

Три характерные гидролого-гидрохимические ситуации возле устья Дуная по данным экспедиционных исследований Морского гидрофизического института в 1997–2013 годах

С. И. Кондратьев

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

Поступила в редакцию 08.10.2018 г., после доработки – 29.11.2018 г.

Цель. Целью данной работы является исследование современной экологической обстановки в акватории северо-западного шельфа (СЗШ) Черного моря. Экология этого района в начале 60-х годов прошлого века серьезно ухудшилась вследствие интенсивной антропогенной нагрузки, что привело к эвтрофированию вод и регулярным заморам рыбы в теплый период года.

Методы и результаты. Морской гидрофизический институт в 1997–2013 гг. провел 7 гидролого-гидрохимических экспедиций в приустьевом взморье Дуная. В пробах воды, отобранных на придонном (0,5–1 м от дна) и поверхностном (0–1 м) горизонтах, было определено содержание растворенного кислорода и биогенных элементов (нитраты, нитриты, фосфаты, кремнекислота).

Выводы. Анализ результатов позволил выделить три характерные гидролого-гидрохимические ситуации для данного района: распространение трансформированного стока Дуная далеко на восток; прижимание стока Дуная к западному берегу Черного моря; вдольбереговой апвеллинг. В поверхностных водах СЗШ во время фотосинтеза происходит быстрое и почти полное извлечение кремнекислоты и нитратов, последнее наблюдается даже ранней зимой. Можно предполагать, что процессы минерализации взвешенного органического вещества в придонных водах СЗШ являются дополнительным источником кремнекислоты и нитратов. Для кремнекислоты это происходит в теплый период года, для нитратов – даже ранней зимой. Вдольбереговой апвеллинг летом может привести к дефициту кислорода в прибрежных водах и вызвать замор рыбы на СЗШ. Воды открытой части СЗШ, прижавшие в осенний период 2010 г. трансформированный пресноводный сток к западному берегу, содержали очень малые концентрации биогенных элементов, особо следует отметить низкое содержание кремнекислоты. Это указывает на продолжение опасного процесса изменения видового состава фитопланктона и далее – всей трофической цепи в Черном море.

Ключевые слова: северо-западный шельф Черного моря, приустьевое взморье Дуная, растворенный кислород, биогенные элементы, вдольбереговой апвеллинг, экспедиционные исследования.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственных заданий по теме № 0827-2019-0003 «Фундаментальные исследования океанологических процессов, определяющих состояние и эволюцию морской среды под влиянием естественных и антропогенных факторов, на основе методов наблюдения и моделирования» и по теме № 0827-2019-0004 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей».

Для цитирования: Кондратьев С. И. Три характерные гидролого-гидрохимические ситуации возле устья Дуная по данным экспедиционных исследований Морского гидрофизического института в 1997–2013 годах // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 4. С. 367–383. doi:10.22449/0233-7584-2019-4-367-383

Three Typical Hydrological-Hydrochemical Situations Near the Danube River Mouth Based on the Marine Hydrophysical Institute Research Expeditions in 1997-2013

S. I. Kondratev

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

Purpose. The paper is aimed at studying the present state of water ecology of the Black Sea northwestern shelf (NWS). Since the early 60-ies of the last century, ecology in this region deteriorated seriously due to intensive anthropogenic load that resulted in eutrophication of waters and regular fish mortality in the warm period of a year.

Methods and Results. In 1997–2013 Marine Hydrophysical Institute realized 7 hydrological and hydrochemical expeditions near the Danube mouth. The dissolved oxygen and nutrients (nitrate, nitrite, phosphate and silicic acid) contents were defined in the water samples collected at the bottom (0.5–1 m above the bottom) and surface (0–1 m) horizons.

Conclusions. Revealed are three hydrological-hydrochemical situations typical of the region: distribution of the transformed Danube flow far to the east, pressing of the Danube flow to the west coast of the Black Sea and alongshore upwelling. Silica and nitrate are rapidly and almost completely extracted from the seawater (the latter one – even in early winter) during photosynthesis in the surface waters on the northwestern shelf. The processes of suspended organic matter mineralization in the bottom waters of the northwestern shelf are assumed to be an additional source of silicic acid and nitrates. As for silicic acid, the process takes place during a warm season, and for nitrates – even in early winter. The alongshore upwelling in summer can lead to oxygen deficiency in the coastal waters and that, in its turn, can result in fish mortality on the shelf. The waters of the northwestern shelf open part which, in autumn 2010, pressed the Danube transformed freshwater flow to the Black Sea west coast, contained very small concentrations of biogenic elements (low content of silicic acid should be particularly noted). The study confirms the fact that the hazardous process of change in the phytoplankton species composition still continues, thus, altering the whole food chain in the Black Sea.

Keywords: northwestern shelf (NWS) of the Black Sea, estuarine area near the Danube mouth, dissolved oxygen, nutrients, alongshore upwelling, field studies.

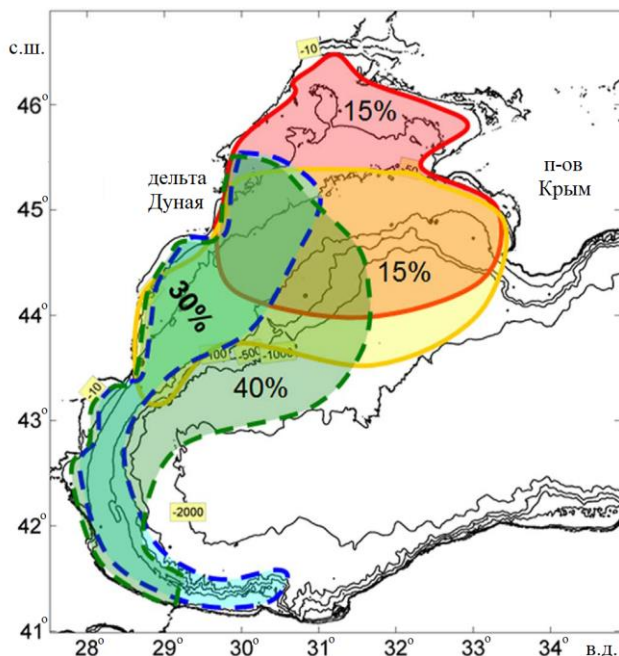
Acknowledgments: the investigation is carried out within the framework of the state task on theme № 0827-2018-0003 “Fundamental studies of the oceanologic processes conditioning the marine environment state and evolution under the impact of natural and anthropogenic factors based on the methods of observations and modeling” and theme № 0827-2019-0004 “Complex interdisciplinary investigations of the oceanologic processes conditioning functioning and evolution of the Black and Azov seas’ coastal zones”.

