

2.2. Гидрохимия северо-западного шельфа Черного моря в современный период

С.И. Кондратьев

Введение

Северо-западный шельф (СЗШ) Черного моря – один из самых сложных для исследования районов Черного моря. Эта акватория подвержена влиянию не только стока Дуная, содержащего отходы промышленности и жизнедеятельности десятка государств Европы, но также загрязненных стоков Днестра и Днестра, и по-этому испытывает чрезвычайно сильную антропогенную нагрузку [Зайцев, 1992, 2006; Aubrey et al., 1996; Брянцев и др., 1997; Беляев и др., 2001; Орлова и др., 2001, 2007; Grégoire, Lacroix, 2003; Иванова, 2004; Берлинский и др., 2004; Дятлов и др., 2013]. С пресноводным стоком поступает большое количество биогенных элементов, что обеспечивает в этом районе обильную кормовую базу для фито-планктона в течение всего года.

В весенне-осенний период в поверхностном слое вод всего СЗШ идет активное потребление фитопланктоном элементов главного биогенного цикла (соединений азота, кремния и фосфора) с образованием кислорода в процессе фотосинтеза. В придонном слое вод происходит обратный процесс – кислород активно расходуется на окисление осевшего взвешенного органического вещества (ВОВ) с выделением минеральных форм биогенных элементов в результате деструкции. Расход значительного количества кислорода на разложение ВОВ периодически приводит к состоянию придонной гипоксии (насыщение вод кислородом менее 30%), регулярно наблюдающейся в этом районе и неоднократно обсуждавшейся в литературе [Tolmazin, 1985; Беляев др., 1997; Берлинский др., 2003; Тучковенко др., 2003; Украинский, Попов, 2009; Заика, Бондарев, 2010; Howarth et al., 2011].

Пожалуй, именно придонная гипоксия и ее завершающая стадия – появление сероводорода при полном исчезновении кислорода, с последующим замором рыбы, вызвали повышенное внимание к СЗШ во второй половине XX века. Если

в начале века незагрязненные воды этой акватории, примыкающей к устьям четырех крупных рек, представляли собой прекрасную базу для воспроизводства рыбных богатств, то в последнее время на СЗШ регулярно наблюдаются заморы рыбы, что естественно вызывает вопросы о причинах этого крайне нежелательного явления. Вот почему начиная с 50-х годов на СЗШ стали регулярно проводиться океанологические исследования, интенсивность которых заметно упала только в 90-х годах после развала Советского Союза.

Важность и сложность этого района привлекали внимание многих исследователей, которые неоднократно проводили обобщения натуральных данных, среди наиболее известных можно выделить работы [Большаков, 1970; Tolmazin, 1985; Зайцев, 1992; Zaitsev, 1998; Гаркавая др., 1998, 2005; Природные..., 1999; Нестерова, 2001; Северо-западная..., 2006]. Во всех этих работах неизменно подтверждалась неблагоприятная экологическая обстановка на СЗШ с продолжающимися заморами рыбы в летний период, однако в последние годы был сделан обнадеживающий вывод об улучшении состояния экологии шельфа [Ткаченко и др., 2008; Oguz, 2010; Лоева и др., 2013; Берлинский и др., 2014].

Границы и районирование СЗШ

Для начала следует определиться, собственно о какой акватории северо-западного шельфа Черного моря будет идти речь в данном обзоре. Более общая задача – до каких глубин акватория Черного моря должна считаться шельфом конкретно с точки зрения гидрохимии. Общепринято определение континентального шельфа как прибрежного района с глубинами до 200 м [Безруков, 2006; Доронин, 2007]. Однако в данной работе глубины шельфа Черного моря следует ограничить, пожалуй, даже не 150 м, как это рассматривают [Рябцев и др., 2005; Shapiro, 2011], а всего 100 м, именно после этого горизонта начинается значительное возрастание угла наклона дна северной части шельфа. Достаточно взглянуть на расположение изобат в северо-западной части моря (рис. 2.2.1), чтобы убедиться, что большая часть акватории шельфа имеет глубины до 50 м (ориентировочно по линии м. Тарханкут – м. Калиакра), значительная часть располагается до изобаты 100 м (приблизительно по линии м. Херсонес – м. Калиакра), а за 100-метровой глубиной (возле берегов Румынии и Болгарии за 150-метровой глубиной) наблюдается сгущение изобат, то есть быстрое увеличение глубин при удалении от ближайшего берега. Определенный в границах от м. Херсонес до м. Калиакра северо-западный шельф занимает 16% акватории Черного моря (68390 км²) и всего 0,7% объема вод (3555 км³), максимальная ширина шельфа достигает 220 км [Иванов, Белокопытов, 2011].

Изобату 100 м, которая представляет среднюю границу области распространения трансформированных речных вод на СЗШ, А.Н. Тамайчук [2009] рассматривает

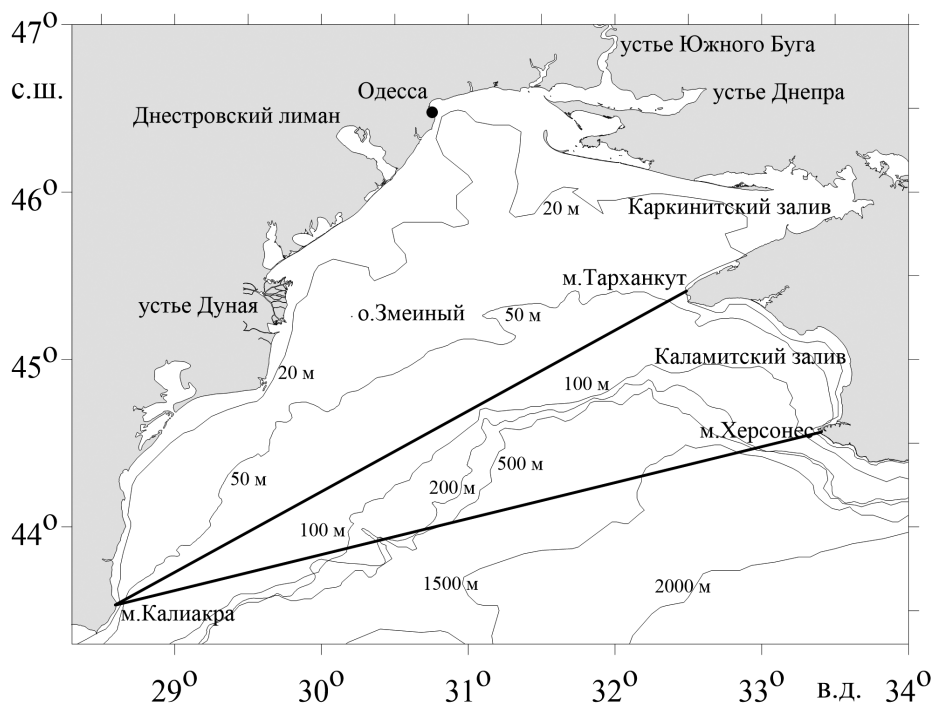


Рис. 2.2.1. Северо-западный шельф Черного моря.

как естественную географическую границу, отделяющую друг от друга качественно различные природные комплексы северо-западной части Черного моря и глубоководной части моря. Хорошее совпадение с изобатой 100 м обнаруживает и внешняя граница основного черноморского течения (ОЧТ), проведенная по экстремумам его меандров на обобщенной схеме циркуляции Черного моря [Титов, 2002].

С точки зрения гидрохимии изобату 100 м следует считать бровкой или кромкой шельфа Черного моря не только потому, что на ней происходит изменение угла наклона дна, по ней проходит максимальная граница распространения вод рек на СЗШ и она совпадает с внешней границей ОЧТ, но и по данным вертикального распределения кислорода [Stanev et al., 2017, 2018]. Содержание кислорода в водах Черного моря начинает стремительно уменьшаться в оксиклине, который располагается на изопикнической поверхности $\sigma_t = 14,0\text{--}14,2 \text{ кг/м}^3$, и достигает 30-процентного насыщения (т.е. состояния гипоксии) примерно на изопикне $\sigma_t = 15,0 \text{ кг/м}^3$, что ориентировочно соответствует глубине 100 м. После чего на глубинах более 130 м (или несколько выше в зависимости от района) исчезают бентосные организмы [Zaitsev, Mamaev, 1998].

Поэтому, если продолжить размеры не только северо-западного, но и любой части черноморского шельфа до классической глубины 200 м, или даже всего до

150 м, то при любом обсуждении гидрохимии шельфовых областей придется рассматривать такой интересный вопрос, как положение границ субкислородной и сероводородной зон на кромке континентального склона Черного моря, что по важности, сложности и объему информации вполне заслуживает отдельного обзора.

Если же теперь вернуться к основной причине, вызвавшей интерес к СЗШ – возникновению придонной гипоксии в теплое время года (с мая по ноябрь [Shapiro, 2011]), то пределы ее распространения редко выходят за глубины более 50 м, то есть за условную линию м. Тарханкут – м. Калиакра, хотя пятна периодической сезонной гипоксии регистрируются не только в прибрежных и приустьевых зонах, но и на глубинах около 100 м [Заика, Бондарев, 2010].

Рассматривая особенности гидрохимии вод СЗШ в настоящее время следует отдавать отчет, что на уровне 90-х годов XX века, вследствие развала СССР изменился прежде всего способ получения натуральных данных. При Советском Союзе функционировала система ОГСНК, при которой регулярно проводились экспедиционные комплексные (гидрология, гидрохимия, гидробиология) исследования всей акватории СЗШ, таким образом, обеспечивалась возможность сравнения содержания тех или иных гидрохимических элементов в различных районах шельфа. После 90-х годов последней «всеполюсной» съемкой Черного моря следует считать, пожалуй, 35-й рейс НИС «Профессор Колесников» в 1995 г. Далее возможности отдельных институтов не позволяли организовать сбор натуральных данных по всей акватории СЗШ. Снижение интенсивности получения натуральных данных одновременно на всей акватории СЗШ сменилось периодом изучения отдельных районов, иногда со специфическими задачами.

Особенности динамики вод СЗШ

Понятно, что при рассмотрении особенностей пространственного распределения гидрохимических компонентов в водах СЗШ следует, прежде всего, ясно представлять особенности динамики вод этого района.

