ИЗМЕНЧИВОСТЬ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КРЫМСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ

DOI: 10.21513/2686-7710-2019-1-33-52

A.С. Кукушкин $^{1)*}$, A.В. Пархоменко $^{2)}$

1) Морской гидрофизический институт РАН, Российская Федерация, 299011, Севастополь, ул. Капитанская, 2;*kukushkinas@mail.ru

 $^{2)}$ Институт морских биологических исследований им. А.О. Ковалевского РАН, Российская Федерация, 299011, Севастополь, пр. Нахимова, 2

Реферат. По данным многолетних (1970-1996 гг.) наблюдений рассмотрена пространственно-временная изменчивость гидрохимических (фосфаты, нитраты, кремнекислота и растворенный кислород) и гидрологических (соленость, температура) параметров в юго-западной части Крымского побережья. Отмечена однородность их сезонных пространственных распределений и незначительные различия концентраций в поверхностном слое. Проведенный анализ временной изменчивости и вертикальной структуры гидрохимических и гидрологических характеристик в слое 0-100 м в северо-западном и южном участках исследуемого района позволил выявить повышение содержания фосфатов и кремнекислоты и понижение концентрации растворенного кислорода в поверхностном (0 м) и нижнем (50-100 м) слоях, а также уменьшение значений солености в поверхностном слое в летний период. В вертикальном распределении исследуемых показателей в слое 0-50 м зимой (февраль) и в слое 0-10 м летом (август) отмечался однородный характер. С увеличением глубины концентрация биогенных элементов и соленость воды монотонно повышались, а концентрация растворенного кислорода и температуры воды понижались. Повышенное содержание фосфатов в годовом цикле в 1980-х годах наблюдалось при одновременном понижении солености и температуры воды. Увеличение концентрации фосфатов в прибрежной зоне исследуемого района в конце 20-го столетия не выявлено.

Ключевые слова. Черное море, фосфаты, нитраты, кремнекислота, растворенный кислород, соленость, температура, изменчивость.

Введение

Исследование экологического состояния шельфовых вод Черного моря представляет большой теоретический и практический интерес в связи с влиянием биогенных веществ (минеральные соединения азота, фосфора и кремния) антропогенного происхождения на прибрежные воды, что тесно связано с процессом их эвтрофикации. По экологическим показателям к наиболее критическим относятся прибрежные районы северо-западной и западной частей Черного моря, в которые с речными, терригенными, промышленно-

бытовыми стоками и атмосферными осадками поступают в большом количестве биогенные элементы (Гаркавая, Богатова, 2006; Геворгиз и др., 2005; Совга и др., 2000). Поэтому в этих районах моря в течение длительного периода (1950-2000 гг.) было проведено большое количество комплексных гидрофизических, гидрохимических, биологических и климатических исследований, обобщенных в монографии (Северо-западная часть Черного моря: биология и экология, 2006).

В прибрежной зоне юго-западной части Крымского побережья такие исследования проводились менее интенсивно по сравнению с исследованиями в северо-западной части моря. Из имеющихся в литературе сведений известно, что биогенные вещества антропогенного происхождения в прибрежные воды Севастопольского морского района в основном поступают с промышленно-бытовыми стоками, стоком небольших рек и ливневыми водами (Куфтаркова и др., 2007). Источником загрязнения также служат полузамкнутые бухты, расположенные вдоль севастопольского побережья, с многочисленными выпусками сточных вод. Проведенные в прибрежной зоне этого района исследования показали, что поступление биогенных веществ из перечисленных источников может оказывать влияние на изменение гидрохимической структуры вод района на расстоянии 2-5 км от береговой линии (Ациховская, Куфтаркова, 1999; Иванов и др., 2003; Куфтаркова и др., 1999; Куфтаркова и др., 2002; Куфтаркова и др., 2007; Parkhomenko et al., 2003). В тоже время практически не была изучена многолетняя пространственно-временная изменчивость гидрохимических и гидрологических показателей в шельфовой зоне (в пределах 200-й метровой изобаты) в юго-западной части Крымского побережья (в том числе в Севастопольском морском районе). Эти сведения представляют несомненный интерес, поскольку результаты анализа многолетней изменчивости их распределений позволяют оценить экологическое состояние исследуемого района.

Цель исследования состояла в изучении пространственного и вертикального многолетних сезонных распределений гидрохимических и гидрологических параметров, внутригодовой и долгопериодной их изменчивости на шельфе юго-западной части Крымского побережья.

Материалы и методы

В работе использовали результаты одновременных наблюдений из банка данных Морского гидрофизического института РАН гидрохимических (фосфаты – PO_4^{3-} , кремнекислота – SiO_3^{2-} , нитраты – NO_3^{-} , аммоний – NH_4^{+} , растворенный кислород – O_2) и гидрологических (соленость – S и температура – T) характеристик, полученные в слое 0-100 м в течение 1955-2000 гг. в югозападной части Крымского побережья, ограниченной координатами 44°-45°15′ с.ш., 32°-34° в.д. Наиболее полными и подробными были данные по солености и температуре (более 7700 станций), PO_4^{3-} и SiO_3^{2-} (1117 станций) и O_2 (2177 станций), менее – NO_3^{-} (141 станций). Ограниченное количество измерений концентрации NH_4^{+} (менее 100 станций) не позволило проанали-

зировать ее пространственно-временной сезонную изменчивость. Предварительный анализ полученных в период 1950-1960 гг. гидрохимических параметров показал завышенные концентрации биогенных элементов, что, по нашему мнению, связано с использованием менее совершенных методов их определений, чем в более поздний период. Поэтому в работе были использованы результаты исследований, полученные в период 1970-1996 гг.

Пространственную структуру исследуемых показателей оценивали по их распределениям в поверхностном слое (0 м). Для построения карт сезонных распределений значения исследуемых параметров усредняли в квадратах со стороной 10′. Средние их значения относились к центру квадрата, в котором они вычислялись.

