

**Особенности пространственного распределения
элементов главного биогенного цикла
в водах приустьевоего взморья Дуная в 1997 – 2013 годах**

© 2015 С.И. Кондратьев

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
E-mail: skondratt@mail.ru*

Поступила в редакцию 27.04.2015 г. После доработки 04.06.2015 г.

Представлены результаты анализа пространственного распределения элементов главного биогенного цикла в водах приустьевоего взморья Дуная, выполненного по данным экспедиционных исследований, проведенных Морским гидрофизическим институтом в 1997 – 2013 гг. Показано, как величина насыщения вод кислородом качественно сказывается на содержании элементов главного биогенного цикла в водах приустьевоего района Дуная. Апвеллинг придонных вод в этом районе, периодически вызывающий значительное уменьшение насыщения кислородом поверхностных вод, существенно увеличивает содержание в них биогенных элементов.

Ключевые слова: приустьевоего район Дуная, гидрологические особенности, кислородный режим, гипоксия, элементы главного биогенного цикла, натурные данные 1997 – 2013 гг.

Введение. Приустьевоего взморье Дуная – один из самых сложных для исследования районов Черного моря. Этот район подвержен влиянию не только стока Дуная, содержащего отходы промышленности и жизнедеятельности десяти государств Европы, но также загрязненных стоков Днепра и Днестра, и поэтому испытывает чрезвычайно сильную антропогенную нагрузку [1 – 6]. С пресноводным стоком поступает большое количество биогенных элементов, что обеспечивает в этом районе обильную кормовую базу для фитопланктона в течение всего года.

Что касается динамики вод в приустьевом взморье Дуная, и особенно в прибрежной зоне, то она определяется в основном ветровыми течениями, которые очень быстро изменяют направление, приспосабливаясь к изменениям поля ветра [7]. Этот район является сложным и по гидрохимии вод. Она здесь относительно проста лишь в зимний период, когда струя Основного Черноморского течения захватывает весь северо-западный шельф и «вентирует» его, относя воды стока Дуная на юг. Во все остальные сезоны биогенные элементы, поступающие в значительных количествах со стоком Дуная, остаются в районе приустьевоего взморья и прилегающей к нему акватории [8, 9].

В весенне-осенний период в приустьевом районе Дуная в поверхностном слое вод идет активное образование кислорода в процессе фотосинтеза, а в придонном кислород активно расходуется на окисление осевшего взвешенного органического вещества, что периодически приводит к состоянию придонной гипоксии, регулярно наблюдающейся в этом районе и неоднократно обсуждавшейся в литературе [10 – 13].

Таким образом, в поверхностном слое вод происходит активное потребление фитопланктоном элементов главного биогенного цикла (соединений азота, кремния и фосфора), в придонном – выделение этих элементов в результате деструкции органического вещества.

В предыдущей статье, в результате анализа влияния особенностей гидрологической структуры на пространственное распределение кислорода в водах приустьевоего взморья Дуная, был сделан вывод о том, что возникновение придонной гипоксии происходит, как правило, при одновременном присутствии термоклина и галоклина в шельфовых водах [14].

В данной работе по материалам натуральных измерений, проведенных Морским гидрофизическим институтом (МГИ) в 1997 – 2013 гг., будет рассмотрено, как в приустьевом районе Дуная особенности пространственного распределения кислорода взаимосвязаны с распределением элементов главного биогенного цикла, а именно фосфатов, кремниевой кислоты и неорганических форм азота (аммония, нитритов и нитратов).

Материалы и методы. Исследования состояния вод в приустьевом районе Дуная проводились Морским гидрофизическим институтом в сентябре и октябре 1997 г. на НИС «Трепанг», в декабре 1998 г. на НИС «Диорит», в ноябре 2001 г. на НИС «Вихрь», в августе 2009 г. на НИС «Сапфир», октябре 2010 г. и сентябре 2013 г. на НИС «Профессор Водяницкий». Гидрохимические наблюдения были проведены по сетке станций, представленной на рис. 1. Более подробная схема станций для отдельных рейсов приводится на рисунках, демонстрирующих пространственное распределение биогенных элементов.

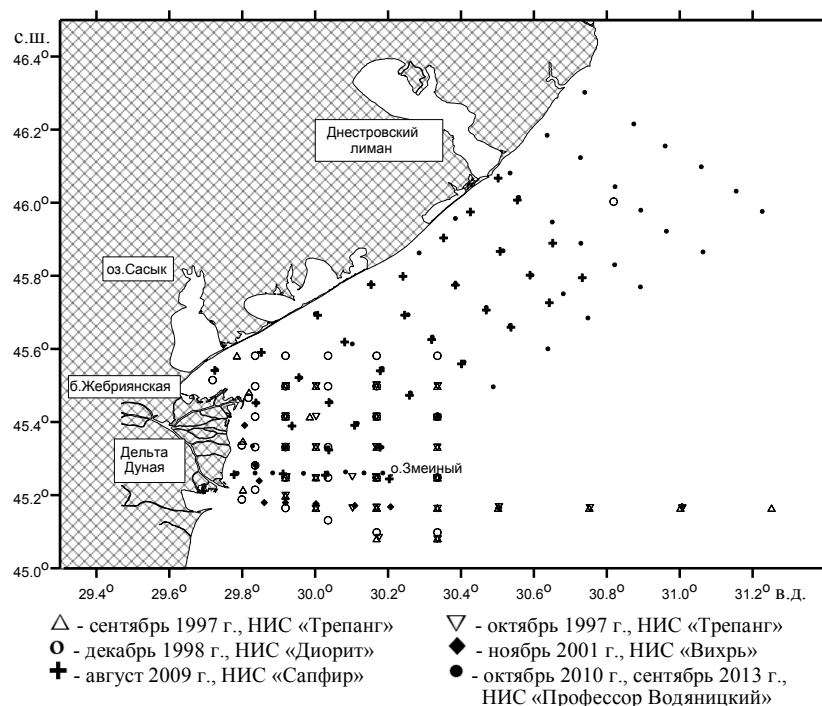


Рис. 1. Схема станций, выполненных Морским гидрофизическим институтом в водах приустьевоего взморья Дуная в 1997 – 2013 гг.

Инструментальные гидрологические наблюдения и отбор проб выполняли СТД-зондом. Отбор проб воды на придонном (0,5 – 1 м от дна) и поверхностном (0 – 1 м) горизонтах производили с помощью кассеты пластиковых батометров. Аналитические определения концентраций биогенных элементов (нитратов, нитритов, фосфатов и кремнекислоты) проводили, как правило, в стационарной береговой лаборатории отдела биогеохимии моря МГИ, для чего пробы отбирались в пластиковые контейнеры объемом 250 мл и замораживались сразу после отбора.

Химико-аналитические определения проводились по методикам, рекомендованным для применения при гидрохимических исследованиях океана [15]. Для калибровки приборов при физико-химических методах измерения и контроля правильности результатов анализа использовались аттестованные стандартные образцы производства НТК «Физико-химический институт НАН Украины».

Результаты и обсуждение. В данной работе особенности пространственного распределения биогенных элементов в поверхностных и придонных водах приустьевоего района Дуная будут рассматриваться на фоне особенностей распределения растворенного кислорода, полученных в тех же экспедициях и на тех же станциях, что были перечислены в рубрике «Материалы и методы».

Сентябрь 1997 г. Объем статьи не позволяет еще раз привести рисунки по пространственному распределению кислорода и биогенных элементов в поверхностных и придонных водах взморья Дуная в сентябре и октябре 1997 г., представленные в работах [11, 16, 17]. Здесь будут только перечислены наиболее интересные результаты.