For citation: Kondratev, S.I., 2019. Three typical hydrological-hydrochemical situations near the Danube River mouth based on the Marine Hydrophysical Institute research expeditions in 1997-2013. *Physical Oceanography*, [e-journal] 26(4), pp. 326-340. doi:10.22449/1573-160X-2019-4-326-340

Введение

В 60-х годах прошлого века после серьезного ухудшения экологической обстановки в акватории северо-западного шельфа (СЗШ) Черного моря вследствие антропогенного эвтрофирования вод начались регулярные заморы рыбы в летнее время. Четыре крупные реки (Дунай, Днепр, Днестр и Южный Буг), общая площадь водосбора которых превышает площадь СЗШ в 23 раза [1], приносят в Черное море индустриальные, агрохозяйственные и бытовые стоки из десятка стран Европы. Трансформированный пресноводный сток этих рек, по данным спутниковых снимков [2], в некоторые периоды распространяется по всему СЗШ, достигая м. Тарханкут, а иногда и м. Херсонес, но

чаще уходит на юг вдоль западного берега (рис. 1). Наиболее высокая антропогенная нагрузка при любом из этих вариантов приходится на прибрежную акваторию, которая простирается от устья Дуная до Днепро-Бугского лимана и в отдельных случаях принимает сток всех четырех рек (если сток Дуная уходит на юг, то с севера поступают такие же эвтрофированные воды).



Р и с. 1. Распространение трансформированного пресноводного стока Дуная в летний период по данным распределения хлорофилла в поверхностных водах [2]

F i g. 1. Propagation of the Danube transformed freshwater flow in summer based on chlorophyll distribution in the surface waters [2]

Пресноводный сток обеспечивает в этой акватории питание фитопланктона неорганическими формами азота, фосфора и кремния в течение всего года, отчего вспышки цветения фитопланктона на СЗШ стали наблюдаться не только весной и осенью, но и зимой [3, 4]. Однако наиболее экологически опасная обстановка на СЗШ наблюдается в теплое время года. В начале весенне-летнего периода (апрель – май [5, 6]) на СЗШ вследствие прогрева вод возникает плотностная стратификация (в которой участвуют и температура, и соленость), обеспечивающая распространение трансформированного речного стока по поверхности, вследствие чего в теплых распресненных поверхностных водах появляются высокие концентрации биогенных элементов. Это приводит к активному развитию фитопланктона (который постепенно расходует биогенные элементы) и к высокому содержанию в поверхностных водах растворенного кислорода, образующегося в процессе фотосинтеза.

В придонных водах происходит обратный процесс – кислород расходует-ся на окисление осевшего взвешенного органического вещества (ВОВ) и возвращение в водную фазу растворенных форм биогенных элементов. При

наличии мощного пикноклина, ограничивающего вертикальный обмен, поступление кислорода с поверхности в придонные воды возможно только в результате ветрового перемешивания. При неблагоприятных метеорологических условиях (длительная штилевая погода) в конце летнего периода (август – сентябрь) на СЗШ содержание кислорода в придонных водах может уменьшиться до состояния гипоксии, при котором насыщение вод кислородом становится меньше 30%.

Возможно, именно финальная стадия развития гипоксии – появление сероводорода после полного израсходования кислорода и последующие вследствие этого заморы рыбы – вызвала повышенное внимание к СЗШ во второй половине XX в. Это явление регулярно и подробно обсуждалось в литературе [7–21] с неизменными выводами о неблагоприятной экологической обстановке на СЗШ. В последние годы появились публикации об улучшении экологии шельфа [22–25] и частичном восстановлении филофорного поля Зернова [26, 27]. Однако наблюдавшийся в августе 2018 г. на протяжении 15 км вдоль берега замор рыбы в Днепро-Бугском лимане [28] показал, что эвтрофикация СЗШ продолжается. Конечно, Днепро-Бугский лиман – лишь небольшая мелководная часть шельфа, подверженная вследствие относительно небольших размеров и малых глубин не меньшей антропогенной нагрузке, чем приустьевое взморье Дуная, но неблагоприятные изменения в гидрохимическом составе вод лимана неизбежно отразятся и на состоянии всего шельфа.

Морской гидрофизический институт (МГИ) в 1997–2013 гг. провел 7 экспедиций в приустьевом взморье Дуная, некоторые результаты которых были представлены в [20, 21]. При обобщении результатов удалось выделить, на наш взгляд, три характерные гидролого-гидрохимические ситуации, в которых:

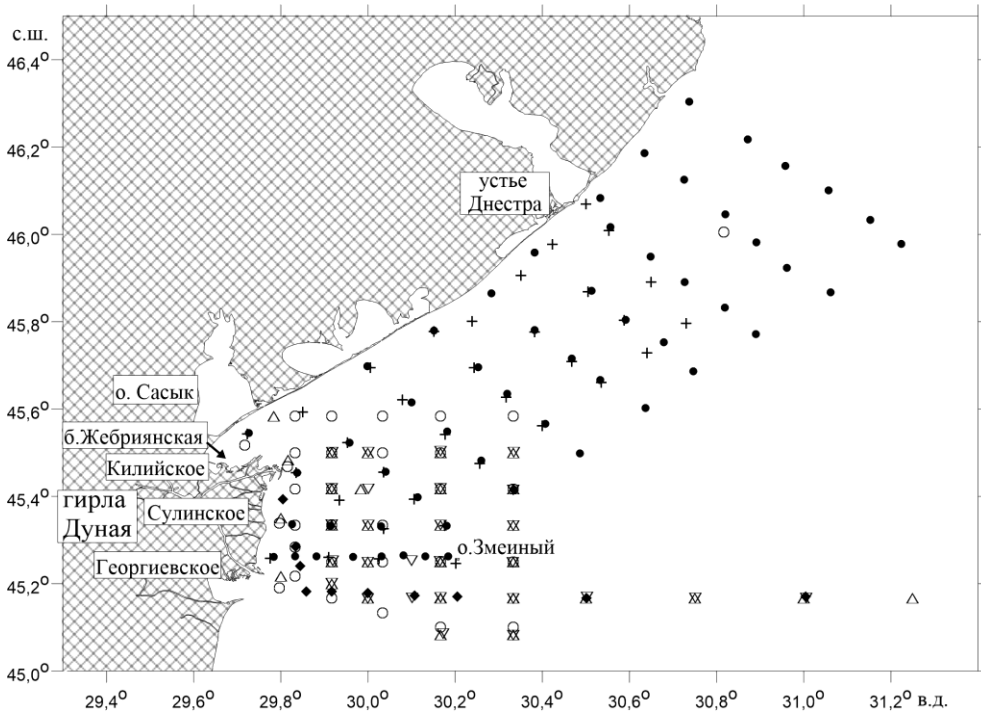
- трансформированные речные воды р. Дунай беспрепятственно распространялись на восток или северо-восток;
- трансформированные речные воды р. Дунай прижимались к западному берегу Черного моря и уходили на юг, не проникая на восток более чем на 5 миль;
- в результате процессов вдольберегового апвеллинга в летний период в поверхностных водах приустьевом взморья отмечалось снижение содержания кислорода.

В недавно предложенной классификации вариантов распределения по СЗШ трансформированного стока Дуная в летний период по данным спутниковых наблюдений [2] первые две ситуации получили название «восточного» и «западного» типов распространения. Там же были рассмотрены еще два варианта, однако в обоих этих случаях рассматривались области за пределами полигона МГИ. Подробному рассмотрению пространственного распределения гидролого-гидрохимических характеристик в определенных нами трех характерных ситуациях и посвящена данная работа.

Материалы и методы

Исследования состояния вод в приустьевом районе Дуная проводились МГИ 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», в октябре 2010 г. и сентябре 2013 г. на НИС «Профессор Во-

дьяницкий». Гидрохимические наблюдения были проведены по сетке станций, представленной на рис. 2. Более подробная схема станций для отдельных рейсов приводится на рисунках, демонстрирующих пространственное распределение биогенных элементов.



