

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уникальное Черное море – от начала исследований до океанологии XXI века

А.П. Лисицын

Настоящий том входит в серию работ, обобщающих новые материалы по морям Европейской России. Все эти моря относятся к водоемам континентальной коры (по тектонике плит), но существенно различаются по связи с океанами, особенностями питания осадочным материалом, геохимией, микробиологией, изотопным составом. Задача этой заключительной главы – не перечень содержания отдельных статей (их в монографии 28), а определение значений открытий в каждом из морей. В монографии построена реальная схема современного и древнего осадконакопления в масштабах литосферных плит – в первую очередь Евро-Азиатской (включая рассеянный осадочный материал внешних геосфер во взаимодействии осадконакопления с физикой, химией, биологией и геологией водоемов).

Черное море относится к наиболее изученным морям Мирового океана. Ему посвящено несколько тысяч статей и книг. И тем не менее остается много неизвестного. Одна из главных проблем, которая дискутируется уже более чем сто лет, – сероводородное заражение глубинных вод. Море состоит как бы из двух этажей с особыми условиями и процессами. Верхний этаж – кислородный (аэробный) – от поверхности до глубин от первых десятков до 200 м. Это освещенная богатая жизнью часть. Нижний – сероводородный, безжизненный слой (за исключением микроорганизмов). Поэтому Ю.И. Сорокин называл Черное море «бактериальным морем» [Сорокин, 1982].

Мощность верхнего кислородного слоя меняется в пространстве и во времени, причины этих изменений пока во многом спорны. Высказывались предположения, что заражение сероводородом может быть связано с подводным вулканизмом. Однако подводных вулканов и признаков вулканизма на дне Черного моря установить не удалось, хотя грязевые вулканы найдены в большом количестве.

Другая гипотеза, – что это связано с высокой продукцией верхнего оксидного слоя, значительными потоками органики и ее последующим разложением на дне. Решение этой проблемы необходимо, потому что такие события в прошлом нередко охватывали все океаны.

Как показано в этой монографии, для выяснения действительных причин заражения необходимы новые подходы – прямые исследования вертикальных потоков осадочного вещества из оксидного слоя на глубины. Потоки органики, как известно, меняются как в пространстве, так и во времени (по сезонам года).

Еще одна группа ученых привлекает данные исследований верхнего слоя донных осадков.

Наконец, слудующая группа – рассматривает новые данные, использующие радиоизотопы и стабильные изотопы углерода и серы. Эти исследования продолжались много лет, и проводились отечественными специалистами (Ю.И. Сорокиным, М.В. Ивановым, А.Ю. Леин, Н.В. Пименовым, М.Б. Гулиным и др.). Путь к этим исследованиям оказался очень долгим. Ведь первые данные о сероводородном заражении глубин моря были получены после первой российской глубоководной экспедиции на Черное море (1890 г.). В современном Мировом океане такое явление встречается очень редко – пока это единственное в Мире море с анаэробными глубинными водами (хотя сероводородное заражение исследовалось в некоторых заливах и фиордах). Для понимания этого явления необходимо определить геологическую позицию этого моря с точки зрения тектоники плит.

Краткая сводка по геологии горно-складчатого обрамления Черного моря дана в первой статье монографии Н.В. Короновским, а по сейсмическим исследованиям – А.А. Шрейдером. Важно отметить, что наряду с доказательствами того, что Черное море развито на континентальной коре, имеются также доказательства присутствия океанской коры – это, в частности, самые крупные грязевые вулканы на дне Черного и Каспийского морей, а также многочисленные холодные сипы, что, вероятно, связано с явлением субдукции с юга.

А.А. Шрейдер не только обобщил материалы по сейсмике всего моря, но и привел важные данные о мощностях и скоростях седиментации, которые, по его данным, изменяются от 9 до 12 см/тыс. лет. Начиная с олигоцена-миоцена шло заполнение впадин с выравниванием их дна.

Для конуса выноса крупнейшей реки водосбора Черного моря – р. Дунай, сейсмическая запись говорит о масштабах разгрузки осадочного вещества Верхнекарпатского озера.