Анализ временной изменчивости и вертикального распределения исследуемых параметров проводился отдельно для двух участков акватории Севастопольского морского района (рис. 1), отличающихся по характеру рельефа дна в прибрежной зоне. Северо-западный участок характеризовался протяженным шельфом (до изобаты 200 м), простирающимся от берега на 37-75 км, и пологим континентальным склоном. На южном участке ширина шельфа в юго-западном направлении достигала 11-18 км и только восточнее м. Айя его ширина увеличивалась до 26 км, а крутизна континентального склона возрастала (Блатов, Иванов, 1992).

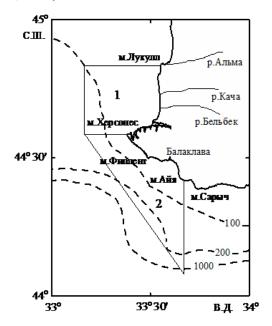


Рисунок 1. Карта акватории Севастопольского морского района и прилегающей акватории моря

1 – северо-западный участок, 2 – южный участок; штриховые линии – изобаты в метрах

Для анализа внутригодовой изменчивости использовали многолетние среднемесячные значения гидрологических и гидрохимических показателей. Долгопериодные сезонные изменения исследуемых показателей оценивали по средним многолетним средневзвешенным их значениям в верхнем (фоти-

ческом) (0-50 м) и нижнем (придонном) (50-100 м) слоях, рассчитанным для 10-летних периодов (1970-1979, 1980-1989, 1990-1996 гг.).

Результаты и обсуждение

На формирование гидрологической структуры вод и распределение гидрохимических параметров в мористой его части значительное влияние оказывает Основное Черноморское течение (ОЧТ) (Блатов, Иванов, 1992). В прибрежной зоне преобладает вдольбереговой перенос водных масс, направление которого в основном определяется ветровыми условиями. Так, на взморье р. Бельбек при северных ветрах силой 4-5 баллов основной поток приближается к берегу, охватывая устойчивым вдольбереговым переносом прибрежную зону до 2 км (Ациховская, Куфтаркова, 1999). С октября по март наибольшую повторяемость имеют северо-северо-восточные ветры, с апреля по сентябрь, хотя и преобладает юго-юго-восточное направление, повторяемость северных румбов довольно велика. При слабом юго-западном ветре основной поток сохраняет антициклоническую (южную) направленность, а в мористой зоне наблюдается образование вихревых структур. С усилением юго-западного ветра поток меняет свое направление на северо-северо-восточное. Поверхностной поток в прибрежной зоне шириной до 3 км направлен к берегу, а мористая зона охвачена устойчивым вдольбереговым потоком северо-восточного направления. При слабых ветрах или смене их направлений наблюдается сложная картина циркуляции вод, характеризующаяся наличием вихревых образований различной направленности. На участке между Севастопольской бухтой, мысом Херсонес и мысом Сарыч также преобладает вдольбереговой перенос. На поле скорости течений здесь значительное влияние оказывает поле ветра, интенсивность струи ОЧТ, сгонно-нагонные явления, а также изрезанность береговой черты.

Пространственное распределение гидрологических параметров

Сезонные распределения солености и температуры в поверхностном слое представлены на рис. 2. В зимний период пространственное распределение солености и температуры (рис. 2а, 2б) на большей части района исследований было однородным, а их значения изменялись в пределах 18.15-18.3 рѕи и 7-8°С соответственно. Более низкая соленость и температура воды наблюдалась в северной мелководной его части, что, по-видимому, обусловлено влиянием берегового стока в связи с повышенными атмосферными осадками в зимний период. В южной глубоководной части района была отмечена повышенная соленость воды, переносимой струей ОЧТ. В северо-западном участке, расположенном между мысами Херсонес и Лукулл средние многолетние (далее средние) величины солености и температуры в поверхностном слое, в верхнем и нижнем слоях (табл. 1) были меньше по сравнению с южным участком, расположенным между мысами Херсонес и Айя и в большей степени подверженном влиянию вод глубоководной части моря.

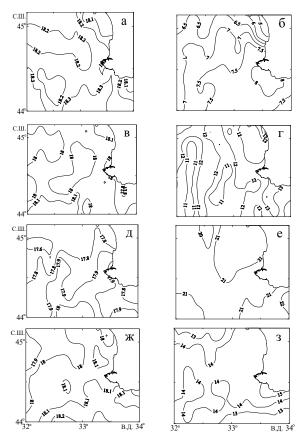


Рисунок 2. Пространственное распределение солености (а, в, д, ж) и температуры (б, Γ , е, з) в поверхностном слое в зимний (а, б), весенний (в, Γ), летний (д, е) и осенний (ж, з) периоды

В весенний сезон соленость воды на поверхности несколько снизилась (на 0.1-0.2 psu), а ее температура повысилась (рис. 2в, 2г). Пространственные распределения солености и температуры сохранили однородность. Наблюдаемые небольшие области повышенных или пониженных значений в распределениях этих показателей, по-видимому, были связаны с межгодовой изменчивостью их значений. Повышенная соленость, как и в зимний период, была отмечена в южной части района. Средние значения солености и температуры в различных слоях водной толщи в северо-западном и южном участках приведены в табл. 1.

Для летнего периода была характерна наиболее низкая в течение года соленость (17.8-17.9 psu) и однородное её распределение (рис. 2д). Распределение температуры также было однородным (рис. 2е). Более высокие значения солености и температуры воды наблюдались в южной части района. Их средние значения в северо-западном участке были несколько ниже, чем в южном участке (табл. 1).

В осенний период соленость в исследуемом районе повысилась (рис. 2ж) до значений 17.9-18.15 psu, близких к её значениям в весенний период. Пространственное распределение солености и температуры (рис. 2ж, 2з) на боль-

шей части района было однородным. Средние значения этих показателей в северо-западном и южном его участках отличались незначительно и были несколько ниже в северо-западном участке (табл. 1).