Самой важной особенностью северо-западного шельфа Черного моря является наличие устьевых областей четырех крупных рек (Дунай, Днепр, Днестр, Южный Буг) [Тучковенко, Торгонская, 2007], пресный сток которых оказывает существенное влияние на пространственно-временную изменчивость термохалинной структуры. Доминирующее влияние на динамику и термохалинную структуру вод (изменчивость циркуляции, проникновение речных вод, апвеллинг и т.д.) оказывают ветровые условия, под которые быстро подстраиваются ветровые течения. По мнению [Тамайчук, 2009], особенности термохалинной структуры вод шельфа определяет скорее рельеф дна, для которого характерно наличие большого числа относительно мелководных областей – банок, заливов, бухт, лиманов, в различной степени сообщающихся с морем. Влияние рельефа дна конечно важно для

прибрежной части СЗШ (в частности, района Каркинитского залива или Днепро-Бугского лимана), но вряд ли оно имеет большое значение для открытой части шельфа, полого спускающегося к кромке.

Кратко описывая динамику вод СЗШ, следует заключить, что она относительно проста лишь в зимний период, когда струя ОЧТ захватывает весь северо-западный шельф и с точки зрения гидрохимии «вентилирует» его, относя воды стока Днепра, Днестра и Дуная на юг. Во все остальные сезоны динамика вод СЗШ, особенно в прибрежной зоне, определяется ветровыми течениями, которые очень быстро изменяют направление, приспосабливаясь к изменениям поля ветра. При этом в теплый период года регулярно возникают ситуации, когда распресненные воды распространяются по всей акватории шельфа, достигая побережья Крыма, и не только западной оконечности м. Тарханкут, но и доходят до м. Херсонес [Демьшев, Маркова, 2006; Шокурова и др., 2004; Ильин, 2006]. Обобщающая картина распространения распресненных вод на СЗШ в современный период дана по данным распределения хлорофилла на поверхности моря (рис. 2.2.2).

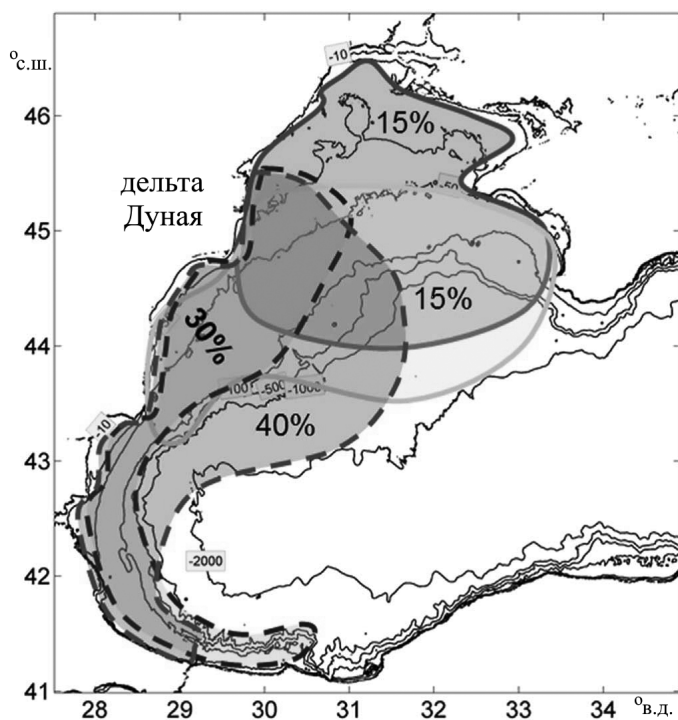


Рис. 2.2.2. Границы проникновения пресноводного стока Дуная в летнее время по данным распределения хлорофилла в поверхностных водах [Kubryakov et al., 2018].

Районирование шельфа

Отмеченная сложность СЗШ, где в западной части от Днепровского лимана до устья Дуная гидрохимию определяет трансформация обильного пресноводного стока, а в восточной (Каркинитский залив) пресная вода поступает в виде не речных, а скорее сточных вод, давно послужили причиной выделения на СЗШ нескольких районов, которые, понятно, оказывают влияние друг на друга, но в случае ослабления динамики вод будут значительно отличаться по гидрохимическим показателям.

Различные варианты такого районирования были рассмотрены в работе [Совга и др., 2005], где представлены в частности: районирование по эколого-географическому признаку Ю.П. Зайцева (рис. 2.2.3а); гидрботаническое районирование, в котором особо выделен Перекопский залив (кутовая часть Каркинитского залива) (рис. 2.2.3б); районирование по составу поверхностных осадков (из которых при возникновении гипоксии начнут поступать минеральные вещества в придонный слой вод) (рис. 2.2.3в). Ну и в завершение этого обзора авторами было предложено районирование СЗШ для боксовой модели (рис. 2.2.3г). Последний вариант, хотя и он подвергся определенной критике в работе [Тамайчук, 2009],

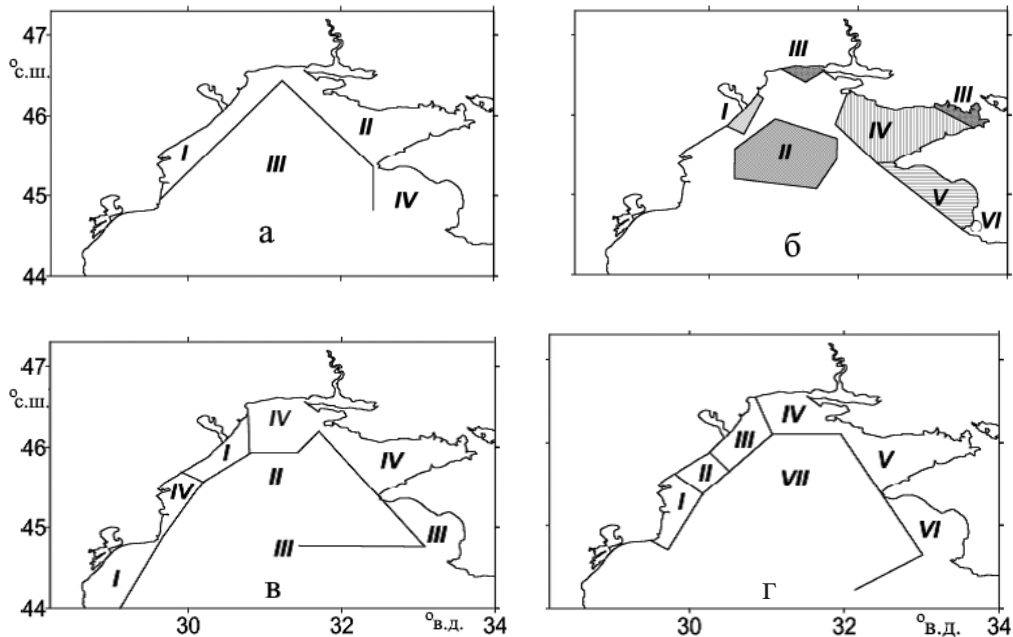


Рис. 2.2.3. Районирование СЗШ: по эколого-географическому признаку (а), гидрботаническое (б), по составу поверхностных осадков (в) и для боксовой модели (г).

кажется наиболее разумным, если в нем объединить области I, II и III, в которых, пожалуй, без натуральных данных сложно определить, сток какой реки – Днепра, Днестра или Дуная, определяет гидрохимию этих вод в данный момент.

Тогда СЗШ можно условно разделить на пять областей:

– район возле Одессы (или Днепро-Бугский приустьевой район), гидрохимию которого во многом определяют стоки Днепра и Южного Буга, а небольшие глубины не препятствуют возникновению придонной гипоксии;

– Дунайско-Днестровский приустьевой район, где основное влияние на состав вод оказывает прежде всего мощный пресноводный сток Дуная, а гипоксия придонных вод является привычным явлением в настоящее время;

– не слишком активно исследовавшийся Каркинитский залив, находящийся в некотором отдалении от ветви ОЧТ, а поэтому «в одиночку справляющийся» с промышленными сбросами в кутовой части;

– Каламитский залив, который стоит отдельно от районов СЗШ, поскольку открыт влиянию глубоководной части Черного моря и является переходным звеном от открытой части моря к СЗШ, благополучно избегая таких явлений, как придонная гипоксия и заморов рыбы как ее результат;

– центральная относительно благополучная часть шельфа, находящаяся на расстоянии примерно 30 миль от всех берегов, на состав вод которой в зависимости от метеорологической обстановки могут оказать влияние остальные районы.

Еще одним доводом для такого условного разделения СЗШ служат так или иначе сложившиеся направления периодических экспедиционных исследований на Черном море украинских институтов, скромные экономические возможности которых не позволяли проводить площадные съемки по всей акватории экономической зоны. В частности, Одесский филиал Института биологии южных морей НАН Украины, Одесский государственный экологический университет, Украинский научный центр экологии моря (НЦЭМ) сосредоточились преимущественно на проблемах Днепро-Бугского приустьевого района, а Морской гидрофизический институт (МГИ, г. Севастополь) провел несколько экспедиций в Дунайско-Днестровском приустьевом районе. Центральная часть шельфа изучалась от случая к случаю по нескольким станциям в редких рейсах, а каких-либо данных по морским экспедиционным исследованиям в районе Каркинитского залива за период 1990–2017 гг. в литературе обнаружить не удалось. Каламитский залив в силу своей близости к центральной части моря и хорошей вентилируемости ОЧТ хотя и относится формально к СЗШ, из-за относительно благополучной экологической обстановки большого интереса с точки зрения гидрохимии не представляет.

В настоящее время оценить особенности распределения океанологических характеристик по всей акватории шельфа возможно, видимо, только по спутниковым снимкам. Это позволяет по величине солености определить распространение по шельфу пресноводного стока, но в плане гидрохимии информация из космоса весьма ограничена и носит скорее качественный, чем количественный характер.