Так, в сентябре 1997 г. в поверхностных водах приустьевоего района Дуная наблюдалась область размером примерно 20 × 30 миль значительного пересыщения вод кислородом (более 120% при фоновом насыщении 105% на периферии полигона). В этой области отмечено пониженное содержание фосфатов (0,1 – 0,2 мкМ при фоновом 0,3 – 0,4 мкМ), кремнекислоты (0,5 – 1,0 мкМ при фоновом 2 – 3 мкМ) и нитратов (менее 0,1 мкМ при фоновом 0,2 мкМ), тогда как концентрации нитритов 0,1 – 0,2 мкМ в этой области не отличались от фоновых.

В придонном слое в сентябре 1997 г., практически под областью пересыщенных кислородом поверхностных вод, располагалась область гипоксии с насыщением кислородом менее 30% при фоновом 70%. В этой области обнаружены значительно более высокие концентрации фосфатов (0,25 – 0,40 мкМ при фоновых 0,1 – 0,2 мкМ), кремнекислоты (24 – 28 мкМ при фоновых 12 – 15 мкМ), нитратов (10 – 12 мкМ при фоновых 1 – 2 мкМ), тогда как повышенного содержания нитритов здесь обнаружить не удалось (на всем полигоне наблюдались концентрации в пределах 0,2 – 0,5 мкМ).

Наблюдаемая качественная связь между насыщением вод кислородом и содержанием биогенных элементов фиксировалась неоднократно [10, 12 – 14] и объясняется относительно просто. Пересыщение поверхностных вод кислородом происходит вследствие интенсивных процессов фотосинтеза, при которых биогенные элементы извлекаются фитопланктоном. При нехватке кис-

лорода в придонных водах активизируются процессы минерализации осевшего органического вещества, в результате которых биогенные элементы возвращаются в растворенное состояние. Различие в концентрациях биогенных элементов в поверхностном и придонном слоях наиболее контрастно для ситуаций с ослабленной динамикой вод, когда в поверхностных водах фитопланктон «успевает» извлечь биогенные элементы до поступления новых со стоком Дуная, а на придонном горизонте отсутствует поступление вод открытой части шельфа.

Октябрь 1997 г. Если в сентябре 1997 г. в приустьевом районе Дуная наблюдалась картина распределения гидрохимических элементов, характерная для ситуации с затрудненным вертикальным обменом вследствие сильной соленостной и температурной стратификации вод, то в октябре продолжительный северо-западный ветер привел к распространению поверхностных вод на восток и вызвал мощный вдольбереговой апвеллинг (см. более подробно работу [16]). Таким образом, поверхностные воды всего исследованного полигона представляли собой не полностью трансформированные воды стока Дуная соленостью менее 17‰, тогда как придонный горизонт был занят черноморскими водами соленостью более 18‰. Именно это и обусловило пространственное распределение гидрохимических элементов.

В поверхностных водах, по мере удаления от устья на восток и ослабления влияния пресноводного стока на концентрации биогенных элементов, монотонно уменьшалась степень насыщения вод кислородом от 140% до фоновых 106%, концентрации кремнекислоты от 7 до 1 мкМ, фосфатов от 0,6 – 0,7 до 0,1 мкМ, нитратов от 5 – 7 до 1 мкМ и менее, нитритов от 0,6 – 0,7 до 0,1 мкМ. Эти изменения происходили между 29,9 и 30,2° в. д. (в октябре исследованный полигон располагался восточнее меридиана 29,9° в. д.). Повышенные концентрации биогенных элементов в пересыщенном кислородом поверхностном слое вод прибрежной полосы приустьевого района можно объяснить неполным извлечением биогенов, в избытке доставляемых со стоком Дуная.

На придонном горизонте вследствие поступления вод из открытой части шельфа степень насыщения кислородом увеличилась минимум до 50%, что обеспечило относительно однородное распределение биогенных элементов. На большей части полигона концентрации кремнекислоты находились в пределах 15 – 18 мкМ (ранее в сентябре в очаге гипоксии наблюдались концентрации выше 25 мкМ), фосфатов – в диапазоне 0,10 – 0,15 мкМ (ранее 0,25 – 0,40 мкМ), нитратов – в пределах 3,5 – 4,5 мкМ (ранее 10 – 12 мкМ), нитритов – в диапазоне 0,1 – 0,2 мкМ (их содержание осталось практически таким же, как в сентябре 1997 г.).

Все перечисленные особенности распределения проявились и на вековом разрезе по 45°10' с. ш., где влияние стока Дуная, обеспечившего более высокую степень насыщения вод кислородом и повышенные концентрации биогенных элементов, наблюдалось только в западной части разреза. Тогда как восточнее 30,2° в. д. отмечалось однородное распределение всех компонентов по горизонтали с постепенным уменьшением насыщения вод кислородом и увеличением содержания в них биогенных элементов при увеличении глубины.

Декабрь 1998 г. В декабре 1998 г. присутствие стока Дуная ощущалось практически на всем исследованном полигоне. Так, изогалина 16‰, расположение которой принято считать контуром зоны трансформированных речных вод в северо-западной части Черного моря [18], в поверхностных водах проходила по меридиану 30,15° в. д., а в придонных – по меридиану 28,85° в. д. Соленость вод поверхностного слоя постепенно возрастала по мере их продвижения от устья на восток от 3 – 4 до 17‰, а температура вод повышалась от 2°C возле береговой черты до 9°C на востоке полигона (30,3° в. д.).

Такое распространение пресноводного стока и определило распределение кислорода и биогенных элементов. В поверхностных водах содержание кислорода и биогенных элементов заметно уменьшалось по мере продвижения от устья Дуная на восток до 30,2° в. д., в придонных – до 29,9 – 30,0° в. д., восточнее этих границ наблюдалось относительно однородное распределение всех компонентов. Понижение концентраций кислорода в данном случае было связано преимущественно с физическим процессом увеличения температуры вод по мере удаления от берега, поскольку степень насыщения вод кислородом почти на всем полигоне была одинаковой: 97 – 100% в поверхностных водах, 94 – 96% в придонных. Практически одинаковая степень насыщения кислородом всей толщи вод указывает на незначительные различия в окислительно-восстановительных условиях на поверхностном и придонном горизонтах в условиях относительно низкой температуры и замедления процессов фотосинтеза.

Насыщение вод поверхностного слоя кислородом выше 100% наблюдалось только в узкой вдольбереговой полосе, где резкое осолонение пресноводного стока уменьшило растворимость газов (рис. 2, *а*). В этой же области совершенно ожидаемо были обнаружены наиболее высокие концентрации биогенных элементов. Так, на ближайшей к берегу станции, расположенной на расстоянии 1,5 мили напротив рукава Быстрый, в распресненных поверхностных водах содержалось: фосфатов более 3,5 мкМ (на востоке полигона 0,2 – 0,3 мкМ); кремнекислоты более 90 мкМ (на востоке 8 – 10 мкМ); нитратов более 120 мкМ (на востоке 2 – 3 мкМ) (рис. 2, *б – з*).

В придонных водах в результате замедления процессов минерализации органического вещества наблюдается одинаковая степень насыщения вод кислородом 94 – 96% почти на всем полигоне, более высокое насыщение кислородом отмечается в прибрежных не полностью трансформированных водах с соленостью менее 16‰ (рис. 3, *а*). При практически одинаковой степени насыщения придонных вод полигона кислородом содержание биогенных элементов в них изменялось не так контрастно, как в поверхностных: фосфатов 0,8 – 0,9 мкМ у устья и 0,2 – 0,3 мкМ на востоке полигона; кремнекислоты 35 – 40 мкМ у устья и 7 – 8 мкМ на востоке; нитратов 4,5 – 5,0 мкМ у устья и около 2 мкМ на востоке (рис. 3, *б – з*).

Увеличение солености вод по мере удаления от берега менее всего сказалось на распределении нитритов. В поверхностных водах концентрации нитритов возле устья 0,7 – 0,8 мкМ превышали фоновую 0,4 мкМ на востоке всего в 2 раза, а в придонных вообще не отмечено разницы в содержании нитритов на западе и востоке полигона, где наблюдались значения 0,3 – 0,4 мкМ и

только по меридиану 29,9° в. д. располагалась область с концентрациями 0,5 – 0,6 мкМ.

