

В.В.Долотов, С.И.Кондратьев, С.В.Ляшенко

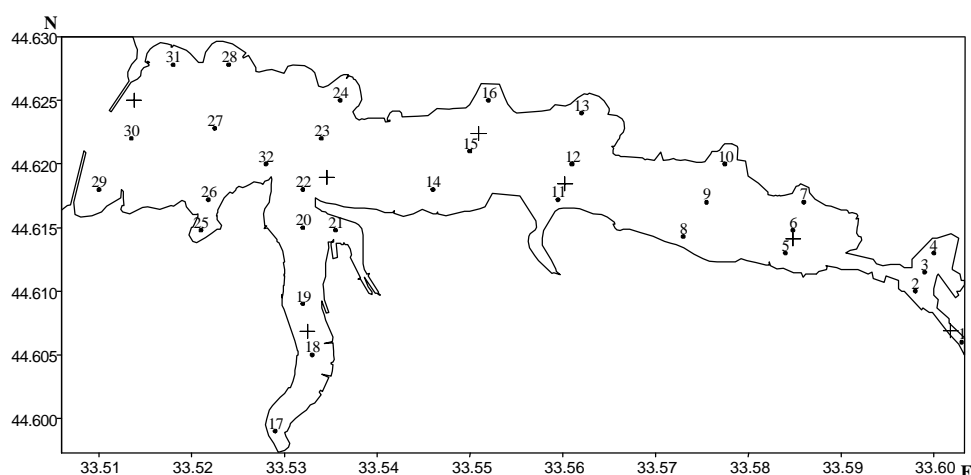
Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь

ВНУТРИГОДОВЫЕ (СЕЗОННЫЕ) ИЗМЕНЕНИЯ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И КИСЛОРОДА В РАЗЛИЧНЫХ РАЙОНАХ СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БУХТЫ

Для каждого месяца в период май 1998 г. – май 1999 г. рассчитано абсолютное содержание биогенных элементов и кислорода в пяти различных районах Севастопольской бухты и для всей бухты в целом. Показано, что наиболее чистый (возле входа в бухту) и наиболее грязный (Южная бухта) районы отличаются по динамике накопления и расходования биогенных элементов. Максимальный запас неорганических форм азота, фосфора, и кремнекислоты во всех районах Севастопольской бухты, за исключением района Инкерманской бухты, приходится на январь.

Современная оценка экологического состояния того или иного водного объекта требует уже не только знания концентраций той или иной гидрохимической составляющей, но и суммарной оценки количеств ее поступления и удаления. Такие данные позволяют сделать оценку ассимиляционной емкости объекта – той нагрузки на водную среду, которая не вызовет необратимых изменений экосистемы.

В определении экологического состояния Севастопольской бухты (СБ) составляющие бюджетов гидрохимических характеристик до настоящего времени не исследовались. В [1] состояние водной среды СБ в 1993 г. было определено как крайне тревожное, которое перешло в 1995 г. в критическое [2]. Это потребовало более интенсивного изучения состояния бухты, и в период 1997 – 2001 гг. число станций для отбора проб было увеличено с 7 до 32 (рис.1). Результаты этих экспедиций позволили выделить наиболее небла-



Р и с . 1 . Сеть из 32 станций на акватории Севастопольской бухты.
Крестиками обозначена сеть из 7 станций.