Таблица 1. Сезонные изменения гидрохимических и гидрологических параметров в поверхностном слое (0 м), в верхнем (0-50 м) и нижнем (50-100 м) слоях северо-западного (СЗ) и южного (Ю) участков Севастопольского морского района

Параметр	Слой, м	Зима		Весна		Лето		Осень	
Параметр		C3	Ю	C3	Ю	C3	Ю	C3	Ю
	0	0.24	0.2	0.16	0.16	0.28	0.26	0.23	0.16
PO ₄ ³⁻ , мкМ	0-50	0.22	0.2	0.17	0.17	0.3	0.23	0.17	0.18
PO_4 , MKIVI	50-100	0.36	0.31	0.38	0.41	0.45	0.57	0.43	0.3
	n	24	36	16	30	14	25	12	22
	0	6.4	6.8	5.8	5.1	4.5	7.2	4.6	7.0
SiO ₃ ²⁻ ,	0-50	7.6	7.8	5.9	4.8	4.6	8.5	6.6	7.5
мкМ	50-100	11.6	13.3	14.7	12.8	11.4	18.2	18.0	15.2
	n	16	30	15	28	11	27	12	25
	0	0.18*	_	0.18*	0.15	0.33*	0.42	0.46*	0.5
NO ₃ -, мкМ	0-50	0.22*	_	0.24*	0.32	0.58*	0.41	0.56*	0.5
NO3, MKIVI	50-100	1.2*	_	1*	_	_	0.44	1.2*	_
	n	7	_	12	2	4	2	5	5
	0	7.45	7.08	6.67	6.86	5.8	5.65	6.56	6.38
O ₂ , мл л ⁻¹	0-50	7.15	6.93	6.87	7.0	6.6	6.4	6.68	6.4
О2, мл л	50-100	6.3	5.9	6.0	5.9	5.3	5.5	5.8	5.3
	n	50	70	20	40	22	80	15	46
S, psu	0	18.0	18.3	18.0	17.97	17.65	17.8	18.0	18.1
	0-50	18.22	18.37	18.2	18.14	17.97	18.1	18.05	18.18
	50-100	18.4	18.62	18.6	18.55	18.65	18.7	18.45	18.5
	n	51	44	20	28	12	27	12	17
T, °C	0	7.8	8.15	12.5	12.8	21.0	21.4	13.8	14.3
1, C	n	51	40	18	28	12	27	12	17

Примечание. n- Количество измерений; *- значения концентрации NO_3^- в расширенном (до $32^\circ40^{'}$ в.д.) северо-западном участке

Проведенный анализ показал однородность распределений солености и температуры в поверхностном слое во все сезоны года. Более высокие средние многолетние их значения в годовом цикле в этом слое были отмечены в южном участке.

Пространственные распределения гидрохимических параметров

В зимний период пространственное распределение основных биогенных элементов (фосфаты (PO_4^{3-}) , кремнекислота (SiO_3^{2-}) и нитраты (NO_3^{-})) в

поверхностном слое на большей части района исследований было однородным (рис. 3, 4). Их концентрации изменялись в пределах 0.15-0.3, 5-20 и 0.05-0.25 мкМ соответственно. Повышенные концентрации фосфатов и нитратов наблюдались в прибрежной зоне, расположенной севернее м. Херсонес (рис. 3а, 4а). Повышенная концентрация кремнекислоты была отмечена вблизи м. Херсонес (рис. 3б). Высокое содержание нитратов также было зарегистрировано в прибрежных водах в восточной части исследуемого района. Средние значения концентрации этих показателей в различных слоях водной толщи в северо-западном и южном участках (в южном участке измерения NO_3^- не проводились) приведены в табл. 1. Средние концентрации NO_3^- в зимний период и другие сезоны определяли в расширенном в западном направлении северо-западном участке (до $32^{\circ}40^{'}$ в.д.). Это было связано с ограниченным количеством данных измерений его концентрации в первоначальных границах этого участка.

В весенний период распределение фосфатов и кремнекислоты в поверхностном слое на большей части акватории района было, как и зимний период, однородным, а их концентрации в среднем были меньше (рис. 3в, 3г). В то же время содержание $\mathrm{SiO_3}^{2^-}$ в районе м. Херсонес было выше по сравнению с зимним периодом. Пространственное распределение нитратов в весенний период было однородным, а их концентрации в северной части района были близки концентрациям нитратов, полученных для зимнего периода (рис. 4б). В юго-восточной части района содержание $\mathrm{NO_3}^-$ заметно снизилось. Средние значения концентраций этих показателей в северо-западном и южном участ-ках приведены в табл. 1.

В летний период характер пространственного распределения концентраций фосфатов и кремнекислоты в поверхностном слое на большей части исследуемого района был таким же, как и в весенний период (рис. 3д, 3е). По сравнению с весенним периодом концентрация ${\rm PO_4}^{3-}$ во всем районе несколько повысилась, а концентрация ${\rm SiO_3}^{2-}$ несколько уменьшилась (особенно вблизи мыса Херсонес). Пространственное распределении нитратов оставалось однородным, а их концентрация увеличилась (особенно в центральной области района) по сравнению с весенним периодом и равномерно понижалась в северном направлении (рис. 4в). Средние значения концентрации этих показателей в северо-западном и южном участках приведены в табл. 1.

В осенний период пространственные распределения PO_4^{3-} и SiO_3^{2-} в поверхностном слое на большей части исследуемого района были близки к их распределениям в зимний период. Отмечались повышенные концентрации в прибрежных районах к северу и югу от мыса Херсонес (рис. 3ж, 3з). Отличие заключалось в небольшом снижении концентрации этих показателей по всей акватории исследуемого района. Распределение нитратов по своему характеру и величинам концентрации хорошо согласовывалось с их распределением в летний период (рис. 4г). Средние значения концентрации анализируемых показателей в северо-западном и южном участках приведены в табл. 1.