Новые исследования – это спутниковые наблюдения не только для определения местоположения судна, но и для изучения вертикальных движений поверхности водосбора, которые определяются с миллиметровой точностью на расстоянии до 200 км. Инструментально установлено, что центральные части Большого Кавказа испытывают поднятие, а дно Черноморской впадины – опускается со скоростью 5,54 мм/год (Е.А. Глазырин).

Еще одна техническая новинка – многолучевой эхолот, с помощью которого составлены детальные карты континентального склона (до глубин 120 м). На этой основе удалось изучить крупные подводные каньоны (Е.А. Глазырин, В.М. Маравев) рек Мзымты и Шахе. Изучению подводных каньонов в нашей стране уделяется недостаточное внимание, поскольку для их исследований необходимо сочетание данных многолучевого эхолота и подводного обитаемого аппарата.

Глава вторая включает результаты работ по традиционно изучавшимся многие годы аэробным и анаэробным водам, причем в пределах одного морского водоема и в пределах одного и того же отрезка времени. Поэтому вторая особенность монографии состоит в том, что вопреки традиционной гидрохимии, изучающей в основном только растворенные формы элементов, здесь рассмотрены и твердые формы: в виде микрочастиц, в том числе $C_{орг}$ – носитель энергии за пределами слоя фотосинтеза (т.е. это образование верхнего слоя – хлорофильного). Существуют также газовые формы, которые зависят от давления воды.

Еще недавно морскую воду считали состоящей из растворенных форм элементов. За последние десятилетия удалось изучить содержание не только бактерий, макро- но и наночастиц, в том числе и других живых организмов и их остатков, и особенно нанопланктона, тонкого (менее 0,45 мкм) минерального вещества (это твердая фаза живого и неживого). Значительным оказалось содержание газов, особенно при высоком давлении, когда газовая форма переходит в растворенную.

Данных об этом теперь накопилось очень много и по водной толще, и в инертных экспериментах в океанологических обсерваториях. Это путь к решению многих вопросов. Здесь исследования могут быть проведены при разных давлениях с разной биотой на протяжении достаточного времени. Это – совместная работа нескольких институтов физического, химического, биологического и геологического направлений. Научное рассмотрение процессов взаимодействия различных фаз в различных условиях среды с участием живого и мертвого органического вещества, вещества бактерий – одна из важнейших проблем океанологии, имеющая не только научное, но и важное практическое значение.

Очень близки к этой проблеме данные по гидрохимии гидросферы, о поступлении ОВ в водоем с суши с речным стоком, с атмосферной взвесью, с осадочным веществом внешних геосфер [Лисицын, 1955, 1956, 2007, 2014].

Глава по гидрохимии Черного моря, по сути, разделяется на две части, которые находятся во взаимодействии. Первая – верхний кислородный слой. Здесь в пределах первой сотни метров под поверхностью сосредоточен весь кислород, растения и животный мир. Это хлорофильный слой – источник кислорода и органика.

Вторая часть – нижний этаж системы Черного моря (главный по объему) – это практически бескислородная (анаэробная) водная масса, где живут только микроорганизмы («море бактерий»).

Анаэробный слой взаимодействует с верхним тонким аэробным как в пространстве, так и по вертикали, а также во времени (по сезонам) и синоптическим

интервалам. Холодный глубинный слой изучен недостаточно. Необходима система стационарных установок (обсерваторий) с датчиками кислорода в верхних 200 м водной толщи или очень частые разрезы со станциями. Первая такая система уже разработана – это океанологические обсерватории особой конструкции, которые через 20 м по вертикали проводят круглогодичные определения не только кислорода, но и ряда других компонентов, взвеси и бактерий. Это автоматические глубоководные обсерватории (АГОС), которые успешно применялись нами на протяжении почти 20 лет (непрерывное изучение условий среды в пяти морях, расположенных на коре континентального типа). В этом томе приведены первые данные круглогодичной постановки (ноябрь 2014 г. – ноябрь 2015 г., см. главу 5). Впервые удалось увидеть дно моря в анаэробной зоне, аналогичной более ранним эпохам господства анаэробных океанов, приводящих к гибели всего живого на планете.