© В.В.Долотов, С.И.Кондратьев, С.В.Ляшенко, 2005

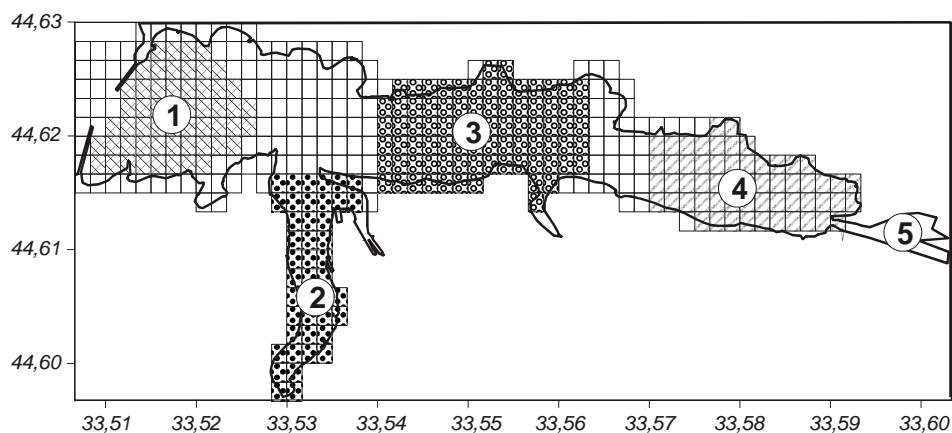
гополучные районы бухты и оценить сезонный ход концентраций отдельных элементов главного биогенного цикла [3 – 6].

Следующей стадией этих исследований должна стать оценка общего абсолютного содержания отдельных биогенных элементов в различных районах бухты и изменение этих величин в течение года. Критерием при выборе районов служили различия в концентрациях биогенных элементов, а также выводы и рекомендации [3]. В итоге, на акватории СБ были выделены районы 1 – 5 (рис.2), которые, по нашим предположениям, должны были различаться между собой по интенсивности биохимических процессов.

Районы 1 и 2 соответствуют наиболее чистому и наиболее загрязненному районам СБ по данным [3, 4]. Район 4 относится к Нефтегавани, где присутствие нефтепродуктов и сток охлаждающих теплоэлектростанцию вод создают, по-видимому, [4, 5] свой микрорежим. В отдельный район 5 выделена Инкерманская бухта, представляющая собой фактически эстуарий реки Черной. Район 3 относится к центральной части бухты и является как бы «осредняющим», т.е. на состояние вод этой акватории при соответствующих метеоусловиях оказывают влияние воды всех вышеперечисленных районов.

Следует отметить, что в рассматриваемый период с мая 1998 г. по май 1999 г. объем стока реки Черной – основного поставщика пресных вод на акваторию СБ – оставался практически неизменным даже в период весеннего паводка 1999 г. Этот объем, составляющий, как правило, $0,003 - 0,004 \text{ км}^3$, достиг величины $0,007 \text{ км}^3$ лишь в июне 1998 г., что никак не проявилось на распределении гидрохимических параметров в водных массах бухты в целом [4]. Таким образом, различия в объемах стока реки Черной не могут быть причиной рассматриваемых ниже особенностей гидрохимических режимов различных районов бухты.

Величина стока реки Черной $0,003 \text{ км}^3$ в месяц соответствует ежедневному поступлению в воды СБ около 100 тыс. м^3 относительно чистых пресных вод, тогда как общий объем бухты составляет $0,079 \text{ км}^3$ [1]. В то же время ежедневный сброс в бухту неочищенных или условно очищенных вод составляет 10 – 15 тыс. м^3 . Следовательно, из поступающих в СБ пресных вод 10 – 15 % составляют неочищенные или условно очищенные сточные воды.



Р и с . 2 . Исследованные районы на акватории Севастопольской бухты. Стороны прямоугольника соответствуют одной десятой координатной минуты.

Методы. Для оценки сезонных изменений абсолютных количеств биогенных элементов и растворенного кислорода в различных районах СБ был разработан подход и математический аппарат, подробности которого изложены в [7]. Вкратце суть методики состоит в наложении на акваторию бухты сетки размером 58×20 ячеек с шагом $0,1'$ по широте и долготе (рис.2), определении средней глубины места и вычислении объема водных масс в каждой ячейке. Концентрация гидрохимических элементов, определяемая на нерегулярной сетке станций, интерполировалась с использованием метода *Inverse Distance* программы *GS «Surfer»* в узлы регулярной сетки. После определения средней концентрации нужного гидрохимического элемента в выбранном «квадрате» можно легко перейти к величине его абсолютного содержания. Суммирование полученных величин для выбранной акватории дает абсолютное содержание элемента в данном районе бухты.

