТФ) обязательно. Хемолитоавтотрофы – наверняка одни из первых живых организмов, появляющихся на планете. Возникновение жизни наиболее вероятно в грунте, чем в открытой водной среде. Соответственно белковая жизнь, например, на Марсе возможна, но не на поверхности, а в более глубоких слоях отложений. Вот почему не могут выявить жизнепроявление на Марсе – либо образцы берут не там, либо «кормят» не тем. Ведь для марсианских микроорганизмов необходима своеобразная питательная среда (Авилов, Авилова, 2003б). По косвенным признакам белковую жизнь, скорее всего можно обнаружить на Венере в виде сообщества анаэробных хемолитоавтотрофов.

Приведенные примеры попадают в схему экосистемных взаимодействий, вытекающих из постулатов концепции существования живой материи. Многим разрозненным фактам находим логическое объяснение, что со своей стороны подтверждает научное значение предложенной концепции. Дальнейшие успехи в этом направлении придадут концепции статус теории, объясняющей суть мироздания. В этом неоценимую услугу окажет информационная система аквагеоэкологии как составная часть геоэкологии, жизнеземлезнания и экологии.

Действительно, воспринимая заложенные в данную информационную систему существенные информационные признаки, экспертные системы, методы оценки состояния как относящиеся в основном к белковой форме жизни, ожидаем правомерным существование таких же характеристик для других форм жизни. По принципу подобия, свойственному природе, строим аналогичные информационные системы для этих форм жизни в случае их доминирования в экосистеме. Тогда логически заключаем, что всем формам (очевидно и видам) жизни свойственны различные состояния – пассивное, нормальное, разной степени активности, которые естественно проявляются только в экосистеме. Ближайшая задача исследований в данном направлении – дать им количественную оценку.

Однако уже сейчас, используя экосистемный анализ, можно на качественном уровне выделить признаки и дать примеры таких состояний. Пока бриллиант в виде алмазного самородка покоится в природе,

он олицетворяет пассивное состояние вещественной формы жизни. Но самородок уже живет, поскольку он являет вид структурированного углерода с высокой степенью упорядоченности. Дальнейшая судьба драгоценного камня также понятна – его нашли, извлекли, обработали по определенной технологии, используя и вкладывая в него информационную составляющую. Теперь он поднялся на уровень нормального состояния вещественной формы жизни. Но вот его продали, и он живет в новом активном состоянии в человеческом обществе – экосистеме с участием всех форм жизни, радуя покупателя, вызывая зависть у некоторых и активизируя саму экосистему, то есть его новое, повышенной активности состояние проявляется только в экосистеме. Подобные рассуждения справедливы и для других видов вещественной формы жизни, начиная от химических элементов и кончая произведениями искусства, – ведь неспроста физики используют выражение: «продолжительность жизни элементарной частицы».

Также понятнее становятся разные типы состояния информационной формы жизни. Если информация в виде статей, книг, фильмов «лежит на полке», то она в пассивном состоянии. Вот информация воспринята, тогда мерой её активности служит реакция общества (экосистемы). Поэтому наработаны разные способы воздействия на человека, лишь бы вызвать его реакцию – трагедии, интриги, лживые факты, лозунги, юмор и многое другое. «Идея, овладевшая массами, становится материальной силой».

Проявление информационной формы жизни в экосистеме с реакцией человека – это верхняя часть айсберга. Гегобайты информации, размещенные в компьютере или в мозге человека, рассматриваем как каплю в море. Предполагаем, что информационная форма жизни чрезвычайно емка и хранит многие факты и события, а наверное и все, происходящие со всеми остальными формами жизни. Они хранятся, также как в библиотеке, в пассивном состоянии, но не на полках, а в каком-то уникальном носителе, вероятно, структурных образованиях космического эфира, становясь активными, как мы уже показали в связи с образованием жизни на Земле, в благоприятных ситуациях. Её «услугами» пользуется Природа, но иногда её архивы доступны и людям, например, экстрасенсам.

Кроме архивных функций, информационная форма жизни выполняет упорядочение информации, устанавливает логические связи и взаимодействия различных видов информации. Задача упрощается, при кажущейся бесконечности поступившей и поступающей инфор-

мации, тем, что процессы, явления и события во вселенной наверняка множественно повторялись. То есть на каждый цикл событий заведена своя ячейка, матрица или тому подобное. Каждое современное событие, связанное цепью взаимодействий с предшествующими фактами и сопутствующими обстоятельствами (экосистемный подход), попадает в уже существующую соответствующую ячейку. Вот Вам и предначертанность судьбы, так как в этой ячейке миллионы раз уже происходили все последующие события, которые обязательно произойдут с Вами. Примитивным аналогом, но хорошей иллюстрацией, служит компьютерная программа игры в шахматы. Составив ей партию, Вы сделали неверный ход и по сложившейся на доске позиции попали под известную компьютеру атаку Алехина – исход очевиден, предначертан.