Рассмотрению пространственно-временных характеристик гидрохимической структуры Черного моря посвящена статья С.К. Коновалова с соавторами. Им удалось установить неконсервативность этих характеристик и присутствие устойчивого динамического равновесия между ежегодным их образованием.

Для работы в морских и океанских водоемах используют теперь прямые методы оценки потоков. Распространены не только автоматические глубоководные ловушки АГОС, но и малые седиментационные ловушки (МСЛ), устанавливаемые на короткое время (дни, недели). Большая ловушка имеет револьверное устройство внизу прямого конуса, где приемные флаконы меняются автоматически (по команде от таймера). Они устанавливаются обычно на год с автоматическим отбором проб ежемесячно, замена батарей станции – один раз в год. Сохранность от бактерий обеспечивается фиксатором в приемных флаконах. В настоящем томе приведены данные по работе АГОС с 1915–1916 гг. до 1918 г. Нами проведена также установка обсерваторий на следующие 2018–2019 гг. с использованием больших и малых ловушек и дополняющих их приборов.

В морской практике постановка приборов с применением вертикального троса с грузом на одном конце и плавучестью на другом называется буйковой. На тросе устанавливают (кроме ловушек) также и другие приборы (датчики температуры, кислорода, акустические измерители течений, самописцы прозрачности, мутности и др.). В нашей практике установка ловушек и обсерваторий проводилась во всех океанах на глубинах до 5 км – одно из достижений 4D-океанологии [Лисицын, 2014].

При исследованиях в пелагиали в настоящее время применяют также большой вариант обсерваторий (АГОС-Б) с приборами непрерывного действия (данные спутников, а также приборов для изучения не только толщи вод, но и верхнего слоя донных осадков до глубин 200 м). Удастся непрерывно изучать осадки анаэробного слоя. Таким образом, обсерватории дают возможность непрерывного исследования осадков в отрезках времени от первых часов до первых столетий (и даже тысячелетий).

Самая нижняя часть АГОС-Б (большой системы) включает приборы для отбора проб донных осадков (из самого верхнего слоя) и полужидких (наилкок – жидкое дно). Обычно мощность таких осадков составляет от долей сантиметра до 10–20 см, а в ряде мест жидкое дно отсутствует. Этот слой – совсем недавно осевшая часть осадочного потока, верхняя часть которого постепенно переходит во взвесь, а нижняя часть переходит в толщу донных осадков, т.е. уходит в прошлое.

Верхний полужидкий слой отбирают с помощью специальных приборов – мультикореров. Обычно это 4 пластиковых цилиндра, которые при срабатывании закрываются крышками сверху и снизу (чем обеспечивается сохранность стратификации придонной суспензии). Весь керн мультикорера длиной до 30–40 см используется для исследования и реконструкции недавних событий. Наконец, самая нижняя часть большой обсерватории – это длинная колонка, полученная трубкой большого диаметра – ТБД.

На обсерваториях АГОС-Б проводятся также предварительные (и замыкающие) вертикальные океанологические зондирования с отбором нужных проб из толщи воды батометрами. Первое зондирование – до постановки обсерватории, другие – в ходе ее посещения, заключительное – перед подъемом обсерватории.

Еще одна важная особенность работ с обсерваториями при их использовании на больших разрезах или на полигонах – синхронизация, т.е. срабатывание не только по горизонтам, но и по времени, что резко повышает качество исследований и надежность сопоставлений.

Станции в автоматическом режиме, как показывает многолетний опыт, отлично работают как в темноте арктических ночей, под толщей льдов, так и в аридной зоне, во время цунами, штормов и стихийных бедствий.