Р и с. 2. Схема станций, выполненных МГИ НАН Украины, в водах приустьевых района Дуная: Δ – сентябрь 1997 г., НИС «Трепанг»; ∇ – октябрь 1997 г., НИС «Трепанг»; \circ – декабрь 1998 г., НИС «Диорит»; \blacklozenge – ноябрь 2001 г., НИС «Вихрь»; $+$ – август 2009 г., НИС «Сапфир»; \bullet – октябрь 2010 г., сентябрь 2013 г., НИС «Профессор Водяницкий»

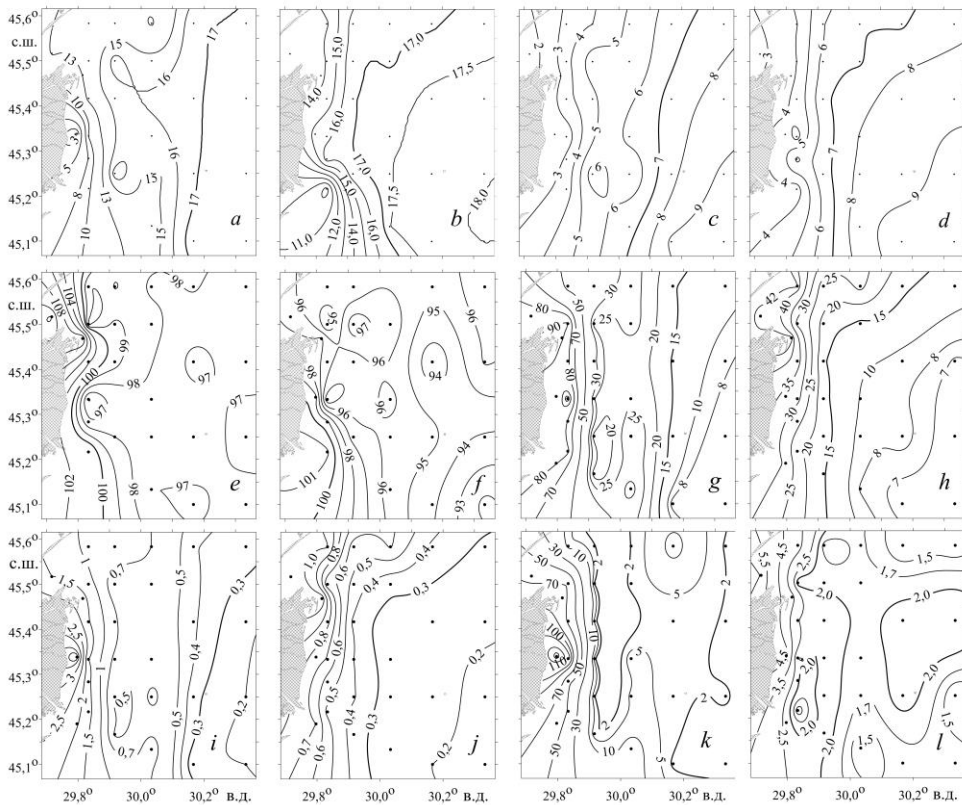
F i g. 2. Scheme of the stations performed by MHI NAS of Ukraine in the Danube near-mouth region: Δ – September, 1997, R/V “Trepang”; ∇ – October, 1997, R/V “Trepang”; \circ – December, 1998, R/V “Diorit”; \blacklozenge – November, 2001, R/V “Vikhr”; $+$ – August, 2009, R/V “Sapfir”; \bullet – October, 2010, September, 2013, R/V “Professor Vodyanitsky”

Инструментальные гидрологические наблюдения и отбор проб выполнялись зондирующими комплексами *Seabird-Electronics* на НИС «Профессор Водяницкий» и шельфовым измерительным комплексом ШИК-3 – в остальных рейсах. Пробы воды на придонном (0,5–1 м от дна) и поверхностном (0–1 м) горизонтах отбирались с помощью кассеты пластиковых батометров. Аналитические определения концентраций биогенных элементов (нитратов, нитритов, фосфатов и кремнекислоты) проводились, как правило, в стационарной береговой лаборатории отдела биогеохимии моря МГИ, для чего пробы отбирались в пластиковые контейнеры объемом 250 мл и замораживались при температуре -18°C сразу после отбора [20, 21].

Химико-аналитические определения проводились по методикам, рекомендованным для применения при гидрохимических исследованиях океана [29]. Для калибровки приборов при физико-химических методах измерения и контроля правильности результатов анализа использовались аттестованные стандартные образцы производства НТК «Физико-химический институт НАН Украины».

Распространение трансформированного пресноводного стока далеко на восток или северо-восток

Декабрь 1998 г. Такое распространение было зафиксировано в двух сезонах: ранней зимой в начале декабря 1998 г. и летом в августе 2009 г. Подробно рассмотрим особенности пространственного распределения гидрохимических элементов для этих случаев.



Р и с. 3. Распределение в поверхностных (a, c, e, g, i, k) и придонных (b, d, f, h, j, l) водах в декабре 1998 г.: солености, ‰ (a, b), температуры, °C (c, d), насыщения кислородом, % (e, f), содержания (мкМ) кремнекислоты (g, h), фосфатов (i, j), нитратов (k, l)

F i g. 3. Distribution of salinity, ‰ (a, b), temperature, °C (c, d), oxygen saturation, % (e, f), content (µM) of silicic acid (g, h), phosphate (i, j) and nitrate (k, l) in the surface (a, c, e, g, i, k) and bottom (b, d, f, h, j, l) waters in December, 1998

Ранней весной 1998 г. наблюдалось следующее распределение гидрологических и гидрохимических характеристик по полигону (рис. 3). Соленость

поверхностных вод плавно увеличивалась по мере удаления от устья Дуная от 3‰ напротив Сулинского гирла до 17‰ (значения, принимаемого за границу смешения пресных и морских вод в Черном море [30]) возле 30,2° в. д. (рис. 3, *a*). Соленость придонных вод возле устья была значительно выше, около 15‰ возле Сулинского гирла и 11‰ – возле Георгиевского. Однако придонная изохалина 17‰ была расположена не так далеко от поверхностной, примерно на 30° в. д.

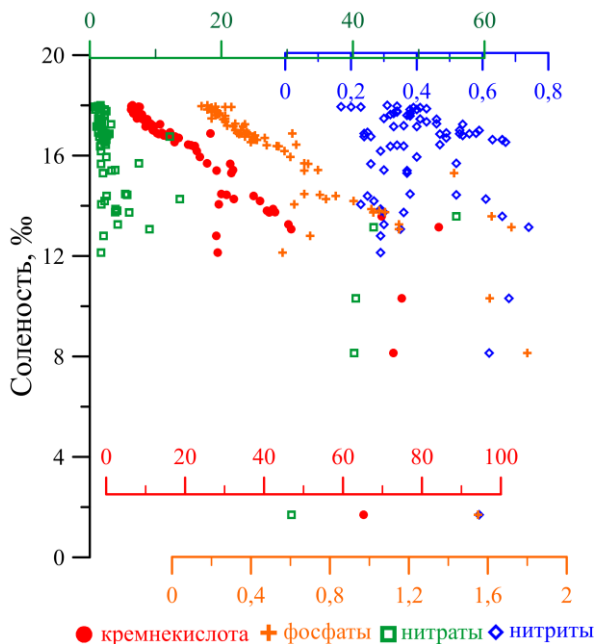
В отличие от солености температура поверхностных и придонных вод не слишком различалась даже возле устья Дуная, а после достижения величины 6°C на поверхности, примерно в 10 милях от устья, вертикальный градиент температуры становился практически нулевым. По достижении соленостью величины 11–12‰ условная плотность поверхностных и придонных вод становилась одинаковой, однако не превышала $\sigma_t = 13,7 \text{ кг/м}^3$ на всем исследованном полигоне. В то же время условная плотность вод на мелководной (глубина 11 м) станции, расположенной севернее, напротив устья Днестра (30,82° с. ш., 46° в. д.), достигала $\sigma_t = 14,0 \text{ кг/м}^3$, т. е. там (и, естественно, севернее) уже началось проникновение холодных прибрежных вод под менее плотные воды открытой части шельфа.