Косвенные признаки проявления информационной формы жизни находим в экосистеме, прежде всего в поведении человека. Как мы уже отмечали, человек, засыпая, передает мысли в информационную систему жизни и, если передаваемая информация значима и сразу попала в нужную ячейку, человек может тут же получить ответ – информацию о дальнейших шагах, так называемые «вещие сны», или решение задачи, вопроса, проблемы. Многие творческие личности признавались, что новые идеи им приходили во сне. Так, Д.И. Менделееву его знаменитая таблица открылась ему во сне. Подобные проявления случаются и наяву. Контакт с информационной формой жизни возможен в процессе длительной умственной работы. А.С. Пушкин считал, что надо сесть работать над рукописью и муза придет. Другие воздействуют на свою психику, чтобы вступить в такой контакт, например, шаманы входят в транс. Как видим, нормальное и активное состояние информационной формы жизни находят проявление только в экосистеме, и для её идентификации наиболее эффективен экосистемный подход.

Космическая форма жизни сложнее для восприятия. К косвенным проявлениям в экосистеме относим взаимодействия её различных энергетических видов, например, биополей человека. По этому поводу в обиходе известно об обмене энергией, энергетических вампиров, наведение порчи и тому подобные признаки, которые относим к состоянию этой формы жизни разной степени активности. Аномальные проявления наблюдают в экосистеме в связи с обменом энергией между формами жизни. Известны уникальные случаи, когда люди обходятся без вещественной пищи длительное время, потребляя лишь космическую энергию. В обратном направлении человек периодически

отдаёт часть энергии в космос, в аномальной ситуации дело доходит до обморока. Обмен энергией океана с космосом происходит в активных зонах (Бермудский треугольник и другие). К признакам такого обмена авторы относят аномальные явления в океане – светящиеся круги, яркие вспышки, остановку времени, выход из строя приборов, исчезновение судов и самолетов и другое. Космическая форма жизни оставляет следы в планетарной экосистеме через аномальные проявления. Пока для них не найдены причинно-следственные связи. Прогрессу исследований в этом новом для науки направлении может способствовать экосистемный подход.

В этом разделе 4.3 показана лишь небольшая часть огромного фактического материала, рассмотрены основные направления аквагеоэкологических исследований, в которых авторы применили разработанную информационную систему. Она позволяет анализировать многообразие проявлений жизни в экосистеме и давать им количественную оценку. Приведенных примеров вполне достаточно для обобщения, суммирования сказанного, которые утверждают в главном, что информационная система аквагеоэкологии с её принципиальным подходом и методами является универсальным механизмом познания как хорошо обследованных, так и предполагаемых или вовсе неизвестных природных процессов и явлений, путем выявления причинно-следственных связей и взаимодействий внутри экосистемы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Информационная система аквагеоэкологии представляет собой достаточно сложный конгломерат специальных подходов и методов отбора и получения необходимой информации, накопления и создания базы достоверных данных, объективного рассмотрения и анализа фактического материала, обоснования результатов и выводов, обеспечения их максимального приближения к истине и высокой степени геоэкологической значимости. Информационная система предназначена служить механизмом, реализующим цели и задачи аквагеоэкологии. Они весьма обширны и многоплановы, вытекают из того положения, которое занимает аквагеоэкология в системе наук.

По выделенным связям и взаимодействиям с традиционными научными направлениями определяем место аквагеоэкологии как объединяющего синтезированного направления, нацеленного на исследования в смежных областях экологии, океанологии, геологии. В то же время, если исходить из тенденций развития междисциплинарных отраслей знаний, аквагеоэкологию считаем частью геоэкологии, возглавляющей одну из ветвей жизнеземлезнания (новый термин, введенный авторами для обозначения научного направления – синтеза геологии с экологией). Геоэкологическую ветвь наделяем единым методологическим, экосистемным подходом – исследовать природные объекты как экосистемы, рассматривать во взаимодействии биотическую и абиотическую её составляющие, отдавая предпочтение первой из них.

Экосистемный подход распространяем и на информационную систему аквагеоэкологии, определяя её структуру и принципы организации для эффективной работы. Информационная система создается индивидуально для изучения конкретного природного объекта или явления. Но при этом необходимо руководствоваться едиными принципами её построения, среди которых выделяем главное: принцип разумной достаточности получаемой и используемой информации, достоверность входящих в систему данных, использование экспертных систем оценки геоэкологического состояния природного объекта, минимизация риска принятия правильного решения в аквагеоэкологии.