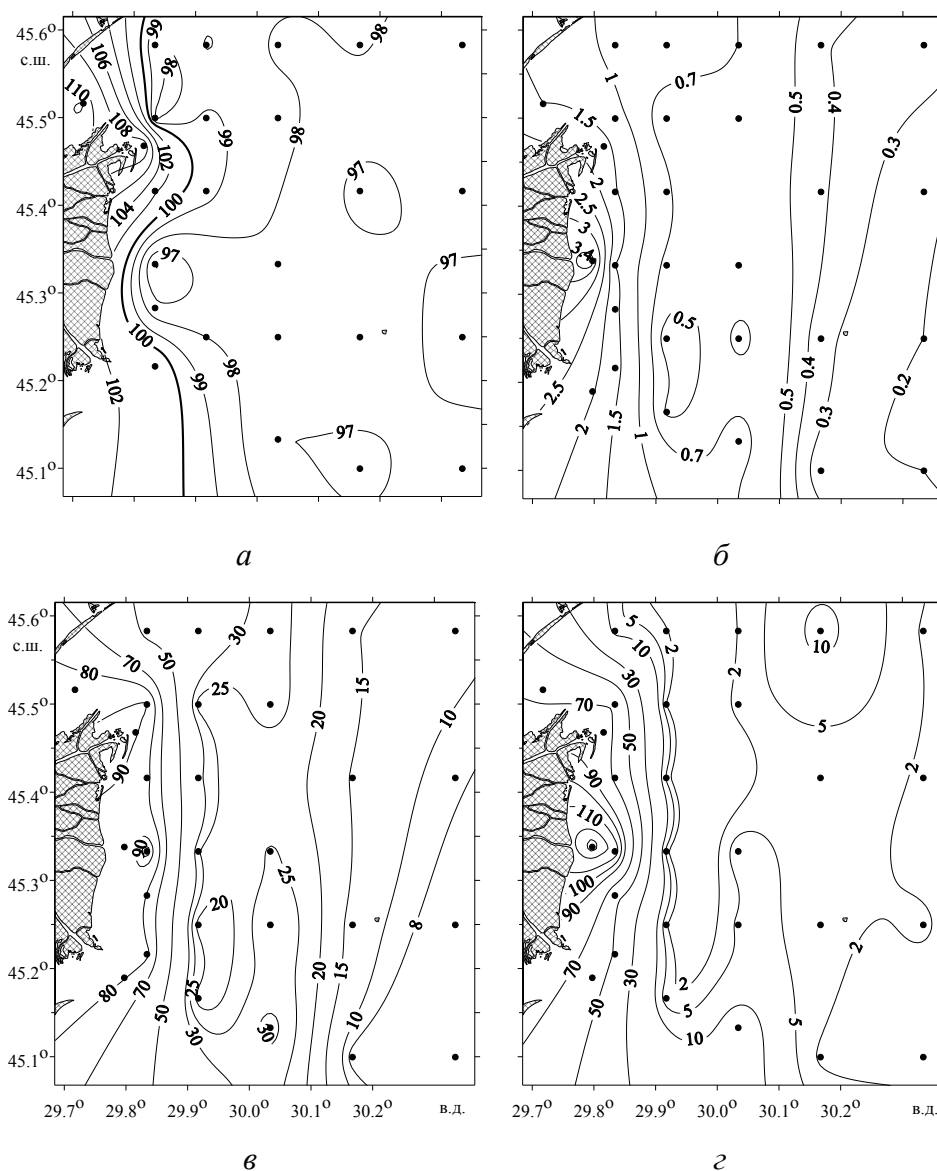


Рис. 2. Распределение на горизонте 1 м в декабре 1998 г. насыщения вод кислородом, % (а) и содержания (мкМ) фосфатов (б), кремнекислоты (в), нитратов (з)

Представленные рис. 2, 3 отражают, видимо, «идеальную» картину влияния стока Дуная на распределение гидролого-гидрохимических характеристик в приустьевом районе в зимний период. Для этого периода характерны ослабленная динамика вод [9], а также, вследствие низкой температуры вод, замедление биохимических процессов фотосинтеза в поверхностных водах и разложения осевшего органического вещества в придонных, что приводит к

практически одинаковой степени насыщения вод кислородом (см. выше). В результате чего поступившие со стоком Дуная биогенные элементы остались, вероятно, почти неизрасходованными в процессе фотосинтеза.

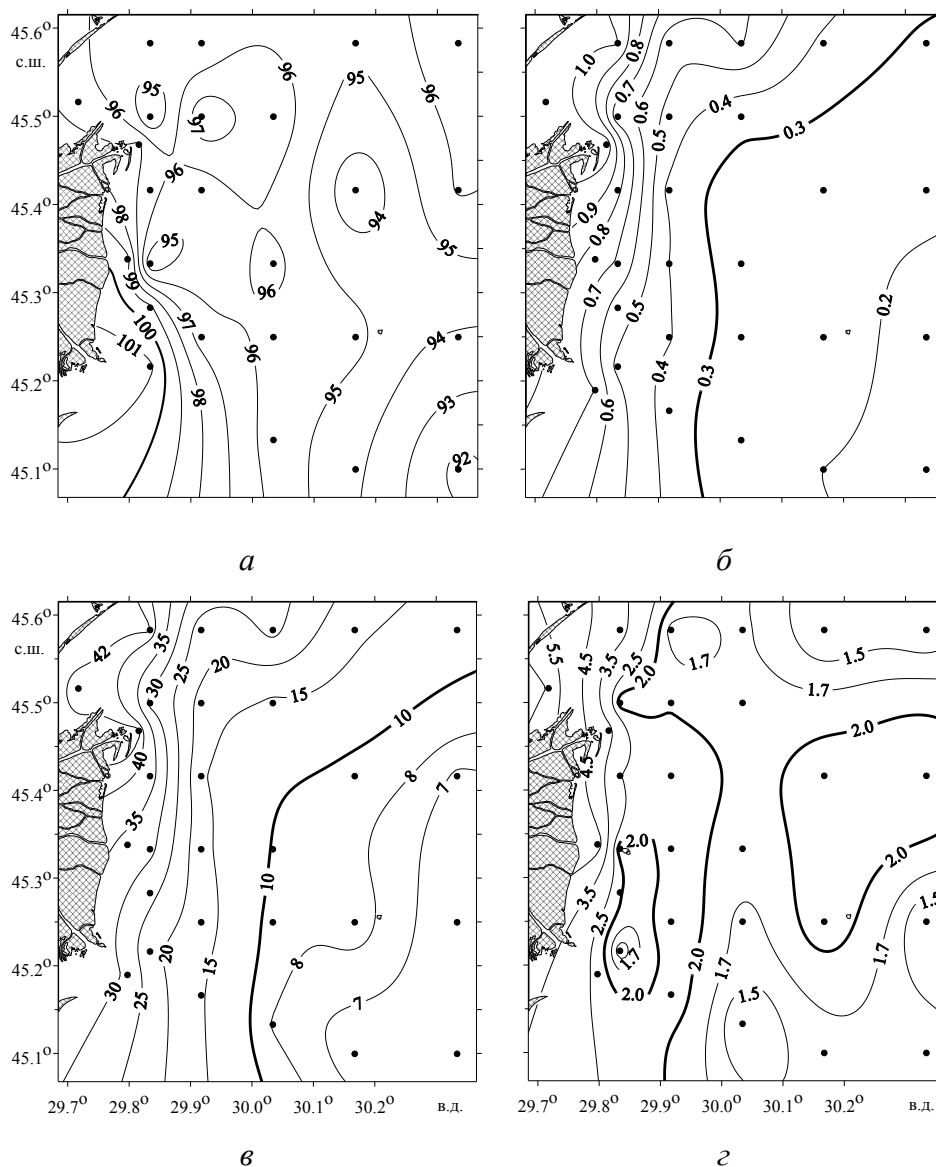


Рис. 3. Распределение на придонном горизонте в декабре 1998 г. насыщения вод кислородом, % (а) и содержания (мкМ) фосфатов (б), кремнекислоты (в), нитратов (г)

Ноябрь 2001 г. Съёмке по разрезу 45°10' с. ш. в ноябре 2001 г. предшествовал апвеллинг, возникший в результате длительного северо-западного ветра. Вследствие этого охлажденные распресненные воды с температурой менее 11,3°C и соленостью менее 17‰ заняли западную часть разреза и рас-

пространились в 20-метровой толще вод примерно до меридиана 30,3° в. д. [19].

