

Особенности вертикального распределения элементов главного биогенного цикла в водах северо-западного шельфа Черного моря

Рассмотрены особенности вертикального распределения элементов главного биогенного цикла в верхней толще вод северо-западного шельфа Черного моря в весенний и осенний сезоны, а также взаимосвязь особенностей вертикального распределения гидрохимических и гидрологических характеристик. Показано, что положение галоклина всегда определяет положение хемоклина, тогда как влияние термоклина на распределение гидрохимических характеристик неоднозначно. Вертикальное распределение гидрохимических параметров может быть однородным при наличии сезонного термоклина, тогда как в его отсутствие могут наблюдаться значительные вертикальные градиенты в распределении гидрохимических характеристик в пределах верхнего перемешанного слоя.

При исследовании вертикального распределения элементов главного биогенного цикла в водной толще Черного моря основное внимание традиционно обращалось на изменения в концентрациях, происходящие по мере превращения аэробной зоны в анаэробную. Подробное описание биохимических процессов, происходящих при этом в интервале изопикнических поверхностей $\sigma_t = 14,2 - 16,5$, дано в работах [1 – 6].

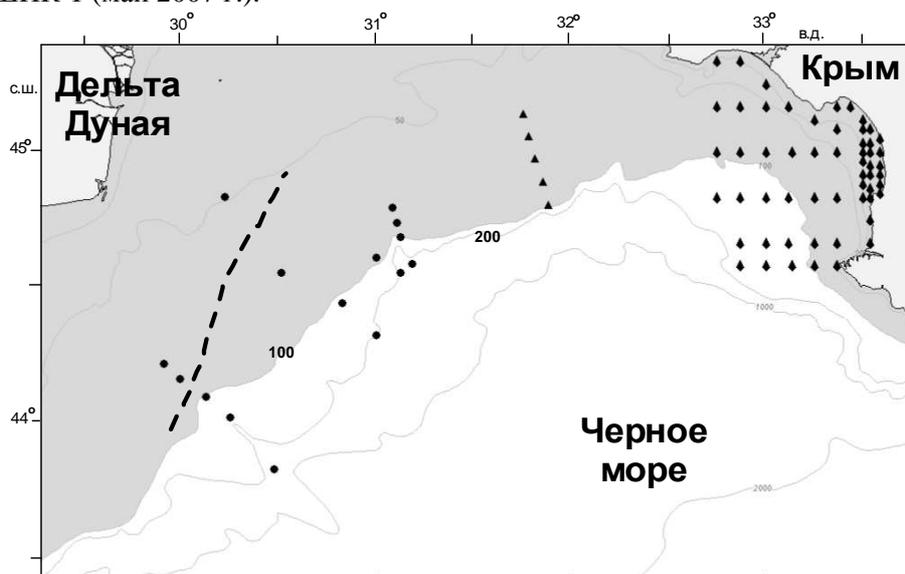
Значительно меньшее внимание уделялось особенностям вертикального распределения биогенных элементов в шельфовых водах, хотя вопрос о том, каких изменений в концентрациях биогенных элементов следует ожидать по мере перемещения от поверхности до холодного промежуточного слоя (ХПС), пожалуй, не менее сложен, чем особенности распределения гидрохимических характеристик в субкислородной и сероводородной зонах. Экспедиционные исследования на шельфе, как правило, ограничивались отбором проб на поверхностном и придонном горизонтах. Однако при таком методическом подходе невозможно исследовать особенности вертикальной структуры стратифицированных шельфовых вод, в которых присутствуют: верхний квазиоднородный слой (ВКС); слой сезонного термоклина; верхняя граница ХПС на $\sigma_t = 14,1 - 14,3$ и ядро ХПС на $\sigma_t = 14,5 - 14,6$. Особенности вертикального распределения элементов главного биогенного цикла на северо-западном шельфе (СЗШ) в мае 2004 и 2007 гг. ниже изопикнической поверхности $\sigma_t = 15,0$ рассмотрены в [7, 8].

Задача данной работы – исследование особенностей распределения биогенных элементов в весенний и осенний сезоны в верхней 100-метровой толще вод с высоким вертикальным разрешением в районах СЗШ, не подверженных влиянию стока рек, а также анализ взаимосвязей между особенностями распределения химических и гидрологических характеристик.

Материалы и методы

Для анализа вертикальных профилей концентраций биогенных элементов использованы данные трех экспедиций Морского гидрофизического института НАН Украины за последние 12 лет, во время проведения которых расстояние между горизонтами отбора проб было менее 10 м. Это исследования на НИС «Эксперимент» в сентябре 1995 г. и мае 2007 г., а также на НИС Болгарской АН «Академик» в мае 2004 г.

Схема расположения гидрохимических станций в рейсах представлена на рис. 1. Отбор проб для химического анализа производили с помощью кассет зондирующих приборов ШИК-3 (1995 г.), «Seabird-Electronics» (май 2004 г.) и ШИК-1 (май 2007 г.).



Р и с. 1. Схема станций, выполненных в сентябре 1995 г. (◆), в мае 2004 г. (●) и в мае 2007 г. (▲). Штриховой линией отмечена примерная граница проникновения на СЗШ речного стока

Экспедиции были проведены в разные сезоны в различных районах СЗШ Черного моря, однако во всех случаях в соответствии с данными по районированию СЗШ исследования выполнялись в относительно чистых районах, не подверженных влиянию стоков Дуная, Днепра и Днестра [9, 10]. Примерная граница зоны (отмеченная на рис. 1 штриховой линией), к северо-западу от которой заметно влияние речного стока, была определена по появлению на трех северо-западных станциях значительных концентраций нитритов и нитратов во всей толще шельфовых вод. Данные для этих станций не вошли в изученный массив. Более подробно о гидрохимической обстановке на СЗШ в мае 2004 г. изложено в работе [7].

Определение концентраций фосфатов, кремнекислоты, нитратов и нитритов спектрофотометрическим методом проводили в соответствии с методикой [11].

Результаты химико-аналитических определений в мае 2004 г. показали следующие коэффициенты вариации вычисленных средних значений концентра-

ций: 3,1% для фосфатов (среднее 1,07 мкМ), 1% для кремнекислоты (среднее 52,5 мкМ), 2% для нитритов и нитратов.

Вертикальные профили градиентов температуры и биогенных элементов рассчитаны с помощью программы «Гидролог» [12] до глубины 100 м, на которой располагалась изопикническая поверхность $\sigma_t = 15,0$.