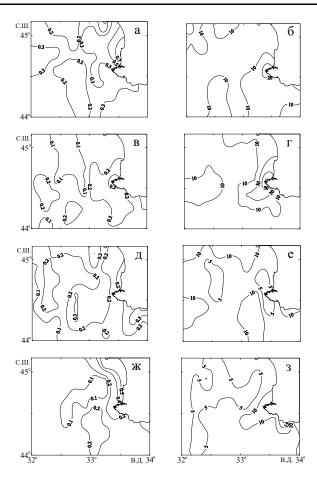


Рисунок 3. Пространственное распределение фосфатов (а, в, д, ж) и кремнекислоты (б, г, е, з) в поверхностном слое в зимний (а, б), весенний (в, г), летний (д, е) и осенний (ж, з) периоды

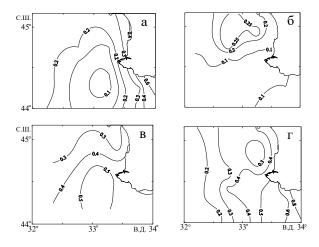


Рисунок 4. Распределение нитратов в поверхностном слое в зимний (а), весенний (б), летний (в) и осенний (г) периоды

Проведенный анализ пространственного распределения основных биогенных элементов показал близость характера этих распределений (однородность) в годовом цикле и сравнительно невысокие различия их средних сезонных концентраций. Повышенное содержание фосфатов, нитратов и кремнекислоты в поверхностном слое, как правило, отмечалось в прибрежных зонах исследуемого района. Для этих биогенных элементов в северозападном и южном участках было характерно пониженное содержание в весенний период. Повышенные концентрации PO_4^{3-} наблюдались летом, SiO_3^{2-} – зимой, NO_3^{-} – летом и осенью. Наблюдаемые в сезонных распределениях этих показателей небольшие области повышенных или пониженных значений, несколько нарушающие однородность распределений, по-видимому, были связаны с разновременностью измерений на различных участках района и с межгодовой изменчивостью их значений.

Сравнение средневзвешенных концентраций PO_4^{3-} , SiO_3^{2-} , NO_3^{-} (табл. 1) в верхнем (0-50 м) и нижнем (50-100 м) слоях указывало на увеличение их концентраций с глубиной. Концентрации биогенных элементов в поверхностном и верхнем слоях во все сезоны различались незначительно. Исключение составляло более высокое содержание NO_3^{-} в слое 0-50 м по сравнению с поверхностным слоем в южном участке весной и в северо-западном участке летом.

Сезонные распределения концентрации растворенного кислорода, также как и распределения биогенных элементов, достаточно однородные. Характерной особенностью этих распределений являлись пониженные значения его концентрации (примерно на 0.1-0.2 мл π^{-1}) в прибрежных участках исследуемого района в зимний, весенний и осенний периоды.

Результаты единичных измерений содержания биогенных элементов в прибрежных водах исследуемого района (Иванов и др., 2003; Куфтаркова и др., 1999; Куфтаркова и др., 2007; Parkhomenko et al., 2003) не позволяют провести их сравнение с полученными нами результатами. В то же время в работе (Геворгиз и др., 2005) были рассмотрены распределения среднегодовых концентраций основных биогенных элементов в поверхностном слое и в слое 0-30 м за период 1980-2002 гг. на северо-западном шельфе и в районе Крымского побережья, ограниченном с юга 44°с.ш. и с востока 34° в.д. При этом значительный объем использованных данных наблюдений был взят из банка данных МГИ РАН (которым пользовались и мы), что повысило качество результатов сравнения. Рассчитанные по сезонным концентрациям фосфатов, кремнекислоты и нитратов среднегодовые их значения в поверхностном слое и в слое 0-30 м в целом удовлетворительно совпали с такими концентрациями в работе (Геворгиз и др., 2005).

Внутригодовая изменчивость

Внутригодовые изменения среднемесячных значений концентрации фосфатов, кремнекислоты, растворенного кислорода и солености представлены на рис. 5. Характер внутригодовой изменчивости концентрации растворенного кислорода в поверхностном и нижнем слоях (рис. 5д, 5е) и солености в поверхностном слое (рис. 5ж, 53) примерно одинаковый и описывается U-

образной кривой с пониженными значениями в теплое время и повышенными – в холодное время года. Изменения этих показателей хорошо согласуются с внутригодовыми изменениями биомассы фитопланктона в зоне фотосинтеза в шельфовой зоне Крымского побережья (Кривенко, Пархоменко, 2010). Кроме того, отметим более низкую соленость (особенно в течение июня – октября) и более высокое содержание растворенного кислорода (в течение всего года) в северо-западном участке по сравнению с южным участком. Эти различия объясняются влиянием на этот участок (помимо берегового стока) вод северозападного шельфа. Эти воды, в свою очередь, в летний период подвержены влиянию трансформированных речных вод, обогащенных биогенными элементами, что способствует более активному развитию фитопланктона и увеличению содержания кислорода в зоне фотосинтеза. На южный участок оказывают влияние более соленые и менее продуктивные воды ОЧТ. Интенсивность этого течения в летний период снижается и его влияние на южный участок ослабевает. Поэтому соленость воды в этом участке снижается в меньшей степени, чем в северо-западном участке. В нижнем слое (50-100 м) характер внутригодовых изменений концентрации растворенного кислорода в обоих участках не изменился, а абсолютные значения среднемесячных концентраций понижались по сравнению с ее изменениями в поверхностном слое (рис. 5д, 5е). Более значительные изменения в этом слое по сравнению с поверхностным слоем наблюдались для солености. Так, заметно повышались среднемесячные ее значения в годовом цикле. Кроме того, отмечалось небольшое увеличение солености (на 0.1-0.3 psu) в летне-осенний период по сравнению с зимне-весенним периодом, что свидетельствовало о притоке в эти районы более соленных глубинных вод из открытой части моря в результате сгонно-нагонных явлений, часто наблюдаемых в летне-осенний период.

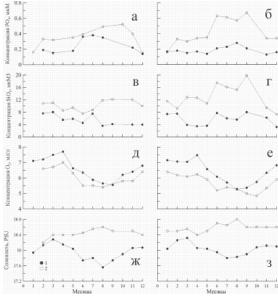


Рисунок 5. Внутригодовые изменения концентрации фосфатов (а, б), кремнекислоты (в, г), растворенного кислорода (д, е) и солености (ж, з) в поверхностном (1) и нижнем (2) слоях в северо-западной (а, в, д, ж) и южной (б, г, е, з) частях Севастопольского морского района

Для внутригодовой изменчивости фосфатов в поверхностном и глубинном слоях также было характерно некоторое увеличение их концентрации в летний период (рис. 5а, 5б). В большей степени это наблюдалось в поверхностном слое в северо-западном участке в связи с влиянием вод северо-западного шельфа, а также в нижнем слое в южном участке. Подобный характер внутригодовых изменений был отмечен для концентрации кремнекислоты в нижнем слое (рис. 5в, 5г). В поверхностном слое таких ее изменений не наблюдалось и даже в северо-западном районе содержание кремнекислоты в весенний, летний и осенний периоды понизилось по сравнению с зимним периодом.

