

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Эта книга – не отдельная монография по Черному морю, а очередной том коллективного исследования – многотомной монографии «Системы морей Европейской части России». Первые тома уже вышли из печати. Это «Система Белого моря» в четырех томах (2010, 2012, 2013, 2017 гг.), «Система моря Лаптевых» совместно с учеными Германии (2000 г.), «Система Балтийского моря» (2017 г.), «Система Каспийского моря» (2016 г.). Издание было поддержано грантом РФФ (№ 14-27-00114П «Седименто-биогеохимические исследования морей европейской части России (рассеянное осадочное вещество, донные осадки, диагенез)») и грантами РФФИ.

События, связанные с распадом СССР, не могли не сказаться на исследованиях в Черном море. Оно оказалось разделенным на зоны эксклюзивных интересов Грузии, Украины и России. Многие важные многолетние связи разорвались, а количество экспедиционных судов намного уменьшилось. Так, из многочисленного флота Института океанологии Академии наук России на Черном море осталось только судно прибрежного плавания «Ашамба».

Два судна для научного глубоководного бурения, которые строились на верфях в Херсоне и были близки к завершению, – переданы на слом. В это время только ученые-моряки из Крыма с большими трудностями продолжили работы в рейсах. Таким образом, Черное море – колыбель отечественной морской науки, где важные исследования начались еще в конце прошлого века и оказались почти забытыми. Исследования возобновились только в последние годы. Настоящая монография – плод совместных работ исследователей Черного моря, в основном тех, которые сохранили научные связи еще со времен до перестройки.

За эти годы изменились многие направления работ в море, приборы для забортных работ и для лабораторных исследований.

Данная монография не претендует на освещение всех новых результатов. Особое внимание уделено новым методам гидрофизики, микробиологии, геохимии и биогеохимии, изучению микро- и наночастиц и объединяющему их методу изотопных исследований (от бактерий и осадков до черномыльской метки). В одном томе не удалось собрать воедино все новые результаты – предполагается подготовка второго тома.

Все тома серии основаны на многолетних работах Лаборатории физико-геологических исследований и других подразделений Института океанологии РАН за последние два десятилетия. Работы в море и на водосборе впервые проводились на новом уровне понимания процессов – физических, химических, биологических и геологических, протекающих в ходе взаимодействия в пространстве и во времени всех геосфер как отдельных частей (блоков) системы, находящихся в непрерывном взаимодействии (как в пространстве, так и во времени).

Впервые удалось довести исследования по этим разделам в море не только на разрозненных океанологических станциях (дискретно), но и в одном и том же месте на обсерваториях-автоматах, работающих автономно на протяжении от первых часов до месяцев, сезонов и лет. Автоматические глубоководные обсерватории (АГОС) работают круглогодично. Это приборы-самописцы, необходимые для изучения изменения во времени основных параметров. Они включают также данные спутников (по содержанию взвеси, хлорофилла и др.) для верхнего слоя и данные по уникальному глубинному самописцу – в виде взвеси в толще вод и в толще донных осадков.

Удалось ввести в практику океанологических исследований не только новые приборы-автоматы, но и новые параметры в изучении процессов. Важнейшее из них – время. Изменения во времени проводятся в автоматическом режиме с разной дискретностью – от минут, часов–суток до месяцев, сезонов, лет и десятилетий. Рекордными по продолжительности пока являются исследования в Белом море – около 15 лет, т.е. около 5 тысяч наблюдений поверхности донных осадков с дискретностью 1 месяц. Смену обсерваторий проводят 1 раз в год в ходе рейсов.

Таким образом, океанологические исследования становятся четырехмерными (широта, долгота, глубина и время) и непрерывными.

При работе на станциях сейчас обычно используют также непрерывное вертикальное зондирование, которое дополняют данными обсерваторий.

Еще одна особенность современных работ в море – расширение исследований по вещественному составу микро- и наночастиц (МНЧ) размером  $>0,45$  мкм, которые обнаружены и изучаются не только в толще воды (в гидросфере), но и во всех взаимодействующих с морем геосферах (атмо-, био-, а также пресноводная часть гидросферы, эндо- (вулканизм), антропосфера, седиментосфера). Микро- и наночастицы и бактерии накапливаются в донных осадках, сохраняя во многом всю информацию. Работает глобальная программа MODIS–Aqua сканер цвета моря и самописец истории среды и климата планеты [Лисицын, 1955, 2001, 2014].