Представленные принципы задают общую тенденцию, главную нить в построении единой информационной системы аквагеоэкологии. Конкретное воплощение этих принципов само по себе многовариантно, зависит от разных факторов, в частности, – от появления новых современных методов анализа и приборов. Это свойство находится в

согласии с постоянно увеличивающимся кругом проблем аквагеоэкологии и делает информационную систему достаточно гибкой, способной соответствовать новым целям и задачам. С другой стороны соблюдение всех рассмотренных принципов при детальной разработке элементов системы придает единообразие и целостность создаваемой информационной системы и обеспечивает сходимость результатов, а также сопоставимость выводов для различных экосистем. Предложенные принципы открывают возможность реализовать экосистемный подход в решении задач аквагеоэкологии с высокой степенью объективности.

На основе названных принципов сформирован элементный состав единой информационной системы аквагеоэкологии:

- существенные информационные признаки;
- достоверная база данных;
- экспертная система оценки геоэкологического состояния природных объектов;
- специфические методы обработки получаемой и используемой информации.

Каждый элемент информационной системы достаточно сложный и емкий, требует значительных по объему экспериментальных и теоретических исследований. Авторы выполнили этот комплекс необходимых изысканий и получили следующие результаты.

Исходя из сформулированных целей и задач аквагеоэкологии, определен объект изучения. Выделение природного объекта в конечных границах происходит не стихийно, а в силу определенного единообразия и целостности предмета наблюдения по сходным свойствам и качествам. Ответственный выбор объекта служит залогом успешного выполнения исследования. В общем виде объектом наблюдения является вся гидросфера плюс контактные зоны. Детализируя, назовем поверхностные, глубинные и придонные воды, лед, снег, донные отложения, подземные воды, влагосодержащие участки литосферы

Выбор существенных информационных признаков базируется на теоретических представлениях о состоянии и функционировании экосистемы. Разработанная авторами теория биохимического состояния природной среды объясняет суть происходящих в ней явлений и процессов. С теоретических позиций показано доминирование газобиохимических показателей и к существенным информационным признакам относим концентрацию АТФ и активность гидролитических ферментов, как главенствующая характеристика биотической состав-

ляющей экосистемы, а для абиотической компоненты – содержание наиболее подвижных газообразных компонентов.

Этот выбор крайне важен также и с позиции приборного обеспечения при формировании базы достоверных данных. Он необходим, чтобы ограничить до минимума исходное число измеряемых компонентов в пробах воды и осадков для нужд аквагеоэкологии, сделав информационную систему пригодной в эффективном, практическом использовании. Но такой подход в отдельных случаях не исключает привлечение дополнительных информационных признаков.

Анализ состояния современной океанографической техники привел к убеждению о необходимости разработки специальных технических средств и методов для получения достоверных количественных данных по существенным информационным признакам в любом из названных объектов. И здесь пришлось искать новые подходы. Среди множества методов сбора информации по изучаемым объектам выделен общий методический прием – отбор проб с любых глубин океана с точностью, соизмеримой с размерами самого объекта. Захват проб воды, газов, осадков происходит без нарушения их нативных свойств. Пробоотборники обеспечивают полную сохранность взятых на глубине компонентов. Погрешности на операциях по отбору и обработке проб так малы, что погрешность метода в целом практически равна погрешности анализа. Эти признаки определяют главные свойства приборов и являются доминантным методологическим принципом их построения.

Для их воплощения пришлось разработать и исследовать новые способы захвата проб и компенсации изменения их объема. Найдены оригинальные технические решения, новизна которых защищена авторскими свидетельствами и патентами – более 20. Приборы комплекса при эксплуатации показали высокую надежность работы, удобство и простоту обслуживания, проявили новые свойства и качества, значительно превосходя отечественные и зарубежные аналоги. Внедрение комплекса в практику морских экспедиций обеспечило наполнение базы информационной системы достоверными данными о содержании и распределении существенных информационных показателей (признаков) в разнотипных экосистемах Мирового океана.

С этого момента раскрываются основные преимущества информационной системы – вступают в действие её методы анализа и обобщения фактического материала, тогда как некоторые исследователи уже ставят точку. В функцию информационной системы входит решение

задачи о том, как воспользоваться полученным массивом данных наиболее эффективным образом. Выбран путь оптимизации количества используемых показателей на различных этапах геоэкологической экспертизы, объединения разрозненных данных в единую экспертную систему, имеющую определенную геоэкологическую значимость.

Созданы и включены в информационную систему критерии оценки геоэкологического состояния экосистемы, выявления формирующих его процессов и явлений. В результате анализа разнообразных подходов к оценке состояния природных вод выделяем наиболее значимый обобщенный показатель – содержание АТФ. Его вводим первым в экспертную систему как главный критерий геоэкологического состояния водного объекта. В определенном смысле он подобен используемому в медицине обобщающему критерию – температуре тела. Если в воде измерена концентрация АТФ менее 1000 нг/л, то в первом приближении, с высокой долей вероятности можно говорить о нормальном состоянии этой экосистемы. При более высоких значениях АТФ наблюдаем отклонение от нормы – своеобразное «болезненное» состояние. В таком контексте – для приближенного или предварительного определения геоэкологически нормального состояния природного объекта, содержание АТФ выступает в роли самостоятельной экспрессной экспертной системы. Для более детального исследования экосистемы и оценки её состояния используем более сложные экспертные системы.