При расчете погрешности определения вертикальных градиентов (ВГ) биогенных элементов была принята во внимание точность использованных методик. Для фосфатов это составит 0,03 мкМ от определяемой концентрации в 1 мкМ, что для двух значений в 10-метровом слое дает ошибку в определении вертикального градиента в 0,006 мкМ/м. Ошибка определения концентрации кремнекислоты до 5 мкМ, согласно [11], составляет 1%, что соответствует 0,05 мкМ и ошибке определения градиента 0,01 мкМ/м при расстоянии между горизонтами 5 м. При больших различиях в глубинах отбора проб ошибка определения градиента концентрации кремнекислоты будет еще меньше. Обсуждаемые ниже величины вертикальных градиентов концентрации биогенных элементов на порядок превышают эти значения, следовательно, рассчитанные значения ВГ не связаны с погрешностями методики определения.

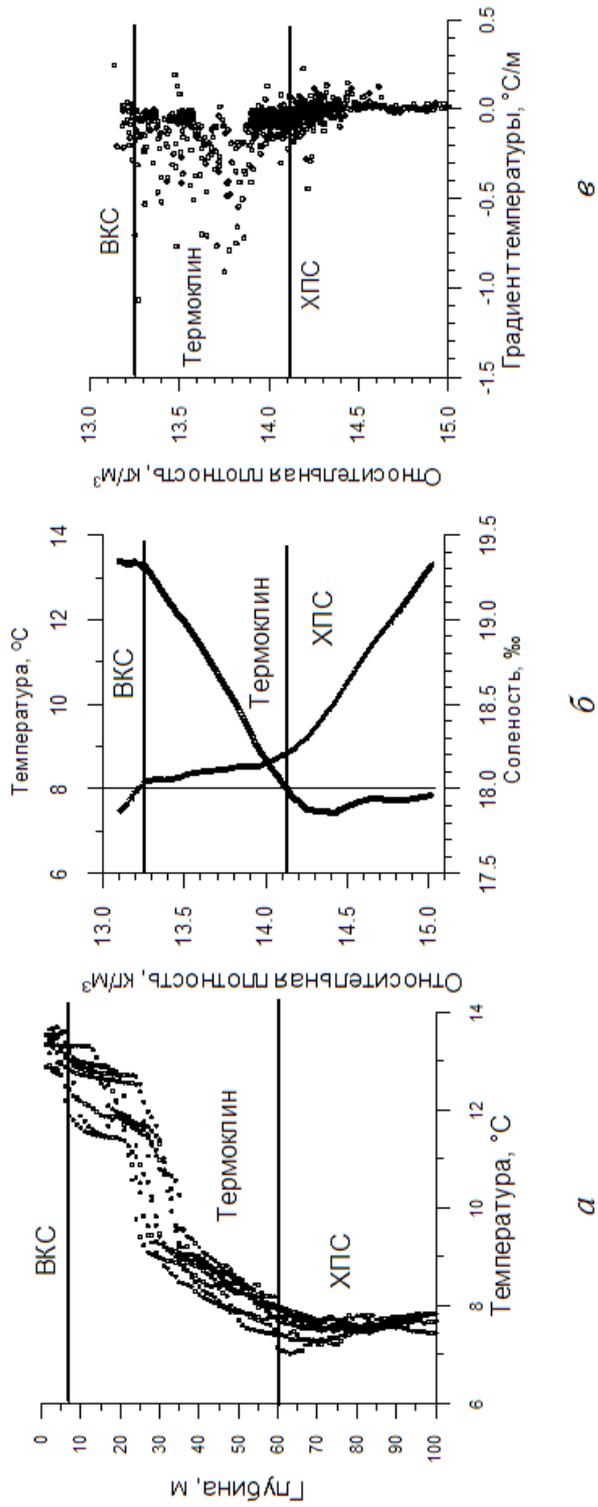
Краткая характеристика вертикального распределения гидрологических параметров в исследованных районах

Формирование вод рассмотренных регионов СЗШ обуславливается главным образом Основным Черноморским течением, ограждающим эти акватории от прямого антропогенного загрязнения, поступающего с речным стоком основных рек в северо-западной части Черного моря и распространяющегося на юг вдоль западного побережья [13].

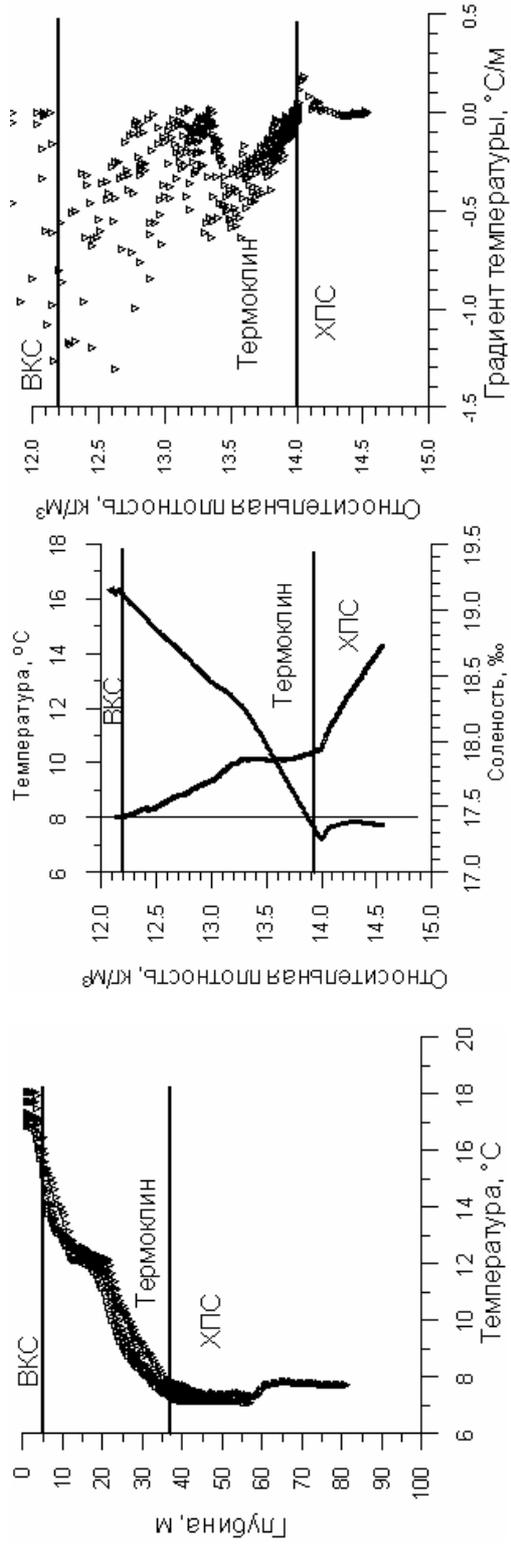
При рассмотрении гидрологических характеристик вод основное внимание уделено вертикальному градиенту температуры, так как далее будет показано, что на особенностях вертикальных профилей биогенных элементов определенным образом отражаются особенности распределения именно этой характеристики.