Нужно иметь в виду, что среднее содержание МНЧ в геосфере ничтожно – от 0,1 до 1 мг/л по данным тысяч измерений. В составе МНЧ присутствуют сотни тысяч и миллионы бактерий и архей.

Открылся новый мир на планете не только современного, но и далекого прошлого, существовавшего до появления кислородной атмосферы и хлорофилла

(мир бактерий и бактериохемосинтеза). Об этом говорят и новые данные по Черному морю (см. этот том).

Для извлечения информации о среде и климате необходимы сканирующие электронные микроскопы, атомная абсорбция, рентген и др.

Особое значение, как показывают данные по Белому, Каспийскому и Черному морям, имеют изотопные исследования S, C, O<sub>2</sub> и др. Для Черного моря они начались с изучения циклов углерода и серы: для определения продукции бактерий и причин появления сероводорода в водной толще. С появлением работ с использованием радиоактивных трассеров, открылась новая страница в изучении геохимии и биогеохимии воды, взвеси, газов и донных осадков. Здесь следует отметить исследования сотрудников Института биологии южных морей им. Ковальского, в особенности в связи с использованием черномыльской метки (см. этот том).

Седиментационные обсерватории в сочетании с непрерывным вертикальным зондированием – это только часть новой информации.

Другая часть обсерваторных наблюдений – данные, получаемые непрерывно со спутников на протяжении более пяти лет для верхнего слоя воды. Это данные о содержании взвешенных частиц, хлорофилла, о температуре, ледовом покрове и др.

Донные осадки также являются нижними этажами обсерваторий – природными самописцами среды и климата не только сейчас, но и во времени – от тысяч до миллионов лет.

Как показало изучение осадочного вещества, это записи не только морской среды и климата, но и других геосфер (атмосферы, гидросферы, пресноводной и морской биосферы, антропосферы).

Впервые возникла возможность изучения с помощью обсерваторий взаимодействия геосфер в пространстве – не только современных (по данным для толщи воды), но и древних – донные осадки.

Сравнительное изучение взвеси и донных осадков, проведенное в ИО РАН для пяти морей, дополняется прямыми определениями течений, а также автономными самописцами обсерваторий и непрерывными записями об изменениях температуры и других параметров на разных глубинах.

Таким образом, можно говорить о развитии нового направления в океанологии, причем не в отдаленном будущем, а уже сейчас. Эти возможности открылись не только для палеоокеанологии, геологии, но и для развития всех направлений океанологии (физики, химии, биологии).

Черное море, как отмечалось, это одно из пяти морей Европы и России. Общим для этих морей является их расположение на единой Евро-Азиатской макроплите, которая перемещается на северо-восток (по данным спутников и магнитным аномалиям) со скоростью от 2 до 7 см/год.

Все эти пять морей расположены на земной коре континентального типа (в отличие, например, от Норвежского и Гренландского, расположенных на коре оке-

анского типа). Многие черты процессов в истории Черного моря связаны с тектоническими (эндогенными) факторами.

Моря расположены в климатическом поясе от 40° до 50° с.ш. от семиаридного и аридного до ледового – арктического (Баренцево море), т.е. находятся также под влиянием факторов климатических.

Можно судить о среде и климате, записанных взвесью в водной толще, а также в толще донных осадков, восстанавливать изменение среды и климата по многочисленным индикаторам (особенно по изотопному составу, методам биостратиграфии, химическим и минералогическим маркерам). Эти данные по донным осадкам должны рассматриваться в сочетании с данными обсерваторий.

Еще одна особенность этой монографии – она написана разными авторами, которые могут иметь свою собственную точку зрения, отличную от принятой. Редакторы тома в ходе подготовки и обсуждения рукописей старались находить наиболее приемлемые решения. В итоге сотрудникам Лаборатории физико-геологических исследований ИО РАН удалось, при обязательном участии и помощи коллег других институтов, завершить первый этап исследований. Это академические институты (ИНМИ, ГИН, ИГ, ИФА и ИОА РАН), Университеты – Московский, Санкт-Петербургский, Томский, Новосибирский, Воронежский и Южный федеральный университет (РГУ), а также ученые из Германии, США и Италии. Т.е. это и международные исследования, работа которых регулярно обсуждается на Международной конференции (Школе) по морской геологии (с 1974 г. по настоящее время). Под руководством д.г.-м.н., профессора Ю.П. Хрусталёва с 70-х годов прошлого века были начаты регулярные научно-исследовательские работы по изучению седиментогенеза морей и озер аридной зоны, в том числе и шельфа Черного моря.