Исследованы поля фоновых содержаний существенных информационных показателей (признаков), для которых построены графические экспертные системы в виде типичных профилей вертикального распределения в воде и осадках. Двухкомпонентные экспертные системы созданы в виде номограмм на основе анализа природных соотношений главенствующих биохимических показателей АТФ и ЩФА. Они дают количественные критерии разделения вод и осадков на биологически пассивные или активные, определения градаций биохимического состояния экосистемы – токсикация, норма, эвтрофирование, а также указывают направленность преобладающих процессов в экосистеме – развитие или угнетение.

Разработанные экспертные системы отражают наиболее общие закономерности, используемые при экспертизе геоэкологического состояния природных объектов. В этом плане их можно назвать «глобальными». Кроме них авторы часто строят и так называемые «локальные» экспертные системы, учитывающие специфические свойства

конкретных водоемов. Они были разработаны в том или ином виде практически для всех исследованных акваторий, включая Балтийское, Черное, Охотское и другие моря, оз. Байкал и т.п. Экспертные системы могут принимать различные формы – численные величины, линии, графики, плоскостные и объемные изображения, модели в реальном и виртуальном формате и другое. Их построение – не самоцель, а достижение эффективности и качества обобщений в аквагеоэкологии.

Геоэкологическая экспертиза включает пять этапов тестирования водных объектов. Кроме паспортизации водоема, составления банка данных, изучается его пригодность к рациональному природопользованию. Комплекс измеренных газобиогеохимических показателей (существенных информационных признаков) составляет фактологическую базу экосистемного анализа, указывающего путь к идентификации аномальных явлений, установлению причинно-следственных связей процессов, происходящих в самой экосистеме и пограничных областях. Здесь в качестве достоверной информации выступают только количественные измерения.

Разработанная информационная система предназначена для использования при проведении исследований в столь же широком спектре проблем, сколь разнообразны цели и задачи аквагеоэкологии. Преимущество информационной системы в её гибкости – состав её элементов может меняться в зависимости от сложности задач, но базовый экосистемный подход остается неизменным – использование всех элементов информационной системы. Экосистемный анализ, применяемый авторами в итоговой части методологии обобщения собственного фактического материала, дал возможность по-новому оценить некоторые процессы и явления в разных областях жизнеземлеznания.

В сфере геоэкологии океана (гидрогеоэкологии) открыто явление существования жизни в глубинных подводных гидротермах, исследовано явление хемолитоавтотрофии в придонной зоне акваторий и обнаружено его широкое распространение в природных экосистемах – на 20–30 % площади под дном океана. Анализ существенных и дополнительных информационных признаков привел к другому открытию – явлению образования активного живого вещества в промежуточных и глубинных водах океана. Тем самым обнаружено неизвестное ранее явление, которое не находится в прямой зависимости от фотосинтетических процессов на дневной поверхности океана.

В другой ветви аквагеоэкологии – литоакваэкологии объединены современные представления о неорганическом и органическом проис-

хождении нефти, обобщены собственные данные натурных и экспериментальных наблюдений, геолого-геохимические и геофизические материалы из нефтегазовой геологии, в результате авторами создана концепция хемолитоавтотрофного цикла углеводородов, то есть единая схема нефтегазообразования. Проблемы литоэкогеологии, как часть экогеологии, рассмотрены в связи с процессами нефтегазоаккумуляции. Авторами изучены некоторые конкретные стороны массопереноса в осадочной толще, обнаружено явление концентрирования рассеянных газовых потоков в свободную форму внутри слоя глинистых отложений при достаточном перепаде давлений. Данное открытие дает ключ к объяснению механизма формирования локальных флюидодинамических систем нефтегазообразования, образования газовых кратеров и возникновения геоэкологических рисков при эксплуатации подводных коммуникаций и др.

Как видим, проблемы двух ветвей жизнеземлезнания часто тесно переплетаются и успешно решаются подходом и методами разработанной информационной системы. Комплекс таких проблем поднимается до уровня емких наиболее общих задач жизнеземлезнания, например, рациональное природопользование, нефтегазоносность недр и другое. К одной из таких глобальных, можно сказать, вселенских проблем относим появление жизни и её проявления. Результаты исследований авторов носят оттенок предпочтительности суждений, свойственной новым идеям и концепциям.

Экосистемный анализ прямых и косвенных проявлений жизни приводит к некоторым общим заключениям, изложенным тезисно. Жизнь может существовать и развиваться только в экосистеме. В экосистеме материя становится живой и в результате экосистемного взаимодействия приобретает разнообразные формы жизни. Все формы жизни и их проявления находятся в постоянном взаимодействии и взаимосвязи. Жизнь, подобно материи, не возникает ниоткуда и не исчезает, а переходит из одной формы в другую, совершая круговорот в природе. Опираясь на современный уровень знаний, выделяем как минимум четыре формы жизни (в порядке возрастания их сложности и уменьшения изученности): вещественную, белковую (углеродную), информационную и космическую. Каждая форма жизни имеет множество сосуществующих видов и требует постоянной подпитки для сохранения собственной структурной организации. Высказанные тезисы все вместе составляют концепцию существования живой материи.