Подобное смешение речных и морских вод в начале зимнего периода при не слишком активном процессе фотосинтеза должно было сопровождаться постепенным уменьшением содержания биогенных элементов в поверхностных водах по мере удаления от устья Дуная. Подобная ситуация [15] действительно соблюдалась для распределения кремнекислоты и фосфатов (рис. 3, *g – j*). Высокие концентрации обоих элементов в поверхностных и придонных водах возле устья Дуная быстро уменьшались по мере удаления от берега, что заканчивалось монотонным распределением по вертикали возле 30,1° в. д.

Однако для окисленных форм азота подобное «консервативное» распределение (т. е. практически линейная зависимость содержания гидрохимического элемента от величины солености) в поверхностных водах не соблюдалось. Концентрации нитратов в поверхностных и придонных водах резко уменьшались около изохалины 13‰ и далее к востоку оставались на уровне около 2 мкМ во всей толще вод (рис. 3, *k, l*). Содержание нитритов, напротив, на всем полигоне независимо от величины солености находилось на уровне 0,4–0,5 мкМ и только в поверхностных водах возле Сулинского гирла увеличивалось до 0,8–0,9 мкМ.

Отмеченное различие в поведении биогенных элементов в процессе смешивания речных и морских вод в декабре 1998 г. было подтверждено изменением в содержании четырех форм биогенных элементов по мере увеличения солености (рис. 4). Для кремнекислоты и фосфатов наблюдалась практически линейная связь между концентрацией и соленостью после того, как соленость становилась выше 12‰. Для окисленных форм азота ситуация была совершенно иной: содержание нитратов уменьшалось почти в 10 раз при достижении соленостью значения более 12‰, тогда как содержание нитритов почти не зависело от солености. Значительный разброс концентраций нитратов, кремнекислоты и фосфатов в слабосоленых (4–10‰) водах связан, возможно, с отбором проб в различных районах исследованного полигона. Если

в исследованиях, которые проводились летом 1995 г., зимой и весной 1997 г. [15], в каждой экспедиции станции располагались компактной группой возле отдельного гирла к западу от 30° в. д., то в декабре 1998 г. размеры полигона МГИ были значительно больше.



Р и с. 4. Распределение концентрации (мкМ) кремнекислоты, фосфатов, нитратов и нитритов относительно солености в декабре 1998 г.

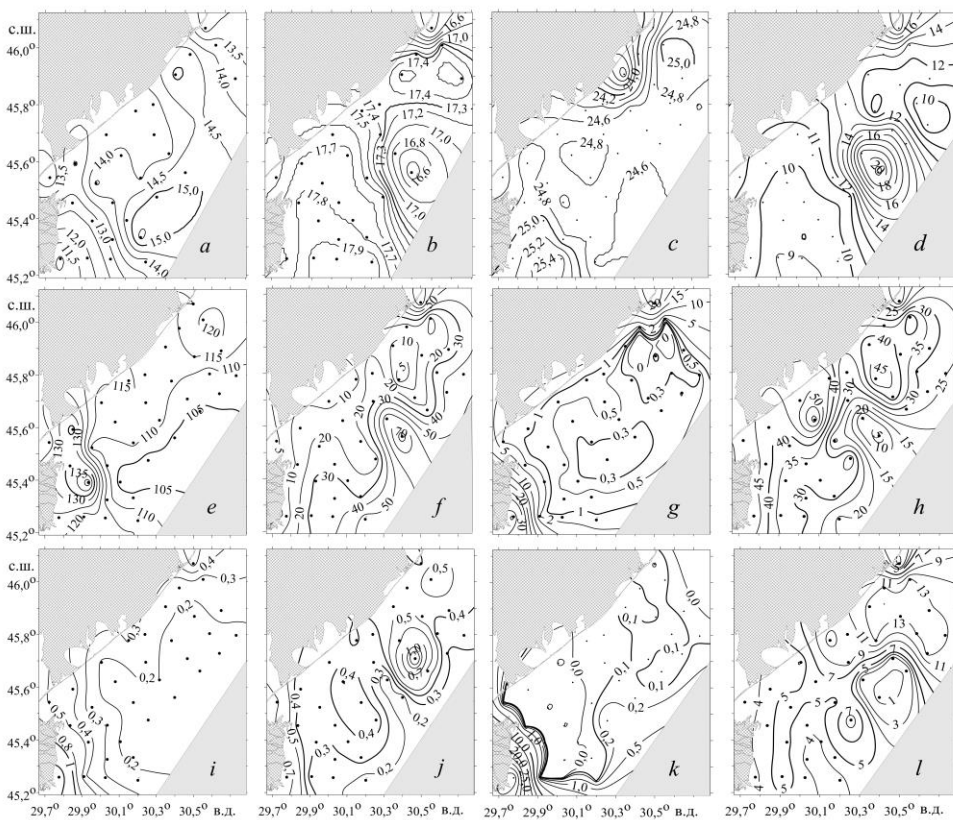
F i g. 4. Distribution of silicic acid, phosphate, nitrate and nitrite concentrations (μmM) relative to salinity in December, 1998

Удаление нитратов из речного стока при одновременном консервативном поведении кремнекислоты позволяет предположить, что ранней зимой 1998 г. процессы фотосинтеза полностью не прекратились, но в них не участвовал кремнекислотный фитопланктон (диатомовые). Таким образом, для роста диатомовых нужна не только определенная минимальная концентрация кремнекислоты в воде, оцениваемая в 2 мкМ [15], но и определенная температура, тогда как другие виды фитопланктона не столь требовательны к условиям роста.

Предположения о продолжающемся процессе фотосинтеза (зимнее цветение фитопланктона возле устья Дуная наблюдалось неоднократно по распределению хлорофилла *a* в поверхностных водах [4]) также подтверждаются данными о насыщении вод кислородом. В открытой части шельфа насыщение вод кислородом было на уровне 97–98%, в то же время возле берега оно было выше, достигая 100–102% напротив Сулинского гирла и 108–110% – напротив Килийского (рис. 3, *e*). Если 100–102%-ное насыщение еще можно объяснить уменьшением растворимости кислорода при увеличении солености в процессе смешения речной воды с морской, то высокое 108–110%-ное насыщение свидетельствует, что, несмотря на низкую (2–3°C) температуру

воды, фотосинтез в Жебриянской бухте, защищенной от северо-западных ветров, остановился не полностью. Также продолжались процессы минерализации ВОВ в придонных водах: при почти одинаковой температуре и солености насыщение кислородом поверхностных вод к востоку от 30° в. д. было не менее 97%, в придонных водах – не более 94–95% (рис. 3, *f*).