Проанализированные массивы данных относятся к весеннему и позднелетнему гидрологическим сезонам, поэтому для всех случаев в верхней 100-метровой водной толще ожидалась трехслойная структура, в которую входил верхний квазиоднородный слой, слой термоклина и холодный промежуточный слой.

Определение толщины ВКС, согласно классификации, изложенной в [14], связано или с изменением температуры, которая на нижней границе ВКС ниже поверхностной на $0,5^\circ\text{C}$, или с уменьшением σ_t на 0,125 в единицах плотности. Согласно этим определениям, в мае 2004 г. ВКС со средней температурой на шельфе $13,5^\circ\text{C}$ распространялся примерно до глубины 5 – 7 м (рис. 2, а) или до изопикнической поверхности $\sigma_t = 13,2 - 13,3$ в поле плотности (рис. 2, б). С учетом примерно 5-метровой толщины ВКС величина ВГ температуры в этом слое должна быть не более $0,1^\circ\text{C}/\text{м}$, что и наблюдалось на большинстве станций (рис. 2, в). Слой термоклина, в котором температура постепенно уменьшалась от 13 до 8°C , простирался до изопикны $\sigma_t = 14,1$, ниже которой располагался ХПС с ядром на $\sigma_t = 14,4$. Значения ВГ температуры в верхней части термоклина в отдельных случаях достигали $-1,1^\circ\text{C}/\text{м}$ и уменьшались до $0,1^\circ\text{C}/\text{м}$ на верхней границе ХПС.



Р и с. 2. Вертикальные профили температуры относительно глубины – а, температуры и солёности относительно плотности – б, вертикальные градиенты температуры относительно плотности – в в мае 2004 г.



а

б

в

Р и с. 3. То же, что на рис. 2, в мае 2007 г.

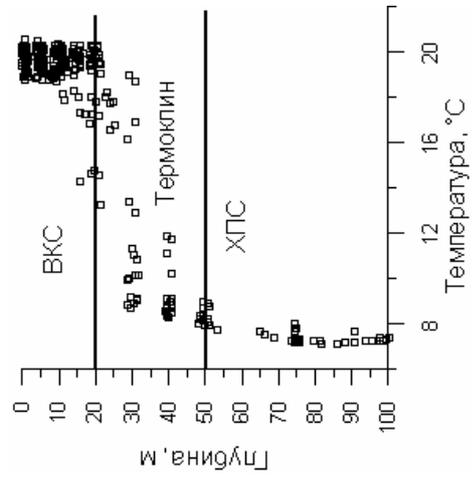
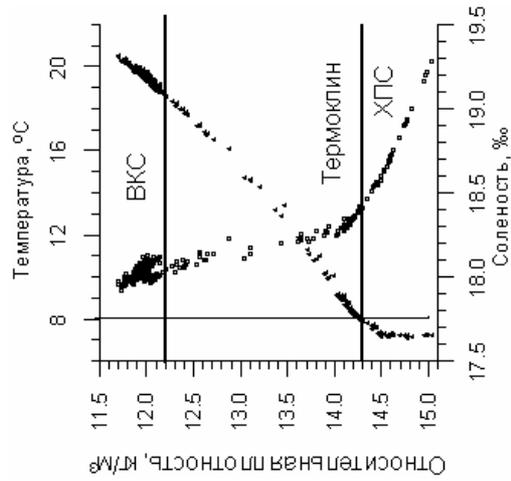
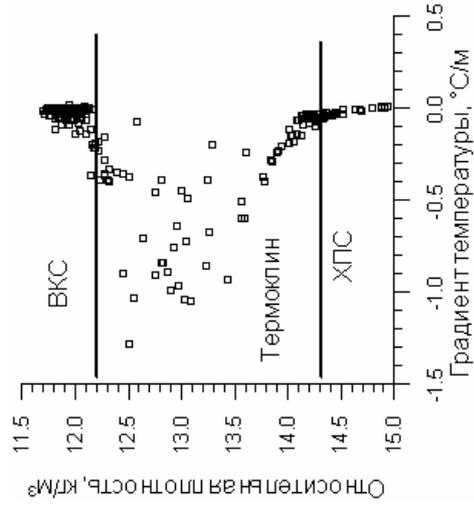
Вертикальный профиль температуры в мае 2007 г. был несколько сложнее, чем в мае 2004 г., так как за счет интенсивной инсоляции тонкий (верхние 2 – 3 м) поверхностный слой вод прогрелся до 17 – 18°C (рис. 3, а). Таким образом, согласно [14], толщина ВКС в мае 2007 г. была 2 – 3 м, нижняя граница этого слоя соответствовала изопикне $\sigma_t = 12,2$. Увеличение температуры ВКС до 18°C привело к тому, что в слое термоклина, простиравшемся примерно до глубины 40 м, между глубинами 12 – 20 м располагался слой, в котором не наблюдалось резкого понижения температуры в поле глубины. Толщина этого слоя с температурой 12 – 13°C составляла 5 – 7 м, его нижняя граница располагалась на изопикне $\sigma_t = 13,3$, где были отмечены нулевые значения ВГ, т.е. это был наблюдавшийся в мае 2004 г. ВКС, который переместился на большие глубины вследствие интенсивного прогрева поверхностных вод.

В поле плотности (рис. 3, б) хорошо видно, как в интервале изопикн $\sigma_t = 13,2 - 13,3$ происходит уменьшение угла наклона кривой вертикального распределения температуры, что в свою очередь отражается на кривой распределения ВГ температуры (рис. 3, в). Над изопикной $\sigma_t = 13,2$ ВГ температуры принимают более высокие значения, достигая в максимальном случае $-1,2^\circ\text{C}/\text{м}$, ниже изопикнической поверхности $\sigma_t = 13,3$ значения ВГ температуры не превышают $-0,6^\circ\text{C}/\text{м}$. Верхняя граница ХПС в мае 2007 г. располагалась на $\sigma_t = 13,9$, а минимум температуры – на $\sigma_t = 14,0$, ниже увеличение плотности происходило за счет увеличения солёности, что следует из профилей температуры и солёности (рис. 3, б).