Особенно следует отметить активное участие известных ученых из морских институтов Крыма (Гидрофизического и Института биологии южных морей). Уникальным является привлечение данных по Чернобыльской катастрофе 1986 г., с выбросом большого количества радиоактивных техногенных трассеров, которые распространились не только на Черное море и его водосбор, но и почти на всю Европу. Этот трагический нечаянный эксперимент имел очень тяжелое завершение с многочисленными человеческими жертвами. Однако ученые с риском для здоровья и жизни на протяжении многих лет исследовали техногенные изотопы во всех срезах и получили уникальные результаты – они представлены в монографии.

Рейсы в Черное море проводились в основном на НИС «Профессор Водяницкий» в 2015–2018 гг. с участием сотрудников институтов РАН: Гидрофизического, Института биологии Южных морей, Института микробиологии, силами отряда геологов Института океанологии РАН.

Пробы воды, взвеси, потоки вещества получены не только для воды, но и для атмосферы, биосферы, антропосферы и донных осадков. Пробы проанализированы в Институте океанологии РАН. В 2018 г. проведена новая постановка АГОС на сезон 2018–2019 гг. Полученные данные будут представлены позднее.

Особенность работ этого года – применение седиментационных обсерваторий (вместе с рейсовыми данными) для параметризации моделей – это первая попытка такого рода!

В подготовке монографии активно участвовали Т.Ю. Зеленина, С.С. Изотова, Л.А. Гайворонская, Н.В. Ульянова, Ю.П. Новигатская.

Авторы выражают свою благодарность всем участникам морских экспедиций, а также экипажам экспедиционных судов, участвующих в сборе данных.

Особая благодарность сотрудникам ММБИ за предоставление результатов многолетних исследований техногенных изотопов катастрофы Чернобыльской АЭС в 1986 г. Это уникальные данные за несколько десятилетий работ в применении к изучению природы не только самого Черного моря, но и его обширного водосбора и прилежащих частей Европы.

### Краткий географический очерк

Внутриконтинентальное Черное море соединяется с Атлантическим океаном через систему проливов и морей в последовательности: пролив Босфор, Мраморное море, пролив Дарданеллы, Средиземное море. Площадь водного зеркала моря составляет 422 тыс. км<sup>2</sup>. Объем воды в Черном море – 555 тыс. км<sup>3</sup>. Годовой водный баланс моря включает поступление пресных и слабо минерализованных вод Азовского моря (30 км<sup>3</sup>) и соленых морских вод (200 км<sup>3</sup>) нижнебосфорского течения. Среди пресных преобладают воды материкового стока (310 км<sup>3</sup>) плюс 230 км<sup>3</sup> атмосферных осадков. Ежегодно с поверхности моря испаряется 560 км<sup>3</sup> и стекает в Мраморное море в составе верхнебосфорского течения 210 км<sup>3</sup>.

В Черном море ниже изобаты 200 м находится впадина площадью 306 тыс. км<sup>2</sup> с максимальной глубиной 2210 м. Бровка восточного и южного шельфа проходит на глубине 100–110 м при ширине 10–15 км. Лишь северо-западный шельф, расположенный на затопленной части Русской платформы, имеет ширину 200 км (на траверзе г. Одесса) и глубину до 120–150 м. Помимо шельфа в строении морфологии дна моря выделяются крутопадающий склон и пелагиаль, разделенная хребтом на западную и восточную халистазы.

**Водосбор.** Водосборный бассейн Черного моря расположен в двух климатических поясах: гумидном и аридном. Его можно разделить на северную, среднюю и нижнюю части. Северная часть захватывает южную половину Русской платформы и характеризуется развитием пологого рельефа и деятельностью крупных равнинных рек (Днепра, Днестра и Южного Буга), размывающих осадочные и метаморфические породы и почвы.

Средняя часть водосбора – зона альпийской складчатости с горными сооружениями Кавказа на востоке, Карпат и Альп – на западе. Южная часть водосбора слагается древними горными сооружениями Анатолии. Здесь размываются в ос-

новном эффузивные породы – туфы и кремнистые отложения, и частично магматические, метаморфические и осадочные комплексы.