В книге показана лишь небольшая часть огромного фактического

материала (всего по теме около 300 публикаций). Результаты основных направлений аквагеоэкологических исследований, в которых авторы применили разработанную информационную систему, подтвердили её высокую эффективность в оценке геоэкологического состояния природных экосистем на количественной основе. Практика работ подчеркнула главное достоинство информационной системы аквагеоэкологии в том, что её принципиальные подходы и методы служат универсальным механизмом познания как хорошо обследованных, так и предполагаемых или вовсе неизвестных природных процессов и явлений, путем выявления причинно-следственных связей и взаимодействий в экосистемах.

Теоретические построения повысили действенность практических рекомендаций по рациональному природопользованию. Приводим один из примеров. Для предотвращения геоэкологической катастрофы в экосистеме Черного моря разумная, созидательная деятельность человека должна быть направлена на откачку горючих газов, метана и сероводорода из глубинных вод и осадков. Следует обеспечить безопасность газовых трубопроводов по дну акватории, исключить сброс бытовых отходов в глубоководную часть Черного моря.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авилов В.И. Герметичный пробоотборник-дегазатор // Океанология. 1976. Т. 16. Вып. 1. С. 170–173.
2. Авилов В.И. Разработка технических средств и методов газовой геохимических исследований в акваториях. М.: ИОАН, 1985. 87 с.
3. Авилов В.И. Технические средства и методы газобиогеохимических исследований океана: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. М.: РЭФИА – ИО РАН, 1997. 78 с.
4. Авилов В.И., Авилова С.Д. Биологически активные вещества как дополнительный критерий при изучении нефтегазоносности акваторий // V Всесоюзный биохимический съезд. Киев, январь 1986. М.: Наука, 1986. Т. 2. С. 140.
5. Авилов В.И., Авилова С.Д. Газобиогеохимические исследования в западной части Черного моря // Геохимия. 1987. № 1. С. 121–128.
6. Авилов В.И., Авилова С.Д. Карта зон в Мировом океане, уязвимых от загрязнения // Всесоюзная конференция «Экологические проблемы охраны живой природы». М., 1990. Т. 2. С. 77.
7. Авилов В.И., Авилова С.Д. Активное живое вещество и ферментная активность в Мировом океане // Третье Всесоюзное Совещание по геохимии углерода. М.: ГЕОХИ, 1991. С. 122.
8. Авилов В.И., Авилова С.Д. Газобиогеохимические исследования в Черном море // Отчёт об исследованиях на РПС «Ихтиандр». НПО Мариэкопром Института новых и прикладных физических проблем Академии Наук Украины и Российской Академии Наук. Утверждён генеральным директором НПО Мариэкопром И.М. Нестеренко и начальником экспедиции А.А. Строгановым. Севастополь, 1993. 39 с.
9. Авилов В.И., Авилова С.Д. Система газобиогеохимических критериев для экспертных оценок в аквагеоэкологии // XI Межд. Школа морской геологии. М., 1997. Т. 1. С. 68.
10. Авилов В.И., Авилова С.Д. Принципы построения информационной системы для принятия решения в аквагеоэкологии // III Межд. научн.-технич. Конференция «Современные методы и средства». М., 1997а. С. 72.
11. Авилов В.И., Авилова С.Д. Моделирование нефтегазообразования в акваториях // Международный Форум по проблемам науки, техники и образования. М., 1998. С. 100.
12. Авилов В.И., Авилова С.Д. Газобиогеохимические показатели в оценке геоэкологического состояния вод Тихого и Атлантического океанов // Доклады Академии Наук. М., 1999а. Т. 369. № 6. С. 802–805.
13. Авилов В.И., Авилова С.Д. Экспериментальное исследование рассеянных потоков природных газов // Доклады Академии Наук. 1999. Т. 369. № 5. С. 664–666.