Наиболее важной особенностью вертикальных профилей температуры в мае 2004 и 2007 гг., на наш взгляд, являются относительно высокие вертикальные градиенты температуры (рис. 2, в; 3, в), которые в поле плотности наблюдаются практически от поверхности до верхней границы ХПС, расположенной на изопикнических поверхностях $\sigma_t = 14,1$ в 2004 г. и $\sigma_t = 13,9$ в 2007 г.

В трехслойной структуре вод в сентябре 1995 г. ВКС толщиной 20 – 30 м был прогрет до 18,0 – 18,5°C (рис. 4, а) и в поле плотности нижней границей располагался на $\sigma_t = 12,2$ (рис. 4, б). Такие критерии для определения нижней границы ВКС не соответствуют рекомендациям [14]. В частности, толщина ВКС в сентябре составляет 0,5 единиц σ_t , а не рекомендованные $\Delta\sigma_t = 0,125$ для вод океана. Однако на рис. 4, в хорошо видно, как ВГ температуры, близкие к нулевым значениям в поверхностном слое, принимают значения более $0,1^\circ\text{C}/\text{м}$ ниже изопикны $\sigma_t = 12,2$.

Таким образом, нижняя граница ВКС и в мае 2007 г., и в сентябре 1995 г. находилась на изопикнической поверхности $\sigma_t = 12,2$. В отличие от вертикальной структуры вод в мае 2007 г. толщина ВКС в сентябре 1995 г. была гораздо больше и составляла в шкале σ_t 0,5 единиц. Слой термоклина с постепенным понижением температуры от 18 до 8°C в поле плотности в сентябре был более мощным, чем в мае, т.к. его нижняя граница (и верхняя граница ХПС) располагалась глубже, чем в мае, на изопикне $\sigma_t = 14,3$.



а

б

в

Рис. 4. То же, что на рис. 2, в сентябре 1995 г.

В отличие от майских профилей относительно высокие (более $0,1^{\circ}\text{C}/\text{м}$) вертикальные градиенты температуры в сентябре наблюдались не сразу от поверхности, а только между изопикнами $\sigma_t = 12,2$ и $\sigma_t = 14,3$. Таким образом, по сравнению с майскими профилями в сентябре выявлены два отличия. Во-первых, в ВКС в поле плотности от поверхности до изопикны $\sigma_t = 12,2$ градиент температуры был практически нулевым. Во-вторых, нижняя граница вод, где градиент становился менее $0,1^{\circ}\text{C}/\text{м}$ (т.е. верхняя граница ХПС), в мае располагалась на изопикне $\sigma_t = 13,9 - 14,1$, а в сентябре – несколько глубже, на $\sigma_t = 14,3$.

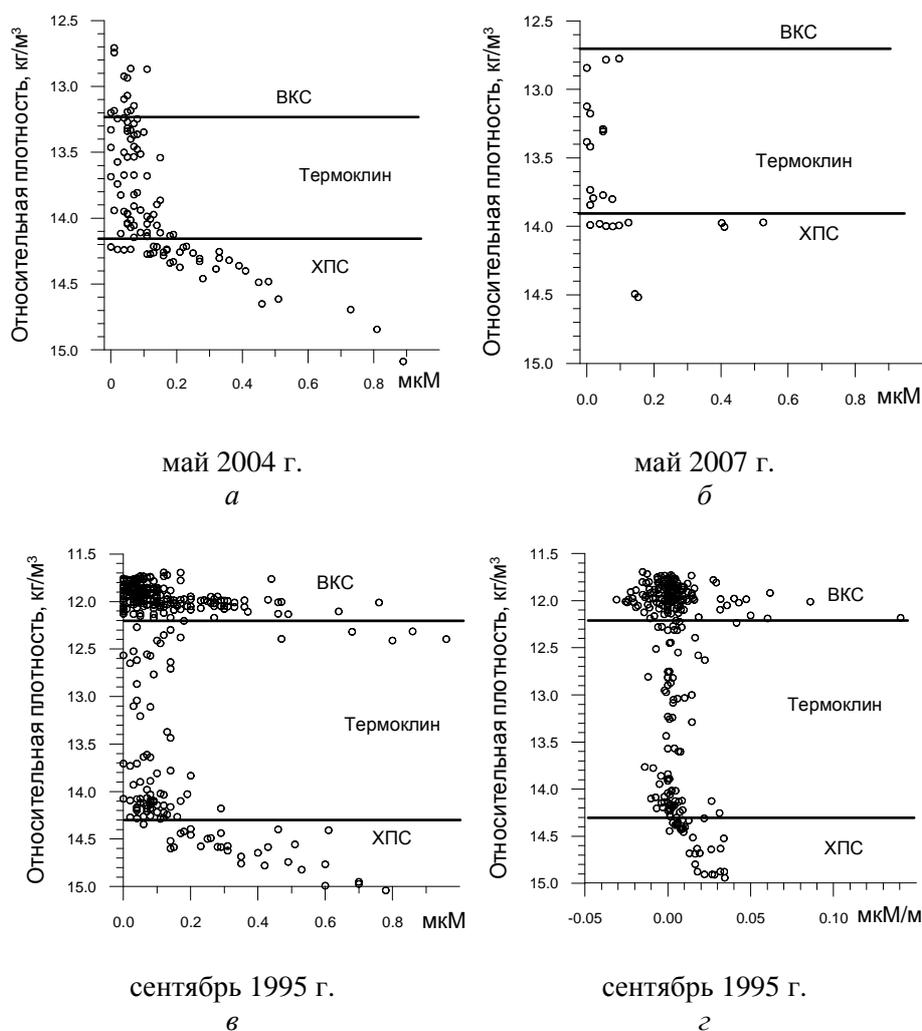
Более подробно гидрологическая обстановка в районе работ в мае 2004 г. и в мае 2007 г. дана в [7] и [8] соответственно.

Вертикальное распределение фосфатов

В вертикальном распределении фосфатов в мае 2004 и 2007 гг. (рис. 5, а, б) следует отметить невысокие концентрации – не более $0,15$ мкМ – в слое вод от поверхности до изопикн $\sigma_t = 14,0 - 14,1$. То есть пока в толще вод существовал градиент температуры выше $0,1^{\circ}\text{C}/\text{м}$ (рис. 2, в; 3, в), распределение фосфатов по вертикали было практически однородным, но как только градиент температуры на верхней границе ХПС ($\sigma_t = 13,9 - 14,1$) становился близким к нулю, однородность распределения нарушалась.