Поставка осадочного материала с водосборных площадей происходит, в основном, по гумидной схеме. Климат – континентальный на северо-западе и севере, семиаридный и средиземноморский у берегов Крыма и Кавказа.

Площадь водосбора рек Черноморского бассейна составляет  $\sim 1875 \cdot 10^6$  км<sup>2</sup>, из них  $\sim 216 \cdot 10^6$  км<sup>2</sup> относится к зоне с незначительным стоком [Лаврова и др., 2011].

Ориентировочно количество взвеси и растворенного материала, приносимого реками в Черное море, составляет  $(127\text{--}144) \cdot 10^6$  т/год (твердый сток) и  $25 \cdot 10^6$  т/год (растворенный). Самый крупный поток взвеси идет с рекой Дунай –  $(68\text{--}83) \cdot 10^6$  т/год. Днестр, Южный Буг и Днепр приносят  $5,1 \cdot 10^6$  т взвеси в год, реки Кавказского побережья –  $18,8 \cdot 10^6$  т/год, реки Турции –  $35,6 \cdot 10^6$  т/год.

**Гидрология.** Поступление в Черноморский бассейн вод, резко различающихся по солености, в сочетании со значительной глубиной моря приводит к образованию высокого вертикального градиента солености и плотности водных масс.

Соленость поверхностных вод примерно вдвое ниже солености вод океана (17,5–18,3 епс), а соленость придонных вод в глубоководной зоне составляет 22–22,5 епс. Наличие ярко выраженных галоклина и хемоклина препятствует перемешиванию поверхностных кислородсодержащих вод с глубинными бескислородными, что приводит к постоянной стратификации водной толщи в глубоководной зоне Черного моря. В нижнем горизонте кислородсодержащих вод преобладают продукты аэробного окисления органического вещества – окисленные формы азота и серы (нитратов, нитритов и элементарной серы). Продукты анаэробного разложения органического вещества (сероводород, тиосульфат, аммоний, метан, CO<sub>2</sub> и др.) содержатся в анаэробных горизонтах водной толщи.

Современный уровень моря, его гидрологический и гидрохимический режимы начали устанавливаться в верхнеголоценовое время (около 5000 лет назад). К настоящему времени около 90% объема Черноморского бассейна заполнено бескислородными (анаэробными) глубинными водами и только 10% объема приходится на поверхностные распресненные кислородсодержащие (аэробные) воды.

Для Черного моря характерно периферийное кольцевое течение, направленное против часовой стрелки (циклонический круговорот), со скоростью 20–40 см/с. В центральной части моря господствуют слабые течения со скоростью менее 10 см/с.

Выделяется западный циклонический круговорот, образующий западную халистазу, занимающую всю западную половину моря. От восточной половины моря западная халистаза отделяется меридиональным течением. Восточную халистатическую область образует восточный циклонический круговорот.

По распределению величины условной плотности воды ( $\sigma_t$ ) выделяются две основные градиентные зоны, первая из которых формируется летом на глубинах 20–30 м, что обусловлено снижением температуры воды с глубиной в слое термоклина, вторая зона – зона хемоклина на глубине 150–200 м, где возрастание плотности с глубиной обусловлено увеличением солености воды по вертикали. По-

ложение зоны хемоклина в значительной мере совпадает с положением верхней границы сероводородной (анаэробной) зоны моря.

Существование хемоклина и пикноклина ниже прогреваемой эвфотической зоны препятствует процессу осенне-зимней конвекционной циркуляции ниже 60–80 м в центре халистаз и 80–100 м на их периферии.

Глубина конвекционной циркуляции определяет глубину залегания градиентного слоя редокс-потенциала, разделяющего аэробную и анаэробную зоны, поскольку именно конвекционная циркуляция поставляет кислород в толщу воды.

Интенсивность вертикального водообмена регулирует биологическую продуктивность.

Воды глубоководных районов моря приближаются по оптическим характеристикам к прозрачным океаническим водам (15–25 м по диску Секи), но их прозрачность снижается до 5–15 м в прибрежных районах и в северо-западной части моря.