14. Авилов В.И., Авилова С.Д. Два рейса – два океана // Наука в России. М., 2000. № 3. С. 76–81.
15. Авилов В.И., Авилова С.Д. Жизнь на океанском дне // Наука в России. М., 2001. № 3. С. 56–61.
16. Авилов В.И., Авилова С.Д. Проявление флюидных потоков со дна в глубоководной части Черного моря // Доклады Академии Наук. 2001а. Т. 378. № 4. С. 522–525.
17. Авилов В.И., Авилова С.Д. Хемолитоавтотрофия в сфере проблем нефтегазоносности акваторий // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. М., 2002. № 10. С. 7–9.
18. Авилов В.И., Авилова С.Д. Загадки Черного моря // Наука в России. М., 2002а. № 6. С. 50–58.
19. Авилов В.И., Авилова С.Д. Потоки газов в придонной зоне глубоководной части океана // Доклады Академии Наук. 2003. Т. 389. № 4. С. 519–523.
20. Авилов В.И., Авилова С.Д. Эль-Ниньо – природное явление глобального масштаба // Труды Международного Форума по проблемам науки, техники и образования. М., 2003а. С. 86.
21. Авилов В.И., Авилова С.Д. Явление хемолитоавтотрофии в нефтегазовой парадигме // Генезис нефти и газа. М.: ГЕОС, 2003б. С. 8–9.
22. Авилов В.И., Авилова С.Д. Геоэкологическое состояние Финского залива // Труды Международного Форума по проблемам науки, техники и образования. М., 2005. Т. 3. С. 101.
23. Авилов В.И., Авилова С.Д. Газогидраты – готовый природный источник энергии // Четвертый Всероссийский энергетический Форум. ТЭК России в XXI веке. М., Кремль, 2006. www.iprg.ru
24. Авилов В.И., Авилова С.Д. Нефтегазовое направление в геоэкологии океана // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. М.: ВНИИОЭНГ, 2007. № 6. С. 56–59.
25. Авилов В.И., Авилова С.Д. Глобальные аспекты аквагеоэкологии // Южно-Российский вестник геологии, географии и глобальной энергии. Астрахань, 2007а. № 1 (25). С. 3–11.
26. Авилов В.И., Авилова С.Д. Прогнозирование геоэкологического состояния Черного моря // Сборник статей IV Международной научно-технической конференции «Наука, образование, производство в решении экологических проблем» (Экология-2007). Уфа, 2007б. С. 84–88.
27. Авилов В.И., Авилова С.Д. Геоэкологические риски отдельных районов Балтийского моря // Там же, 2007в. С. 374–378.
28. Авилов В.И., Авилова С.Д. Изучение геоэкологической обстановки вблизи затонувших объектов в Балтийском море // Там же. (Экология-2008). 2008в. С. 58–68.
29. Авилов В.И., Авилова С.Д. Оценка генезиса углеводородов подводных вулканов, газогидратов, газовых факелов Черного моря по газобиогео-

- химическим показателям // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. Киев: Нац. Академия Наук Украины, 2007. № 2. С. 67–85.
30. Авилов В.И., Авилова С.Д. Газобиогеохимические аспекты проблем нефтегазообразования // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. М.: ВНИИОЭНГ. 2008а. № 6. С. 4–8.
 31. Авилов В.И., Авилова С.Д. Теоретические основы аквагеоэкологии. М.: «ВИКТАН-полиграф», 2008. 120 с.
 32. Авилов В.И., Авилова С.Д. Участие науки в нефтегазовой отрасли // Шестой Всероссийский Энергетический Форум «ТЭК России в XXI веке». М., Кремль, 2008б. www.irpg.ru.
 33. Авилов В.И., Авилова С.Д. Явление хемолитоавтотрофии в нефтегазообразовании // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. Киев: Нац. Академия Наук Украины, 2008. № 1. С. 70–78.
 34. Авилов В.И., Авилова С.Д. Газобиогеохимические исследования в придонной среде акваторий // Доклады Академии Наук. 2009. Т. 427. № 6. С. 821–825.
 35. Авилов В.И., Авилова С.Д. Основные направления синтеза геологии с экологией // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. М. ВНИИОЭНГ. 2009а. № 9. С. 24–29.
 36. Авилов В.И., Авилова С.Д. Наука геоэкология в морских исследованиях // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. Киев: Нац. Академия Наук Украины, 2009б. № 3. С. 5–24.
 37. Авилов В.И., Авилова С.Д. Планетарные аквагеоэкологические процессы // Геология, география и глобальная энергия. Астрахань, 2009в.
 38. Авилов В.И., Авилова С.Д., Пака В.Т. Газобиогеохимические исследования отдельных регионов Балтийского моря // Доклады Академии Наук. 2008. Т. 422. № 1. С. 81–84.
 39. Авилов В.И., Троцюк В.Я. Усовершенствование средств получения герметичных проб донных осадков // Океанология. 1980. Т. 20. Вып. 3. С. 558–563.
 40. Авилова С.Д. Биологически активные вещества как возможная оценка состояния водной среды // II-ой Всесоюзный съезд океанологов. Декабрь. Ялта. Севастополь, 1982. Вып. 3. Часть. 2. С. 142–143.
 41. Авилова С.Д. Биохимическая характеристика вод тропической зоны восточной части Тихого океана // Биология моря. Владивосток, 1982а. № 3. С. 51–57.
 42. Авилова С.Д. Мочевина в водах северо-западной части Индийского океана // Океанология. 1983. Т. 23. Вып. 4. С. 588–593.
 43. Авилова С.Д. Биологически активные вещества (АТФ и щелочная фосфомоноэстераза) // Влияние разлива мазута на экосистему Балтийского моря. Вильнюс: Отдел географии АН Лит. СССР. 1984. С. 118–125.
 44. Авилова С.Д. Некоторая биохимическая характеристика придонных вод в северо-западной части Индийского океана // Океанология. 1984а. Т. 24.