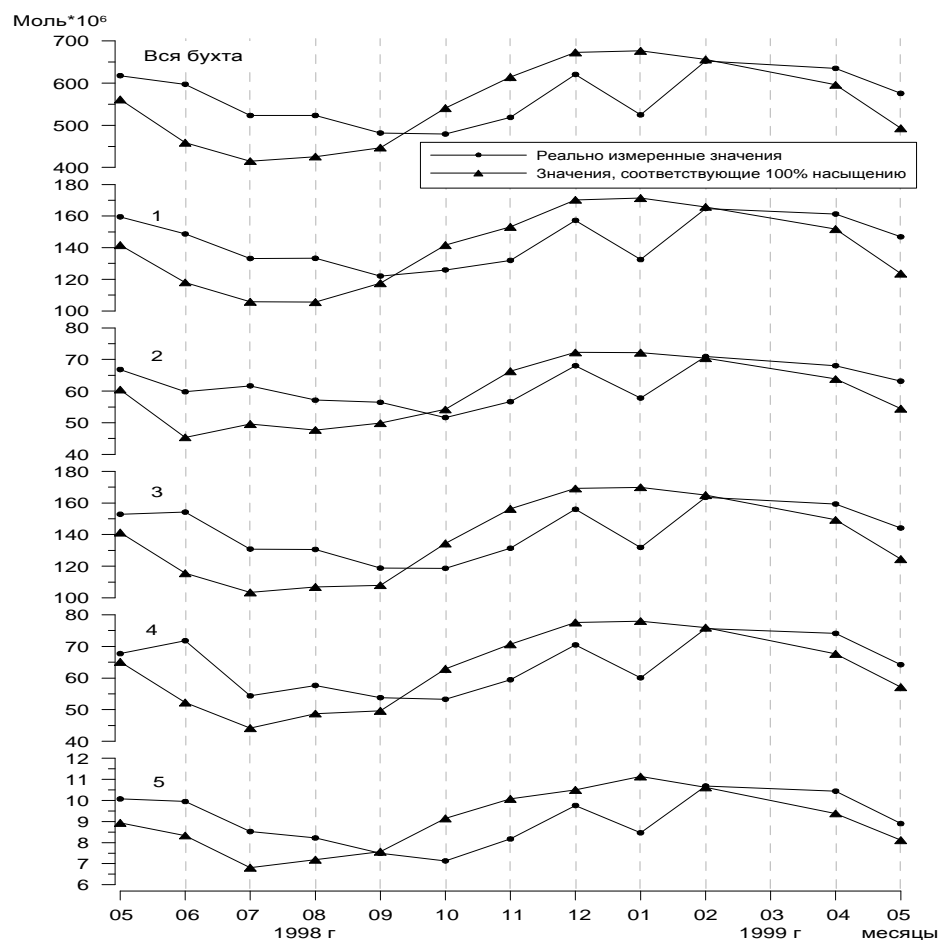
Ранее было показано [7], что относительная ошибка предложенного нами способа расчета абсолютного содержания гидрохимических характеристик для массива данных по СБ составляет около 20 – 30 %, а в случае однородного распределения гидрохимической характеристики (например, кислорода) различие в определении абсолютного содержания составляет всего 3 %.

По данной методике были рассчитаны абсолютные количества элементов главного биогенного цикла и растворенного кислорода для бухты в целом и пяти ее различных районов для каждого месяца за период май 1998 г. – май 1999 г.

Результаты. Режим растворенного кислорода в различных районах Севастопольской бухты. Как для бухты в целом, так и для всех изученных районов накопление растворенного кислорода началось в сентябре, и максимальный его запас приходился на декабрь (рис.3). В период декабрь – январь происходило уменьшение этого запаса, после чего к февралю он восстанавливался до декабрьских значений и даже несколько превосходил их. Поскольку резкого изменения температуры морской воды в период декабрь – февраль не наблюдалось (температура воды в момент отбора проб во всех случаях составляла $6 - 7$ °C), подобное изменение абсолютного содержания кислорода может быть объяснено только химико-биологическими процессами. Можно, в частности, предполагать, что интенсивность фотосинтеза к январю становится минимальной, тогда как интенсивность процессов потребления кислорода в процессах дыхания не изменяется.