Индикатором относительной мутности воды служит показатель ослабления направленного света ( $C$ ). В слое 0–200 м наблюдаются экстремумы, соответствующие положению слоев скопления в толще воды взвеси автохтонного (биологического) и аллохтонного (терригенного) происхождения на глубинах 110–130 и 160–180 м. На глубине 110–130 м наблюдалось скопление массы фекалий планктонных рачков и отмершего фитопланктона, оседание которых задерживается в слое их нейтральной плавучести. Над верхней границей сероводородной зоны понижение прозрачности может быть связано с образованием взвеси, состоящей из гидроокислов железа и марганца, скоплений бактериопланктона и простейших.

**Гидрохимия.** Ионный состав солей, растворенных в черноморской воде, отличается от состава солей в океанах повышенным содержанием  $\text{HCO}_3^-$ -иона и величины общей щелочности, образующихся за счет поступления речных вод в поверхностные горизонты водной толщи и, особенно, за счет повышения концентрации  $\text{CO}_2$  в анаэробной зоне в результате разложения органического вещества.

Распределение ионов  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  в толще черноморской воды аномально по сравнению с океанской водой. Соотношение между концентрацией этих ионов и величиной солености меняется в результате активных биогеохимических процессов, протекающих в толще воды: деструкции органического вещества, редукции сульфатов, окисления сероводорода до сульфатов, сопряженных с редукцией сульфатов процессов метаногенеза и метаноокисления и др.

Все перечисленные процессы трансформируют взвесь и готовят ее к седиментации.

Над пикноклином на нижней границе аэробной зоны скапливаются в виде взвеси нерастворимые оксиды железа и марганца. В анаэробной зоне железо присутствует в растворенной закисной форме. Ионы меди и цинка в максимальных концентрациях присутствуют в аэробной зоне, где они связываются в сульфиды и постепенно осаждаются на дно. Железо и марганец накапливаются в глубинных

анаэробных водах в виде коллоидных форм и тонкодисперсных взвесей сульфидов, карбонатов и растворенных закисных ионов.

В летнее время на глубинах 20–30 м у верхней границы термоклина часто формируется слой кислородного максимума (130–140% насыщения) за счет активного фотосинтеза фитопланктона.

Промежуточная редокс-зона расположена между кислородной и сероводородной зонами у нижней границы хемоклина. В редокс-зоне происходят интенсивные процессы химического и биологического окисления восстановленных соединений, образующихся за счет бактериального анаэробного распада органического вещества.

Ниже промежуточной зоны до дна простирается анаэробная сероводородная зона с концентрацией сероводорода от 0,05–0,3 мг/л до 11–12 мг/л, но чаще концентрация сероводорода в пределах анаэробной зоны возрастает до глубины 1500 м и далее стабилизируется на уровне 9,5 мг/л. Максимум концентрации сероводорода в толще воды приходится на осень [Сорокин, 1982]. Сероводород присутствует в воде анаэробной зоны в виде гидросульфидного иона  $\text{HS}^{1-}$  (на 80–90%), остальная часть сероводорода присутствует в виде сульфидного иона  $\text{S}^{2-}$ .

Помимо сероводорода в воде анаэробной зоны содержится тиосульфат – промежуточный продукт химического окисления сероводорода, как было доказано Ю.И. Сорокиным прямыми экспериментами с меченым сульфидом.

В воде сероводородной зоны накапливаются газы: азот, углекислота и метан. Черноморский метан до начала 1990-х годов привлекал существенно меньше внимания исследователей, чем сероводород. К этому времени было опубликовано всего три работы, в которых рассматривалось распределение метана в водной толще Черного моря [Atkinson, Richards, 1967; Hunt, 1974; Scranton, 1977].

## Взвесь

*Органическое вещество в водной толще.* В поверхностных слоях воды Черного моря содержится 3,2–3,7 мг/л растворенного органического углерода (РОУ). В более глубоких слоях концентрация РОУ постепенно снижается до 2,3–2,5 мг С/л на глубинах 1000–2000 м [Дацко, 1959]. В Черное море поступает с речным стоком значительная масса аллохтонного сильно метаморфизованного органического вещества гуминовой природы, устойчивого к бактериальному разложению.