Август 2009 г. Ситуация с максимальным влиянием речного стока на распределение гидролого-гидрохимических характеристик в летний период наблюдалась в приустьевом взморье Дуная в августе 2009 г. Если зимой 1998 г. пресноводный сток существенно повлиял только на вертикальные градиенты солености на ближайшей к устью акватории к западу от 30° в. д., то летом 2009 г. поверхностные и придонные воды отличались по температуре и солености на всем исследованном полигоне (рис. 5, *a – d*).



Р и с. 5. Распределение в поверхностных (*a, c, e, g, i, k*) и придонных (*b, d, f, h, j, l*) водах в августе 2009 г.: солености, ‰ (*a, b*), температуры, °С (*c, d*), насыщения кислородом, % (*e, f*), содержания (мкМ) кремниевой кислоты (*g, h*), фосфатов (*i, j*), нитратов (*k, l*)

F i g. 5. Distribution of salinity, ‰ (*a, b*), temperature, °С (*c, d*), oxygen saturation, % (*e, f*), content (μМ) of silicic acid (*g, h*), phosphate (*i, j*) and nitrate (*k, l*) in the surface (*a, c, e, g, i, k*) and bottom (*b, d, f, h, j, l*) waters in August, 2009

Соленость распресненных поверхностных вод не превышала 15‰, на придонном горизонте она была не менее 17,3‰. Температура на поверхности составляла около 24–25°С, у дна – всего около 10–12°С. Особенностью гид-

рологической структуры была линза распресненных теплых вод (с температурой у дна выше 20°C) диаметром примерно 15 миль и толщиной около 20 м, с центром на 45,5° с. ш., 30,5° в. д. Содержание некоторых гидрохимических компонентов в придонных водах этой линзы заметно отличалось от фоновых.

Интенсивный фотосинтез в поверхностных водах обеспечил их насыщение кислородом на всем полигоне минимум на 105%, вблизи Килийского гирла насыщение превышало 135% (рис. 5, *e*). Расход кислорода на минерализацию ВОВ в придонных водах, наоборот, привел к обширной гипоксии с насыщением менее 30% почти на всем полигоне (за исключением линзы распресненных вод), а в прибрежных районах насыщение падало до 5% (рис. 5, *f*). Если учесть, что пробы придонной воды отбирались на расстоянии 1 м от дна, вполне возможно, что у самого дна в воде появился сероводород.

В условиях активного фотосинтеза в теплых поверхностных водах быстро расходовались кремнекислота и нитраты, их содержание в 10 милях от берега уменьшилось примерно в 100 раз по сравнению со стоком Дуная (рис. 5, *g, k*). Аналогичное уменьшение, но не такое значительное, всего примерно в 10 раз, наблюдалось и для фосфатов (рис. 5, *i*). Суммируя распределения кремнекислоты и нитратов в поверхностных водах, следует отметить, что, хотя трансформированный пресноводный сток распространился далеко на восток, содержание биогенных элементов в нем заметно уменьшилось на небольшом расстоянии от устья.

Возвращение неорганической формы кремния в процессе минерализации обеспечило содержание этого элемента в придонных водах на уровне 30–40 мкМ, что сравнимо с содержанием кремнекислоты в речном стоке (рис. 5, *h*). Содержание в придонных водах нитратов (5–10 мкМ) не достигало уровня 35 мкМ в стоке Дуная, но примерно в 50–100 раз превосходило концентрацию нитратов в поверхностных водах (рис. 5, *l*). Каких-то значительных отличий в содержании фосфатов в поверхностных и придонных водах зафиксировано не было (рис. 5, *i, j*).

Распределение нитритов на поверхностном и придонном горизонтах было очень похоже на распределение нитратов, но в меньших концентрациях. При удалении от устья содержание нитритов в поверхностных водах (максимальное 1,7 мкМ возле Георгиевского гирла) быстро уменьшалось, становясь нулевым примерно там, где проходила изолиния нитратов в 1 мкМ. В придонных водах всего полигона содержание нитритов было больше, чем на поверхности, около 0,2–0,5 мкМ.

В распресненных водах линзы с центром на 45,5° с. ш., 30,5° в. д. (судя по толщине слоя теплых вод, линза представляла собой мелкомасштабный антициклонический круговорот, однако данные по течениям отсутствуют) содержание кислорода и биогенных элементов не отличалось от окружающих поверхностных вод. Однако придонные воды по сравнению с фоновыми содержали больше кислорода (70% насыщения по сравнению с 30%), меньше кремнекислоты (5 мкМ против 30–50 мкМ), меньше нитратов (1 мкМ против 5–7 мкМ), но больше фосфатов (более 1 мкМ против 0,3–0,4 мкМ). Можно предположить, что в придонных водах линзы начались процессы минерали-

зации, однако не достигли такой интенсивности, как на остальной части полигона.

В поверхностных водах глубоководной части Черного моря элементом, лимитирующим фотосинтез, являются неорганические соединения азота [31], тогда как в прибрежных районах лимитирующим элементом считают фосфаты [32] при том, что при избытке этих элементов оптимальное мольное соотношение Редфилда между ними должно быть 16:1. В наблюдавшейся в августе 2009 г. ситуации, когда мольное отношение неорганического (нитратного) азота ($N_{\text{неорг}}$) к неорганическому фосфору ($P_{\text{неорг}}$) в приустьевом районе уменьшилось от примерно 30:1 до 1:1 в 10 милях от берега, наверное, сложно однозначно определить лимитирующий элемент.