К февралю увеличение солнечной освещенности активизирует процессы фотосинтеза и запас растворенного кислорода не только восстанавливается до такого же уровня, как и в декабре, но и превосходит его, достигая максимума во всех районах бухты.

Сравнение теоретического и практического запасов кислорода в районах бухты. Для каждого из пяти рассматриваемых районов и для всей бухты в целом было рассчитано также теоретическое количество содержащегося там растворенного кислорода. Теоретические расчеты проводили, исходя из предположения о существовании равновесия в процессе обмена кислорода вод бухты с кислородом атмосферы, т.е. предполагая 100 % насыщение вод кислородом при данной температуре. Иными словами, кривые теоретически возможного содержания кислорода представляют ситуацию



Р и с. 3. Содержание кислорода в различных районах (1 – 5) СБ в период май 1998 г. – май 1999 г.

равновесного обмена с кислородом атмосферы, т.е. ситуацию, когда исключено влияние биохимических процессов на содержание растворенного кислорода в водных массах.

При сравнении годового хода двух распределений, 100 %-ного теоретического и реально измеренного, для всех исследовавшихся регионов бухты четко выделяются две ситуации: первая – когда реальный запас кислорода превышает теоретически возможный, и вторая – противоположная ей. Первая ситуация длится с февраля по сентябрь, вторая, характеризующаяся недостаточным содержанием кислорода относительно теоретически возможного начинается в сентябре – октябре и заканчивается соответственно в феврале.

Таким образом, для всех районов бухты февраль и сентябрь являются «переломными», когда реальное содержание кислорода в водах акватории равно теоретически возможному. Следовательно, в летний период процессы фотосинтеза обеспечивают избыток кислорода и поступление его из водных масс в атмосферу, тогда как зимой наблюдается обратная картина – воды бухты извлекают кислород из атмосферы. Выводы о существовании двух периодов кислородного режима в СБ, когда она является потенциальным

поставщиком и потенциальным потребителем атмосферного кислорода, совпадают с данными [4] о сезонных изменениях концентрации кислорода в поверхностных и придонных слоях вод СБ.

Полученный результат позволяет рассматривать регулярно наблюдаемое 100%-ное насыщение поверхностных вод кислородом в осенне-зимний период как первый этап извлечения кислорода из атмосферы, когда активные процессы перемешивания на границе раздела двух фаз обеспечивают равновесие с кислородом атмосферы.

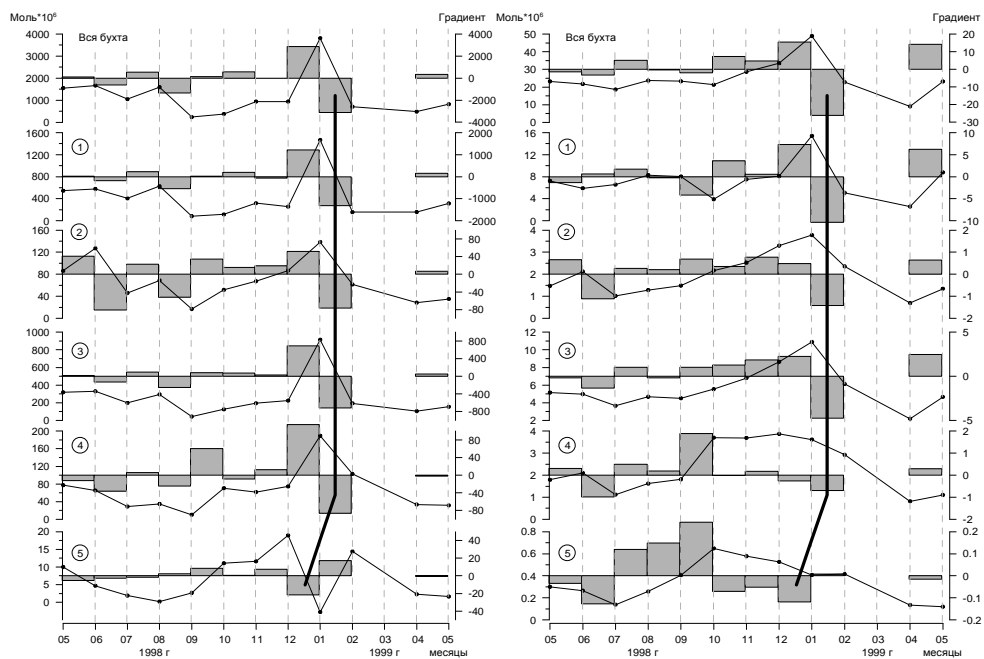
Величины абсолютного содержания биогенных элементов. Различия в годовом ходе абсолютного содержания биогенных элементов в различных районах бухты гораздо более контрастны по сравнению с практически монотонными изменениями в содержании растворенного кислорода. На приведенном рис.4 представлены рассчитанные величины абсолютного содержания биогенных элементов (левая шкала) и изменение абсолютного содержания каждого элемента от месяца к месяцу (правая шкала).