Содержание взвешенного органического углерода (ВОУ) в воде Черного моря составляет 0,2–0,4 мг С/л, или 10% от его суммарного содержания. У нижней границы кислородной зоны на глубинах 110–115 м на большей части акватории Черного моря обнаруживается тонкий слой плотной аккумуляции взвешенного органического детрита с концентрацией «органики» 7 мг С/л. Выше и ниже этого слоя концентрация «органики» не превышала 0,4 мг С/л. Основную массу органической взве-

си составляют растительный детрит, остатки отмершего фитопланктона и фекалии планктона. Это слой нейтральной плавучести перечисленного материала. Концентрация усвояемого растворенного и взвешенного ОВ в морской воде составляет 0,6 мг С/л, или 20–25% от содержащегося в воде общего органического углерода.

Приходная часть баланса органического углерода состоит из первичной продукции, продукции хемосинтеза и аллохтонной органики стока рек и воды Азовского и Мраморного морей. Расходная часть баланса включает минерализацию в кислородной зоне и в анаэробной зоне, сток в другие бассейны, пополнение запаса растворенной органики в воде, осаждение на дно.

Первичная продукция фитопланктона, по данным радиоуглеродного метода, составляла 200–250 г С/м<sup>2</sup>·год [Сорокин, 1982]. В северо-западной части моря величина первичной продукции – минимум 300 г С/м<sup>2</sup>. Общий уровень концентрации биогенных элементов в эвфотической зоне и их запас у нижней ее границы типичны для мезотрофного глубокого моря умеренной климатической зоны. Горизонтальные и вертикальные движения водных масс, сезонное конвекционное перемешивание верхних слоев воды и сгонно-нагонные течения, по данным разных авторов, обеспечивают поток биогенных элементов из глубинных слоев моря в зону фотосинтеза.

Самые серьезные преобразования состава и количества взвеси происходят на шельфах Черного моря.

Шельфы, располагаясь на границе с континентами, являются сложной системой, которая состоит из механических, физических, гидрохимических, геохимических и биологических барьеров. Все эти барьеры затрудняют количественные оценки вертикальных потоков оседающего вещества в пределах шельфа, количественные оценки выноса осадочного материала от берегов на большие глубины открытого моря, и особенно они осложняют изучение процессов геохимической трансформации вещества взвеси при прохождении от устьев рек к морю.

Шельфы Черного моря заметно различаются по площади, глубине, влиянию речного стока и по антропогенному влиянию. Выделяются Северо-Западный, Северо-Восточный, Кавказский и Анатолийский шельфы. Лучше других изучен Северо-Западный (СЗ) шельф – наиболее важный промысловый район моря.

## Северо-Западный шельф

Широкий мелководный северо-западный шельф занимает площадь 48000 км<sup>2</sup>, или ~11% поверхности моря с объемом воды 1150 км<sup>3</sup> и средней глубиной ~24 м. Главным поставщиком осадочного материала в Черное море является зона альпийской складчатости: р. Дунай и горные реки Кавказа поставляют 61–68% материала взвеси.

Уровень Черного моря имеет ярко выраженную сезонность и зависит от стока рек, в первую очередь Дуная и Днестра. Среднегодовая температура воды моря в 2007–2009 гг. увеличилась по сравнению с 1982–1993 гг. на 1°С (с 15°С до 16°С).

В период 1860–2008 гг. сток р. Дунай увеличился при заметной межгодовой изменчивости на  $0,126 \text{ км}^3/\text{год}$  ([Mikhailov, Mikhailova, 2007], цитир. по [Лаврова и др., 2011]).

Река Дунай – вторая по длине река в Европе протяженностью 2857 км, дренирует площадь  $817000 \text{ км}^2$ . Дунай берет начало в районе Black Forest (Черный лес) в Германии, протекает по семи европейским странам и впадает в Черное море на территории Румынии. Дунай выносил в море в течение 1960–1970 гг.  $60 \cdot 10^6 \text{ т/год}$  растворенного и  $68 \cdot 10^6 \text{ т/год}$  взвешенного материала [Ропа, 1993].

Для оценки процессов микробной деструкции органического вещества чрезвычайно важно знать величину первичной продукции фотосинтеза (ППФ). В 2002 г. опубликована новая среднегодовая величина ППФ для мелководного северо-западного района и для глубоководной части моря (в зимний и летний периоды). Максимальная (до  $1720 \text{ мг С} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$ ) продукция фитопланктона зафиксирована в мае. Измерения сделаны в верхнем слое водной толщи, в зоне смешения речной дунайской и морской воды, при разной солености (от  $<0,3$  до 17 епс) и температуре: в апреле 1997 г. ( $7,4^\circ\text{C}$ ), мае 1997 г. ( $9,7^\circ\text{C}$ ) и в июле 1995 г. ( $24,9^\circ\text{C}$ ).