Сравнение полученных нами сезонных изменений содержания фосфатов и кремнекислоты с аналогичными их изменениями в прибрежном районе Крыма (Совга и др., 2014) показало следующее. В прибрежных водах, прилегающих к Ялтинскому заливу, сезонные концентрации этих показателей оказались в 2-4 раза более высокими по сравнению с полученными нами, что видимо, связано с влиянием загрязненных вод Ялтинского залива. Кроме того, пониженные их концентрации были отмечены в летний период (причина уменьшения не объяснялась). В то же время по нашим данным в южном участке, расположенном западнее на 40-60 км, в этот период наблюдалось увеличение содержания этих биогенных элементов.

Вертикальное распределение гидрохимических и гидрологических показателей

Вертикальные профили гидрохимических и гидрологических параметров, построенные по одновременно измеренным и осредненным их значениям в феврале (холодный период) и августе (теплый период) в течение 1970-1983 гг., представлены на рис. 6. Анализ вертикальных распределений показал следующее. В феврале, самом холодном месяце года, в результате зимней термической конвекции сформировалось однородное распределение температуры по всей водной толще в обоих участках района исследований (рис. 6а, 6б). Вертикальные распределения концентрации гидрохимических параметров и солености также были однородными в слое 0-50 м в северо-западном участке и в слое 0-30 м в южном участке. С ростом глубины концентрация биогенных элементов и соленость увеличивались, а концентрация растворенного кислорода уменьшалась. Наиболее значительные изменения этих показателей были отмечены в придонном слое северо-западного участка. В целом характер вертикального распределения анализируемых показателей в обоих участках совпадал, но наблюдались различия в их абсолютных величинах. Более высокая соленость и содержание кремнекислоты во всей водной толще были отмечены в южном участке, который находился под влиянием вод открытой части моря (ОЧТ, апвеллинг). Концентрация растворенного кислорода в слое 0-30 м в обоих участках была примерно одинаковой, а при увеличении глубины она была выше в северо-западном участке.

В августе, наиболее теплом летнем месяце, толщина верхнего квазиоднородного слоя в обоих участках не превышала 10 м (рис. 6в, 6г). С глубиной значение солености монотонно увеличивалось и было выше в южном участке

исследуемого района. Между горизонтами 10 и 30 м наблюдался четко выраженный слой скачка. Концентрации PO_4^{3-} и SiO_3^{2-} в слое 0-30 м изменялись незначительно. Глубже, до дна, они монотонно увеличивались. Распределение концентрации O_2 во всем слое в обоих участках было одномодальным с максимумом на горизонте 30 м, равном 7.1 и 6 мл π^{-1} в северо-западном и южном участках соответственно. С глубиной его концентрация заметно уменьшилась (менее 5 мл π^{-1}). Наиболее значительные изменения содержания биогенных элементов и растворенного кислорода были отмечены в слое 75-100 м, который по температуре соответствовал холодному промежуточному слою. В целом характер изменения вертикальных профилей анализируемых показателей в обоих участках в августе, как и в феврале, хорошо совпадал.

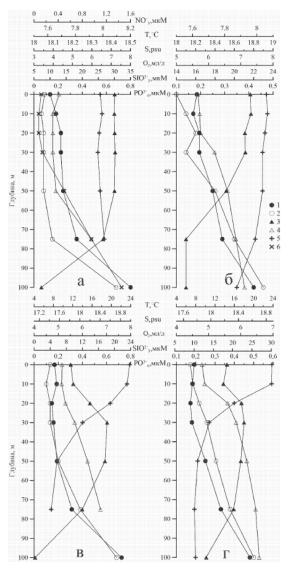


Рисунок 6. Вертикальные распределения концентрации фосфатов (1), кремнекислоты (2), растворенного кислорода (3), солености (4), температуры (5) и нитратов (6) в феврале (а, б) и августе (в, Γ) в северо-западной (а, в) и южной (б, Γ) частях Севастопольского морского района

Долгопериодная изменчивость

Долгопериодные изменения содержания биогенных элементов рассмотрим на примере изменения концентрации фосфатов в течение 1970-1996 гг. Для оценки таких изменений были определены её сезонные средневзвешенные значения в верхнем (0-50 м) и нижнем (50-100 м) слоях в северо-западном и южном участках исследуемого района (табл. 2) и их аномалии (табл. 3) за 10-летние периоды (1970-1979, 1980-1989, 1990-1996 гг.). В этих слоях также были рассчитаны аномалии солености и температуры воды (табл. 3). Величину аномалии определяли как разницу между средним сезонным за 10-летний период и средним сезонным многолетним (1970-1996 гг.) значениями, нормированную на многолетнее среднее квадратическое отклонение.

Таблица 2. Сезонные изменения средневзвешенных значений концентрации PO₄³(мкМ) в верхнем (0-50 м) и нижнем (50-100 м) слоях северо-западного (СЗ) и южного (Ю) участков Севастопольского морского района за 10-летние периоды

Пе- риод	Слой, м	Зима		Весна		Ле	ето	Осень	
		C3	Ю	C3	Ю	C3	Ю	C3	Ю
1970- 1979	0-50	0.16	0.21	0.2	0.18	0.22	0.18	0.16	0.17
	50-100	0.38	0.27	0.41	0.46	0.63	0.33	0.4	0.24
1980- 1989	0-50	0.25	0.25	0.27	0.17	0.28	0.27	0.25	0.23
	50-100	0.36	0.31	0.37	0.34	0.53	0.69	0.37	0.49
1990- 1996	0-50	0.14	0.09	0.23	-	0.2	0.16	0.1	0.06
	50-100	0.18	0.29	0.42	-	0.26	0.45	0.31	0.08

Анализ представленных в табл. 2 данных показал следующее. В 1970-е годы во всей водной толще в обоих участках в основном были зарегистрированы положительные аномалии солености и температуры воды. Концентрация фосфатов в эти годы в годовом цикле в слое 0-50 м находилось в пределах 0.16-0.2 мкМ, а аномалия изменялась от -0.5 до 0, что указывало на более низкую их концентрацию по сравнению со среднемноголетними величинами. При этом более низкие концентрации фосфатов были отмечены при более высоких значениях солености и температуры воды. В слое 50-100 м повышенное содержание фосфатов (выше среднемноголетнего) было отмечено весной в южном, а летом в северо-западном участках. Соленость воды в эти сезоны в этих участках также была повышенной по сравнению с другими сезонами.