Нитраты. Содержание этой формы неорганического азота (рис.4, а) в течение года на всех исследованных акваториях достигает максимальных значений в январе, за исключением района Инкермана, где максимум приходился на декабрь.

В наиболее чистом районе возле входа в бухту, который можно выбрать для сравнения, содержание нитратов в январе ($1466 \cdot 10^6$ Моль) примерно втрое превышает среднемесячное значение ($419 \cdot 10^6$ Моль). Примерно такое же трехкратное превышение содержания нитратов в январе наблюдается и для всей бухты, и для района в центральной части. В то же время в Южной бухте кроме январского максимума наблюдался еще и близкий к нему по абсолютной величине июньский.

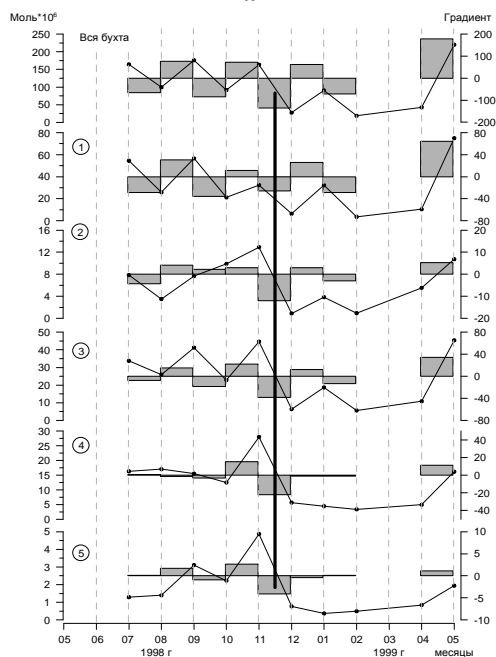
Нитриты. В случае нитритов (рис.4, б) один четкий максимум абсолютного содержания, приходящийся, как и в случае нитратов, на январь, и примерно вдвое превышающий среднемесячное содержание нитритов в водных массах, наблюдался только в относительно чистых районах бухты возле входа (район 1). В центральной части и в Южной бухте особенно этот максимум был не такой явный, а в случае района Нефтегавани резкое увеличение содержания нитритов происходило в ноябре, после чего содержание нитритов в течение четырех месяцев оставалось практически постоянным.

Аммоний. Тенденция постепенного накопления всех форм биогенных элементов в период ноябрь-январь не характерна для аммония (рис.4, в). Запас этой формы неорганического азота в наиболее чистом районе бухты у входа и по всей бухте в целом в течение всего года не имел ярко выраженного максимума. В Южной бухте, в районе Нефтегавани и Инкермана были отмечены максимальные содержания аммония в ноябре. Абсолютный минимум содержания аммония во всех районах бухты, кроме Инкермана, как и для всех остальных биогенных элементов, пришелся на февраль. Такое поведение может служить подтверждением известного положения, согласно которому при ослаблении интенсивности процессов фотосинтеза фитопланктон начинает избирательно осваивать наиболее усвояемую форму азота, которой в серии $NO_3^- - NO_2^- - NH_4^+$ является ион аммония [8].



