

А.С.Матыгин*, В.Н.Сытов*,
Ю.И.Попов**, С.П.Ковалишина**

*Гидрометеорологический центр Черного и Азовского морей, г.Одесса

**Украинский научный центр экологии моря, г.Одесса

ИЗМЕНЧИВОСТЬ КЛИМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОРСКИХ ВОД В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

На основании более чем столетних наблюдений, проведенных Гидрометцентром Чёрного и Азовского морей, а также материалов экспедиционных наблюдений Украинского научного центра экологии моря, рассмотрены многолетние изменения параметров атмосферы и вод северо-западной части Черного моря. Показано устойчивое зимнее потепление, увеличение температуры холодного промежуточного слоя. Изменения гидрологических условий исследуемой акватории способствовали качественным и количественным изменениям фитопланктонного сообщества.

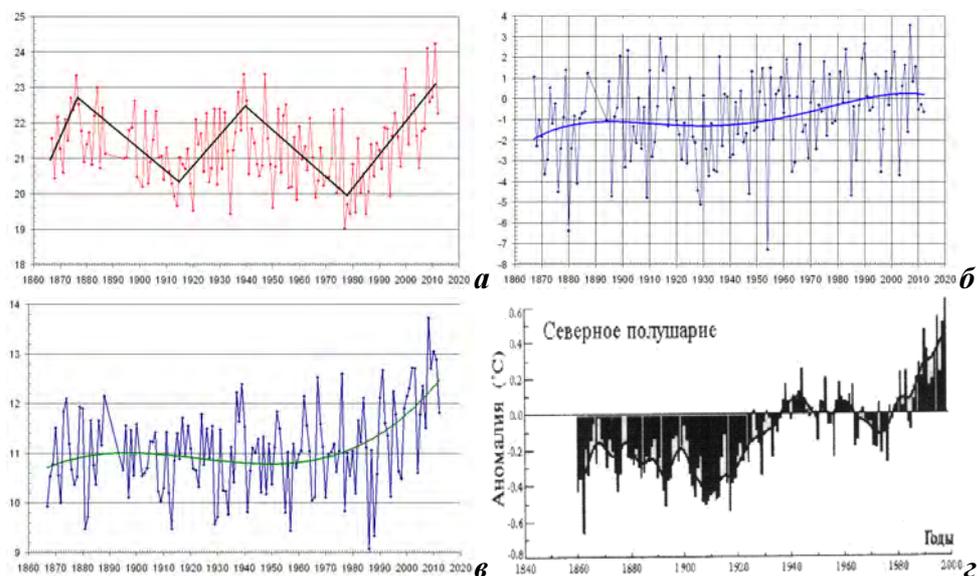
КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *северо-западная часть Черного моря, климатические изменения, температура, соленость, холодный промежуточный слой, фитопланктон.*

Введение. В настоящее время важным направлением различных климатических программ являются исследования регионального климата. В частности, *CIESM* (Средиземноморская научная комиссия) отметила, что заметные изменения быстрее всего затронут наиболее уязвимые полузаткнутые, мелководные акватории и специфические морские экосистемы таких морей как Средиземное и Черное.

В процессе региональных изменений климата, обусловленного крупномасштабными циркуляционными процессами, меняются условия и характеристики вертикального обмена, горизонтального циркуляционного режима, структуры промежуточных вод (вод холодного промежуточного слоя), изменяется пространственно-временная структура полей температуры и солёности, режим стока рек. Совокупность изменений гидрометеорологических параметров определяют разнонаправленные по благоприятности условия для развития представителей различных видов фитопланктона, предполагает появления новых состояний экосистемы северо-западного шельфа Черного моря (СЗШ).