На разрезе 45°10' с. ш. в верхней 15 – 20-метровой толще вод наблюдалось относительно однородное вертикальное распределение кислорода (концентрация около 6,5 мл/л) и степени насыщения вод кислородом (около 93 – 95%). Следует отметить, что впервые на всем полигоне (даже возле устья) степень насыщения поверхностных вод кислородом оказалась менее 100%. Наиболее важной особенностью распределения кислорода по разрезу являлась небольшая зона гипоксии (образовавшаяся, видимо, в летний период) на меридиане 29,9° в. д. на глубине 26 – 28 м с насыщением кислородом менее 40% (см. более подробно в работе [19]).

В этой зоне гипоксии содержание фосфатов, кремнекислоты и нитратов значительно превышало фоновое (фосфатов более 0,5 мкМ при фоновом 0,2 – 0,3 мкМ; кремнекислоты более 10 мкМ при фоновом 2 – 3 мкМ; нитратов более 4 мкМ при фоновом 1 – 2 мкМ). Тогда как концентрация нитритов 0,02 – 0,03 мкМ в зоне гипоксии оказалась даже меньше фоновой 0,06 – 0,10 мкМ.

Образование в данном районе зоны гипоксии с повышенным содержанием фосфатов, кремнекислоты и нитратов могло бы быть объяснено не только процессами минерализации органического вещества, но также и проникновением на шельф обедненных кислородом вод глубоководной части моря [5, 6, 20]. Но в таком случае повышенные концентрации перечисленных выше компонентов должны были бы наблюдаться в придонных водах по всему разрезу, что, однако, опровергается вышеприведенными особенностями их распределений. Следовательно, обнаруженная в позднеосенний сезон зона гипоксии – это результат чисто биохимических процессов в приустьевом районе Дуная.

Август 2009 г. Картины распределения насыщения вод кислородом и содержания биогенных элементов в поверхностных и придонных водах придунайского полигона в августе 2009 г. были очень похожи на приведенные выше результаты съемки в сентябре 1997 г.

Интенсивный фотосинтез, обеспечивший значительное пересыщение поверхностных вод кислородом почти на всем полигоне (фоновые значения в восточной части полигона составляли около 105%) (рис. 4, *a*), сопровождался «выеданием» биогенных элементов, причем для окисленных форм азота (рисунок для нитритов не приводится) практически полным (рис. 4, *б – г*).

Зато в придонных водах, на большей части полигона находившихся в состоянии гипоксии с насыщением кислородом менее 30% (рис. 5, *a*), концен-

трации биогенных элементов были значительно (в несколько раз) выше, чем на поверхности (рис. 5, б – г). Причем содержание кремнекислоты в придонных водах было даже выше, чем в поверхностных на ближайшей к устью станции!

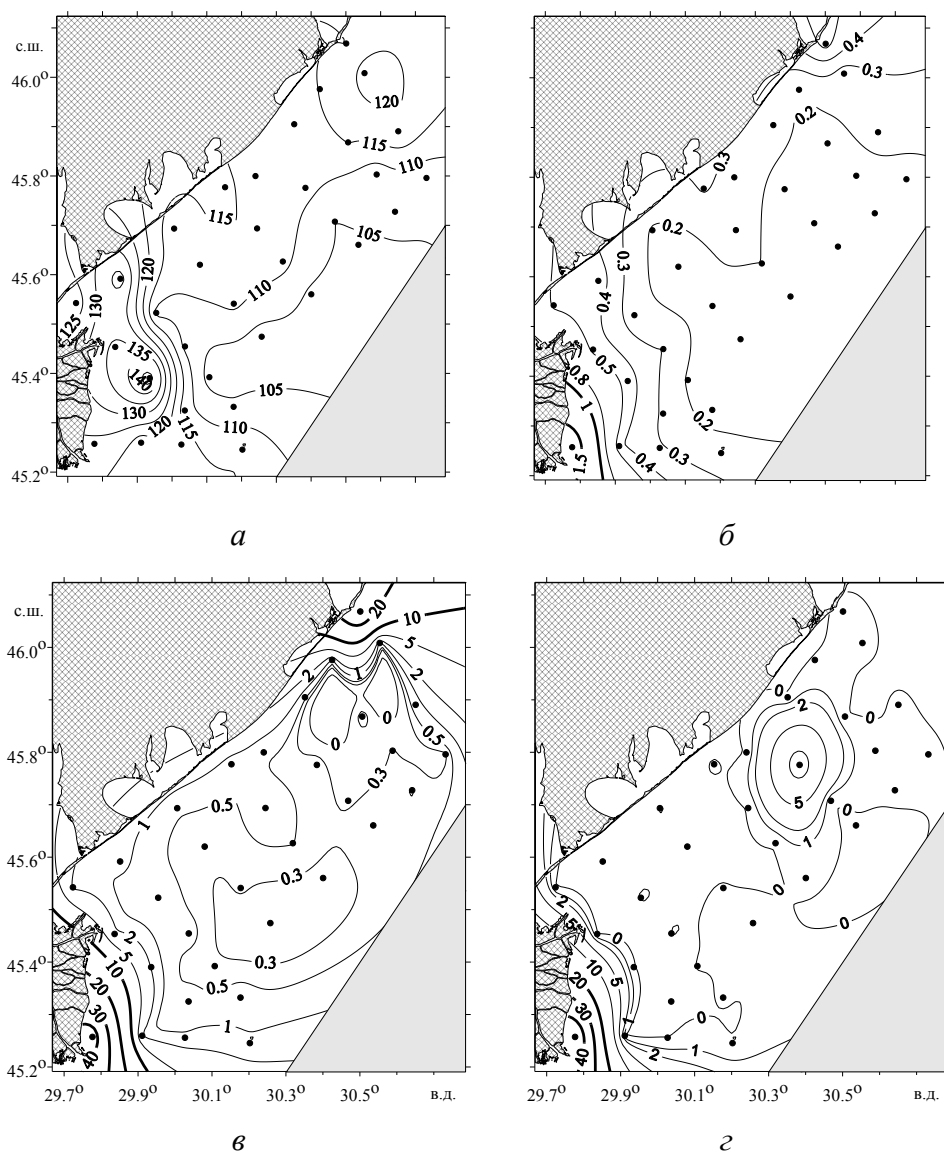


Рис. 4. Распределение на горизонте 1 м в августе 2009 г. насыщения вод кислородом, % (а) и содержания (мкМ) фосфатов (б), кремнекислоты (в), нитратов (г)

Следует также отметить, что на относительно мелководной станции на юго-востоке исчезновение гипоксических условий и повышение степени насыщения придонных вод кислородом до 70% сопровождалось заметным

уменьшением содержания биогенных элементов по сравнению с близлежащими водами.