Конечно, снимок из космоса, на котором представлено распределение хлорофилла «а» на поверхности моря (см. рис. 2.2.2), однозначно доказывает отличие вод шельфа от глубоководной части и, в частности, дает основания считать, что и Каркинитский залив, куда не так часто доходит речной сток, также эвтрофирован, как и приустьевые части шельфа. Однако в настоящее время космический снимок отражает распределение тех или иных характеристик на поверхности моря. Из него можно как-то вывести содержание фитопланктона в поверхностных водах и утверждать, что поверхностные воды в местах скопления фитопланктона наверняка пересыщены кислородом, но ничего нельзя сказать о вертикальном распределении фитопланктона, который при возникновении плотностной стратификации концентрируется на термоклине и приводит к возникновению подповерхностного максимума кислорода в теплый период года. То есть основной источник кислорода, а затем и ВОВ, которое затем будет в придонных водах расходовать кислород на минерализацию, находится не на поверхности моря, и для определения интенсивности синтеза кислорода и ВОВ требуются натурные данные.

В связи с этим кажется целесообразным обсуждать не гидрохимию всего СЗШ в целом, а рассмотреть вначале особенности гидрохимических режимов трех прибрежных и центральной областей, согласно районированию (см. рис. 2.2.3г), и далее сделать обобщение о состоянии центральной части и всего шельфа в целом.

Днепро-Бугский приустьевой участок

Двенадцатилетний мониторинг 1988–1999 гг. [Берлинский и др., 2002; Тучковенко и др., 2003; Орлова и др., 2007] и более поздние натурные данные 2009–2010 гг. [Богатова, 2011; Тучковенко и др., 2011] позволили выделить на Днепро-Бугском приустьевом участке Одесский район (рис. 2.2.4) и следующие особенности формирования его гидролого-гидрохимического режимов:

- доминирование большую часть года ветровых течений, определяющих циркуляцию водных масс – вдольбереговой перенос и водообмен с центральной частью шельфа;

- сезонную изменчивость степени влияния пресного стока Днепра и Южного Буга;

- систематическое развитие ветрового апвеллинга, обеспечивающего водо- и массообмен между поверхностными и придонными водами в весенне-летний период, когда эти слои разделены пикноклином;

- определить, что, хотя минеральный фосфор и остается биогенным элементом, лимитирующим первичную продукцию, в прибрежной зоне отмечено нарушение природных соотношений азота и фосфора с резким дефицитом минеральных соединений азота.



Рис. 2.2.4. Районирование Днепро-Бугского приустьевого района.

При выходе из Днепро-Бугского лимана речные воды растекаются по поверхности моря в виде языка, который при доминировании северных и северо-западных ветров направляется на юго-запад, и распределение у берегов Одессы не прослеживается, соленость остается в обычных пределах – 14–16‰. При доминировании ветров восточной четверти язык распределенных вод простирается вдоль северного побережья до берегов Одессы, понижая соленость до 10–12‰, а в исключительных случаях до 3‰. Возможна также ситуация, когда речные воды на выходе из лимана растекаются веерообразно, длина зоны трансформации лиманной воды в морскую по солености не превышает двух десятков километров, и соленость вод в Одесском районе в этом случае не понижается.

Расходы р. Днепр максимальны в мае, так что проникновение в Одесский район языка лиманных вод, приносящих значительное количество органических и минеральных соединений, наиболее вероятно в конце весны. Соотношение кон-

центраций биогенных элементов в трансформированном речном стоке может быть различным в зависимости от состава речного стока, температуры и прозрачности вод, фазы развития планктонного сообщества и т.п.

Качество вод этой акватории (фоновые значения) формируется под влиянием стока рек Днепр и Южный Буг, а также антропогенных источников загрязнения прибрежной зоны Одесского района, промышленных портовых и коммунальных комплексов городов Одесса, Ильичевск и Южный. Хотя по массе поставляемых в СЗШ биогенных веществ вклад береговых источников Одесской агломерации составляет лишь 3–10% от их количества, поступающего с речным стоком Днепра, Днестра и Южного Буга [Иванов и др., 2006; Тучковенко, Иванов, 2007; Тучковенко и др., 2011].

Несмотря на большие различия в объеме поступающих из лиманов водных масс – около 50 км³/год из Днепро-Бугского лимана и около 10 км³/год из Днестровского, содержание в них минеральных и органических веществ сопоставимо [Богатова, 2011]. Стоки зарегулированных Днепра с Южным Бугом и Днестра формируются на густонаселенной и урбанизированной территории, а на водохранилищах и в Днепро-Бугском и Днестровском лиманах ежегодно отмечают «цветение» воды, следствием которого становится увеличение поступления в море не минеральных, а растворенных и взвешенных органических соединений.

Анализ ретроданных за 1975–1995 гг. и результатов еженедельного мониторинга 2009–2010 гг. показал, что за анализируемые периоды при достаточно стабильном уровне минеральных соединений азота и фосфора уровень органических соединений указанных элементов в прибрежной зоне увеличился в 4 и 2 раза соответственно.

Сравнить содержание биогенных элементов в поверхностных и придонных водах Днепровского и Бугского лиманов с водами открытой части шельфа между м. Херсонес и м. Лукулл можно по данным экспедиции МГИ в сентябре 2007 г. (табл. 2.2.1). Важнейшие отличия – значительно более высокие концентрации всех биогенных элементов в водах Днепро-Бугского лимана, в отдельных районах

Таблица 2.2.1

**Содержание кислорода (мл/л) и биогенных элементов (мкМ)
в водах Днепровского и Бугского лиманов и на юго-западном шельфе Крыма**

Район, горизонт		Кислород		Нитраты	Нитриты	Фосфаты	Кремне-кислота
		мл/л	%				
Бугский лиман	поверхн.	5,50–8,72	86–140	0,01–7,28	0,07–1,42	3,16–6,01	176–203
	придон.	7,57–8,11	121–130	0,04–7,31	0,13–1,43	4,05–6,65	176–217
Днепровский лиман	поверхн.	6,54–7,77	101–120	0,03–0,22	0,02–0,08	1,01–3,34	169–207
	придон.	1,29–7,60	21–117	0,00–4,60	0,04–0,81	0,50–3,64	89–205
шельф Крыма	поверхн.	6,25–7,18	104–106	0,00–1,74	0,00–0,03	0,00–0,14	0,6–8,9
	придон.	2,58–6,4	35–88	0,90–4,62	0,00–0,03	0,00–0,71	9,6–46,1

которого поверхностные воды были пересыщены кислородом до 140%, то есть продолжался активный фотосинтез. Тот же фотосинтез не прекратился и в водах юго-западного шельфа Крыма, но здесь пересыщение составляло «разумные» 105%, характерные для вод шельфа, не подверженных эвтрофикации. Еще один важный момент – обилие растворенной формы кремния в водах Днепро-Бугского лимана и отсутствие высоких концентраций нитратов, что подтверждает наблюдения [Ragueneau et al., 2002] о трансформации кремния и нитратов в приустьевых областях.

Любопытное наблюдение было сделано летом 2010 г., когда аномально высокие температуры воздуха в июне–августе обеспечили ранний прогрев водных масс, что привело не только к активному развитию процессов фотосинтеза, но и быстрому рециклингу органических соединений азота и фосфора в минеральные [Богатова, 2011]. Последние вновь вовлекались в биотический круговорот, что в результате не приводило к накоплению трудноминерализуемых органических соединений азота в прибрежной зоне.

Отмеченные особенности гидрохимического режима позволяют предполагать, что трансформация речных вод в морские происходит преимущественно в Днепро-Бугском лимане и на открытый шельф приходит вода, основные загрязнители которой уже остались в осадках лимана [Мезенцева и др., 2009]. То есть у пресноводных стоков Днепра и Южного Буга (также и Днестра) имеются «природные очистные сооружения» в виде зоны лимана, а за счет слабого обмена Днепро-Бугского лимана с водами открытой части шельфа стоки Днепра и Южного Буга оказывают относительно слабое влияние на состояние вод СЗШ. Следует отметить, что у Дуная такая промежуточная зона для трансформации речного стока отсутствует.

Приустьевой район Дуная

Наиболее подробные исследования гидрохимии вод приустьевого взморья Дуная за последние годы были выполнены, пожалуй, МГИ, который в 1997–2013 гг. провел 7 экспедиций в этом районе, результаты которых обсуждались в [Кондратьев и др., 1999, 2007а, б; Кондратьев, Внуков, 1999; Кондратьев, 2009, 2012, 2014, 2015]. Обобщенная схема станций, на которых основное внимание уделялось содержанию растворенного кислорода и биогенных элементов в поверхностных и придонных водах, представлена на рис. 2.2.5.

Эта серия натуральных наблюдений охватила три периода – летний, осенний и зимний, и происходила при различных гидрологических ситуациях: нагон вод открытой части шельфа и вдольбереговой апвеллинг в приустьевой области; распространение речного стока далеко на северо-восток и прижимание стока к берегу не более чем на 5 миль от устья, с распространением поверхностных распресненных вод на юг вдоль берегов Румынии.

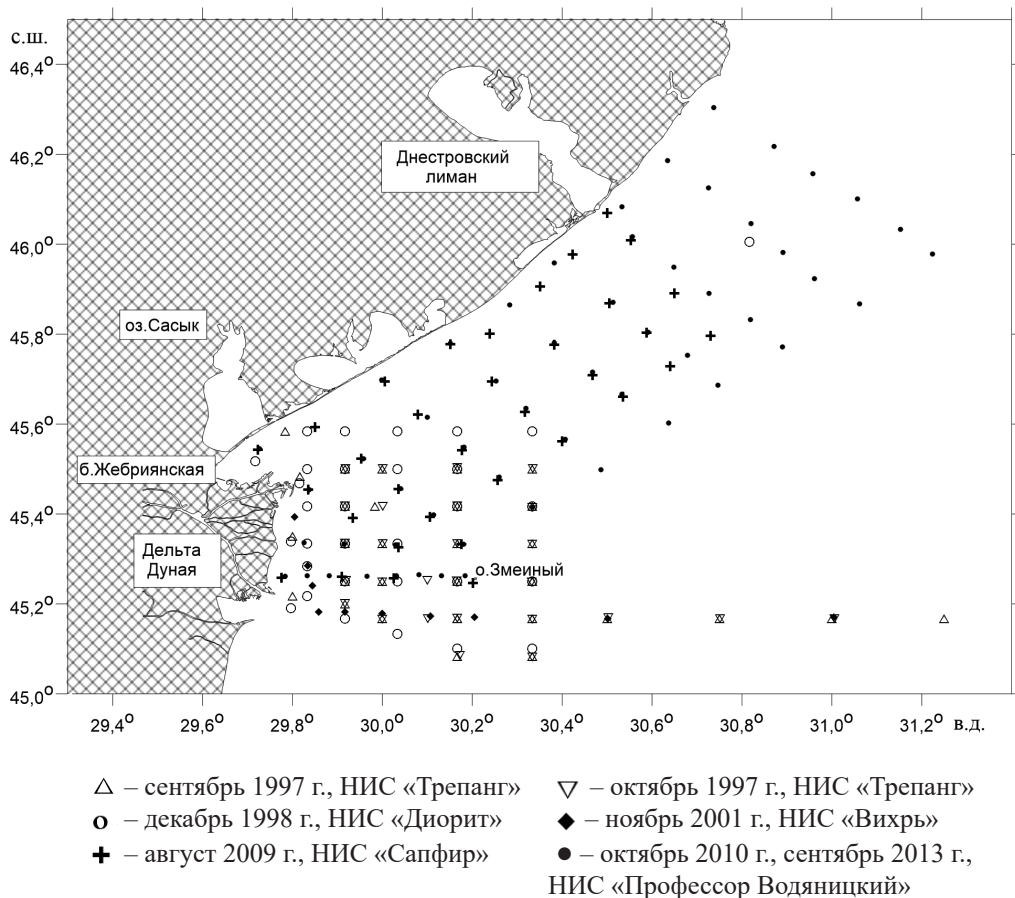


Рис. 2.2.5. Схема станций, выполненных МГИ в приустьевом районе Дуная в 1997–2013 гг.