*Район устьевого взморья рек* – это зона смешения речных и морских вод и основной поставщик взвешенного и растворенного материала в море.

Данные по содержанию взвеси в водной толще устьевого взморья р. Дунай приведены в работах по материалам 8-й экспедиции НИС «Витязь» в 1984 г. [Хрусталев и др., 1988]. Содержание взвеси в районах устьевого взморья колебалось от  $13\text{--}16 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$  в речных водах до  $1 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$  в морской воде. В составе взвеси был обнаружен терригенный и аутигенный (хемогенный) материал и разнообразный органический детрит.

В материалах EROS показано распределение концентрации взвеси, содержания  $\text{BOY}$  во взвеси и процентное содержание  $\text{BOY}$  от взвеси в зависимости от солености в зоне смешения дунайской и черноморской воды в протоке Chilia в апреле 1997 г. (зимний период), в протоке Sulina в апреле и мае 1997 г. (весенний период) [Saliot et al., 2002].

Самая высокая концентрация взвеси характеризует воды протоки Chilia с соленостью менее 1 епс. С ростом солености от 0,5 до 18 епс количество взвеси падает до  $0,12 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ . Другими словами, при движении от устья реки к морю происходит уменьшение количества взвеси и рост процентного содержания  $\text{C}_{\text{орг}}$  во взвеси. В распределении  $\text{POY}$  такая закономерность не отмечена.

О резком снижении концентрации взвеси в зоне смешения речных и морских вод известно из работ А.П. Лисицына [1994, 2014].

Содержание взвеси и  $\text{BOY}$  в зоне смешения дунайской воды с черноморской зависит от величины солености: чем выше соленость, тем меньше взвеси присутствует в воде и зимой, и летом. Важно отметить, что процентное содержание  $\text{BOY}$  во взвеси, напротив, сильно растет при увеличении солености до 16 епс.

В апреле–мае 1997 г. в северо-западном районе моря, по данным спутникового сканера цвета, изучалось распределение взвеси и концентрации хлорофилла «а» (Chl-a) во взвеси (Modular Optoelectronic Scanner на борту спутника IRS-P3). Концентрация Chl-a на северо-западном шельфе варьировала от 0,5 до 10–15 мг·м<sup>-3</sup>, с максимумом в июле 1995 г., минимумом в апреле, а в остальные месяцы около 5 мг·м<sup>-3</sup>. На остальной акватории моря концентрация Chl-a с июля по октябрь изменялась от 0,5 до 2 мг·м<sup>-3</sup>, а на северо-восточном шельфе – от 2 до 5 мг·м<sup>-3</sup>. Высокая концентрация Chl-a (до 15 мг·м<sup>-3</sup>), в эстуарной зоне р. Дунай интерпретируется как комплексный эффект флювиального потока, строгой вертикальной стратификации и поверхностной циркуляции, определяющих присутствие и распределение взвешенного и растворенного материала в поверхностном слое водной толщи.

*Биогенные элементы в водной толще устьевого взморья.* Влиянием речного стока объясняются высокие концентрации биогенных элементов (NH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>-NO<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub>), высокие значения отношений неорганического растворенного азота к неорганическому растворенному фосфору и высокая концентрация Chl-a в зоне смешения р. Дунай–море по сравнению с морской водой (соленостью более 17 епс).

Исследованы концентрации CH<sub>4</sub> и O<sub>2</sub> в зоне смешения вод р. Дунай с черноморской водой различной солености. На всех станциях наблюдалось увеличение солености сверху вниз по водной колонке, падение концентрации кислорода в придонной воде до 0,1 мг O<sub>2</sub>·л<sup>-1</sup> и рост концентрации метана ко дну. Концентрации Cl, CH<sub>4</sub>, Alk и O<sub>2</sub> в придонной воде в разных районах приустьевого взморья мало различаются. Исключение – район дельты р. Дунай, где наблюдались повышенные концентрации метана до 13 мкл·л<sup>-1</sup>, ст. 19.