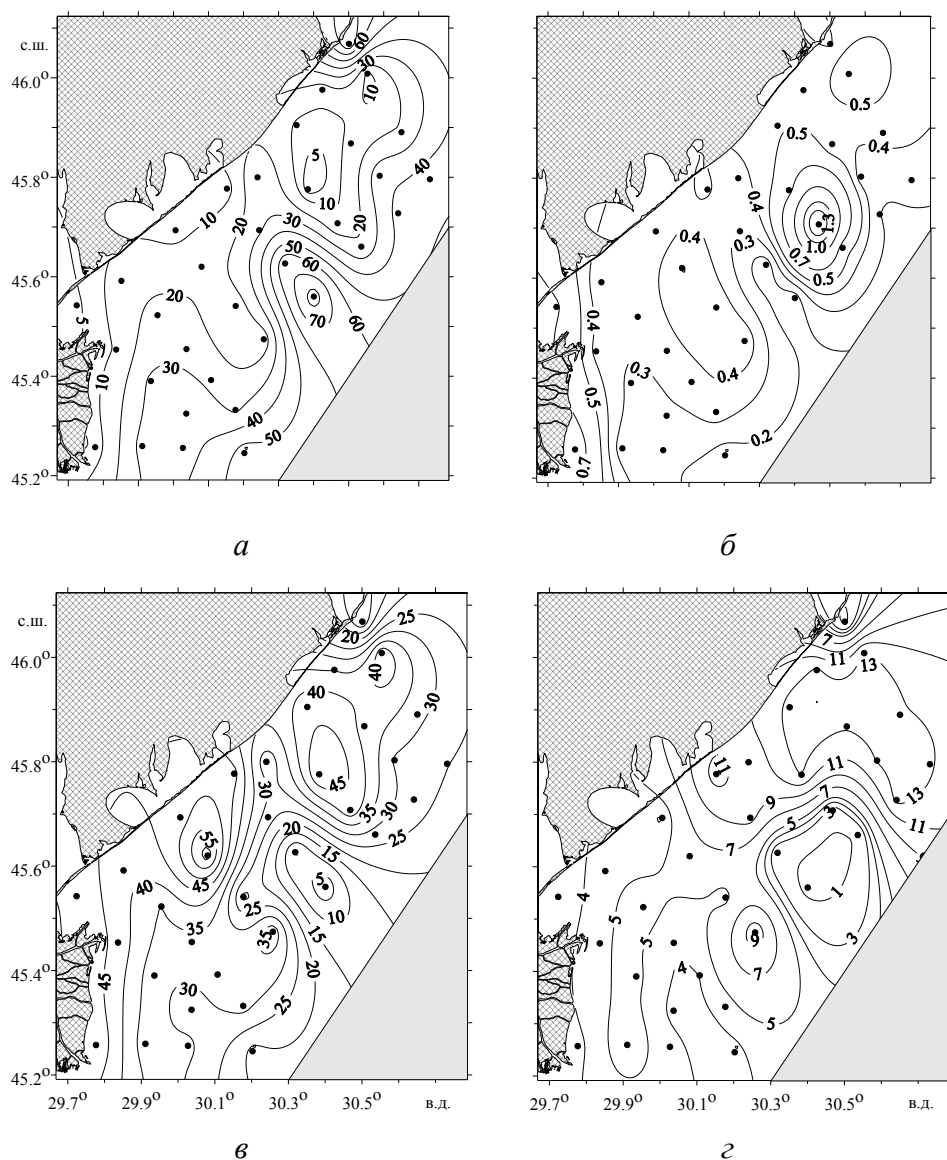


Рис. 5. Распределение на придонном горизонте в августе 2009 г. насыщения вод кислородом, % (а) и содержания (мкМ) фосфатов (б), кремнекислоты (в), нитратов (г)

Октябрь 2010 г. В октябре 2010 г. почти весь полигон по всей толще был заполнен водами открытой части шельфа с относительно высокой соленостью (более 17‰), влияние речного стока ощущалось только в верхнем 5-метровом слое прибрежных районов [21]. Возникла такая ситуация вследствие совместного действия течений, одно из которых узким потоком шло вдоль берега на юго-запад и не позволяло распресненным водам распространяться на север,

тогда как генеральный поток восточнее меридиана 30° в. д. следовал на северо-запад и принес на полигон воды открытой части шельфа.

В результате распространения стоков Днестра и Дуная вдоль берега во всех поверхностных распределениях наблюдалась узкая прибрежная полоса повышенных концентраций биогенных элементов, которые достигали максимума в небольшой области (2 – 3 мили от берега) возле устья Дуная (рис. 6, а – г).

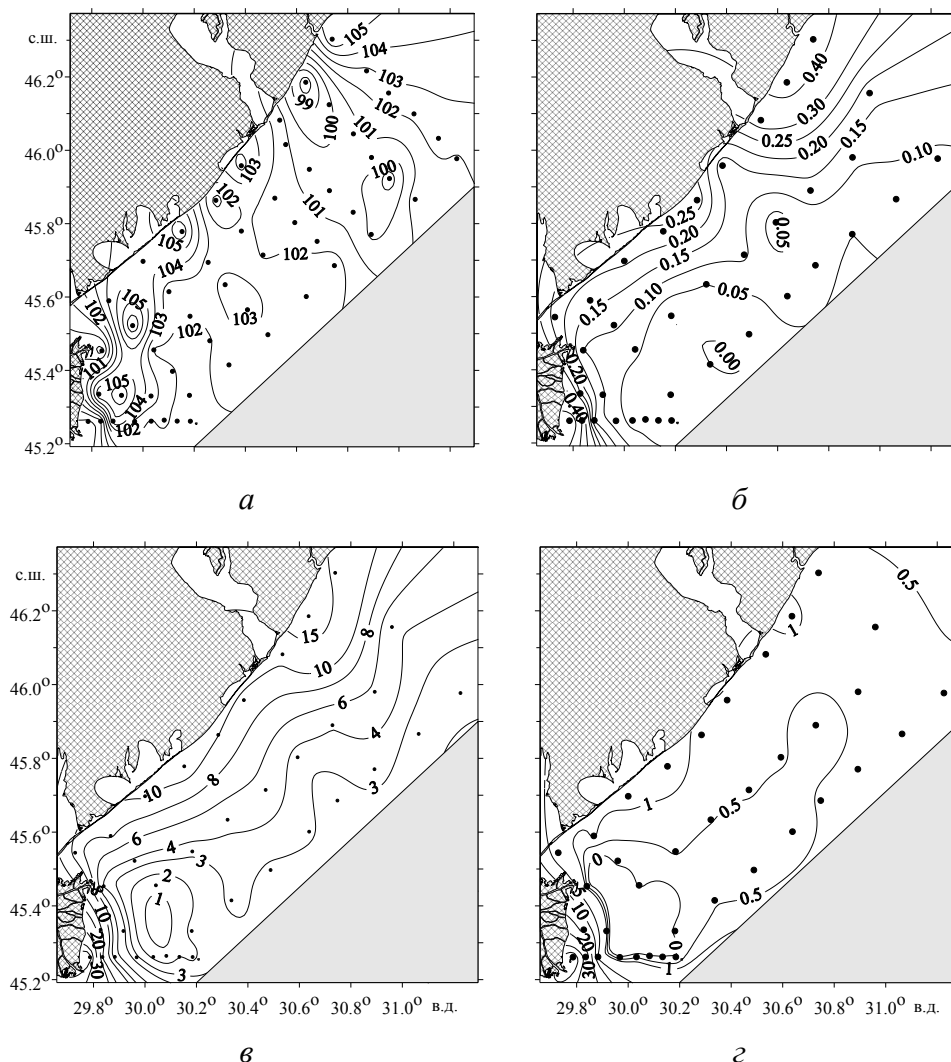


Рис. 6. Распределение на горизонте 1 м в октябре 2010 г. насыщения вод кислородом, % (а) и содержания (мкМ) фосфатов (б), кремнекислоты (в), нитратов (г)

Максимальные величины, зафиксированные на станции в 2 милях от берега, составляли: для степени насыщения кислородом более 105%; для концентраций фосфатов 0,7 мкМ, кремнекислоты 50 мкМ, нитратов 50 мкМ, нитритов около 1 мкМ. Тогда как уже на расстоянии 10 миль от берега со-

держание всех биогенных элементов уменьшалось как минимум в 10 раз, а фоновые значения на меридиане 30,1° в. д. составляли соответственно 0,05 мкМ; 1 – 2 мкМ; 0,5 мкМ; 0,05 мкМ, что примерно в 10 – 50 раз меньше максимальных значений.