Результаты и обсуждения. *Температура воздуха.* Потепление в XX в. имеет немонотонный характер. В вековом ходе глобальной температуры для северного полушария визуально определяются следующие периоды тенденций аномалии глобальной температуры воздуха у поверхности северного полушария (рис.1, 2) [1]:

- период относительной стабильности – с конца 1860-х до конца 1900-х гг. со средним значением аномалии температуры воздуха около $-0,3$ °С;
- период первого глобального потепления XX в. – временной интервал от первого десятилетия XX в. до конца 40-х гг.;
- период стабилизации – с конца 40-х до конца 70-х гг. отмечается относительная стабильность аномалии глобальной температуры воздуха, ее среднее значение (около 0 °С);



Р и с . 1 . Временной ход среднемесячных температур воздуха на МГС Одесса за июнь – август (*а*), за декабрь – февраль (*б*), среднегодовая температура (*в*), среднегодовая [1] по северному полушарию (*г*).

– период второго глобального потепления XX в. – с конца 70-х гг. по настоящее время. Отмечается второй интенсивный подъём температуры, при котором рекордные значения достигнуты в последнее десятилетие XX в. и в начале XXI в.

Согласно определенным выше периодам относительной монотонности изменчивости значения средней летней температуры на МГС Одесса имеет колебательный характер с периодом около 60 лет (рис.1, *а*). Графики временных рядов среднезимних и среднегодовых значений температур (рис.1, *б*, *в*) имеют локальные отличия от аномалии температуры полушария (рис.1, *г*), но и на них также заметна тенденция роста, начиная со второй половины прошлого столетия.

Если фаза повышения температуры продлится ожидаемые 30 лет, то глобальное потепление, вызванное природными факторами, стабилизируется на современном уровне, по аналогии с изменениями температуры приземного воздуха конца XIX в. и середины XX в.

Для получения количественных интегральных оценок степени суровости зимних условий и последующего выявления климатических изменений в приводной атмосфере акватории СЗШ использовался модифицированный метод, ранее предложенный в [2], суть которого заключалась в вычислении годовых сумм отрицательных температур воздуха. Предлагаемая модификация заключается в том, что суммируются не отрицательные температуры, а отклонения среднесуточной температуры воздуха холодного полугодия ниже значения + 5 °С, а для летнего периода – выше + 10 °С. Начиная с 20-х гг. прошлого столетия, наметилась тенденция уменьшения суровости зимних условий, по крайней мере, в северном Причерноморье. Если на протяжении последних 40 лет по данным МГС Одесса теплые зимние условия отмеча-

лись 7 раз (1966, 1975, 1983, 1990, 2001, 2007 и 2009 гг., причем в 2007 г. они были экстремально теплыми за весь период более чем столетних предшествующих наблюдений), то в предшествующие 70 лет имела место единственная очень теплая зима (1936 г.). Соответственно, обратная картина наблюдается для очень холодных зим (рис.2, а).

Для летнего периода в климатическом масштабе следует отметить большую повторяемость в последние годы теплых и очень теплых и, наоборот, полное отсутствие очень холодных летних условий (рис.2, б). Полиномиальные тренды зимних и летних сумм температур находятся в противофазе вплоть до середины 90-х гг., в дальнейшем же наблюдается синфазное их увеличение, т.е. теплой зиме стало соответствовать теплое лето. Интегральная оценка температуры воздуха теплых периодов последнего десятилетия имеет последовательные резкие пики максимумов: а в 2007, 2010 и 2012 гг. сумма градусо-дней с температурами выше $+10^{\circ}\text{C}$ вышла за пределы диаграммы, рассчитанной по всему предшествующему ряду наблюдений. Отметим также, что за период 1980 – 2012 гг. существенно уменьшилась дисперсия межгодовых интегральных характеристик для летнего периода.

Температура поверхностного слоя вод. Общеизвестно, что для всего Мирового океана существует тенденция потепления верхнего слоя вод, средняя температура которого повысилась на $0,67^{\circ}\text{C}$. Для Черного моря необходимо разбить период анализа на два этапа, иначе эта тенденция формально не