Так, в августе 2009 г. в приустьевом районе Дуная наблюдалась ситуация, когда пресноводный сток «максимально» влиял на распределение гидрологических и гидрохимических характеристик. Распределение в той или иной степени проявлялось во всей толще вод, соленость придонных вод не превышала 17.9‰, поверхностных – 15‰ (рис. 2.2.6а, б). Фотосинтез в поверхностных водах обеспечил насыщение кислородом не менее 105%, а в отдельных районах превышал 135% (рис. 2.2.6в), тогда как в придонных водах расход кислорода на минерализацию ВОВ привел к обширной гипоксии с насыщением менее 30%, а в некоторых местах насыщение упало до 5% (рис. 2.2.6г).

Отбор придонных проб происходил на глубине 1 м, так что вполне возможно, что у самого дна в воде уже мог появиться сероводород. Ну и как следствие различных процессов в поверхностных и придонных водах – возникло крайне неод-

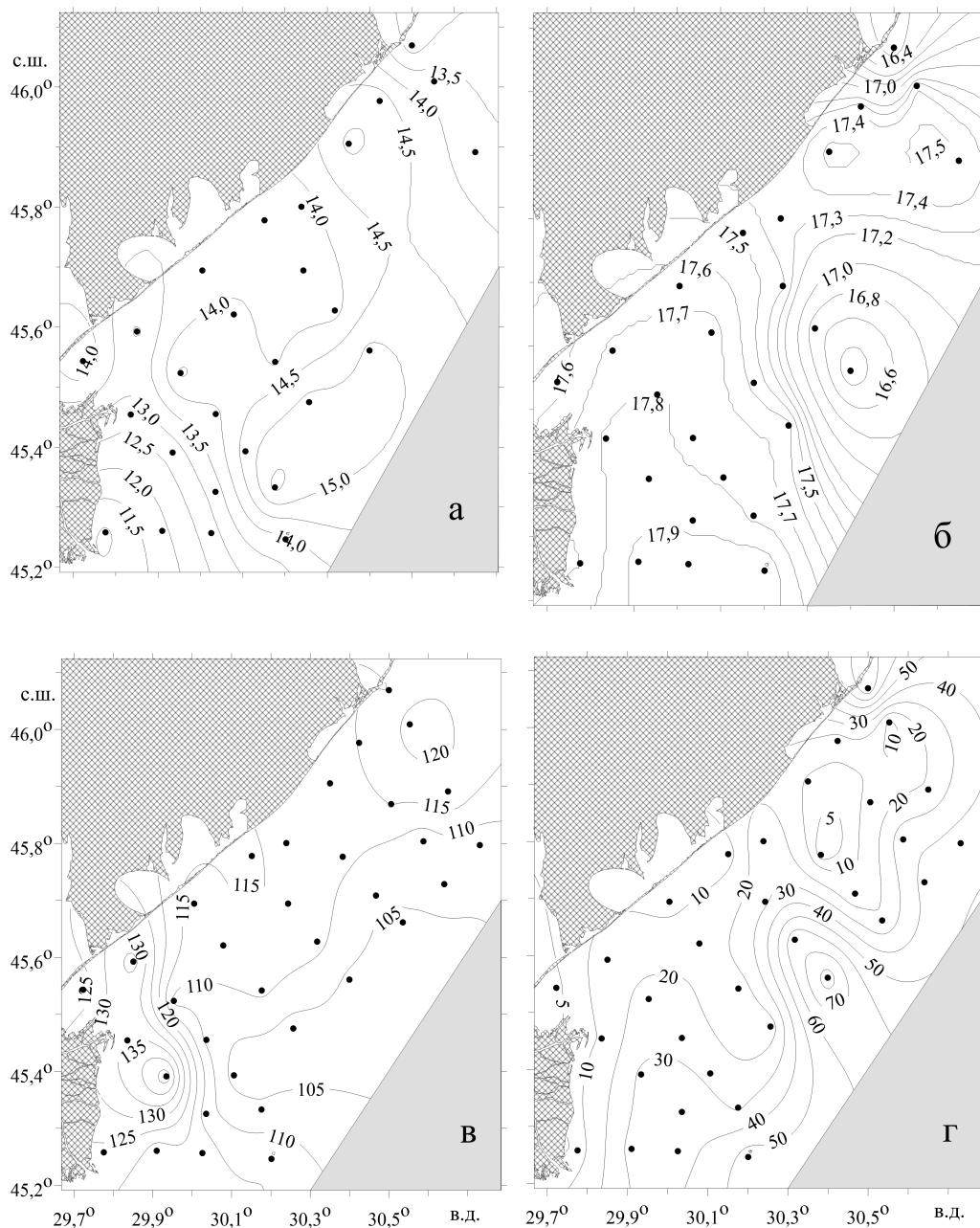


Рис. 2.2.6. Распределение на поверхностном (слева) и придонном (справа) горизонтах в августе 2009 г. солености, ‰ (а, б), насыщения вод кислородом, % (в, г) и содержания кремнекислоты, мкМ (д, е).

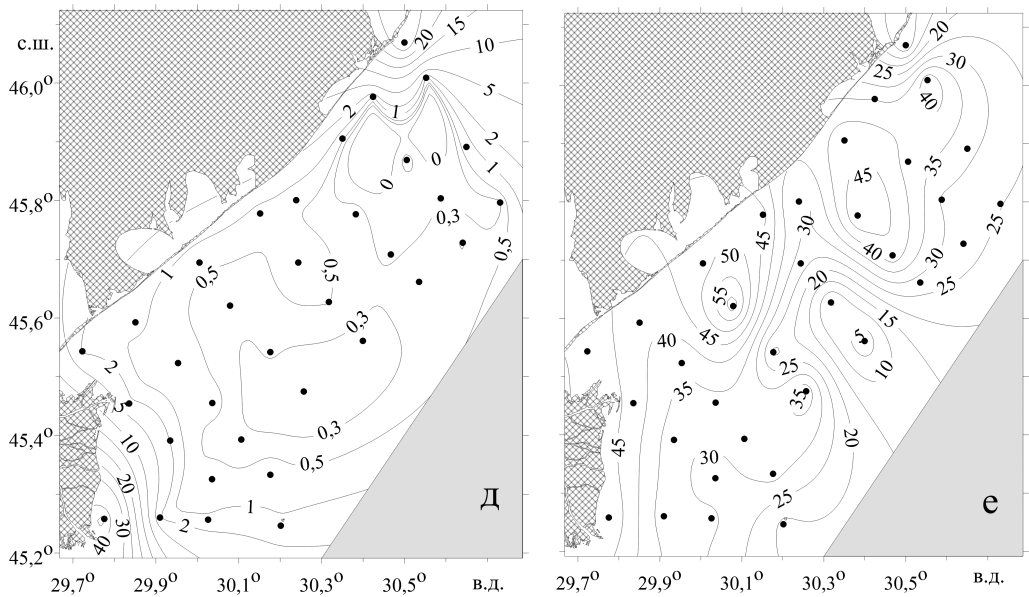


Рис. 2.2.6 (окончание)

народное распределение биогенных элементов по вертикали. К примеру, кремнекислота в поверхностных водах на обширной акватории была почти начисто «съедена», а в придонных ее содержание было выше, чем в стоке Дуная (рис. 2.2.6д, е).

Ситуация с «запиранием» стока Дуная в узкой вдольбереговой полосе благодаря действию нагонных ветров наблюдалась в октябре 2010 г., когда почти весь приустьевой район был заполнен водами открытого шельфа, а пресноводный сток был прижат к берегу. Соленость поверхностных вод менее 17,5‰ была только во вдольбереговой полосе, а в 10–15 милях от устья Дуная вообще была выше 17,9‰ (рис. 2.2.7а). Это и определило распределение биогенных элементов: содержание фосфатов и кремнекислоты у берега было более 0,2 и 8 мкМ, соответственно, тогда как в водах открытого шельфа (и на поверхности, и на придонном горизонте) их концентрации были почти на порядок меньше (рис. 2.2.7б, в).