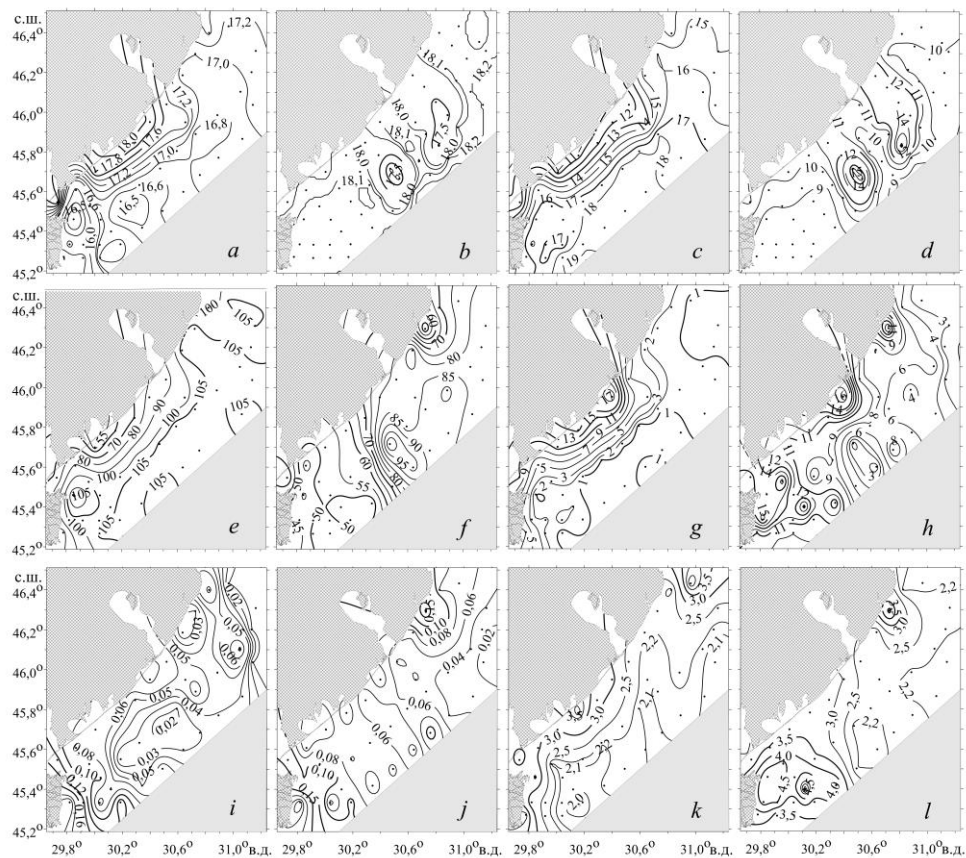
Также сложно предположить, какие виды фитопланктона должны были преимущественно развиваться. Обилие кремнекислоты возле берега и высокое отношение $N_{\text{неорг}} / P_{\text{неорг}}$ благоприятны для роста диатомовых водорослей [33, 34]. При удалении на 10 миль мористее недостаток кремния и низкое содержание минеральных форм азота должны были приводить к развитию других видов фитопланктона, в том числе кокколитофорид [35–37]. При этом в придонных водах присутствовали высокие концентрации кремния, что при апвеллинге вновь могло изменить ситуацию в пользу роста диатомовых и т. д.

Вдольбереговой апвеллинг в приустьевом районе Дуная

В 3 из 7 экспедиций МГИ в 1997–2013 гг. в исследованном районе наблюдался вдольбереговой апвеллинг. Наиболее контрастное изменение распределений гидрологических и гидрохимических характеристик зафиксировано в сентябре 2013 г. Распресненные поверхностные воды с соленостью 16,5–16,6‰ и температурой 18–19°C возле берега были замещены придонными водами открытой части шельфа с соленостью около 18‰ и температурой 9–10°C (рис. 6, *a – d*).

При удалении поверхностных вод от берега образовались две линзы распресненных и теплых вод (соленость придонных вод менее 17,5‰, температура – более 15°C) (рис. 6, *b, d*): одна напротив устья Днестра, координаты центра другой 45,7° с. ш., 30,6° в. д., обе диаметром около 20 миль и толщиной около 20 м. Содержание кислорода и кремнекислоты в придонных водах этих линз значительно отличалось от фоновых.

Следует заметить, что в сентябре на этом участке шельфа, который хорошо снабжается биогенными элементами пресноводного стока, следовало ожидать пересыщения поверхностных вод кислородом. Действительно, насыщение кислородом поверхностных вод на незатронутом апвеллингом юго-востоке полигона было около 105% (рис. 6, *e*). Однако подъем к поверхности придонных вод, насыщение кислородом которых не превышало 50% (рис. 6, *f*), привел к экологически опасной ситуации, когда насыщение кислородом всей толщи вод в 2–3 милях к юго-западу от устья Днестра не превышало 80%. Можно предположить, что подобные апвеллинги, которые могли поднять к поверхности еще более истощенные кислородом воды, вызывали заморы рыбы, регулярно наблюдавшиеся на СЗШ ранее.



Р и с. 6. Распределение в поверхностных (*a, c, e, g, i, k*) и придонных (*b, d, f, h, j, l*) водах в сентябре 2013 г.: солености, ‰ (*a, b*), температуры, °C (*c, d*), насыщения кислородом, % (*e, f*), содержания (мкМ) кремнекислоты (*g, h*), фосфатов (*i, j*), нитратов (*k, l*)

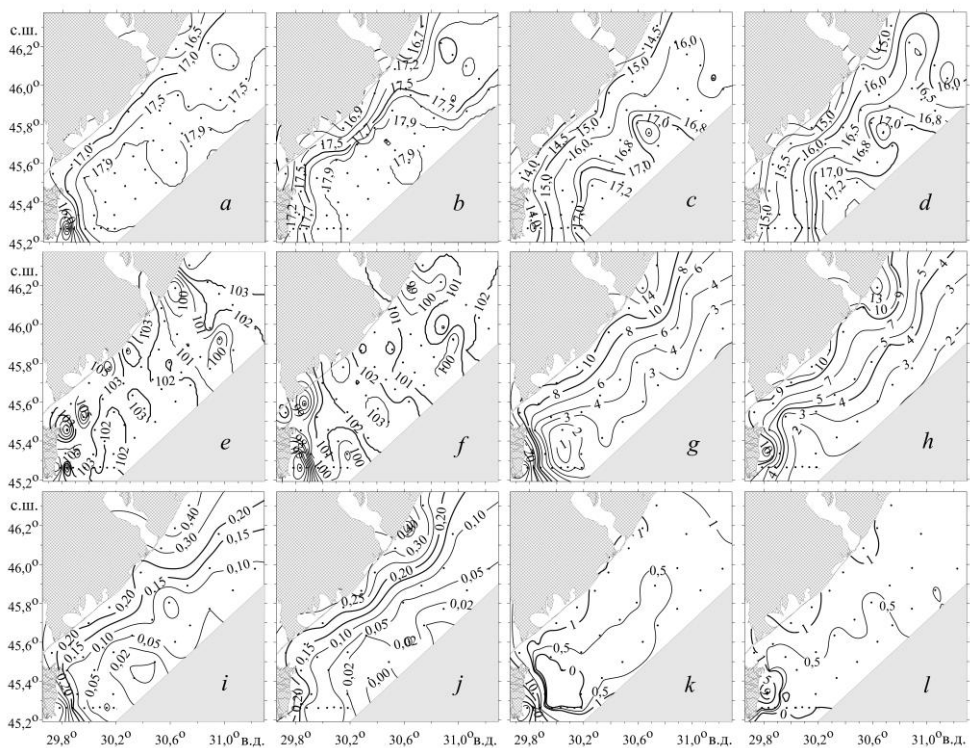
F i g. 6. Distribution of salinity, ‰ (*a, b*), temperature, °C (*c, d*), oxygen saturation, % (*e, f*), content (μM) of silicic acid (*g, h*), phosphate (*i, j*) and nitrate (*k, l*) in the surface (*a, c, e, g, i, k*) and bottom (*b, d, f, h, j, l*) waters in September, 2013

Наибольшее влияние на распределение биогенных элементов в поверхностных водах апвеллинг оказал на кремнекислоту, содержание которой было на уровне 1 мкМ (судя по концентрациям, оставшимся на юго-востоке) и увеличилось более чем на порядок возле берега (рис. 6, *g, h*). Это подтверждает выводы [18] о дополнительном источнике кремнекислоты для поверхностных вод в приустьевом районе Дуная.

Значительных изменений в содержании фосфатов в результате апвеллинга не было отмечено, возможно, благодаря низким концентрациям (менее 0,1 мкМ) и в поверхностных, и в придонных водах (рис. 6, *i, j*). Также не слишком изменилось и содержание нитратов, хотя следует отметить, что их концентрации в придонных водах (4–5 мкМ) были больше, чем в поверхностных (2–3 мкМ) (рис. 6, *k, l*). Таким образом, процесс минерализации ВОВ в придонных водах является для поверхностных вод источником не только кремнекислоты, но и нитратов.