Вып. 3. С. 460–463.

45. Авилова С.Д. Аденозинтрифосфат в водах Перуанского апвеллинга // Океанология. 1984б. Т. 24. Вып. 4. С. 616–623.
46. Авилова С.Д. Биохимические методы в оценке состояния водной среды и осадков // V Всесоюзный биохимический съезд. Киев, январь, 1986. М.: Наука. Т. 2. С. 73.
47. Авилова С.Д. Биологически активные вещества как индикаторы биохимического состояния морской среды // Диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук. М., 1990. 453 с.
48. Авилова С.Д., Авилов В.И. Биохимическая индикация для нормирования экологического состояния водных объектов. М.: ВАСХНИЛ, 1990. 31 с.
49. Авилова С.Д., Авилов В.И. Оценка экологического состояния водных объектов по биохимическим показателям (методические указания). М.: РЭФИА, 1997. 35 с.
50. Бондаренко Н.А. Пограничные структуры платформ Черноморско-Каспийского региона: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Саратов, КубГУ, 2009. 37 с.
51. Ваганов П.А. Что понимают под термином «Environmental Geology» на Западе? // Школа экологической геологии и рационального недропользования: Материалы шестой межвуз. молодеж. науч. конф. СПб.: СГУ, 2005. С. 96–104.
52. Геодекян А.А., Авилов В.И., Авилова С.Д. Газобиогеохимические исследования в осадках Северных морей // Доклады Академии Наук. 1986. Т. 289. № 5. С. 1217–1220.
53. Геодекян А.А., Авилов В.И., Авилова С.Д. Газобиогеохимические характеристики придонной воды и современных осадков западного сектора Черного моря // Доклады Академии Наук. 1986а. Т. 289. № 4. С. 966–970.
54. Геодекян А.А., Авилов В.И., Авилова С.Д. Геоэкологический мониторинг морской среды // Доклады Академии Наук. М., 1990. Т. 311. № 1. С. 183–188.
55. Геодекян А.А., Авилов В.И., Авилова С.Д. Геоэкологические исследования Байкала // Доклады Академии Наук. 1990а. Т. 310. № 6. С. 1442–1446.
56. Геодекян А.А., Авилов В.И. и др. Газы придонных вод северо-западной части Индийского океана // Доклады Академии Наук. 1977. Т. 237. № 6. С. 1483–1485.
57. Геодекян А.А., Авилов В.И., Авилова С.Д., Троцюк В.Я. Газобиогеохимические исследования газовых кратеров и геоакустических аномалий Балтийского моря // Доклады Академии Наук. 1988. Т. 299. № 2. С. 449–453.
58. Геодекян А.А., Авилов В.И., Авилова С.Д., и др. Геоэкологическое со-

- стояние отдельных водных объектов присахалинского шельфа // Доклады АН. 1991. Т. 321. № 4. С. 810–813.
59. Геодекян А.А., Авилов В.И., Авилова С.Д. Геоэкологические исследования и прогнозирование экологического состояния природной среды // Доклады Академии Наук. 1992. Т. 324. № 2. С. 415 – 419.
60. Геодекян А.А., Авилов В.И., Авилова С.Д. Океан глазами геоэкологов // Наука в России. М., 1993. № 1. С. 30–36.
61. Геодекян А.А., Авилов В.И., Авилова С.Д. Геоэкологический мониторинг водных бассейнов сахалинского шельфа // Доклады Академии Наук. 1994. Т. 334. № 1. С. 83–86.
62. Геодекян А.А., Авилов В.И., Авилова С.Д. Газобиогеохимические исследования в водах Атлантического океана // Доклады Академии Наук. 1997. Т. 354. № 4. С. 517–521.
63. Геодекян А.А., Авилов В.И., Троцюк В.Я. Интерпретация результатов газово-геохимических исследований Охотского моря // Океанология. 1977. Т. 17. Вып. 2. С. 237–242.
64. Геодекян А.А., Шнюков Е.Ф., Авилов В.И., Авилова С.Д. Газобиогеохимические исследования в Черном море в районе Крыма // Доклады Академии Наук. 1995. Т. 342. № 5. С. 667–671.
65. Единые критерии качества вод. М.: СЭВ, 1982. 65 с.
66. Емельянов В.А. Основы морской геоэкологии. Киев: Наукова думка, 2003. 238 с.
67. Миркина (Авилова) С.Д. Выделение и биохимическая характеристика растворенного органического вещества природных вод // Океанология. 1977. Т. 17. Вып. 4. С. 629–637.
68. Миркина (Авилова) С.Д. Биологически активные соединения в водах северо-западной части Индийского океана // I Съезд советских океанологов. М.: Наука, 1977а.. Вып. II. С. 190–191.
69. Миркина (Авилова) С.Д. Ферментная активность и АТФ в водах северо-западной части Индийского океана // Океанология. 1979. Т. 19. Вып. 4. С. 517–521.
70. Миркина (Авилова) С.Д. Биохимическая характеристика вод тропической зоны восточной части Тихого океана // Биология моря. 1982. № 3. С. 621–625.
71. Одум Ю. Основы экологии. М.: Мир, 1975. 740 с.
72. Проблемы зарождения и эволюции биосферы / Под ред. Академика РАН Э.М. Галимова. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2008. 552 с.
73. Отчёт по экспедиции 22 рейса НИС «Академик Курчатов». 1976. Т. 1, 2.
74. Снакин В.В., Мельчинко В.Е., Бутовский Р.О. и др. Оценка состояния и устойчивости экосистем. М.: ВНИИприрода, 1992. 127 с.
75. Трофимов В.Т. Содержание и соотношение экологической геологии и геологии окружающей среды // Геология, география и глобальная энергия. Астрахань, 2008. № 1 (28). С. 3–19.