Эта же эмпирическая зависимость характерна для вертикальных профилей фосфатов и градиентов фосфатов в сентябре 1995 г. (рис. 5, в, г), причем здесь она подтверждается также особенностями распределения температуры и фосфатов в ВКС. В это время в ВКС, от поверхности до $\sigma_t = 12,2$, наблюдались небольшой (до $0,1^{\circ}\text{C}/\text{м}$) температурный градиент (рис. 4, в) и высокая изменчивость концентраций фосфатов – от 0 до 1 мкМ (рис. 5, в). Последнее привело к тому, что величина градиента концентрации фосфатов изменялась в относительно широких пределах, от $-0,04$ до $+0,08$ мкМ/м (рис. 5, г). Ниже изопикны $\sigma_t = 12,2$ абсолютная величина градиента температуры возрастала и находилась в пределах $0,2 - 1,3^{\circ}\text{C}/\text{м}$, а содержание фосфатов становилось однородным, с концентрациями, не превышающими $0,2$ мкМ. При этом пределы изменения вертикального градиента уменьшились примерно вдвое, он не превышал $\pm 0,02$ мкМ/м. Когда температурный градиент становился близким к нулю ниже изопикны $\sigma_t = 14,3$, концентрации фосфатов сразу начинали возрастать с увеличением глубины.

Следует отметить также, что если в мае изопикническая поверхность, ниже которой начиналось устойчивое возрастание концентрации фосфатов, располагалась на $\sigma_t = 13,9 - 14,1$, то в сентябре она углубилась до $\sigma_t = 14,3$. Возможно, конечно, что причина такого заглубления связана только с биогеохимическими процессами, обеспечившими образование большого количества взвешенного органического вещества в летний период, оседание которого повлияло на вертикальное распределение фосфатов. Однако более логичным кажется предположить, что одни и те же процессы определили особенности вертикальных профилей гидрологических и гидрохимических характеристик. В частности, как только летний прогрев водных масс обеспечил относительно высокий градиент температуры до большей глубины, содержание фосфатов до этой же глубины стало однородным.



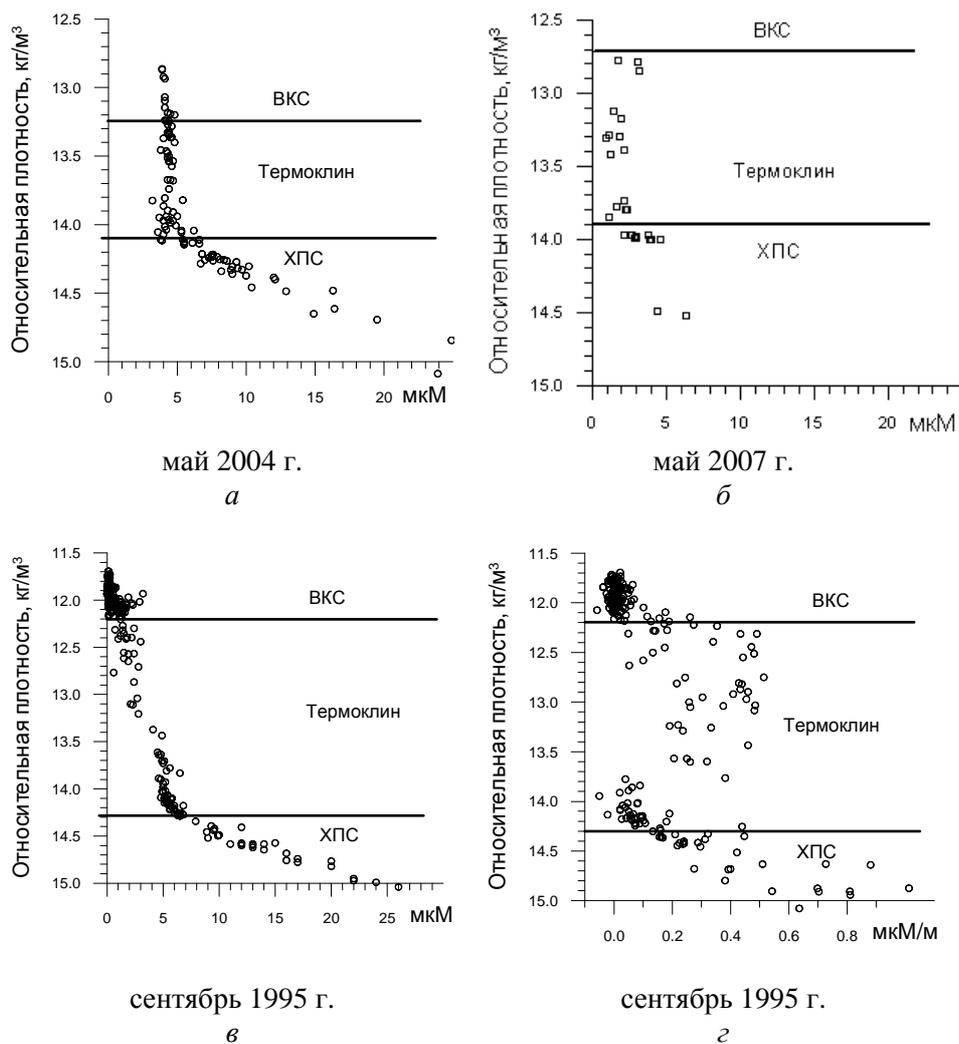
Р и с. 5. Вертикальные профили фосфатов (а – в) и вертикальный градиент концентрации фосфатов (г) относительно плотности

Вертикальное распределение кремнекислоты

На вертикальных профилях кремнекислоты в мае следует отметить однородное (содержание кремнекислоты не превышало 5 мкМ) распределение концентраций от поверхности до изопикн $\sigma_t = 13,9 - 14,1$ (рис. 6, а, б). Ниже этих изопикнических поверхностей концентрация кремнекислоты начинала резко возрастать с увеличением глубины. Такая же ситуация наблюдается и для сентябрьских профилей с тем отличием, что возрастание концентраций кремнекислоты начинается с изопикны $\sigma_t = 14,3$ (рис. 6, в).