Прижимание трансформированного речного стока к западному берегу Черного моря

Ситуация с запириением стока Дуная в узкую вдольбереговую струю благодаря действию ветровых условий наблюдалась в октябре 2010 г., когда почти вся исследованная акватория была заполнена водами открытой части шельфа, а речной сток узкой струей распространялся вдоль западного берега Черного моря (рис. 7).



Р и с. 7. Распределение в поверхностных (*a, c, e, g, i, k*) и придонных (*b, d, f, h, j, l*) водах в октябре 2010 г.: солености, ‰ (*a, b*), температуры, °C (*c, d*), насыщения кислородом, % (*e, f*), содержания (мкМ) кремнекислоты (*g, h*), фосфатов (*i, j*), нитратов (*k, l*)

Fig. 7. Distribution of salinity, ‰ (*a, b*), temperature, °C (*c, d*), oxygen saturation, % (*e, f*), content (μM) of silicic acid (*g, h*), phosphate (*i, j*) and nitrate (*k, l*) in the surface (*a, c, e, g, i, k*) and bottom (*b, d, f, h, j, l*) waters in October, 2010

Только в этой струе шириной не более 10 миль соленость поверхностных вод была менее 17,5‰, на остальной части полигона – более 17,9‰ (рис. 7, *a*). Это определило распределение биогенных элементов: возле устья концентрации кремнекислоты и фосфатов были более 8 и 0,2 мкМ соответственно, тогда как во всей толще вод остального полигона они были на порядок меньше (рис. 7, *g, i*). Вертикальные распределения всех гидролого-гидрохимических характеристик были практически монотонны, различия между поверхностными и придонными водами наблюдались только в трех-мильной зоне, прилегающей к Сулинскому и Георгиевскому гирлам.

Среди особенностей распределения гидрохимических элементов при прижимании трансформированного стока Дуная к западному берегу следует особо выделить:

– экологически безопасное насыщение кислородом всей толщи вод на 100–102%;

– очень малые концентрации всех биогенных элементов в водах открытой части шельфа: кремнекислоты – на уровне 2–3 мкМ; нитратов – менее 1 мкМ, фосфатов – на уровне 0,1 мкМ, тогда как вблизи Георгиевского гирла поверхностные воды содержали биогенных элементов почти на порядок больше: кремнекислоты 49 мкМ; нитратов 49 мкМ; фосфатов 0,7 мкМ.

Температуры вод шельфа и солнечной освещенности в начале октября было бы вполне достаточно, чтобы обеспечить вспышку цветения фитопланктона в случае, если бы речной сток распространился на восток или северо-восток. Однако низкое содержание биогенных элементов не позволило насытить поверхностные воды кислородом более чем на 102–103%. Таким образом, в октябре 2010 г. воды СЗШ не отличались от вод глубоководной части Черного моря (за исключением трехмильной зоны возле устья). Иными словами, нами была зафиксирована вентиляция вод СЗШ в осенний период.

Во всех обсуждаемых случаях (распространение трансформированного речного стока на восток, запираание вдоль берега, апвеллинг) различие в насыщении кислородом поверхностных и придонных вод оказывало наибольшее влияние на содержание кремнекислоты. В случаях гипоксии придонных вод содержание в них кремнекислоты было минимум на порядок больше, чем в поверхностных водах. Это подтверждает выводы [18] о возникновении на СЗШ в теплый сезон дополнительного источника неорганического кремния благодаря процессу минерализации его органических форм, поступающих с пресноводным стоком и осаждающихся по мере трансформации речных вод.

Заключение

Воды открытой части СЗШ, прижавшие в осенний период 2010 г. трансформированный пресноводный сток к западному берегу, содержали очень малые концентрации биогенных элементов. Особенно следует отметить низкое содержание кремнекислоты. Это указывает на продолжение опасного процесса изменения видового состава фитопланктона и далее – всей трофической цепи в Черном море.

В поверхностных водах СЗШ в процессе активного фотосинтеза летом имеет место почти полное извлечение кремнекислоты и нитратов, последнее происходит даже ранней зимой.

В результате процессов вдольберегового апвеллинга в летний период в поверхностных водах приустьевом районе Дуная возможно снижение содержания кислорода и возникновение замора рыбы на СЗШ.

Процессы минерализации взвешенного органического вещества на СЗШ являются дополнительным источником кремнекислоты и нитратов, для кремнекислоты – в теплый период года, для нитратов – даже ранней зимой. Содержание кремнекислоты в придонных водах может оказаться даже выше, чем в речном стоке.

Различия в распределении фосфатов и нитритов в поверхностных и придонных водах СЗШ не слишком велики. Для фосфатов это, возможно, связано с быстрым оборотом в процессах фотосинтеза и минерализации ВОВ. Для нитритов – возможно, с тем, что они являются промежуточным продуктом в процессах нитрификации и денитрификации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлинский Н. А., Гаркавая Г. П., Богатова Ю. И. Проблемы антропогенного эвтрофирования и развития гипоксии в северо-западной части Черного моря // *Экология моря*. 2003. Т. 63. С. 17–22.
2. Kubryakov A. A., Stanichny S. V., Zatsepin A. G. Interannual variability of Danube waters propagation in summer period of 1992–2015 and its influence on the Black Sea ecosystem // *Journal of Marine Systems*. 2018. Vol. 179. P. 10–30. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2017.11.001>
3. Финенко З. З., Суслин В. В., Ковалева И. В. Сезонные и многолетние изменения концентрации хлорофилла в Черном море по спутниковым наблюдениям // *Океанология*. 2014. Т. 54, № 5. С. 635–645. doi:10.7868/S0030157414050062
4. Кубрякова Е. А., Кубряков А. А., Станичный С. В. Влияние зимнего выхолаживания на вертикальное вовлечение вод и интенсивность цветения фитопланктона в Черном море // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. Т. 34, № 3. С. 206–222. doi:10.22449/0233-7584-2018-3-206-222
5. Ильин Ю. П. Гидрологический режим распространения речных вод в северо-западной части Черного моря // *Наукові праці УкрНДГМІ*. 2006. Вип. 255. С. 242–251. URL: uhmi.org.ua/pub/np/255/4_Pyln.pdf (дата обращения: 04.10.2018).
6. Украинский В. В., Попов Ю. И. Климатические и гидрофизические условия развития гипоксии на северо-западном шельфе Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2009. № 3. С. 19–29.
7. Tolmazin D. Changing Coastal oceanography of the Black Sea. I: Northwestern Shelf // *Progress in Oceanography*. 1985. Vol. 15, iss 4. P. 217–276. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(85\)90038-2](https://doi.org/10.1016/0079-6611(85)90038-2)
8. Зайцев Ю. П. Экологическое состояние шельфовой зоны Черного моря у побережья Украины (обзор) // *Гидробиологический журнал*. 1992. Т. 28, № 4. С. 3–18.
9. Environmental changes in the western Black Sea related to anthropogenic and natural conditions / D. Aubrey [et al.] // *Journal of Marine Systems*. 1996. Vol. 7, iss. 2–4. P. 411–425.
10. Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure / C. Humborg [et al.] // *Nature*. 1997. Vol. 386. P. 385–388.
11. Zaitsev Yu., Mamaev V. Marine biological diversity in the Black Sea: a study of change and decline. New York : United Nations Publications, 1997. 208 p.
12. Гаркавая Г. П., Богатова Ю. И., Берлинский Н. А. Формирование гидрохимических условий на устьевом взморье Дуная // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. С. 133–141.
13. Benthic Nutrient Cycling and Diagenetic Pathways in the North-western Black Sea / J. Friedrich [et al.] // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2002. Vol. 54, iss. 3. P. 369–383. <https://doi.org/10.1006/ecss.2000.0653>
14. Зайцев Ю. П., Поликарпов Г. Г. Экологические процессы в критических зонах Черного моря: синтез результатов двух направлений исследований с середины XX до начала XXI веков // *Морской экологический журнал*. 2002. Т. 1, № 1. С. 33–55.
15. Biogeochemical Transformations of Inorganic Nutrients in the Mixing Zone between the Danube River and the North-western Black Sea / O. Ragueneau [et al.] // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2002. Vol. 54, iss. 3. P. 321–336. <https://doi.org/10.1006/ecss.2000.0650>