а

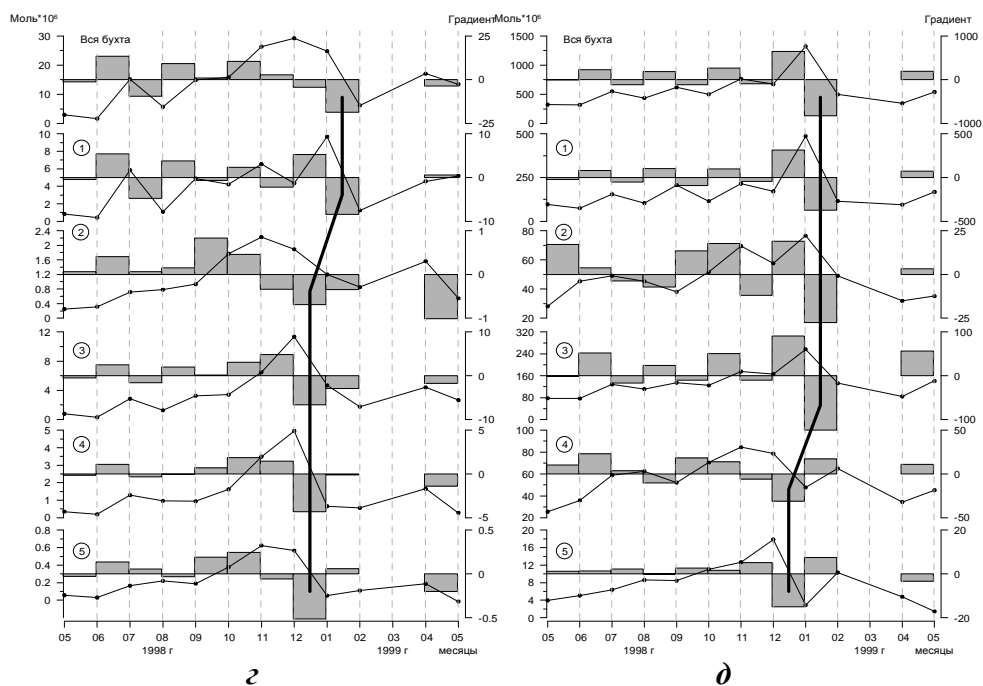
б



в

Р и с . 4 . Содержание гидрохимических элементов в различных районах СБ в период май 1998 г. – май 1999 г. (ломаная линия), ежемесячный градиент (прямоугольники) в тех же единицах, жирная линия связывает периоды максимального потребления элементов: нитраты (а); нитриты (б); содержание аммония (в); фосфатов (г); кремнекислоты (д).

Фосфаты. В наиболее чистых водах района 1 возле входа в бухту отмечены два максимума абсолютного содержания фосфатов (рис.4, г): больший в январе и меньший в июле. В остальных районах ситуация несколько отличается, а в целом по бухте зимний максимум не такой четкий и смещен на декабрь. Подобное расположение и форма максимума вызваны тем, что в других районах бухты зимний максимум абсолютного содержания фос-



Продолжение рис. 4.

фатов приходился на разные месяцы: для районов в центральной части бухты и в Нефтегавани это был декабрь, для района Южной бухты и Инкермана даже ноябрь. В результате по бухте в целом следует говорить о сезонном зимнем максимуме содержания фосфатов, а не о конкретном месяце, в котором он наблюдается.

На основании полученных данных нельзя утверждать, что наблюдавшийся летний максимум фосфатов в районе 1 является характерной особенностью района, а не является результатом единичного сброса сточных вод.

Кремнекислота. Динамика кремнекислоты (рис.4, д) в водах бухты примерно повторяет динамику других биогенных элементов с четко выраженным максимумом в чистых районах бухты, приходящимся на январь (для Инкермана на ноябрь – декабрь).