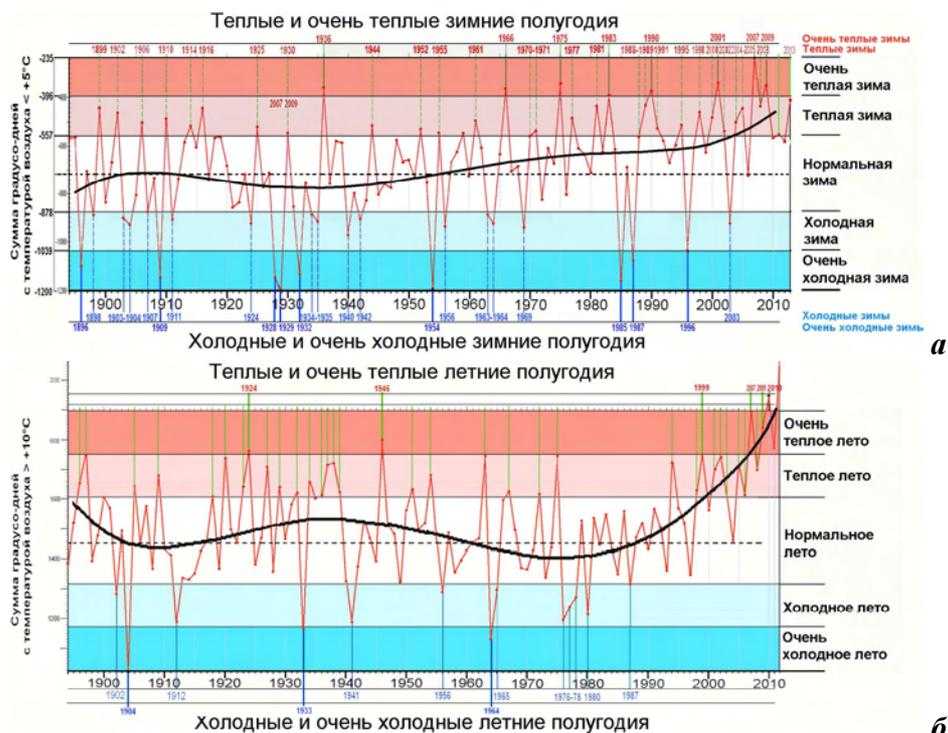
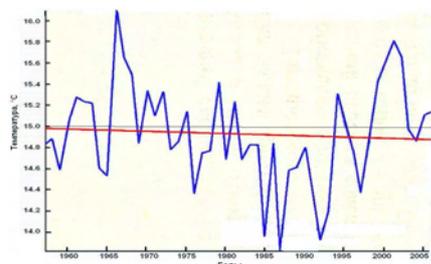


Рис. 2. Межгодовая изменчивость суммы отклонений среднесуточных температур холодного периода ниже значения $+5^{\circ}\text{C}$ (а) и теплого – выше $+10^{\circ}\text{C}$ (б) по данным МГС Одесса. Сплошные жирные линии – полиномиальные тренды 5-го порядка.



Р и с . 3 . Среднегодовые изменения поверхностной температуры Черного моря, понижение температуры – 0,08 °С с 1957 по 2006 гг. [4].

обнаруживается [3]. На рис.3 приведен график изменений поверхностной температуры для периода 1957 – 2006 гг. и соответствующая оценка тренда, указывающего на понижение температуры

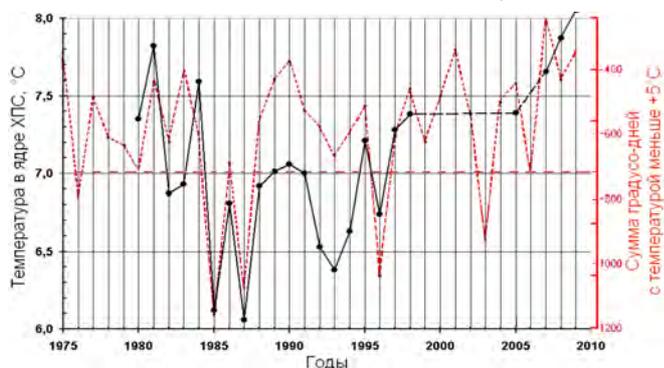
($SST = -0,0016634 \cdot Year + 18,2366$, понижение температуры: – 0,08 °С с 1957 г.), однако, если рассматривать процесс с 1982 по 2005 гг., то Черное море уже будет относиться к районам с быстрым нагреванием (значение потепления равно 0,96 °С)[4].