Скорость подъема биогенных элементов в зоне смешения река–море измерялась с использованием различных трассеров (<sup>14</sup>C, <sup>15</sup>N, <sup>32</sup>Si, <sup>32</sup>P) для определения максимума процесса эвтрофикации моря за счет поступления вод р. Дунай [Ragueneau et al., 2002]. Обнаружена линейная зависимость BOY, BOA (взвешенного органического азота) от концентрации Chl-a в продуктивный период [Ragueneau et al., 2002]. Во все сезоны концентрация биогенных элементов и Chl-a были значительно выше в дунайской воде по сравнению с морской.

Распределение органического материала во взвеси, коллоидах и в истинных растворах исследовалось в главных протоках дельты р. Дунай – Chilia и Sulina в конце зимы (апрель) и в начале весны (май) в 1997 г. [Saliot et al., 2002]. Исследования показали, что общее количество взвеси зимой уменьшается по сравнению с весной за счет активности биологических процессов в зоне смешения пресных и морских вод. Об этом свидетельствует также распределение жирных кислот в ОВ протоки Sulina, являющихся индикаторами присутствия фитопланктона и бактериальной активности. Весной с изменением солености происходят изменения в составе взвешенного органического вещества, что связано с лизисом клеток речной популяции планктона в ответ на изменение солености. Концентрация POY в воде Sulina изменяется по сезонам: весной – 2,9 мг·л<sup>-1</sup>, зимой более 4 мг·л<sup>-1</sup> [Saliot et al., 2002].

В составе РОУ присутствуют два химически лабильных компонента с низкомолекулярным весом: аминокислоты и углеводы. В разделе 3.1 показана зависимость их распределения от солености в зоне смешения вод проток Chilia и Sulina зимой (апрель 1997 г.) и протоки Sulina весной (май 1997 г.) с черноморской водой. С увеличением солености концентрация аминокислот и углеводов в составе РОУ заметно убывает, особенно в зимний период.

В зоне смешения речных и морских вод наблюдается резкое падение концентрации взвеси («маргинальный фильтр» по А.П. Лисицыну). Так, например, в октябре–декабре 1984 г. в зоне смешения вод Дуная и черноморской воды не удалось собрать взвесь. На станции в 15 милях от устья реки в водах с соленостью 17,5 епс в поверхностном водном слое (0–10 м) концентрация взвеси колебалась от 0,23 до 1,14 мг·л<sup>-1</sup>, а в слое 50–100 м составила всего 0,03–0,13 мг·л<sup>-1</sup>. Исследование закономерностей образования взвеси на шельфе Черного моря проводили также сотрудники Ростовского университета в течение десятка лет, ежегодно по сезонам (см. раздел 5.2).

Седиментогенез на северо-западном шельфе протекает, в основном, в платформенных условиях за счет речной взвеси, поступающей из гумидных зон, и в меньшей степени – за счет эоловой взвеси и при абразии берегов. Если не считать абразионный материал, то основной поток взвеси состоит из очень тонкого пелитового материала, надолго задержавшегося в толще воды и транспортируемого на значительные расстояния от устьевых зон. Для района характерна высокая продуктивность фито- и зоопланктона и присутствие биологического материала во взвеси.

Максимальное количество взвеси в 1985–1992 гг. наблюдалось в водной толще дельты р. Дунай (более 164 г см<sup>-2</sup>·год<sup>-1</sup>) [Денисов, 1998]. По масштабам аккумуляции взвеси черноморский шельф относится к «лавинному типу седиментации» (по А.П. Лисицыну).

Распределение растворенных н-алканов 25–35 мкг/л также зависит от солености в зоне смешения река–море. Зимой минимум концентрации н-алканов (0,2 мкг л<sup>-1</sup>) связан с соленостью ~4 и 6 епс. Летом наблюдается падение концентрации н-алканов с 0,7 до 0,2 мкг·л<sup>-1</sup> при росте солености от 3 до 15 епс.

Заканчивая краткий географический очерк Черного моря, можно подчеркнуть, что целью написания монографии «Система Черного моря» является анализ современного состояния и основных процессов, происходящих в море, и использование полученных данных для сравнения с палеоводоемами, существовавшими на месте Черного моря с миоцена: солоноватоводными (Понтическое, Чаудинское, Древнеэвксинское, Новоэвксинское) и солеводными (Сарматское, Меотическое, Карангатское).