В этих исследованиях в трех случаях удалось наблюдать апвеллинг в прибрежной полосе, наиболее контрастное изменение в распределении гидролого-гидрохимических характеристик имело место в сентябре 2013 г. Распресненные поверхностные воды с соленостью 16,5–16,6‰ у берега были заменены придонными водами открытой части шельфа с соленостью около 18‰ (рис. 2.2.8а), что привело к резкому уменьшению насыщения вод кислородом, от «благополучных» 105% в открытой части до 60–70% у берега (рис. 2.2.8б), и увеличению содер-

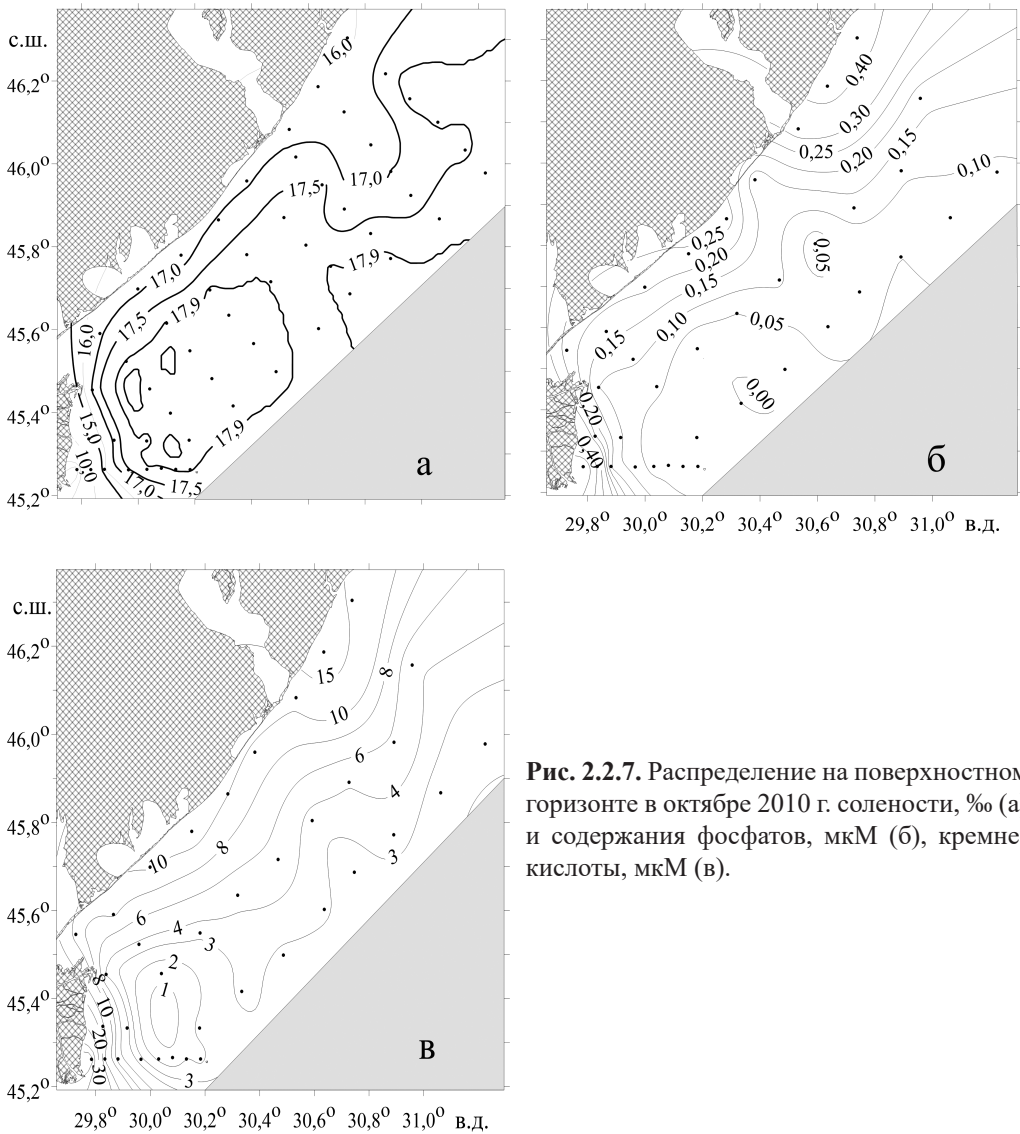


Рис. 2.2.7. Распределение на поверхностном горизонте в октябре 2010 г. солёности, ‰ (а) и содержания фосфатов, мкМ (б), кремнекислоты, мкМ (в).

жания биогенных элементов, в частности концентрация кремнекислоты у берега была на порядок выше, чем «фоновая» (рис. 2.2.8в).

Следует отметить, что в сентябре 2013 г. в этом богатом биогенными элементами районе шельфа следовало ожидать пересыщения поверхностных вод кислородом. Однако подъем к поверхности обедненных кислородом придонных вод привел к экологически тревожной ситуации, когда насыщение кислородом всей толщи вод 2–3-мильной вдольбереговой полосы к юго-западу от Днестровского

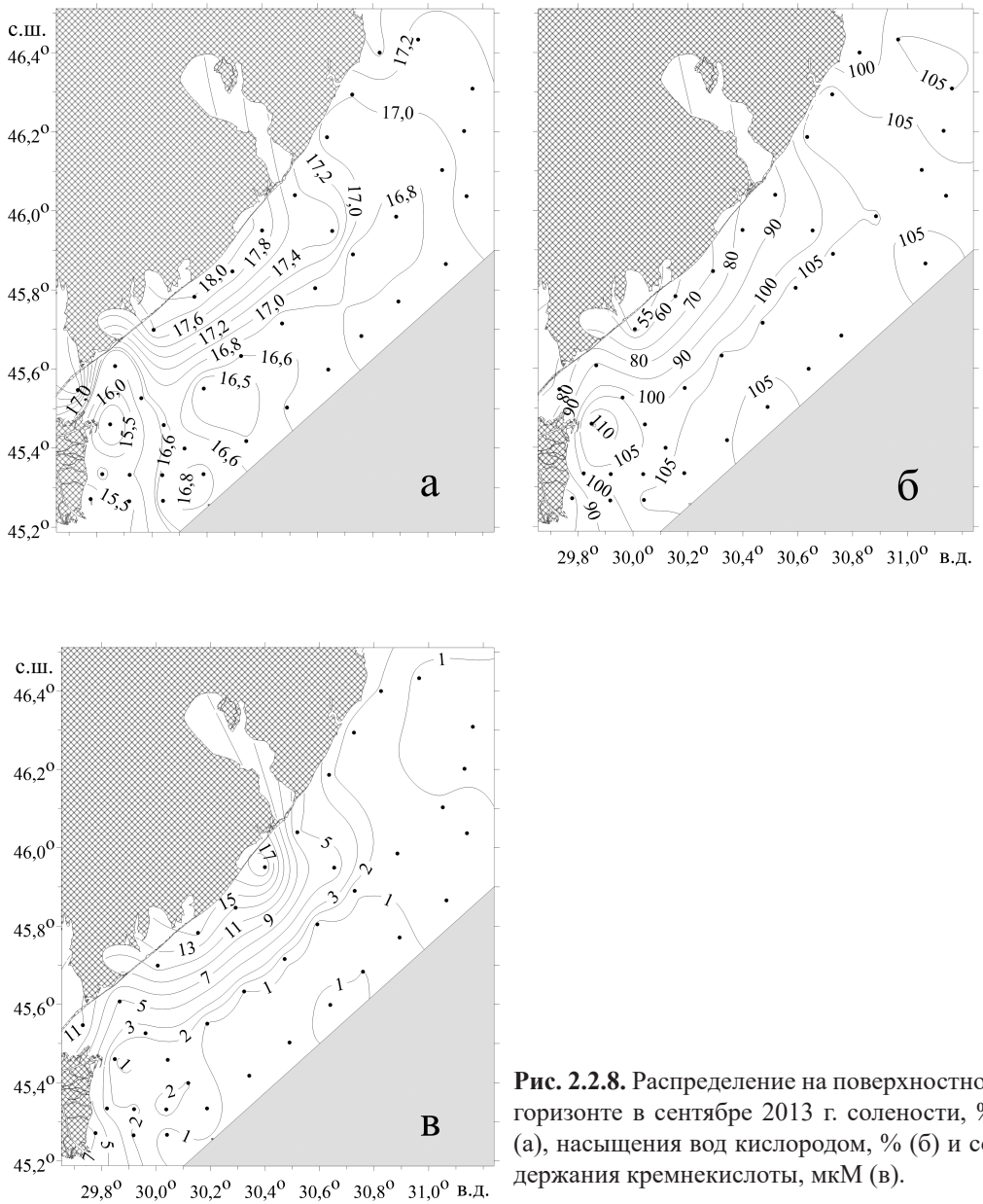


Рис. 2.2.8. Распределение на поверхностном горизонте в сентябре 2013 г. солености, ‰ (а), насыщения вод кислородом, % (б) и содержания кремнекислоты, мкМ (в).

лимана не превышало 80% (см. рис. 2.2.8а). Можно предположить, что именно подобные апвеллинги, поднимавшие к поверхности еще менее насыщенные кислородом придонные воды, являлись причиной заморов рыбы, регулярно случавшихся в этом районе ранее.

Во всех перечисленных выше случаях (распространение и запираание пресноводного стока, апвеллинг) различия в степени насыщения вод кислородом оказали наибольшее влияние на содержание кремнекислоты; в отдельных случаях при гипоксических условиях в придонных водах отмечались концентрации, которые превышали содержание кремнекислоты в поверхностных приустьевых водах. Это совпадает с выводами [Ragueneau et al., 2002] о дополнительном источнике кремния в теплый период года за счет минерализации органических форм кремния, пришедших со стоком Дуная и осевших по мере трансформации речных вод.

Наименее подвержено влиянию окислительно-восстановительных условий оказалось пространственное распределение нитритов, которое для придонных и поверхностных вод во всех рассмотренных случаях заметно не отличалось. Возможно, это следствие того, что нитриты являются промежуточным продуктом в реакциях нитрификации и денитрификации, которые поддерживают примерно одинаковый уровень концентрации нитритов при условии, что в воде присутствуют окисленная (нитраты) и восстановленная (аммоний) формы азота.

Ряд исследователей полагает, что зоны гипоксии на СЗШ могут возникать за счет проникновения на шельф обедненных кислородом вод глубоководной части моря [Еремеев и др., 2001; Friedrich et al., 2002], как это происходит с холодным промежуточным слоем (ХПС) на СЗШ, для которого изопикнический обмен оказался более важен, чем зимняя конвекция [Shapiro et al., 2011]. Однако при таком проникновении повышенные концентрации биогенов в придонных водах должны были бы наблюдаться по всему разрезу от устья Дуная до кромки шельфа, что опровергается натурными данными по вертикальному распределению биогенов [Кондратьев, 2015]. Более того, в рассматриваемой ситуации глубокое проникновение на СЗШ бедных кислородом вод открытой части моря оказалось невозможно вследствие разности плотностей придонных гипоксических вод, которая на момент съемки не превышала $\sigma_t = 14,0 \text{ кг/м}^3$, и плотности вод глубоководной части моря $\sigma_t = 15,0 \text{ кг/м}^3$, при которой насыщение вод кислородом достигает 30%. Следовательно, возникающие на СЗШ зоны гипоксии – результат чисто биохимических процессов в приустьевом районе Дуная.