Максимальное абсолютное потребление биогенных элементов в акватории Севастопольской бухты. Оценка максимальных абсолютных количеств биогенных элементов, потребляемых в различных районах СБ в процессах водообмена, фотосинтеза и осадкообразования, проводилась исходя из максимального уменьшения содержания гидрохимических компонентов в водах бухты. Как следует из рис.4, а – д, для всех приведенных биогенных элементов, исключая аммоний, максимальное изменение содержания приходится на один месяц из периода декабрь – февраль, при этом по мере удаления от открытого моря этот период наступает раньше. Максимальная интенсивность потребления ионов аммония для всех участков акватории пришлась на период ноябрь – декабрь.

Количественная оценка величины этих изменений в моль·10⁶, представляющая абсолютную ассимиляционную способность данного района по вы-

бранному компоненту, представлена в табл.1. Там же приведены мольное соотношение между извлеченными биогенными элементами и значения относительных ассимиляционных способностей (ОАС). Величины ОАС, получаемых делением значений абсолютных ассимиляционных емкостей на объем водных масс, показывают количество молей биогенного элемента, извлекаемого из одного кубометра воды.

Как видно из приведенных пропорций во всех районах бухты «наиболее успешно» извлекаются неорганические формы азота, «хуже всего» фосфаты, тогда как кремнекислота занимает промежуточное положение.

Стехиометрическое отношение числа молей «удаленных» в периоде максимального потребления биогенных элементов для всей бухты оказалось равным: $N_{(\Sigma \text{неорг})} : Si : PO_4 = 178 : 46 : 1$. В этой пропорции наблюдается очень высокое соотношение между $N_{(\Sigma \text{неорг})} : PO_4 = 178 : 1$, что более, чем на порядок выше, чем $16 : 1$ в «классической» формуле Редфилда [9]. Это может служить косвенным подтверждением того, что в условиях Севастопольской бухты лимитирующим фактором роста фитопланктона является содержание фосфора, как это было отмечено ранее [10, 11]. Кроме этого, объяснить найденное несоответствие можно еще и высокой скоростью кругооборота фосфора, а также тем, что нами не учитывались органические формы существования биогенных элементов.

Среди полученных величин ОАС следует отметить неожиданно низкое значение этой величины для Южной бухты, хотя постоянно высокие концентрации биогенных элементов в ней предполагают достаточно интенсивное извлечение биогенных элементов из ее водной массы. Можно предполагать, что полученное для Южной бухты значение несколько занижено, вследствие постоянного поступления в нее сточных вод и невозможности вследствие этого точно оценить количество извлеченных биогенных элементов.

Т а б л и ц а 1. Максимальные изменения в абсолютных количествах биогенных элементов в период январь – февраль 1999 г. (моль 10^6), относительная ассимиляционная способность (ОАС) (моль/м³) и мольные соотношения ассимилированных биогенных элементов.

район	1	2	3	4	5	вся бухта
объем (м ³)	22,7	9,7	22,6	10,4	1,4	89,9
фосфаты	8,4	0,69	6,67	4,30	0,51	18
кремний	371	28	124	31	15	823
нитраты	1310	77	721	87	22	3104
нитриты	10	1,4	4,7	0,69	0,25	26
аммоний	28	2,9	13	1,2	0,40	72
$N_{\text{неорг.}}$	1348	81,3	738	88,9	22,6	3202
ОАС PO_4	0,37	0,07	0,30	0,41	0,36	0,20
ОАС SiO_3	16	2,89	5,49	2,98	10	4,13
ОАС $N_{\text{неорг.}}$	59	8,4	32	8,5	16,1	35,6
$N_{\text{неорг.}} : Si : P$	160:44:1	118:41:1	111:19:1	21:7:1	44:29:1	178:46:1

Обсуждение результатов. Как видно из приведенных выше рисунков и данных табл.1, различные районы СБ отличаются по динамике накопления и расходования биогенных элементов, а в некоторых случаях и растворенного кислорода.

Наиболее общей закономерностью для всех выбранных районов был пик накопления биогенных элементов в зимний период и значительного уменьшения содержания гидрохимических характеристик сразу после этого. Из этой картины явно выпадает район Инкермана, в котором эта зависимость для всех биогенных элементов сместилась на более ранний период.

По степени извлечения биогенных элементов (на один атом фосфора) изученные районы бухты заметно различаются, что должно быть связано с различием видового разнообразия микроорганизмов, населяющих водную толщу [12].