В 1980-е годы концентрация PO₄³⁻ в слое 0-50 м, равная 0.17-0.28 мкМ, в годовом цикле была выше средней многолетней (табл. 2, 3). По сравнению с 1970-ми годами она увеличилась в 1.35-1.55 раз за исключением весеннего периода в южном участке, когда концентрация фосфатов в течение 1970-1980 гг. практически не изменилась. Соленость и температура в этом слое, в отличие от 1970-х годов, в основном была ниже средней многолетней (отрицательная аномалия). Наибольшее повышение содержания фосфатов было отмечено в осенний период, когда значения солености и температуры были близки к

средним значениям. В слое 50-100 м содержание фосфатов северо-западном участке в годовом цикле и зимой в южном участке незначительно отличалось от среднего многолетнего его содержания. По сравнению с 1970-ми годами оно было на 5-20% ниже.

Таблица 3. Сезонные аномалии средневзвешенных значений концентрации фосфатов (PO₄³⁻) (мкМ), солености (S) (psu) и температуры (T°C) воды в верхнем (0-50 м) и нижнем (50-100 м) слоях в северо-западном (C3) и южном (Ю) участках Севастопольского морского района в различные временные периоды

Период	Пара- метр	Слой,	Зима		Bee	сна	Лето		Осень	
Период		M	C3	Ю	C3	Ю	C3	Ю	C3	Ю
1970-1979	PO ₄ ³⁻	0-50	-0.4	0	0	0	-0.5	-0.4	-0.1	-0.1
		50-100	0.1	-0.33	0.1	0.2	0.5	-0.5	-0.1	-0.3
	S	0-50	1.1	0.35	0.48	1.0	1.5	0.82	0	0.45
19/0-19/9		50-100	0.62	-0.3	-0.16	1.15	0.7	0.28	-0.15	0
	Т	0-50	0.75	0.15	-0.5	0.12	-0.4	0.75	0.78	0.52
		50-100	0	0.33	0.7	0.6	0.1	0.7	0.3	0.4
1980-1989	PO ₄ ³⁻	0-50	0.2	0.12	0.7	0	0.2	0.5	0.88	0.5
		50-100	0	0	0	-0.28	-0.23	-0.53	-0.19	1.0
	S	0-50	-0.7	-1.17	-1.0	-0.5	-0.6	-0.5	0.1	-0.4
1700-1707		50-100	-1.0	-1.1	-1.0	-0.12	-0.06	0	-0.1	-0.1
	Т	0-50	0.25	-0.2	0.5	-0.2	0.2	-0.75	0.5	0.38
		50-100	0.5	-1.0	-0.1	-0.4	0.2	-0.7	0	0.4
1990-1996	PO ₄ ³⁻	0-50	-0.53	-0.17	0	0	-0.06	-0.6	0	-0.3
		50-100	-0.27	-0.05	0.12	0	-0.2	-0.17	-0.2	0.4
	S	0-50	-0.15	-0.1	-0.1	-0.16	-0.45	-0.9	-	0.5
		50-100	-0.2	1.7	-0.8	0.23	-0.6	-0.8	_	_
	Т	0-50	-0.5	0.4	0.3	_	0.15	1.1	_	-0.8
		50-100	-0.5	1.1	-0.6	_	-0.3	0	_	-0.4

Увеличение концентрации фосфатов примерно в 2 раза по сравнению с предыдущим десятилетием было отмечено только в южном участке в летнеосенний период, что может свидетельствовать о притоке глубинных вод с более высоким содержанием фосфатов из открытой части моря в результате сгонно-нагонных явлений, часто наблюдаемых в летне-осенний период. Значения солености и температуры в этом слое в обоих участках, как и в слое 0-50 м, в основном были ниже средних значений (отрицательные аномалии).

В 1990-е годы концентрация фосфатов в слое 0-50 м в годовом цикле изменялась в пределах 0.14-0.22 мкМ, а в слое 50-100 м -0.33-0.44 мкМ. Эти значения концентрации фосфатов были близки и даже несколько ниже (в северозападном – зимой и в южном участке – летом) их средних многолетних значений. При этом соленость воды, как и в 1980-е годы, в основном была пониженной (отрицательная аномалия) за исключением повышенной солености

(положительная аномалия) зимой в слое 50-100 м и осенью в слое 0-50 м. Температура воды также была ниже средней многолетней. Повышенные ее значения в обоих слоях были зарегистрированы в южном участке в зимний период и в слое 0-50 м – в летний. По сравнению с предыдущим десятилетием содержание фосфатов в слое 0-50 м в обоих участках зимний, весенний и летний периоды уменьшалось в 1.2-2 раза и было ниже на 10-15% (кроме весеннего периода в южном участке), чем в 1970-е годы. Более заметные изменения были отмечены в осенний период, когда концентрация PO_4^{3-} уменьшилась более чем в 2 раза по сравнению с предыдущими десятилетиями. В слое 50-100 м в зимний и летний периоды концентрация фосфатов в северо-западном участке уменьшилась в 2 раза по сравнению с предыдущими десятилетиями. Весной и осенью в этом участке и зимой в южном участке их содержание изменилось незначительно. Значительное понижение содержания фосфатов было отмечено в осенний период в южном районе — в 3 и 6 раз по сравнению с 1970-ми и 1980-ми годами соответственно.

Сравнительный анализ многолетних сезонных изменений средневзвешенных значений концентрации фосфатов в верхнем и нижнем слоях в северозападном и южном участках Севастопольского морского района показал повышенное их содержание (в 1.35-1.55 раза) в годовом цикле в 1980-х годах. Такое их содержание, как правило, наблюдалось при одновременном понижении солености и температуры воды в этих слоях.