Мощный ВКС в сентябре не приводит к каким-то заметным изменениям на вертикальном распределении кремнекислоты, концентрации ко-

торой и в мае, и в сентябре от поверхности до изопикны $\sigma_t = 14,3$ находятся в пределах 2 – 5 мкМ. Вертикальный градиент концентрации кремнекислоты (рис. 6, з) в ВКС и в слое термоклина качественно очень похож на ВГ температуры (рис. 4, в). В ВКС вертикальные градиенты температуры и кремнекислоты близки к нулю: пока ВГ температуры оставался ниже $0,1^\circ\text{C}/\text{м}$ от поверхности до изопикны $\sigma_t = 12,2$, ВГ кремнекислоты не превышал $0,1$ мкМ/м. При увеличении ВГ температуры в термоклине между изопикнами $\sigma_t = 12,2$ и $\sigma_t = 14,3$ наблюдалось возрастание ВГ кремнекислоты. На верхней границе ХПС (изопикна $\sigma_t = 14,3$) ВГ температуры приближается к нулю, точно так же ведет себя и ВГ кремнекислоты.



Р и с. 6. Вертикальные профили кремнекислоты (а – в) и вертикальный градиент концентрации кремнекислоты (з) относительно плотности

Различие в поведении ВГ температуры и кремнекислоты наблюдается после изопикны $\sigma_t = 14,3$, т.е. с того момента, когда плотностную стратификацию вод начинает определять не температура, а соленость (рис. 4, б). Ниже верхней границы ХПС на фоне практически нулевого ВГ температуры происходит резкое возрастание ВГ кремнекислоты, который ниже изопикны $\sigma_t = 14,3$ принимает только положительные значения и достигает 1,0 мкМ/м на $\sigma_t = 15,0$.

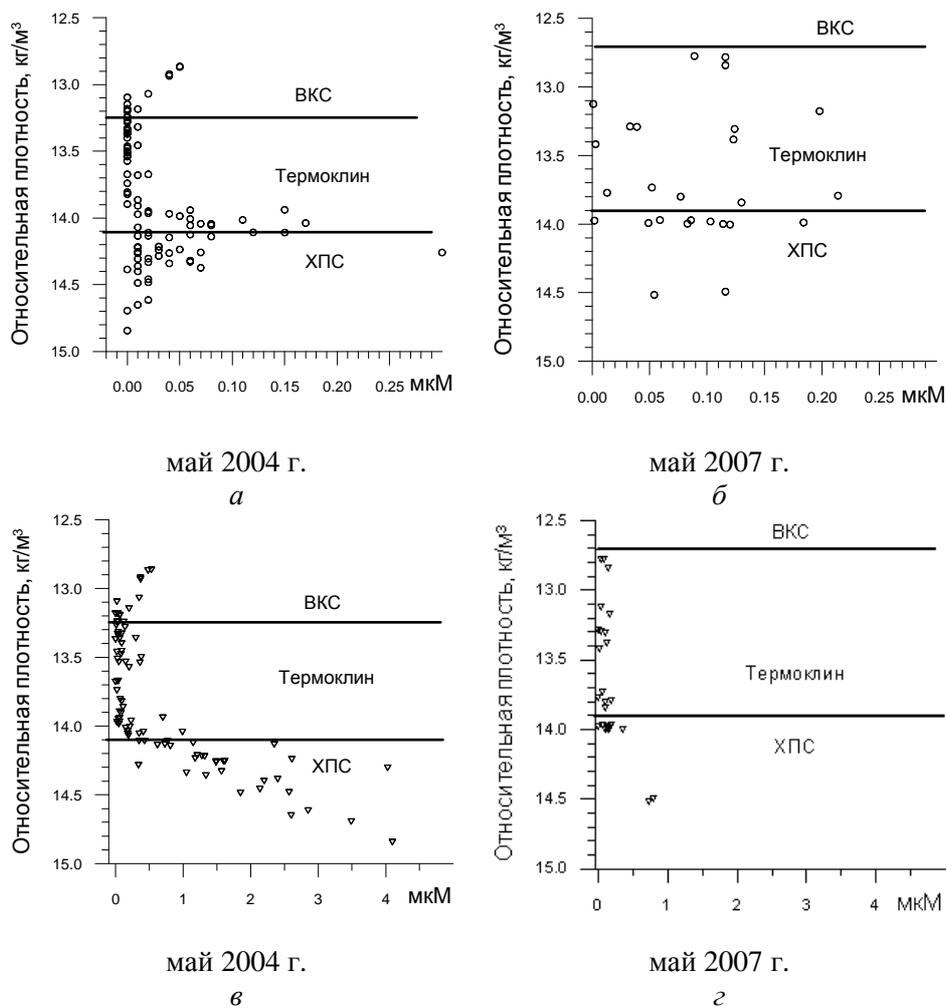
Тенденция постепенного возрастания содержания кремнекислоты с увеличением глубины (рис. 6, а – в) наглядно подтверждается распределением ВГ концентрации кремнекислоты (рис. 6, з): на фоне положительных значений 0 – 0,1 мкМ/м в ВКС, 0 – 0,5 мкМ/м в термоклине и 0,1 – 1,0 мкМ/м ниже $\sigma_t = 14,3$ лишь в редких случаях наблюдалось отрицательное значение ВГ, не превышающее –0,01 мкМ/м, что укладывается в погрешность определения.

Таким образом, от поверхности до изопикны $\sigma_t = 14,3$ ВГ кремнекислоты ведет себя точно так же, как ВГ температуры: малые значения градиента температуры в ВКС и нижней части термоклина соответствуют небольшим, до 0,1 мкМ/м, значениям ВГ кремнекислоты, тогда как большие значения градиента температуры в слое термоклина приводят к почти пятикратному увеличению ВГ кремнекислоты.

Вертикальное распределение нитритов и нитратов

В соответствии с опубликованными данными на вертикальном профиле нитратов должен наблюдаться пик концентраций на $\sigma_t = 15,5$, окруженный сверху и снизу максимумами нитритов [15]. В данной работе из этой структуры возможно рассмотреть только положение верхнего максимума нитритов, а также оценить, с какой глубины начинается увеличение содержания нитратов.