Как показал анализ, в частности данные табл.1, гидрохимический режим Южной бухты более соответствует определению «чистой» акватории, по сравнению с районами Нефтегавани и Инкермана.

Общие выводы.

1. В годовом ходе содержания кислорода во всех районах бухты выделяются два периода: с февраля по сентябрь, когда абсолютное содержание кислорода в бухте превышает его растворимость; и с октября по январь, когда абсолютное содержание кислорода ниже растворимости.

2. Абсолютное содержание нитратов, нитритов, фосфатов в более чистых районах бухты достигает максимума в декабре – январе, в удаленных от открытой части моря максимальное содержание биогенных элементов приходится на ноябрь – декабрь. Кроме этого, для наиболее загрязненного участка Севастопольской бухты существенно изменяется характер зависимости содержания биогенных элементов во времени.

3. Максимальный запас неорганических форм азота находится в форме нитратов и составляет $1310 \cdot 10^6$ моль (236523 т). Максимальный запас кремнекислоты и фосфатов составляют $371 \cdot 10^6$ моль (92588 т) и $18 \cdot 10^6$ моль (2353 т) соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морочковский В.А., Ковальчук Ю.Л. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты // Ихтиофауна черноморских бухт в условиях антропогенного воздействия. – Киев: Наукова думка, 1993. – С.17-24.
2. Овсяный Е.И., Романов А.С., Миньковская Р.Я., Красновид И.И., Озюменко Б.А., Цымбал И.М. Основные источники загрязнения морской среды Севастопольского региона // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2001. – вып.2. – С.138-152.
3. Овсяный Е.И., Кемп Р.Б., Репетин Л.Н., Романов А.С. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты в условиях антропогенного воздействия (по наблюдениям 1998 – 1999 гг.) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. – С.79-103.
4. Павлова Е.В., Овсяный Е.И., Гордина А.Д., Романов А.С. Современное состояние и тенденции изменения экосистемы Севастопольской бухты // Акватория и

- берега Севастополя: экосистемные процессы и услуги обществу.– Севастополь: Аквавита, 1999.– С.70-94.
5. *Gordina A.D., Pavlova E.V., Ovsyany E.I., Wilson J.G., Kemp R.B., Romanov A.S.* Long-term changes in Sevastopol Bay (the Black Sea) with particular reference to the ichthyoplankton and zooplankton // *Estuarine, Coastal and Shelf Science.*– 2001.– 52.– P.1-13.
 6. *Сеничкина Л.Г.* Изменение структуры фитопланктона в локальных зонах моря под воздействием антропогенных факторов // *Планктон Черного моря.*– Киев: Наукова думка, 1993.– С.55-68.
 7. *Долотов В.В., Кондратьев С.И., Ляшенко С.В.* Использование возможностей программного обеспечения для расчета содержания гидрохимических элементов в закрытой акватории // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.*– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004.– вып.10.– С.161-164.
 8. *Shiomoto A., Sasaki R., Shimoda T.* Kinetics of nitrate and ammonium uptake by the natural populations of marine phytoplankton in the surface water of the Oyashio region during spring and summer // *J. of Oceanogr.*– 1994.– 50, №5.– P.515-529.
 9. *Takanashi T., Broecker W., Lander S.* Redfield ratio based on chemical data from isopycnal surfaces // *J. Geophys. Res.*– 1985.– v.90.– P.6907-6924.
 10. *Benitez-Nelson C.R.* The biogeochemical cycling of phosphorus in marine systems // *Earth-Science Reviews.*– 2000.– 51.– P.109-135.
 11. *Downing J.A.* *Marine nitrogen: Phosphorus stiochiometry and the global N:P cycle* // *Biogeochemistry.*– 1997.– 37.– P.237-252.
 12. *Миронов О.Г., Кирюхина Л.Н., Алемов С.В.* Санитарно-биологические аспекты экологии Севастопольских бухт в XX веке.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003.– 185 с.

Материал поступил в редакцию 04.02.2005 г.
После доработки 19.05.2005 г.