Важные комплексные исследования, в которых изучалось влияние концентраций биогенных элементов на рост различных видов фитопланктона в приустьевом районе Дуная, были проведены в 1995–1997 гг. [Ragueneau et al., 2002]. Авторы отмечают, что относительная простота описания гидрохимического режима СЗШ, так же как и гидрологии этого региона, касается только зимнего периода. Для него характерны максимальные концентрации биогенных элементов в речном стоке и консервативное распределение неорганических форм биогенов по отношению к солености при слабой активности фотосинтеза, лимитированного поступлением света. Наиболее важными выводами этой работы для весенне-осеннего периодов являются:

– уменьшение поступления со стоком Дуная от зимы к лету растворенных форм кремния и азота, тогда как поступление фосфатов остается неизменным;

- наиболее интенсивный рост фитопланктона наблюдается в интервале соленостей от 3 до 5‰ (когда еще развиваются речные формы), и от 10 до 13‰;
- очень быстрое извлечение кремнекислоты при фотосинтезе в поверхностных водах и быстрое возвращение кремния в растворенную форму при минерализации осевшего ВОВ. Последний процесс является дополнительным мощным источником кремния, концентрация которого в водах эстуария не падает ниже 3–5 мкМ, таким образом кремний не лимитирует рост диатомовых на СЗШ;
- концентрация кремнекислоты 2 мкМ является минимальным уровнем для конкурентного роста диатомовых, но даже при достаточном содержании кремнекислоты их рост лимитируется нитратами и фосфатами;
- фосфаты являются лимитирующим элементом фотосинтеза; в весенний и летний периоды они активно извлекаются из распресненного стока, соленость вод которого не превышает 10‰, после чего содержание фосфатов в поверхностном слое воды уменьшается;
- нитраты являются основным источником азота при фотосинтезе и почти полностью извлекаются при солености менее 9–10‰, после чего планктон использует для роста аммоний;
- механизм эфтрофикации в приустьевом районе не определяется каким-то единственным компонентом.

Такие выводы, как высокое содержание кремния в придонных водах, которое становится источником кремния при апвеллинге, и практически полное извлечение нитратов по мере трансформации речного стока в воды открытой части шельфа были подтверждены в [Кондратьев, 2015].

Каркинитский залив

По сравнению с приустьевыми районами СЗШ, структура, динамика и изменчивость вод Каркинитского залива, отличающегося своеобразными физико-географическими и гидрологическими характеристиками, изучались куда менее интенсивно. Среди современных работ по гидрологии залива следует назвать [Пухтяр и др., 2003; Пухтяр, 2007]. Что касается гидрохимии вод, то она исследовалась и оценивалась косвенно, по составу вод, сбрасываемых в залив [Совга и др., 2011; Гулин и др., 2016]. Обнаружить в литературе результаты целенаправленных экспедиционных исследований с получением натуральных данных по гидрохимическому составу вод Каркинитского залива не удалось, состояние вод залива оценивалось в основном по снимкам из космоса.

Протяженность Каркинитского залива с севера на юг от Тендровской косы до м. Тарханкут составляет 130 км, с запада на восток – 140 км. Бакальской косой и Бакальской банкой залив поделен на два подрайона: западный глубоководный и восточный мелководный размерами с севера на юг 44 км, с запада на восток 83 км

и глубинами до 9 м. С северо-запада и запада в залив поступают распресненные шельфовые воды, с юга и юго-запада – соленые, при этом характерно неравномерное поступление в зависимости от сезона и ветровых условий. Ранней весной в залив начинается поступление распресненных вод, которое интенсифицируется летом, в начале осени этот процесс ослабевает и зимой (когда усиление ОЧТ «изолирует» Каркинитский залив от речного стока) почти прекращается.

Проникновение вод в восточную мелководную часть залива значительно затруднено вследствие ее изолированности. Воды основной части залива могут поступать в восточную часть только в узком интервале направлений ветров от западного до юго-западного через Бакальский пролив. В результате мелководная восточная часть залива в летне-осенний период до 2 месяцев может оставаться без существенного водообмена с глубоководной частью, в которой время обновления верхнего слоя вод в весенне-летний период не превышает двух недель [Пухтяр, 2007].

Восточная мелководная часть залива представляет особый интерес с точки зрения гидрохимии и экологии, поскольку именно она подвержена интенсивной антропогенной нагрузке. Во время функционирования Северо-Крымского канала (СКК) распределение солености в заливе было неравномерным, в местах сброса днепровских вод из рисовых чеков и рыбоводных прудов возникали области значительного распреснения с соленостью 0,99–2,72‰. Прекращение работы СКК на территории Крымского п-ова привело к осолонению вод и замене ихтиофауны эстуарного типа на морскую [Поликарпов, 20086].

Кроме этого, в кутовую часть Каркинитского залива поступают сбросовые воды химических предприятий Армянского промышленного центра производства анилиновых красителей, соды, двуокиси титана, серной кислоты, аммофоса и Краснопереконского промузла. Поэтому экологическое состояние района в зоне Каркинитского залива оценивается как «катастрофическое» из-за наличия токсичных веществ, попадающих с этими водами [Совга и др., 2011].

В устьях лиманов наблюдаются остатки сероводородного загрязнения (придонные, иловые воды), не связанные с антропогенными источниками. В донных осадках отмечается наличие тяжелых металлов в концентрациях, превышающих 2 ПДК. На открытых участках побережья фиксируется угнетенное состояние бентоса на локальных участках, а в заливах – изменение видового состава, разрушение биоценозов, гибель отдельных видов.

Еще в 1992–1994 гг., по данным Украинского НЦЭМ, в поверхностных водах Каркинитского залива, по сравнению с другими районами моря, были обнаружены наиболее высокие концентрации хлорируемых углеводородов [Орлова, 1994]. При этом практически для всех хлорорганических пестицидов, поступающих в кутовую часть залива, их содержание в воде превышает содержание в донных отложениях. Это является признаком их плохой сорбции на взвесах и незначительного выделения в донные отложения, а значит эти загрязняющие вещества

могут переноситься на значительные расстояния и причинять ущерб экосистеме не только в местах их непосредственного сброса.

Учитывая «катастрофическое» экологическое состояние Каркинитского залива, очень важно оценить, как изменится это состояние в обозримом будущем, что достаточно сложно. В любом случае следует учитывать, что после прекращения подачи днепровской воды в Крым по СКК ее избыток стал сбрасываться с территории Херсонской области в восточную часть залива, что вызвало резкое распреснение воды [Гулин и др., 2016]. Подобная перемена неизбежно должна отразиться на гидрологическом и гидрохимическом режиме вод Каркинитского залива, заилении дна, состоянии флоры и фауны. В самом неблагоприятном случае нельзя исключать возможность (учитывая затрудненность водообмена с основной частью залива) превращения восточной части залива в некое подобие Днепро-Бугского лимана со всеми вытекающими последствиями, включая придонную гипоксию и сероводородное заражение.

Каламитский залив

Последнее подробное исследование гидрохимического состава вод Каламитского залива было проведено в сентябре 1995 г., а его результаты обсуждаются в [Кондратьев, 2009]. Отсутствие обильного пресноводного стока и значительной промышленной инфраструктуры на берегах западного Крыма, равно как и ничем не нарушаемый водообмен с глубоководной частью моря делают воды залива более похожими на воды открытой части моря, чем на воды СЗШ, поэтому в данном обзоре гидрохимия вод Каламитского залива обсуждаться не будет.

Центральная часть северо-западного шельфа

При обобщении данных многолетних исследований по всей акватории СЗШ 1980–2002 гг. по квадратам $0,5 \times 0,5^\circ$ было проанализировано содержание неорганических форм элементов главного биогенного цикла в верхнем 30-метровом слое вод, представленное на рис. 2.2.9 [Геворгиз и др., 2005]. Этот слой не только наиболее обеспечен данными, но и является зоной наиболее активного фотосинтеза. Хотя воды СЗШ тем и отличаются, что для весенне-осеннего периода характерны значительные отличия в содержании биогенных элементов в поверхностных и придонных водах, такое обобщение по 30-метровой толще дает наглядное представление о том, в каких районах шельфа содержание неорганических форм азота, фосфора и кремния постоянно находится на высоком уровне.

Это, естественно, оказались приустьевые районы, а предложенное районирование разделило шельф на три области (рис. 2.2.10).