В вертикальном распределении нитритов в мае 2004 г. (рис. 7, а) следует отметить прежде всего их весьма низкое содержание (не превышающее 0,02 мкМ) от поверхности до нижней границы термоклина на изопикне $\sigma_t = 14,1$, на которой располагался максимум концентраций, достигший в 2004 г. 0,3 мкМ. В мае 2007 г. этот максимум (не такой явный, как в 2004 г., вероятнее всего, вследствие небольшого массива данных и практически их отсутствия для глубин ниже $\sigma_t = 14,1$) располагался на изопикне $\sigma_t = 13,9$ (рис. 7, б). Положение максимума нитритов на верхней границе ХПС в мае 2004 г. ($\sigma_t = 14,1$) и в мае 2007 г. ($\sigma_t = 13,9$) совпадает с началом увеличения концентраций нитратов, для которых от поверхности до изопикн $\sigma_t = 14,0 – 14,1$ наблюдалось практически однородное вертикальное распределение с концентрациями не более 0,5 мкМ в 2004 г. и до 0,3 мкМ в 2007 г. (рис. 7, в, з). Важно отметить, что ни для нитритов, ни для нитратов не происходило сколько-нибудь значительного повышения концентраций в слое термоклина, а заметные изменения в концентрациях начинались, когда ВГ температуры приближался к нулю, т.е. когда термоклин переходил в ХПС.



Р и с. 7. Вертикальные профили нитритов – а, б и нитратов – в, г относительно плотности

Обсуждение результатов

Верхний 100-метровый слой вод Черного моря представляет собой сильно стратифицированную по плотности структуру, в которой изменение условной плотности достигает 5 кг/м^3 – от $\sigma_t = 11$ на поверхности до $\sigma_t = 16$ на 100-метровой глубине [16]. В стратификации верхней части этого слоя от поверхности до верхней границы ХПС важное значение имеет градиент температуры, тогда как в более глубоких слоях температура изменяется незначительно и величина плотности зависит в основном от солёности (см. изменение наклона вертикального профиля солёности на верхней границе ХПС на рис. 2, б; 3, б; 4, б). Появление галоклина на верхней границе ХПС сопровождается также появлением оксиклина и хемоклина, поскольку вертикальный обмен одинаковым образом влияет на эти характеристики [17].

На основании ранее опубликованных данных принято считать, что над термоклином концентрации биогенных элементов в весенне-летний период должны

быть относительно невелики вследствие их биохимического потребления, а под термоклином они возрастают вследствие регенерации оседающей биомассы [18, 19]. Таким образом, сезонный термоклин является плотностным барьером, ограничивающим обмен между ВКС и нижележащим слоем вод. Следует, однако, отметить, что далеко не во всех случаях концентрации биогенных элементов под сезонным термоклином в весенне-летний период выше, чем в ВКС.

Например, однородное распределение по вертикали в верхней 50-метровой толще вод при сформированном 18 – 20-метровом ВКС было характерно для многих шельфовых станций летом 1995 г. [19]. Более того, в летние месяцы 1990 – 1995 гг. (т.е. в условиях существования ВКС толщиной 20 м) на верхней границе термоклина наблюдалось повышенное содержание фитопланктона и хлорофилла «а», при этом в слое сезонного термоклина отсутствовали экстремумы на вертикальных профилях фосфатов и нитратов [20]. Следовательно, возникла ситуация, когда термоклин являлся плотностной ловушкой для фитопланктона, но не для биогенных элементов.

Приведенные данные указывают на незначительное изменение в содержании биогенов по вертикали весной (рис. 4, а, б; 5, а – в; 6, а – с) или даже на повышенное содержание фосфатов в прогретом до 18°C ВКС над термоклином в конце лета (рис. 4, в). Резкое возрастание концентраций биогенных элементов начинается значительно глубже, на верхней границе ХПС, где при практически постоянной температуре наблюдается перегиб вертикального профиля солёности, т.е. в ситуации, когда стратификацию вод начинает определять не температура, а солёность, что следует из рис. 2, б; 3, б; 4, б.

Таким образом, общие особенности вертикального распределения исследованных в мае (2004, 2007 гг.) и в сентябре (1995 г.) в Каламитском заливе и на СЗШ четырех компонентов главного биогенного цикла – фосфатов, кремниевой кислоты, нитритов и нитратов – заключаются в отсутствии значительных изменений концентраций в водных слоях, где вертикальный градиент температуры более 0,1°C/м. В весенний период вследствие небольшой толщины формирующегося ВКС монотонное вертикальное распределение биогенных элементов наблюдается от поверхности до верхней границы ХПС, расположенного на изопикнической поверхности $\sigma_t = 14,0 - 14,1$. Осенью между ВКС и верхней границей ХПС, заглубляющейся за летний период до $\sigma_t = 14,3$, концентрации биогенных элементов изменяются незначительно.

В тех же случаях, когда вертикальный градиент температуры в слое вод менее 0,1°C/м (а такая ситуация наблюдается в ВКС и ХПС), содержание биогенных элементов изменяется в гораздо больших интервалах. Следовательно, температурный градиент не препятствует выравниванию концентраций, таким препятствием является градиент солёности. Таким образом, причиной появления хемоклина является прежде всего стратификация по плотности, обеспечиваемая преимущественно солёностью, тогда как плотностная стратификация, обеспечиваемая преимущественно температурой, не обязательно приводит к образованию хемоклина.

Предположение о том, что температурный градиент не препятствует выравниванию концентраций по вертикали, кажется парадоксальным, поскольку общепринято, что именно сезонный термоклин является одним из условий возникновения гипоксических явлений или, в предельном случае, – появления сероводо-

рода в придонном слое и заморов на СЗШ в летний период [2, 18]. Возможно, что обсуждаемое выравнивание гидрохимических профилей при наличии температурного градиента характерно только для рассматриваемых в работе относительно чистых районов шельфа, в которых содержание биогенных элементов относительно невелико, тогда как в районе устья Дуная картина в эти же гидрологические сезоны может быть совершенно другой [21].

Возможно также, что ослабление вертикального обмена и возникновение гипоксических условий связано не с термоклинном, а с галоклинном, возникающим в прилегающих к устьям Дуная и Днепра районах, где соленость поверхностных вод может на 3 – 4 ‰ отличаться от солености придонных вод. В частности, в летний период в некоторых районах СЗШ наблюдалось ступенчатое изменение солености с высокими градиентами плотности, результатом чего стало появление максимума флуоресценции (связанного с содержанием хлорофилла) на верхней границе термоклина [19]. Здесь уместно заметить, что верхняя граница хемоклина, появляющаяся в Черном море на глубинах с изопикнами $\sigma_t = 14,1 - 14,3$, возникает именно в той ситуации, когда стратификацию вод по плотности начинает определять не температура, а соленость.