При установке измерителей течений на АГОС на разных горизонтах, также работающих в автоматическом режиме синхронно (или дискретно), удастся определять не только направление потоков взвеси, но и их скорость. Измерения течений во времени (направление и скорость) – это важная часть четырехмерной океанологии. Для горизонтов наблюдений строят «розы» ветров, как в метеорологии.

Другой метод изучения рассеянных форм осадочного вещества (взвеси) на глубинах с отбором больших навесок был впервые разработан и применен в первом рейсе НИС «Витязь» в 1949 г. Это метод мембранной ультрафильтрации [Лисицын, 1955, 1956]. Далее этот метод широко используется при геолого-геохимических исследованиях во всех океанологических экспедициях.

Фильтрацию проводят из проб глубинной воды, поднятой специальными «чистыми» батометрами (батометры Нискина и др.). Выбор горизонтов закрытия батометров определяется в ходе анализа вертикального зондирования с непрерывным определением сенсорами всех важных компонентов. Фильтрация ведется в вакууме в специальном помещении с соблюдением чистоты воздуха (по счетчикам частиц) [Лисицын, 1955, 1956, 2005]. Обычно оба эти метода (фильтрация и седиментационные ловушки) используются одновременно, особенно при работе

на обсерваториях типа АГОС-Б. Применение этих двух методов в комплексе с другими исследованиями при работах на станциях дает возможность разнообразных определений взвешенных форм рассеянного осадочного вещества. Гранулометрический спектр определяют с помощью счетчика частиц Коултера или других видов счетчиков частиц в воде.

В качестве стандарта для разделения частиц по крупности на взвешенные и растворенные в настоящее время используют порог 0,45 мкм. Частицы ниже этого диаметра относят, условно, к растворенным. Анализ растворенных форм осадочного вещества и отдельных его компонентов ведут с применением различных методов экстракции элементов из воды.

В настоящее время общее число таких новых определений составляет для Мирового океана многие десятки тысяч, что дало возможность определить среднее глобальное содержание от 0,1 до 1 мг/л и получить представление о рассеянном веществе Мирового океана.

Изучение взвешенных и растворенных форм осадочного вещества в целом, а также минеральных и биологических частиц, отдельных минералов и элементов и соединений взвеси в настоящее время становится неотъемлемой частью океанологии. Это новое направление изучения вод океанов и придонного слоя начала XXI века.

Из сказанного следует, что круг получаемой информации в океанологии за последние десятилетия значительно расширился, расширились также возможности и надежность исследований, когда они проводятся на основе данных, полученных в одном месте, на одной глубине, в одном времени года. Этим достигается синхронность определения в разных точках и на разных глубинах для обсерваторий, удаленных на сотни и тысячи километров. Все это важно, в том числе для Черного моря.

Особое значение эти работы имеют для моделирования процессов, когда используются не случайные параметры, а параметры 4-мерных измерений для места, по которому строится модель. Наконец, возможно, настанет время надежных (реальных) и работающих моделей, а не догадок.

Только сейчас становится возможным оценить вклады разных геосфер в разных климатических (а для океана также и тектоно-магматических) геосферах и зонах [Лисицын, Леин, 2018; Мировой океан, 2018].

Таким образом, сочетание новых методов исследования теперь дает возможность количественно (и в 4 измерениях) оценивать вклад разных геосфер в осадочные процессы в морях и океанах, т.е. наиболее объективно оценивать условия среды и климата в морях и на суше, причем как современные, так и в геологическом прошлом, с более надежным воссозданием палеоусловий среды и климата.

Толща донных осадков, таким образом, становится сейчас золотой летописью событий на планете в целом для времени от начала появления атмосферы и воды. Особенно важными сейчас представляются попытки прочитать летопись измене-

ний климата, в первую очередь для Европы, с определением циклов и трендов этих изменений. На основании этих циклов и прямых наблюдений представляется возможным прогноз погоды и климата для конкретных регионов, прежде всего Европы. Публикация коллективных монографий по континентальным морям – один из первых шагов в этом направлении.