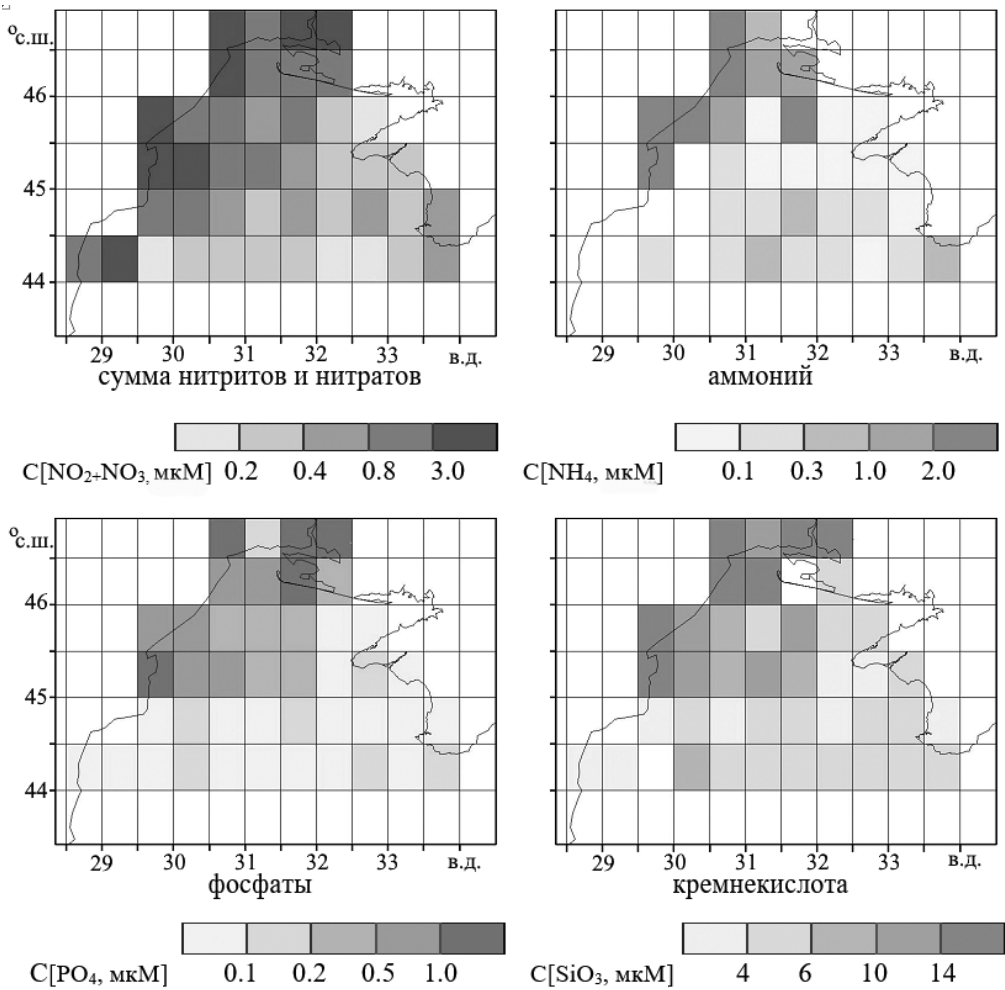


Рис. 2.2.9. Среднегодовые концентрации неорганических форм азота, фосфора и кремния в верхнем 30-метровом слое вод СЗШ (квадраты без заливки – данные отсутствуют).

I – районы максимальных концентраций, непосредственно прилегающие к берегу, где влияние речного стока на гидрохимические условия вод проявляется в течение всего года; II – область высоких концентраций, соответствующая зоне распространения трансформированных речных вод, границы которой могут изменяться в течение года в зависимости от интенсивности речного стока и ветровых условий; III – область относительно низких концентраций биогенных элементов, где на протяжении всего года выраженное влияние речного стока отсутствует.

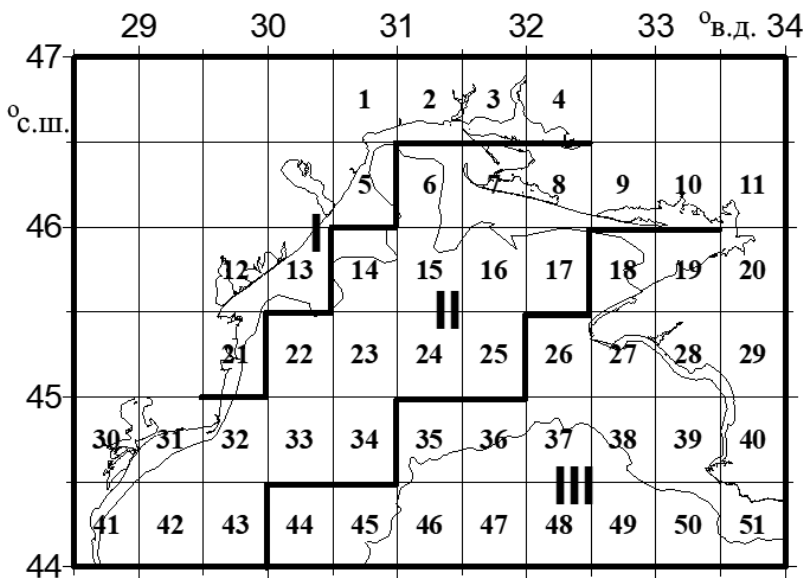


Рис. 2.2.10. Районирование СЗШ по содержанию неорганических форм элементов главного биогенного цикла в верхнем 30-метровом слое вод.

Такое достаточно грубое районирование СЗШ в зависимости от речного стока совпадает с оценкой распространения по шельфу пресноводного стока [Ильин, 2006], хотя выделять на СЗШ всего три области явно мало (см. районирование СЗШ выше). Следует отметить, что на рис. 2.2.9 подтверждается сходство поверхностных вод Каламитского залива и глубоководной части моря по гидрохимическим характеристикам, а также указывается на отсутствие натуральных данных по Каркинитскому заливу.

Среди целенаправленных исследований центральной части СЗШ (именно акватории, а не отдельных разрезов при изучении прибрежных районов) в последнее время в литературе удалось найти только одну работу по изучению «филлофорного поля Зернова» летом 2012 г. [Берлинский и др., 2014]. Важность этой работы определяется ее темой – современным состоянием «филлофорного поля», размеры которого в 70–90-х годах значительно сократились именно благодаря возникновению гипоксии придонных вод.

Исследования водных масс и донных осадков по схеме на рис. 2.2.11 показали, что в последние 10–15 лет происходит восстановление «филлофорного поля», что обусловлено следующими причинами: сокращением стока биогенных веществ из рек, увеличением прозрачности вод в результате сокращения взвешенных веществ органического и минерального происхождения в воде и прекращения дон-

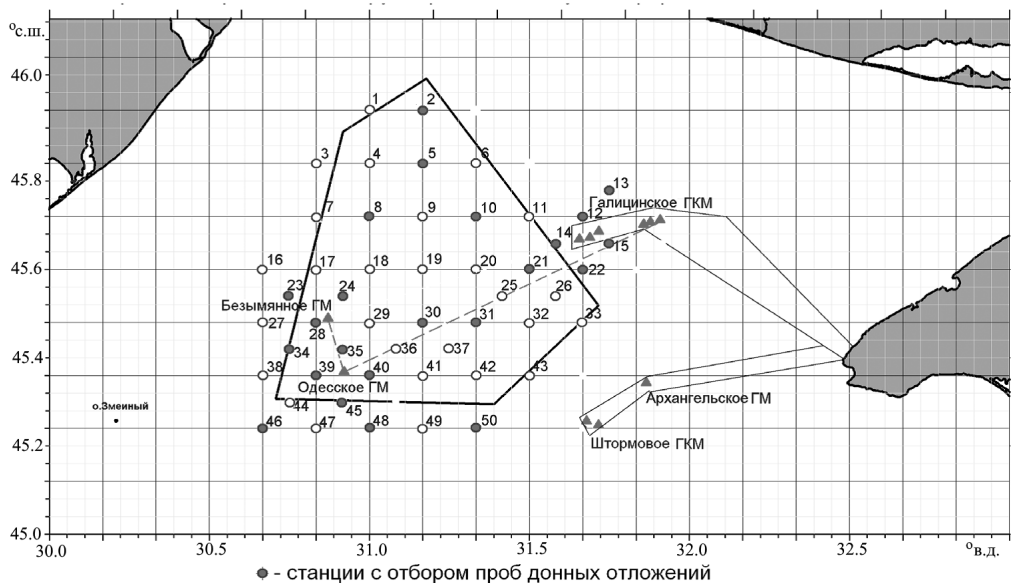


Рис. 2.2.11. Схема расположения станций в районе «филлофорного поля» и места добычи углеводородного сырья на шельфе Черного моря [Берлинский и др., 2014].

ного траления. Общее количество видов водорослей макрофитобентоса района исследований за последние годы возросло в 2–3 раза, что свидетельствует об улучшении экологического состояния «филлофорного поля Зернова».

Общие особенности гидрохимии вод СЗШ

Редкий случай сравнить содержание гидрохимических элементов на различных участках СЗШ одновременно возник 21 мая 2000 г., когда в течение дня были отобраны пробы на поверхностном и придонном (на 20 м, т.е. на значительном отдалении от берега) слое вдоль всего СЗШ и для контраста в бухте Ласпи на южном берегу Крыма (ЮБК) (рис. 2.2.12).

Содержание всех биогенных элементов уменьшалось по мере продвижения от устья Дуная на северо-восток до ст. 11, где увеличились концентрации нитратов и кремнекислоты (видимо, проявилось влияние Днепро-Бугского лимана), после чего от центральной части шельфа (ст. 12) до ЮБК заметных различий в значительно понизившемся (для окисленных форм азота в десятки раз) содержании биогенных элементов в поверхностных и придонных водах отмечено не было

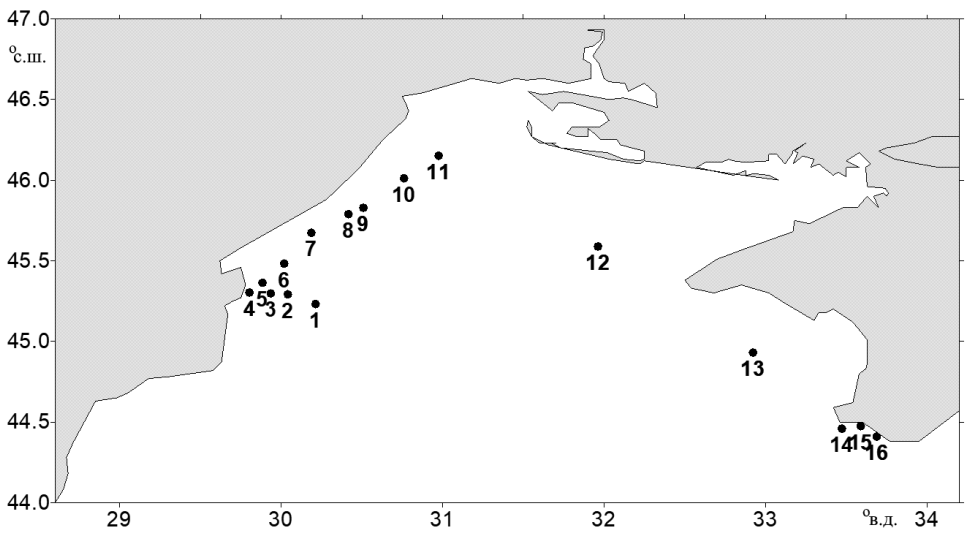


Рис. 2.2.12. Расположение станций вдоль берега СЗШ в мае 2000 г.

(рис. 2.2.13) [Kondratiev, Liashenko, 2001]. Нужно отметить, что возле дельты Дуная уже в мае 2000 г. кислорода на придонном горизонте было всего 60%, то есть пошел процесс образования гипоксических условий.