Общее сходство вертикальных распределений гидрохимических характеристик в Черном море [17, 22, 23] состоит в том, что изопикническая поверхность $\sigma_t = 14,1 - 14,3$ является «критической» для элементов главного биогенного цикла. Ниже этой изопикны происходит уменьшение содержания растворенного кислорода, что сопровождается увеличением содержания кремнекислоты, фосфатов, нитритов и нитратов, т.е. начинается формирование оксиклина и хемоклина. Можно предположить, что этот скачок связан с изменением приоритета характеристик, определяющих плотность воды в Черном море. Пока плотность определяется в основном температурой, наблюдаются относительно монотонные вертикальные распределения, но как только градиент температуры становится крайне мал и изменения солености начинают определять изменения в плотности, на кривых вертикального распределения возникает перегиб.

Таким образом, если при наличии сезонного термоклина в незагрязненных районах СЗШ наблюдаются относительно монотонные вертикальные профили гидрохимических элементов, то появление постоянного галоклина резко изменяет форму вертикального распределения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Godispoti L.A., Friederich G.E., Murray J.W. et al.* Implications of continuous vertical profiles that penetrated the oxic/anoxic interface // *Deep-Sea Res.* – 1991. – **38**, №S2A. – P.691 – 710.
2. *Tuğrul S., Basturk O., Saydam C. et al.* Changes in the hydrochemistry of the Black Sea inferred from water density profiles // *Nature.* – 1992. – **359**, №6391. – P.137 – 139.
3. *Buesseler K., Livingston H.D., Ivanov L., Romanov A.* Stability of oxic/anoxic interface in the Black Sea // *Deep-Sea Res.* – 1994. – **41**, №2. – P.283 – 296.
4. *Murray J.W., Kononov S.K., Romanov A.S. et al.* 2001 R/V Knorr cruise: new observations and variations in the structure of suboxic zone // *Oceanography of Eastern Mediterranean and Black Sea.* – Turkey, Ankara: TUBITAK Publishers, 2003. – P.545 – 557.
5. *Якушев Е.В., Лукашев Ю.Ф., Часовников В.К., Чжу В.П.* Современное представление о вертикальной гидрохимической структуре редокс-зоны Черного моря // *Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря.* – М.: Наука, 2002. – С.119 – 133.

6. *Часовников В.К., Якушев Е.В., Лукашев Ю.Ф.* Влияние вихревой динамики на гидрохимическую структуру вод северо-восточной части Черного моря // Там же. – С. 151 – 161.
7. *Кондратьев С.И., Романов А.С., Внуков Ю.Л.* Особенности распределения гидрохимических характеристик в районе материкового склона северо-западной части Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 2007. – №5. – С.69 – 79.
8. *Отчет* начальника океанографической экспедиции о работах во 2-м рейсе НИС «Эксперимент» в северо-западной части Черного моря в мае 2007 г. (15.05.07 – 20.05.07) // Научные фонды МГИ НАН Украины, инв. №4989. – Севастополь, 2007.
9. *Гаркавая Г.П., Богатова Ю.И., Берлинский Н.А., Гончаров А.Ю.* Районирование Украинского сектора северо-западной части Черного моря (по гидрофизическим и гидрохимическим характеристикам) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2000. – С.9 – 24.
10. *Орлова И.Г., Павленко Н.Е., Коморин В.Н., Бондарь С.Б.* Современное состояние химического загрязнения северо-западного шельфа Черного моря // Там же. – 2001. – С.139 – 153.
11. *Методы* гидрохимических исследований океана. – М.: Наука, 1978. – 267 с.
12. *Belokopytov V.N.* «Oceanografer» applied software for oceanographic surveys // International Symposium on Information Technology in Oceanography/ CITD-98, 12 – 16 October, 1998, Abstracts. – Goa, India, 1998. – P.79.
13. *Shapiro G.I., Mee L.D., Lemeshko E.M. et al.* A comprehensive study of mesoscale dynamics and horizontal transports in the north western part of the Black Sea // Geophys. Res. Abstr. – 2005. – 7. – EGU05-A-00620.
14. *Levitus S.* Climatological Atlas of the World Ocean // NOAA Professional Paper. 1982. – 13.
15. *Еремеева Л.В., Романов А.С., Овсяный Е.И. и др.* Гидрохимические исследования в 33-м рейсе научно-исследовательского судна «Профессор Колесников». – Севастополь, 1995. – 42с. (Препринт / НАН Украины. МГИ).
16. *Gregoire M., Stanev E.* Ventilation of Black Sea anoxic waters. Preface // J. Mar. Syst. – 2001. – 31. – P.1 – 2.
17. *Ozsoy E., Unluata U.* Oceanography of the Black Sea: a review of some recent results // Earth-Sci. Rev. – 1997. – 42. – P.231 – 272.
18. *Tolmazin D.* Changing coastal oceanography of the Black Sea, I. Northwestern Shelf // Prog. Oceanogr. – 1985. – 15. – P.217 – 276.
19. *Tankéré S.P.C., Muller F.L.L., Burton J.D. et al.* Trace metal distributions in shelf waters of the northwestern Black Sea // Cont. Shelf Res. – 2001. – 21. – P.1501 – 1532.
20. *Kideys A.E., Kovalev A.V., Shulman G. et al.* A review of zooplankton investigations of the Black Sea over the last decade // J. Mar. Syst. – 2000. – 24. – P.355 – 371.
21. *Kondratyev S.I., Lemeshko E.M.* The extremely late bottom hypoxia on the north-western shelf of the Black Sea at the end of November 2001 // Oceanography of Eastern Mediterranean and Black Sea. – Turkey, Ankara: TUBITAK Publishers, 2003. – P.457 – 461.
22. *Konovalov S.K., Murray J.W.* Variations in the chemistry of the Black Sea on a time scale of decades (1960 – 1995) // J. Mar. Syst. – 2001. – 31. – P.217 – 243.
23. *Chasovnikov V.K., Lukashev Yu.F.* Influence of eddy dynamics on the vertical distribution of hydrochemical compounds of the Black Sea // Oceanography of Eastern Mediterranean and Black Sea. – Turkey, Ankara: TUBITAK Publishers, 2003. – P.443 – 446.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 21.11.07
После доработки 13.02.08

ABSTRACT Considered are the features of vertical distribution of the elements of main biogenic cycle in the upper thickness of the northwestern shelf waters in the Black Sea in spring and autumn seasons, and also the interrelation of the peculiarities of vertical distribution of hydrochemical and hydrological characteristics. It is shown that position of halocline always stipulates that of chemocline; in that case the thermocline influence upon the distribution of hydrochemical characteristics is ambiguous. Vertical distribution of hydrochemical parameters can be uniform in the presence of seasonal thermocline, whereas in its absence significant vertical gradients in distribution of hydrochemical characteristics can be observed within the upper mixed layer.