Заключение

Рассмотрены основные особенности пространственного распределения основных биогенных элементов (фосфатов, нитратов и кремнекислоты), растворенного кислорода, солености и температуры в поверхностном слое исследуемого района. Выявлена однородность их пространственного распределения и незначительные различия сезонных концентраций. Повышенное содержание фосфатов, нитратов и кремнекислоты и пониженная концентрация растворенного кислорода, как правило, отмечались в прибрежных зонах исследуемого района.

Для внутригодовой изменчивости концентрации фосфатов в поверхностном и нижнем слоях было характерно её увеличение в летний период. Внутригодовые изменения солености и концентрации растворенного кислорода в поверхностном слое, описываемые U-образной кривой с пониженными значениями в теплый период и повышенными — в холодный период года, хорошо согласуются с внутригодовыми изменениями биомассы фитопланктона в слое фотосинтеза в юго-западной части Крымского побережья.

Выявлено однородное распределение гидрологических и гидрохимических параметров в зимний период (февраль) в слое 0-50 м и 0-30 м в северозападном и южном участках соответственно. С увеличением глубины содержание биогенных элементов и соленость воды монотонно повышались, а концентрация растворенного кислорода и температура воды понижались. Летом (август) содержание фосфатов, кремнекислоты и соленость ниже слоя скачка

(10-30 м) монотонно повышались, что, по-видимому, связано с притоком более соленых вод из открытой части моря в нижний слой за счет сгонно-нагонных явлений.

Повышенное содержание фосфатов в водах Севастопольского морского района в годовом цикле в 1980-х годах наблюдалось при одновременном понижении солености и температуры воды. Увеличение концентрации фосфатов в водах прибрежной зоны исследуемого района в конце 20-столетия не выявлено.

Показано, что изменчивость гидрохимических показателей шельфовых вод Севастопольского морского района в большей степени определяется влиянием природных процессов (сезонные метеоусловия, атмосферные осадки и динамика прибрежных вод).

Работа выполнена в рамках государственного задания по темам: № 0827-2019-0001 «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан — атмосфера, определяющих региональную пространственновременную изменчивость природной среды и климата»; № 0828-2019-0003 (АААА-А18-118021490093-4) «Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом».

Список литературы

Ациховская Ж.М., Куфтаркова Е.А. 1999. Абиотические факторы среды в районе сбора сточных вод (акватория Севастополя). – В кн.: Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зоны и комплексное использование ресурсов шельфа – Севастополь, ЭКОСИ-Гидрофизика, с. 47-57.

Блатов А.С., Иванов В.А. 1992. Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря. – Киев, Наукова думка, 244 с.

Гаркавая Г.П., Богатова Ю.И. 2006. Гидрохимические исследования. — В кн.: Северо-западная часть моря: биология и экология. — Киев, Наукова думка, с. 60-83.

Геворгиз Н.С., Кривенко О.В., Кондратьев С.И. 2005. Обобщение данных многолетних исследований содержания основных биогенных элементов в северо-западной части Черного моря за период 1980-2002 гг. – В кн.: Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа, вып. 12. – Севастополь, ЭКОСИ-Гидрофизика, с. 177-187.

Иванов В.Н., Субботин А.А., Губанов В.И. 2003. Гидрохимический режим вод Севастопольского взморья и его перспективы для хозяйственного использования — В кн.: Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа, вып. 2 (7). — Севастополь, ЭКОСИ-Гидрофизика, с. 134-143.

Кривенко О.В., Пархоменко А.В. 2010. Пространственная и временная изменчивость биомассы фитопланктона в Черном море за период 1948-2001 гг. – Морской экологический журнал, т. 9, \mathbb{N} 4, с. 5-24.

Куфтаркова Е.А., Ковригина Н.П., Родионова Н.Ю. 1999. Гидрохимическая характеристика вод Балаклавской бухты и прилегающей к ней прибрежной части Черного моря. – Гидробиологический журнал, т. 35, № 3, с. 88-99.

Куфтаркова Е.А., Ковригина Н.П., Родионова Н.Ю., Бобко Н.И. 2007. Гидрохимическая характеристика прибрежных вод Крымского побережья. В кн.: Марикультура мидий на Чёрном море. – Севастополь, ЭКОСИ-Гидрофизика, с. 74-93.

Куфтаркова Е.А., Немировский М.С., Родионова Н.Ю. 2002. Гидрохимический режим района экспериментальной мидиевой фермы (рейд Севастополя, Черное море). — Экология моря, вып. 59, с. 61-65.

Северо-западная часть Черного моря: биология и экология. 2006.— Киев, Наукова думка, 701 с.

Совга Е.Е., Жоров В.А., Богуславский С.Г. 2000. Многолетняя изменчивость потоков фосфора в северо-западной части Черного моря. — Морской гидрофизический журнал, \mathbb{N}_2 4, с. 69-79.

Совга Е.Е., Годин Е.А., Пластун Т.В., Мезенцева И.В. 2014. Оценка гидрохимического режима прибрежных вод Ялтинского залива. — Морской гидрофизический журнал, № 3, с. 48-58.

Parkhomenko A.V., Kuftarkova E.A., Subbotin A.A., Gubanov V.I. 2003. Results of hydrochemical monitoring of Sevastopol offshore waters. – J. Coastal Res., vol. 19, No. 1, pp. 74-82.

Статья поступила в редакцию: 01.06.2018 г.

После переработки: 11.04.2019 г.