Вследствие заполнения полигона водами открытой части шельфа наблюдалась примерно одинаковая степень насыщения кислородом (101 – 103%) придонных и поверхностных вод, только вблизи дунайского берега степень насыщения понижалась до 98% и менее. Другим следствием «запирания» стока Дуная и «вентиляции» вод северо-западного шельфа стало практически однородное распределение биогенных элементов по вертикали почти на всем полигоне, поэтому карты пространственного распределения биогенных элементов на поверхностном и придонном горизонтах восточнее 30,0° в. д. были весьма похожи. Исключением явилась уже упомянутая узкая вдольбереговая полоса возле устья Дуная, в которой благодаря пресноводному стоку содержание биогенных элементов на поверхности было заметно выше, чем у дна.

Принимая во внимание обнаруженную в этом районе в ноябре 2001 г. гипоксию, на придунайском участке векового разреза по 45°10' с. ш. в октябре 2010 г. были выполнены съемки по учащенной (через 1,5 – 2 мили) сетке станций, однако ожидавшихся областей с явным дефицитом кислорода выявлено не было. Это была редкая для взморья Дуная ситуация, когда насыщение кислородом придонных вод почти всего полигона превышало 100%, причем изолиния 100%-ного насыщения располагалась всего в 2 милях от устья. Как результат – отсутствие в придонных водах на разрезе по 45°10' с. ш. областей с повышенными концентрациями биогенных элементов (рисунки не приводятся).

Если не принимать во внимание сезонность, то картины распределения концентраций биогенных элементов в августе 2009 г. и октябре 2010 г. контрастно дополняют друг друга. В августе весь полигон был заполнен распресненными водами, что привело к пересыщению кислородом поверхностных вод и образованию гипоксических условий на дне, и в итоге концентрации биогенных элементов на поверхности и у дна резко отличались. Тогда как в октябре почти весь полигон был заполнен водами открытой части шельфа, что привело к однородному распределению по вертикали растворенного кислорода и биогенных элементов, за исключением узкой вдольбереговой полосы возле устья Дуная.

Сентябрь 2013 г. Съемке придунайского взморья в сентябре 2013 г. предшествовали продолжительные ветры северных румбов, которые не позволили пресноводному стоку Дуная распространиться на северо-восток и вызвали обширный вдольбереговой апвеллинг к юго-западу от Днестровского лимана [22]. Соленость поверхностных вод на ближайших к берегу станциях (расстояние от берега 2 – 3 мили) была больше 18‰, тогда как на остальной акватории полигона соленость на поверхности не превышала 17‰ (по этой изогалине можно судить о размерах площади апвеллинга) и резко понижалась по мере приближения к устью Дуная (рис. 7, а). Придонный горизонт практически всего полигона занимали воды открытой части шельфа с соленостью более 18‰ (рис. 7, б).

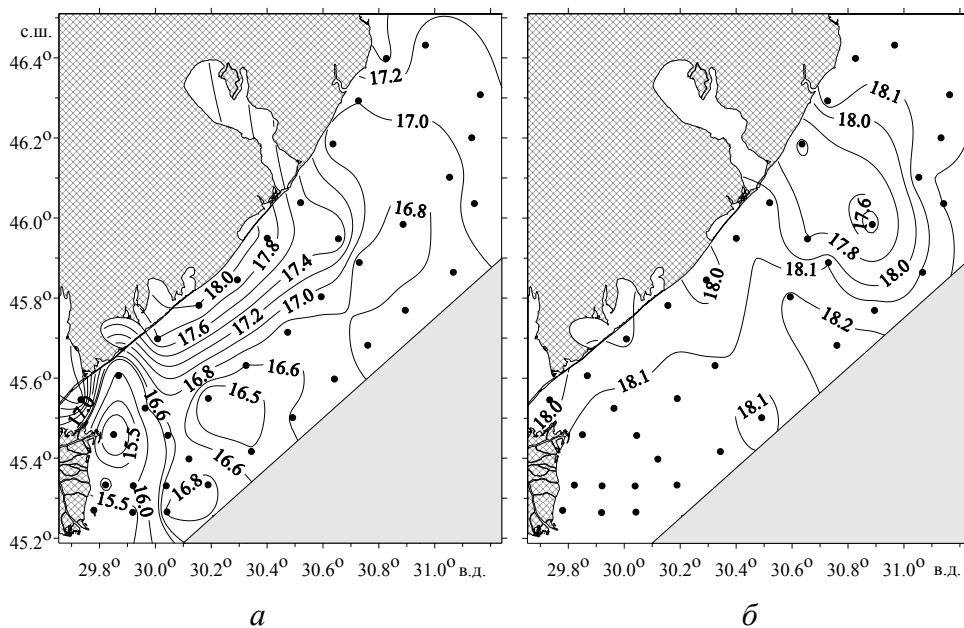


Рис. 7. Распределение солёности, ‰ на поверхностном (а) и придонном (б) горизонтах в сентябре 2013 г.

В данный гидрологический сезон в этом богатом биогенными элементами районе шельфа следовало ожидать пересыщения поверхностных вод кислородом. Однако подъем к поверхности обедненных кислородом придонных вод (о насыщении кислородом придонных вод см. далее) привел к экологически тревожной ситуации, когда насыщение кислородом всей толщи вод 2 – 3-мильной вдольбереговой полосы к юго-западу от Днестровского лимана не превышало 80% (рис. 8, а). 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 [23, 24] и произошедшего совсем недавно [25].

В поднявшихся на поверхность обедненных кислородом придонных водах в 2 – 3-мильной вдольбереговой полосе наблюдались значительно более высокие концентрации всех биогенных элементов по сравнению с фоновыми: фосфатов более 0,8 мкМ (при фоновом значении на юго-востоке полигона 0,4 мкМ); кремнекислоты более 15 мкМ (при фоновом 1 мкМ); суммы нитратов и нитритов более 3,5 мкМ (при фоновом 2,1 мкМ) (рис. 8, б – г); аммония более 0,7 мкМ (при фоновом 0,2 мкМ). Следует отметить, что концентрация кремнекислоты в соленых поверхностных водах к юго-западу от Днестровского лимана была не ниже, чем рядом с устьем Дуная.

В придонных водах от устья Дуная до меридиана 30,3° в. д. сохранялась область с низким (менее 50%) насыщением вод кислородом (рис. 9, а) (нет сомнений в том, что до апвеллинга размеры этой области были значительно больше; возможно, она захватывала весь полигон, как, например, в сентябре 1997 г. (см. выше)).