76. Шнюков Е.Ф., Авилов В.И., Авилова С.Д. Газобиогеохимические исследования. В книге: Геологические исследования Черного моря. Киев, 2006. С. 135–155.
77. Шнюков Е.Ф., Авилов В.И., Авилова С.Д. Происхождение углеводородов, подводных вулканов, газогидратов, газовых факелов Черного моря по газобиогеохимическим показателям // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. М., 2007. № 8. С. 22–31.
78. Avilov V.I., Avilova S.D., Braginsky A.P., Pavlovsky B.R. Scientific aspects of the problem of ecological ocean reserve creation. PACON. 1999 // Honolulu. Hawaii. Proceedings. P. 484–489.
79. Avilova S.D., Avilov V.I. Biological active matters as indicator of the biochemical state of environment // 9-th International symposium on environmental biogeochemistry: Abstracts. Moscow, 1989. P. 90.
80. Avilov V.I., Avilova S.D. Near-bottom surrounding of gas crater areas in the Baltic sea // Там же. Moscow, 1989. P. 89.
81. Avilov V.I., Avilova S.D. Gasbiochemical research of Baikal // Там же. Moscow, 1989a. P. 99.
82. Avilov V.I., Avilova S.D. Biochemical state of Baikal ecosystem is similar to that of the ocean // The first Vereshchagin Baikal informational conference. Irkutsk, 1989b. P. 46.
83. Dmitrievsky A.N., Avilov V.I., Avilova S.D. Expert estimation of water environment ecological state at oil-gas fields development. PACON. 1999 // Abstracts. Moscow, 1999. P. 265.
84. Keller E. A. Environmental geology. 8-th ed. Santa Barbara: University of California. 2004.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. СТРУКТУРА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ.....	5
1.1. Критерии качества вод.....	5
1.2. Место аквагеоэкологии в системе наук.....	11
1.3. Принципы создания информационной системы.....	22
2. ПОЛУЧЕНИЕ ДОСТОВЕРНОЙ ГАЗОБИОГЕОХИМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ.....	26
2.1. Объекты натуральных и экспериментальных исследований.....	27
2.2. Выбор существенных информационных признаков.....	30
2.3. Принципы построения специальных технических средств.....	34
2.4. Разработка новых способов отбора проб.....	55
2.5. Техническое решение приборного комплекса.....	66
2.6. Экспериментальная оценка достоверности получаемой информации.....	71
3. ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ.....	80
3.1. Объекты натуральных и экспериментальных исследований.....	82
3.2. Выбор существенных информационных признаков.....	86
3.3. Принципы построения специальных технических средств.....	89
4. ТЕХНОЛОГИЯ АКВАГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	92
4.1. Методика тестирования водного объекта.....	92
4.2. Пространственно-временное распределение показателей.....	96
4.3. Область применения информационной системы.....	106
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	128
ЛИТЕРАТУРА.....	135
	141

Авилов Владимир Игоревич – главный научный сотрудник Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской Академии Наук, доктор технических наук, академик РАЕН

Авилова Светлана Давыдовна – главный научный сотрудник Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской Академии Наук, доктор биологических наук, академик РАЕН

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА АКВАГЕОЭКОЛОГИИ

Компьютерная верстка *О.Ф. Корсунский*
Корректор *Е.П. Бережкова*

Издание осуществлено за счёт средств авторов

Подписано в печать 11.11.2009. Формат 60х90/16
Бумага офсетная № 1. Заказ № 347
Объем 8,9 печ. л.

Тираж 300 экз.
Издательство «Прима-Пресс»
121170, Москва, Кутузовский пр. 8