VARIABILITY OF HYDROCHEMICAL AND HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS IN THE SOUTHWESTERN PART OF THE CRIMEAN COASTS

A.S. Kukushkin ^{1)*}, A.V. Parkhomenko ²⁾

¹⁾Marine Hydrophysical Institute RAS,
2, Kapitanskaya str., 299011, Sevastopol, Russian Federation; * kukushkinas@mail.ru

²⁾ Kovalevsky Institute of Marine Biological Studies RAS, 2, Nakhimov ave., 299011, Sevastopol, Russian Federation

Abstract. According to the data of long-term (1970-1996) observations, the spatio-temporal variability of hydrochemical (phosphates, nitrates, silicic acid and dissolved oxygen) and hydrological (salinity, temperature) parameters in the southwestern part of the Crimean coast is considered. Homogeneity of their seasonal spatial distributions and insignificant differences in concentrations in the surface layer are noted. The analysis of the temporal variability and the vertical structure of the hydrochemical and hydrological characteristics in the 0-100 m layer in the northwestern and southern sections of the investigated region made it possible to reveal the increase in the content of phosphates, silicic acid, and the decrease in the concentration of dissolved oxygen in the surface (0 m) and lower (50-100) m) layers, as well as the decrease in salinity values in the surface layer during the summer period. In the vertical distribution of the studied parameters in the 0-50 m layer in winter (February) and in the 0-10 m layer in summer (August), a homogeneous character was observed. With increasing depth, the concentration of biogenic elements and the salinity of the water increased monotonically, and the concentration of dissolved oxygen and water temperature decreased. The increased phosphate content in the annual cycle in the 1980-s was observed with a simultaneous decrease in salinity and water temperature. An increase in the phosphate concentration in the coastal zone of the study area at the end of the 20-th century was not revealed.

Keywords. Black sea, phosphates, nitrates, silica, dissolved oxygen, salinity, temperature, variability.

References

Atsikhovskaia Zh.M., Kuftarkova E.A. 1999. Abioticheskie faktory sredy v raione sbora stochnykh vod (akvatoriia Sevastopolia) [Abiotic environmental factors in the area of wastewater collection (water area of Sevastopol)]. Ekologicheskaia bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zony i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa [Ecological safety of coastal and shelf zones and comprehensive use of shelf resources]. Sevastopol, EKOSI-Gidrofizika, pp. 47-57.

Blatov A.S., Ivanov V.A. 1992. *Gidrologiia i gidrodinamika shel'fovoi zony Chernogo moria* [Hydrology and hydrodynamics of the black sea shelf zone]. Kiev, Naukova dumka, 244 p.

Garkavaia G.P., Bogatova Iu.I. 2006. *Gidrokhimicheskie issledovaniia* [Hydrochemical studies]. *Severo-zapadnaia chast' moria: biologiia i ekologiia* [North-Western part of the sea: biology and ecology]. Kiev, Naukova dumka, pp. 60-83.

Gevorgiz N.S., Krivenko O.V., Kondrat'ev S.I. 2005. Obobshchenie dannykh mnogoletnikh issledovanii soderzhaniia osnovnykh biogennykh elementov v severo-zapadnoi chasti Cher-nogo moria za period 1980-2002 gg. [Generalization of the data of long-term studies of the content of the main nutrients in the North-Western part of the Black sea for the period 1980-2002]. *Ekologicheskaia bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa* [Ecological safety of coastal and shelf zones and comprehensive use of shelf resources], issue 12. Sevastopol, EKOSI-Gidrofizika, pp. 177-187.

Ivanov V.N., Subbotin A.A., Gubanov V.I. 2003. Gidrokhimicheskii rezhim vod Sevasto-pol'skogo vzmor'ia i ego perspektivy dlia khoziaistvennogo ispol'zovaniia [Hydrochemical regime of waters of the Sevastopol seaside and its prospects for economic use] *Ekolo-gicheskaia bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resur-sov shel'fa* [Ecological safety of coastal and shelf zones and comprehensive use of shelf resources], issue 2 (7). Sevastopol, EKOSI-Gidrofizika, pp. 134-143.

Krivenko O.V., Parkhomenko A.V. 2010. Prostranstvennaia i vremennaia izmenchivost' bio-massy fitoplanktona v Chernom more za period 1948-2001 gg. [Spatial and temporal variability of phytoplankton biomass in the Black sea for the period 1948-2001]. *Morskoi ekologicheskii zhurnal – Marine Ecological Journal*, vol. 9, no. 4, pp. 5-24.

Kuftarkova E.A., Kovrigina N.P., Rodionova N.Iu. 1999. Gidrokhimicheskaia kharakteristi-ka vod Balaklavskoi bukhty i prilegaiushchei k nei pribrezhnoi chasti Chernogo moria [Hydrochemical characteristics of the waters of Balaklava Bay and the adjacent coastal part of the Black sea]. *Gidrobiologicheskii zhurnal – Hydrobiological Journal*, vol. 35, no. 3, pp. 88-99.

Kuftarkova E.A., Kovrigina N.P., Rodionova N.Iu., Bobko N.I. 2007. Gidrokhimicheskaia kharakteristika pribrezhnykh vod Krymskogo poberezh'ia [Hydrochemical characteristics of coastal waters of the Crimean coast]. *Marikul'tura midii na Chernom more* [Mariculture of mussels on the Black sea]. Sevastopol, EKOSI-Gidrofizika, pp. 74-93.

Kuftarkova E.A., Nemirovskii M.S., Rodionova N.Iu. 2002. Gidrokhimicheskii rezhim raiona eksperimental'noi midievoi fermy (reid Sevastopolia, Chernoe more) [Hydrochemical regime of the area of experimental mussel culture farm (Harbor of Sevastopol, Black sea)]. *Ekologiia moria* – *Ecology of the sea*, vol. 59, pp. 61-65.

Severo-zapadnaia chast' Chernogo moria: biologiia i ekologiia [North-Western part of the Black sea: biology and ecology]. 2006. Kiev, Naukova dumka, 701 p.

Sovga E.E., Zhorov V.A., Boguslavskii S.G. 2000. Mnogoletniaia izmenchivost' potokov fosfora v severo-zapadnoi chasti Chernogo moria [Long-term variability

of phosphorus fluxes in the North-Western part of the Black sea]. *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal – Marine Hydrophisycs Journal*, no. 4, pp. 69-79.

Sovga E.E., Godin E.A., Plastun T.V., Mezenceva I.V. 2014. Ocenka gidrohimicheskogo rezhima pribrezhnyh vod Jaltinskogo zaliva. [Assessment of hydrochemical regime of the coastal waters of the Yalta Bay]. *Morskoj gidrofizicheskii zhurnal – Marine Hydrophisycs Journal*, no. 3, pp. 48-58.

Parkhomenko A.V., Kuftarkova E.A., Subbotin A.A., Gubanov V.I. 2003. Results of hydrochemical monitoring of Sevastopol offshore waters. – Journal Coastal Research, vol. 19, No. 1, pp.74-82.