Статья А.А. Клювиткина и др. (см. раздел 5.1) основана на анализе потоков осадочного вещества на основе круглогодичного исследования на первой большой (АГОС-Б) морской обсерватории в Черном море. Читатель может убедиться в целесообразности нового минералого-геохимического и биологического подхода с прямым измерением потоков всех компонентов в единицах потоков ($\text{мг}/\text{м}^2/\text{год}$). Это новое направление в изучении геохимии и седиментологии океанов.

Монументальная работа Т.А. Яниной по стратиграфии и палеогеостратиграфии Черного моря открывает главу об осадочных отложениях и развивает особое направление этих исследований, которые проводятся крупнейшими геологами России на протяжении уже более 150 лет. Этот почетный список открывает Н.И. Андрусов, который в 1889–1890 гг. обнаружил сероводородное заражение глубинных вод Черного моря и более 50 лет занимался его исследованием. Это А.Д. Архангельский и Н.М. Страхов, М.В. Муратов, Е.Н. Невеская – этот список занял бы целые страницы! Результатом стало развитие исследований фауны, в первую очередь малакофауны. Не только для Черного моря, но и для Каспия, Азовского, Аральского и других морей – и не только в общем, но и с удивительными деталями участков, заливов и бухт, и для природных каналов, которые когда-то соединяли эти моря между собой и со Средиземным морем, а через него – с Мировым океаном.

Участие Т.А. Яниной в коллективной монографии «Система Черного моря» – это, несомненно, большая удача! Мне думается, что впереди еще много интересных работ, чтобы использовать новые методы определения возраста, стратиграфии, изотопной стратиграфии для дальнейшего совершенствования этого замечательного направления в отечественной геологии и морской геологии.

Другая статья – по иловым водам южных морей принадлежит Ю.Н. Гурскому – это процессы метаморфизации этих вод, где участие биоты проявляется только работой бактерий анаэробного слоя. Взаимодействие кислорода и сероводорода, по Н.А. Ореховой и С.К. Коновалову перекликается со статьей А.Ю. Леин и М.В. Иванова, где использованы изотопные индикаторы. Авторы во многом расходятся, и опять возникает необходимость совместных работ на океанологических обсерваториях с получением надежных параметров.

Главная трудность при попытках построения моделей – в переходе к параметрам, которые меняются в пространстве и во времени (см. главу 1). Мне кажется, что донные океанологические обсерватории (и в частности АГОС) дадут значения параметров, необходимых не только для построения реальной модели и для определения вероятных ее изменений в пространстве и во времени (4D -модели). Такие работы запланированы силами двух-трех институтов на Чер-

ном море в 2019 г. Тогда обсерватории могут стать необходимой (параметрической) частью построения моделей.

К общепринятым исследованиям в рейсах научно-исследовательских судов с дискретным отбором проб на отдельных станциях необходимо добавить непрерывные круглосуточные, круглогодичные или многолетние сезонные исследования для получения необходимых для реальных моделей параметров. Многолетний опыт Лаборатории физико-геологических исследований ИО РАН с непрерывными исследованиями на протяжении от 3–4 до 15 лет показал, что для получения представительных реальных параметров на случайном ходе одномоментных процессов необходимы специальные постановки – обсерватории, размещенные в ключевых местах не только концентраций ($\text{мг}/\text{м}^2$) компонентов, но и изменения их во времени – потоков ($\text{мг}/\text{м}^2/\text{сут}$), т.е. необходимы четырехмерные исследования процессов с обязательной координатой времени. Именно это открывает возможности не только для синхронизации всей сети наблюдений, но и возможности их изучения в прошлом и прогноза на будущее. Удастся получить реальные значения параметров и реальные изменения во времени для построения моделей (обсерватория – мать моделей процессов).

Пока удавалось провести четырехмерные исследования – непрерывные, круглогодичные, на пяти морях Европейской России и в северной части Атлантики (см. серию монографий «Система морей...»).

Имеющийся опыт работ показал, что четырехмерные исследования обсерваторного типа могут происходить не только непрерывно на всех глубинах одновременно (синхронно), но и специализированно, например, для определения потоков загрязнений из рек, первичной продукции фитопланктона, а также бактериопланктона, потока пеллетов зоопланктона и др.