С точки зрения гидрохимии важнейшей особенностью вод всего СЗШ является формирование в весенне-летний период на глубинах 5–15 м пикноклина, разделяющего прогретые и распресненные воды поверхностного слоя и холодные, соленые воды придонного слоя. Следует подчеркнуть, что в образовании пикноклина участвуют и термоклин, и галоклин, что в теплый период года легко обеспечивается для вод СЗШ прогревом обильного стока пресных вод. Занимая поверхностный фотический слой толщиной 5–15 м, воды с повышенной концентрацией биогенных веществ в течение длительного периода времени создают благоприятные условия для развития фитопланктона.

Условия максимального распространения трансформированных речных вод, когда они охватывают значительную часть СЗШ, включая Каркинитский залив, возникают в мае при наибольшей повторяемости в весенний период (март–май) южных и западных ветров. При этом южные ветры в период весеннего половодья «запирают» речные воды в области шельфа, а западные обуславливают их распространение к востоку.

При повышенной повторяемости ветров восточных направлений речные воды прижимаются к западному побережью и интенсифицируется их перенос к югу.

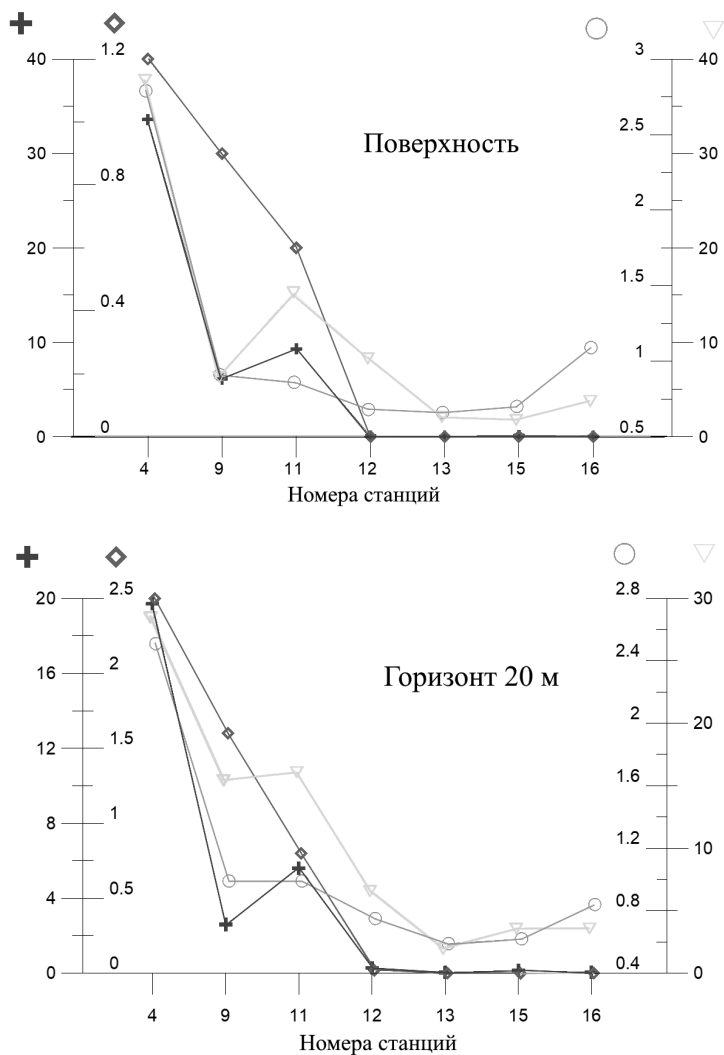


Рис. 2.2.13. Содержание (мкМ) нитратов (+), нитритов (◇), фосфатов (○) и кремнекислоты (▽) в поверхностных водах и на горизонте 20 м в мае 2000 г.

При этом площадь их распространения на СЗШ минимальна, а в восточные районы (Каламитский и Каркинитский заливы) активно поступают с юга воды открытого моря [Украинский, Попов, 2009].

В весенне-осенний период в приустьевом взморье Дуная в поверхностном слое вод идет активное образование кислорода в процессе фотосинтеза, а в придонном – кислород активно расходуется на окисление осевшего взвешенного ор-

ганического вещества. Процесс фотосинтеза в придонном слое практически прекращается вследствие высокой концентрации аллохтонной взвеси в поверхностных водах, снижающей прозрачность воды и препятствующей проникновению солнечного света.

Устойчивое распреснение поверхностного слоя приводит к высокой стратификации вод, подавляющей вертикальный турбулентный обмен кислородом. Именно одновременное присутствие в вертикальной структуре вод термоклина и галоклина необходимо для образования гипоксийных условий в придонных водах, при этом не требуются значительные глубины. Так, гипоксийные условия с образованием в итоге сероводорода регулярно наблюдались в придонных водах мелководного (глубины до 10 м) Днепровского лимана и даже в Севастопольской бухте на глубине 18 м. Таким образом, в летнее время на СЗШ существуют эти обе причины возникновения анаэробных условий в морских экосистемах.

Следствием всех этих особенностей является чрезвычайно сложный кислородный режим этого района, ранее отмеченный в 1980-х годах и подтвержденный исследованиями 1990-х, с диапазоном от почти трехкратного пересыщения кислородом (170–280% насыщения) поверхностных вод до гипоксии в придонных [Гаркавая и др., 2000].

Гипоксия придонных вод на СЗШ в теплый период года стала регулярно отмечаться, начиная с 70-х годов прошлого столетия и продолжает регулярно повторяться. Так, в районах шельфа севернее 45° с.ш. гипоксия занимала в 1999 и 2000 гг. не менее 36–37% площади СЗШ [Украинский, Попов, 2009], при этом в приустьевом районе Дуная гипоксия наблюдалась и в позднеосенний период [Kondratyev, Lemeshko, 2003].

Интенсивность распространения придонной гипоксии вод на СЗШ сначала напрямую связывали с объемом стока рек, однако позже оценки корреляционных связей между суммарными стоками рек, сроками наступления их максимальных значений, с одной стороны, и площадями гипоксии на СЗШ, с другой, не выявили наличия существенной зависимости. Все это указывает на то, что на развитие данного процесса значительное влияние оказывают и другие факторы, в основном связанные с межгодовой изменчивостью условий в приводной атмосфере [Украинский, Попов, 2009].

Современной особенностью гидробиохимии СЗШ стало зимнее цветение фитопланктона, которое стало отмечаться с начала 90-х годов прошлого столетия и наблюдается в настоящее время, по данным как спутниковых, так и прямых определений [Огуз и др., 2007; Дорофеев и др., 2017]. Другой особенностью, на общем фоне потепления климата на СЗШ, является смещение сроков начала весеннего цветения фитопланктона. Более ранние сроки начала паводкового стока рек и весеннего прогрева вод приводят к раннему формированию сезонного пикноклина, далее ослаблению вертикального обмена вод и уменьшению потока кислорода в придонные слои, ну и, соответственно, более ранней гипоксии придонных вод.

Максимальное развитие этих процессов произошло в 2000 г., когда после аномально теплого весеннего периода насыщенность вод кислородом под пикноклином в районе Белгород-Днестровской банки уже в мае не превышала 40%, в начале второй декады июня там наблюдались условия гипоксии, а осенью под пикноклином отмечалось наличие сероводорода [Попов и др., 2002]. Завершился этот ранний прогрев вод на СЗШ аномально поздней гипоксией, наблюдавшейся в ноябре в приустьевом районе Дуная на «вековом» разрезе по 45°10' с.ш. [Kon-dratyev, Lemeshko, 2003].

Другим важным моментом для распределения гидрохимических характеристик является систематическое развитие на СЗШ ветрового прибрежного апвеллинга, обеспечивающего водо- и массообмен между поверхностными и придонными слоями акватории в весенне-летний период года. Понятно, что апвеллинг регулярно развивается и в холодный период года, но для вертикального распределения различных параметров он не имеет значения вследствие однородности этих распределений. Однако в теплый период года, после формирования пикноклина в теплом верхнем квазиоднородном слое идет фотосинтез и расходуются биогенные элементы, а в нижнем холодном происходит разложение осевшего ВОВ, при котором расходуется кислород и выделяются биогенные элементы. При апвеллинге придонные воды поднимаются на поверхность и являются источником биогенов, что активизирует процессы фотосинтеза. И все будет благополучно, если только на поверхность не поднимутся гипоксийные воды со столь малым содержанием кислорода, что его не хватит для обеспечения жизнеспособности отдельных видов рыб. В итоге получается замор и экстремальная экологическая ситуация, которую в настоящее время человек не в состоянии исправить.

Заключение

Завершить предложенный обзор гидрохимии северо-западного шельфа Черного моря следовало бы предвидением того, что случится с водами шельфа в обозримом будущем. Однако, сделать гарантированное предсказание как будет изменяться ситуация на СЗШ в дальнейшем, вряд ли возможно. Улучшение экологической ситуации на шельфе в последнее время может сойти на нет, если восстановится промышленность Украины и с ней поставка загрязняющих и биогенных веществ в воды Дуная, Южного Буга и Днестра, а это вопрос к политологам и экономистам, а не океанологам.

Более вероятной кажется не слишком зависящая от экономики ситуация, когда видовой состав фитопланктона на СЗШ станет заметно иным, чем в других шельфовых областях Черного моря. Увеличение в несколько раз потока неорганических форм азота с речным стоком в период с 60-х до 90-х годов сопровождалось уменьшением потока неорганических форм кремния. Это привело к постепен-

ному уменьшению содержания кремнийсодержащего фитопланктона, изменило трофическую цепь и дестабилизировало экосистему Черного моря. Процесс этот, видимо, будет развиваться и дальше.

Правильнее предположить, что состав фитопланктона на прибрежной части СЗШ и далее до пролива Босфор останется тем же, что и сейчас, он не должен претерпеть значительных изменений, поскольку поступление с пресноводным стоком кремния, растворенного или связанного в речные формы фитопланктона, обеспечит рост диатомовых. А вот в остальных частях шельфа, где содержание кремнекислоты в поверхностных водах в настоящее время часто падает ниже 2 мкМ – уровня, при котором диатомовые конкурентноспособны по сравнению с другими видами, – преимущество в развитии получают виды фитопланктона, использующие не кремний, а углерод для построения оболочки. Далее возникнет иная трофическая цепь, в конце которой возможно изменение видового состава рыб.