16. *Grégoire M., Lacroix G.* Exchange processes and nitrogen cycling on the shelf and continental slope of the Black Sea basin // *Global Biogeochemical Cycles*. 2003. Vol. 17, no. 2. Article No. 1073. 17 p. doi:10.1029/2002GB001882
17. Влияние стока Дуная на экологические условия северо-западной части Черного моря / Н. А. Берлинский [и др.] // *Вестник Московского университета. Серия. 5. География*. 2004. № 5. С. 17–21.
18. Северо-западная часть Черного моря: биология и экология / Отв. ред. Ю. П. Зайцев, Б. Г. Александров, Г. Г. Миничева. Киев : Наукова думка, 2006. 701 с. URL: <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=AV20120134877> (дата обращения: 04.10.2018).
19. *Shapiro G. I., Wobus F., Aleynik D. L.* Seasonal and inter-annual temperature variability in the bottom waters over the western Black Sea shelf // *Ocean Science*. 2011. Vol. 7, iss. 5. P. 585–596. <https://doi.org/10.5194/os-7-585-2011>
20. *Кондратьев С. И.* Особенности пространственного распределения кислорода в водах приустьевоего взморья Дуная в 1997–2010 годах // *Морской гидрофизический журнал*. 2014. № 3. С. 60–76.
21. *Кондратьев С. И.* Особенности пространственного распределения элементов главного биогенного цикла в водах приустьевоего взморья Дуная в 1997–2013 годах // *Морской гидрофизический журнал*. 2015. № 5. С. 35–52. doi:10.22449/0233-7584-2015-5-35-52
22. *Oguz T., Velikova V.* Abrupt transition of the northwestern Black Sea shelf ecosystem from a eutrophic to an alternative pristine state // *Marine Ecology Progress Series*. 2010. Vol. 405. P. 231–242. doi:10.3354/meps08538
23. *Bologa A. S., Sava D.* Present state and evolution trends of biodiversity in the Black Sea: decline and restoration // *Journal of the Black Sea/Mediterranean Environment*. 2012. Vol. 18, no. 2. P. 144–154. URL: <http://blackmeditjournal.org/volumes-archive/vol18-2012/vol-18-2012-no-2> (дата обращения: 04.10.2018).
24. *Capet A., Beckers J.-M., Grégoire M.* Drivers, mechanisms and long-term variability of seasonal hypoxia on the Black Sea northwestern shelf – is there any recovery after eutrophication? // *Biogeosciences*. 2013. Vol. 10, iss. 6. P. 3943–3962. doi:10.5194/bg-10-3943-2013
25. Современное экологическое состояние северо-западной части Черного моря / И. Д. Лоева [и др.] // *Екологічна безпека прибережної та шельфової зон та комплексне використання ресурсів шельфу*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. Вип. 27. С. 237–242. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/56945> (дата обращения: 04.10.2018).
26. Влияние изменчивости условий морской среды на динамику филлофорного поля Зернова / Н. А. Берлинский [и др.] // *Вісник Одеського національного університету. Серія: Географічні та геологічні науки*. 2014. Т. 19, вип. 2. С. 40–57. URL: <http://eprints.library.odku.edu.ua/id/eprint/2243> (дата обращения: 04.10.2018).
27. *Ткаченко Ф. П., Третьяк И. П.* Макрофитобентос ботанического заказника общегосударственного значения «Филлофорное поле Зернова» (Украина) // *Альгология*. 2015. Т. 25, № 3. С. 238–246. <http://dx.doi.org/10.15407/alg25.03.238>
28. URL: <https://mk.mk.ua/gubric/crime/2018/08/27/57927/> (дата обращения: 04.10.2018).
29. Современные методы гидрохимических исследований океана / Отв. ред. О. К. Бордовский, А. М. Чернякова. М. : Институт океанологии им. П. П. Ширшова АН СССР, 1992. 201 с.
30. *Большаков В. С.* Трансформация речных вод в Черном море. Киев : Наукова думка, 1970. 328 с. URL: <http://library.univer.kharkov.ua/OpacUnicode/index.php?url=/notices/index/IdNotice:817963/Source:default> (дата обращения: 04.10.2018).

31. *Кривенко О. В.* Содержание и потребление неорганических соединений азота в Черном море // Морской экологический журнал. 2008. Т. 7, № 4. С. 13–26. URL: <https://repository.marine-research.org/handle/299011/981> (дата обращения: 04.10.2018).
32. *Mikaelyan A. S., Zatsepin A. G., Chasovnikov V. K.* Long-term changes in nutrient supply of phytoplankton growth in the Black Sea // Journal of Marine Systems. 2013. Vol. 117–118. P. 53–64. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2013.02.012>
33. *Egge J. K., Aksnes D. L.* Silicate as regulating nutrient in phytoplankton competition // Marine Ecology Progress Series. 1992. Vol. 83. P. 281–289. <https://doi.org/10.3354/meps083281>
34. *Стельмах Л. В., Мансурова И. М.* Эколого-физиологические основы биоразнообразия фитопланктона Черного моря // Экосистемы, их оптимизация и охрана. 2012. Вып. 7. С. 149–158.
35. *Cokacar T., Oguz T., Kubilay N.* Satellite-detected early summer coccolithophore blooms and their interannual variability in the Black Sea // Deep-Sea Research Part I. 2004. Vol. 51, iss. 8. P. 1017–1031. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2004.03.007>
36. *Микаэлян А. С., Силкин В. А., Паутова Л. А.* Развитие кокколитофорид в Черном море: межгодовые и многолетние изменения // Океанология. 2011. Т. 51, № 1. С. 45–53.
37. *Alternation of diatoms and coccolithophores in the northeastern Black Sea: a response to nutrient changes / A. S. Mikaelyan [et al.] // Hydrobiologia. 2015. Vol. 755, iss. 1. P. 89–105. doi:10.1007/s10750-015-2219-z*

Об авторе:

Кондратьев Сергей Иванович, старший научный сотрудник, отдел биогеохимии моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат химических наук, **ResearcherID: F-8972-2019**, skondratt@mail.ru