Вместе с тем необходима установка специализированных обсерваторий для оценки работы сорбционных насосов и биофильтров в устьях рек (граница река–море) с оценкой потоков загрязнений, форм взвеси и прямых оценок роли маргинальных фильтров по сезонам и годам.

Имеется опыт определения концентраций и потоков вещества (и загрязнений) во времени на аэрозольных обсерваториях, а также опыт биологических работ на шельфе и в пелагиали с количественным определением мощности бионасосов раннего типа и их сезонности.

Системы наблюдений 4D с помощью обсерваторий – это модель процессов с оценкой эффективности и внесением необходимых дополнений и изменений. Уникальный опыт Чернобыля дает право надеяться, что четырехмерные исследования «обсерватория–модель» – дело ближайшего будущего.

При планировании необходимо определять места постановки главных обсерваторий на шельфе, в Западной и Восточной котловинах моря, на хр. Андрусова и Шатского. Эти исследования должны быть дополнены специализированными обсерваториями в устьях рек (маргинальные фильтры) для получения данных первичной (бактериопродукция) и вторичной продукции через потоки, с детальным

изучением проб и др. Архитектура станций и размещение на них приборов для определения параметров могут меняться в зависимости от участников постановок.

Заключительные главы монографии посвящены стабильным изотопам, метану и нефтяному загрязнению Черного моря.

Самый большой раздел – радионуклиды и изотопный состав серы и углерода как результат геохимических процессов в Черном море. Это обширная статья А.Ю. Леин и М.В. Иванова о происхождении нижнего сероводородного слоя, известного отсутствием жизни. Эта работа новаторская, продолжавшаяся много лет. Именно с изучения особых бактерий удалось завершить многолетнюю дискуссию о происхождении сероводородного слоя в Черном море. По новым данным геохимиков и геологов такие условия возникали в прошлом не только для других морей, но и для океанов.

Радионуклидам скандия, цезия и плутония посвящены четыре взаимно связанные статьи, которые заканчивают изотопную часть монографии. Толчком к развитию этого направления стала катастрофа на Чернобыльской АЭС в 1986 г. с выбросом в атмосферу, а затем в пределы всего водосбора моря огромных количеств опасных для всего живого изотопов стронция, цезия и плутония. Эта катастрофа войдет в историю как одна из крупнейших. В деталях она записана не только в статьях, но и в донных отложениях и других вечных записях – природных самописцев.

До этой катастрофы уже были сходные первые ядерные взрывы (1945–1946 гг.) – выбросы с радионуклидами. Эти работы касались, в основном, пояса северного полушария (40°–50° с.ш.), где производились испытания оружия и накапливались загрязнения.

Большой удачей было создание коллектива высококвалифицированных сотрудников, их связи с международными организациями (МАГАТЭ и др.).

Исключительно важным было и то, что главным объектом исследований стали не суша, а моря – морская водная взвесь, а также донные осадки. Удалось уверенно проследить процессы распространения от источника до мест накопления, проследить путь радионуклидов, определить роль почвы и растений, распределение их в оксидном и в анаэробном слоях Черного моря.

Важно отметить большую роль нуклидов не только с точки зрения индикаторов в аэробном и анаэробном слоях, но и как индикаторов других процессов, а также для получения количественных показателей в единицах потоков вещества и энергии.

К сожалению, этот опасный и важный труд еще не получил должной оценки. Неожиданно Черное море становится новым не только по радионуклидам, но и в связи с быстрым ростом загрязнений р. Дунай из южной Европы и р. Днепр из центральной Европы, которые быстро возрастают. Это также нефтяные и газовые загрязнения (трубопроводы по дну моря), а также большую опасность для биоценозов представляют виды вселенцев.

В итоге читатель найдет новые идеи и подходы, многие из которых представлены впервые. Черное море с его сероводородным заражением – это современный аналог аноксидных океанов в прошлом (юра и древнее).