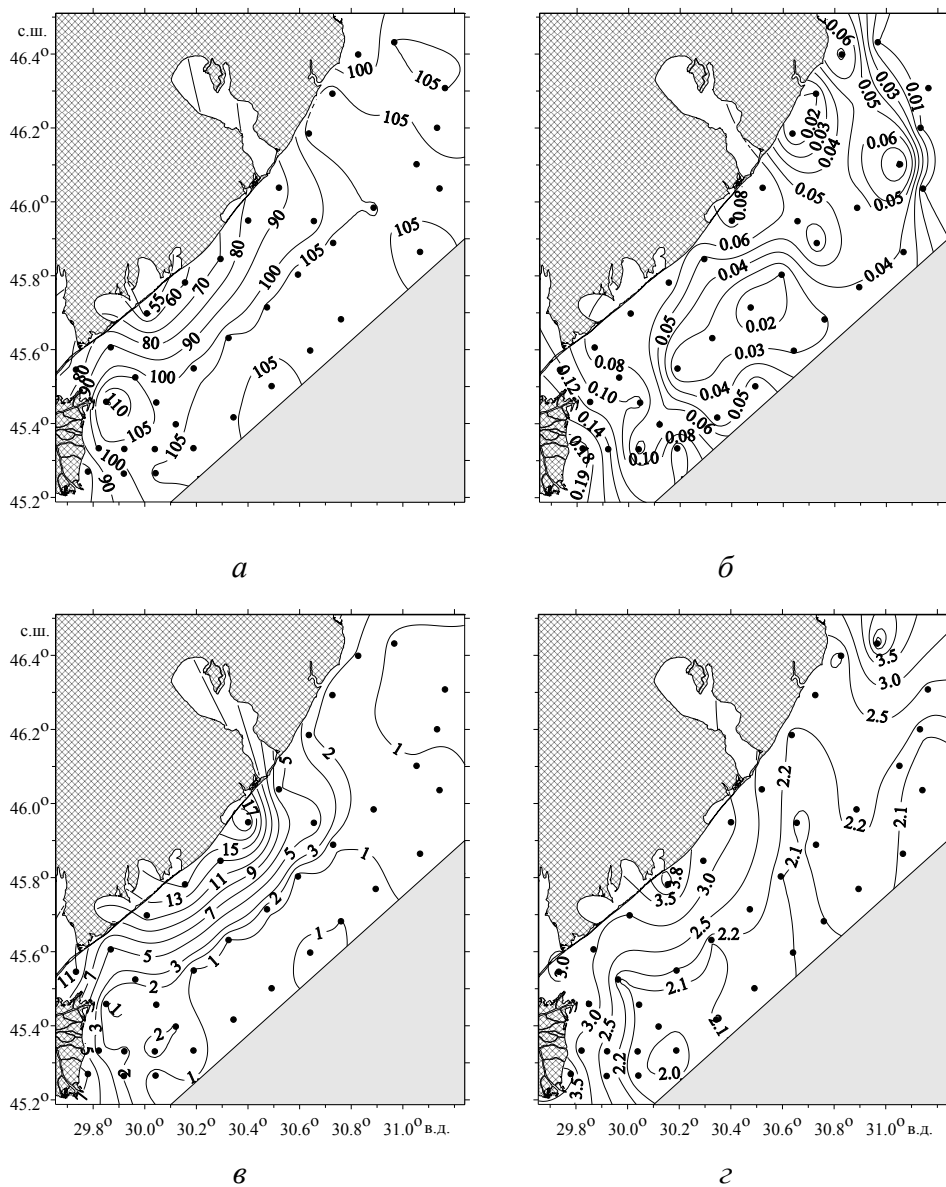


Рис. 8. Распределение на горизонте 1 м в сентябре 2013 г. насыщения вод кислородом, % (а) и содержания (мкМ) фосфатов (б), кремнекислоты (в), нитратов (г)

Концентрации всех биогенных элементов в районе, ограниченном изолинией 55%-ного насыщения кислородом, были заметно выше, чем в восточной части полигона: так, фосфатов содержалось более 0,1 мкМ; кремнекислоты 10 – 15 мкМ; суммы нитратов и нитритов 4,2 – 4,8 мкМ (рис. 9, б – г); аммония около 0,5 мкМ. В придонных водах у восточной границы полигона наблюдался также язык вод повышенной (более 18,1‰) солености, обозначивший район наиболее далекого проникновения к берегу вод открытой части шельфа. Степень насыщения вод кислородом здесь доходила до 90%, а

содержание биогенных элементов было определено меньше, чем в близлежащих водах: фосфатов около 0,05 мкМ; кремнекислоты около 4 мкМ, суммы нитратов и нитритов около 2,2 мкМ; аммония 0,2 мкМ.

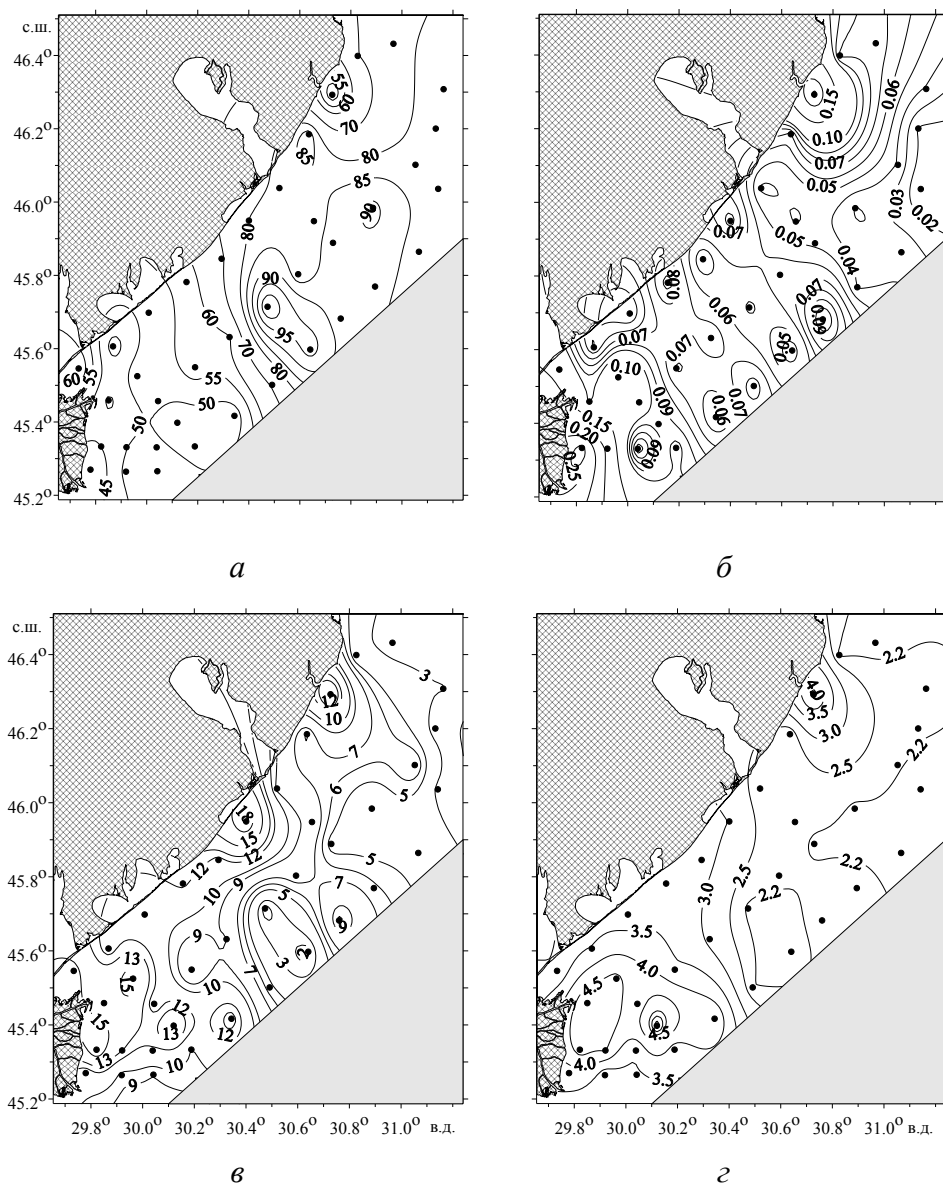


Рис. 9. Распределение на придонном горизонте в сентябре 2013 г. насыщения вод кислородом, % (а) и содержания (мкМ) фосфатов (б), кремнекислоты (в), нитратов (г)

Таким образом, в трех наблюдавшихся нами случаях подъема к поверхности придонных вод в результате апвеллинга в приустьевом районе Дуная зафиксированы значительное уменьшение степени насыщения кислородом и увеличение содержания биогенных элементов в поверхностных водах. Несомненно,

должно происходить аналогичное увеличение и концентраций иных продуктов разложения (в том числе и токсичных) осевшего взвешенного органического вещества. Подобная ситуация может негативно повлиять на состояние гидробионтов, вплоть до образования заморов рыбы.

Во всех перечисленных выше случаях 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. Наименее подвержено влиянию окислительно-восстановительных условий 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. При этом нитриты могут расходоваться в результате реакции *anammox* (*anaerobic ammonium oxidation*), в которой они взаимодействуют с аммонийной формой азота с образованием в итоге элементарной формы азота [26, 27].

Выводы.

1. Проведен качественный анализ взаимосвязи между насыщением вод кислородом и содержанием в них элементов главного биогенного цикла для поверхностных и придонных вод приустьевого района Дуная в различные гидрологические сезоны. Отмечены три наиболее важные ситуации:

– в случае распространения стока Дуная на восток на значительное (30 – 50 миль) расстояние содержание биогенных элементов в пересыщенных кислородом поверхностных водах значительно меньше, чем в испытывающих дефицит кислорода придонных водах;

– в случае «запирания» стока Дуная в узкой вдольбереговой полосе и заполнения почти всего приустьевого района водами открытого шельфа наблюдается практически однородное вертикальное распределение биогенных элементов за пределами 2 – 3-мильной вдольбереговой полосы;

– в случае апвеллинга поднявшиеся к поверхности ненасыщенные кислородом воды, распространяющиеся на расстояние до 20 – 30 миль от берега, содержат значительно больше биогенных элементов, чем окружающие.

2. В результате апвеллинга в таком сложном по гидрохимии районе, как приустьевое взморье Дуная, возможное резкое понижение насыщения кислородом поверхностных вод и увеличение содержания в них биогенных элементов могут негативно повлиять на состояние гидробионтов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tolmazin D. Changing coastal oceanography of the Black Sea. I: Northwestern Shelf // Progr. Oceanogr. – 1985. – 15. – P. 217 – 276.
2. Aubrey D., Moncheva S., Demirov E. et al. Environmental changes in the Western Black Sea related to anthropogenic and natural conditions // J. Mar. Syst. – 1996. – 7. – P. 411 – 425.

3. *Гаркавая Г.П., Богатова Ю.И., Берлинский Н.А. и др.* Районирование Украинского сектора северо-западной части Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2000. – С. 9 – 25.
4. *Гаркавая Г.П., Богатова Ю.И., Берлинский Н.А.* Формирование гидрохимических условий на устьевом взморье Дуная // Там же. – С. 133 – 141.
5. *Еремеев В.Н., Латун В.С., Совга Е.Е.* Влияние антропогенных загрязнителей и путей их переноса на экологическую обстановку в северо-западном районе Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 2001. – № 5. – С. 41 – 55.
6. *Friedrich J., Dinkel Ch., Friedl G. et al.* Benthic nutrient cycling and diagenetic pathways in the North-Western Black Sea // Estuar. Coast. Shelf Sci. – 2002. – 54, № 3. – P. 369 – 383.
7. *Михайлов В.Н., Морозов В.Н., Михайлова М.В. и др.* Гидрологические процессы в устьевой области Дуная и их возможные изменения // Водные ресурсы. – 1998. – № 1. – С. 24 – 32.
8. *Северо-западная часть Черного моря: биология и экология / Под ред. Ю.П. Зайцева, Б.Г. Александрова, Г.Г. Миничева.* – Киев: Наукова думка, 2006. – 58 с.
9. *Kourafalou V.H., Stanev E.V.* Modeling the impact of atmospheric and terrestrial inputs on the Black Sea coastal dynamics // Annal. Geophys. – 2001. – 19. – P. 245 – 256.
10. *Фесюнов О.Е., Назаренко М.Ф.* Геоморфологические и экологические особенности зоны гипоксии северо-западного шельфа Черного моря // Экология моря. – 1991. – Вып. 37. – С. 20 – 26.
11. *Кондратьев С.И., Внуков Ю.Л.* Структура вертикального распределения кислорода в водах приустьевом взморья Дуная в осенний период 1997 г. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 1999. – С. 125 – 137.
12. *Украинский В.В., Попов Ю.И., Орлова И.Г. и др.* Изменчивость кислородного режима и гидрологической структуры вод северо-западного шельфа Черного моря в летне-осенний период 1998 года // Метеорологія, кліматологія та гідрологія. – 2001. – Вип. 43. – С. 211 – 221.
13. *Берлинский Н.А., Гаркавая Г.П., Богатова Ю.И.* Проблемы антропогенного эвтрофирования и развития гипоксии в северо-западной части Черного моря // Экология моря. – 2003. – Вып. 6. – С. 17 – 22.
14. *Кондратьев С.И.* Пространственное распределение кислорода в водах приустьевом взморья Дуная в 1997 – 2010 годах // Морской гидрофизический журнал. – 2014. – № 3. – С. 60 – 76.
15. *Методы гидрохимических исследований океана / Под ред. О.К. Бордовского.* – М.: Наука, 1978. – 267 с.
16. *Кондратьев С.И., Геворгиз Н.С.* Влияние апвеллинга на гидрохимический режим районов устья Дуная и острова Змеиный осенью 1997 г. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 1999. – С. 111 – 125.
17. *Кондратьев С.И., Еремеева Л.В., Геворгиз Н.С.* Влияние апвеллинга на гидрохимический режим // Природные условия взморья реки Дунай и острова Змеиный / Под. ред. В.А. Иванова. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 1999. – С. 160 – 173.
18. *Большаков В.С.* Трансформация речных вод в Черном море. – Киев: Наукова думка, 1970. – 328 с.
19. *Kondratyev S.I., Lemesko E.M.* The extremely late bottom hypoxia on the North-Western Shelf of the Black Sea at the end of November 2001 // Oceanography of the Eastern Mediterranean and Black Sea / Ed. Aysen Yilmaz. – Turkey, TÜBİTAK, 2003. – P. 457 – 461.
20. *Кондратьев С.И., Романов А.С., Внуков Ю.Л.* Особенности распределения гидрохимических характеристик в районе материкового склона северо-западной части Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 2007. – № 5. – С. 96 – 106.

21. *Отчет* о работах в 67-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» // Научные фонды МГИ НАН Украины. – Севастополь, 2010. – 244 с.
22. *Отчет* о работах в 76-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» // Там же. – Севастополь, 2013. – 282 с.
23. *В Черном море* массово вымирает рыба. – <http://vkurse.ua/society/massovo-vymiraet-ryba>. 2007.
24. *Левит А.* В Черном море – массовый мор рыбы. – «Факты» (Одесса), 2010. – <http://fakty.ua/119146-v-chernom-more-yuzhnyh-limanah-i-ozerah-iz-za-anomalno-vysokoj-temperatury-vody-massovo-gibnet-ryba>.
25. *Выброс* сероводорода в Коблево. – <http://vimism.ru/tag/zamor-ryby>. 2015.
26. *Thamdrup B., Dalsgaard T., Jensen M.M. et al.* Anaerobic ammonium oxidation in the oxygen-deficient waters off northern Chile // *Limnol. Oceanogr.* – 2006. – 51. – P. 2145 – 2156.
27. *Naqvi S.W.A., Voss M., Montoya J.P.* Recent advances in the biogeochemistry of nitrogen in the ocean // *Biogeosci.* – 2008. – 5. – P. 1033 – 1041.

Features of spatial distribution of nutrients in the main biogenic cycle in the coastal waters of the Danube region in 1997 – 2013

Kondratyev S.I.

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
e-mail: skondratt@mail.ru*

Results of analysis of the data on spatial distribution of nutrients in the main biogenic cycle in the coastal waters of the Danube region obtained in the expeditionary studies performed by the Marine hydrophysical institute in 1997 – 2013 are represented. It is shown that degree of waters' oxygenation influences nutrients' content of the main biogenic cycle in the coastal waters of the Danube region. The bottom water upwelling in this region periodically resulting in significant decrease of surface water oxygenation considerably increases content of biogenic nutrients.

Keywords: coastal waters of the Danube region, hydrological features, oxygen saturation, hypoxia, nutrients of the main biogenic cycle, expeditionary data of 1997 – 2013.