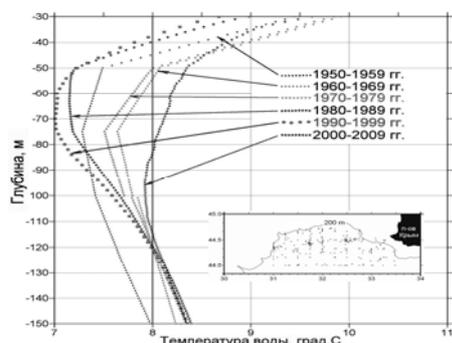
Анализ тенденций климатических изменений температуры вод СЗШ, проведенный на материалах наблюдений почти двухсот экспедиций, показал, что в основном они касаются зимнего периода. В западной части СЗШ в поверхностном слое средняя температура вод повысилась в зимний период на два градуса, а в придонных – более чем на 3 °С [5]. Аналогичные выводы можно сделать и в отношении вод открытой акватории СЗШ.

Параметры холодного промежуточного слоя (ХПС). Важным интегральным параметром состояния вод Черного моря является температура в ядре холодного промежуточного слоя (ХПС) для района материкового склона с глубинами более 200 м в пределах пространственной трапеции с границами 44 – 45° с.ш., 31 – 33° в.д. (рис.4). В процессе регионального изменения климата условия формирования и сами характеристики ХПС изменяются. Межгодовые колебания температуры вод ядра ХПС показывают, что в последние годы происходит их аномальное резкое увеличение. В 2009 г. отмечен абсолютный максимум температуры за весь период наблюдений (8,07 °С). Совмещение графиков рядов суммы зимних температур воздуха и температуры вод ядра ХПС подтверждает определяющее влияние межгодовой изменчивости термических условий над поверхностью вод СЗШ на формирование характеристик ХПС адвективного происхождения.

Что касается толщины ХПС, то она также подвержена низкочастотной изменчивости, обусловленной климатическими тенденциями. Если придерживаться критерия выделения границ ХПС по изотерме 8 °С, то можно отметить трехкратное увеличение толщины ХПС с середины 60-х к середине 90-х гг. XX ст. (от ~ 20 до ~ 60 м) и последовавшее затем его уменьшение.

Р и с . 4 . Временной ход изменения температуры воды в ядре ХПС материкового склона СЗШ (в пределах трапеции с границами 44 – 45° с.ш., 31 – 33° в.д. (—)) и суммы градусо-дней с температурами ниже значения +5 °С (- - -).





Р и с . 5 . Средние декадные профили температуры воды ХПС зоны конвергенции северо-западного участка материкового склона Черного моря за период с 1950 по 2010 гг. (периоды осреднения, а также район выборки данных указаны на врезках).

Ясно, что при повышении температуры в ядре ХПС более $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ эту изотерму уже нельзя использовать в качестве индикатора верхней и нижней границ

слоя. Ядро ХПС можно выделять теперь только по минимуму температуры в промежуточном слое (по точке на профиле температуры с нулевым вертикальным градиентом), а границы ХПС – по градиентному критерию.

Осредненные по десятилетиям вертикальные профили температуры воды теплых периодов (V – IX месяцы) (рис.5) получены по данным экспедиционных наблюдений в районе склона СЗШ. В период 1950 – 1959 гг. температура вод в области ядра ХПС была относительно низкой ($\sim 7,3\text{ }^{\circ}\text{C}$), в последующие две декады (1960 – 1979 гг.) она находилась в пределах $\sim 7,5\text{ – }7,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. В 80-х гг. наблюдалось снижение температуры вод ядра ХПС ($7,1\text{ – }7,2\text{ }^{\circ}\text{C}$), которое обусловлено холодными зимами 1985 и 1987 гг. Наиболее низкая средняя температура в ядре ХПС отмечена в 90-е гг. XX ст. (около $7\text{ }^{\circ}\text{C}$). Причина этого – четыре относительно холодные зимы: 1992 – 1994 и 1996 гг. С 2000 г. теплые зимы способствовали повышению температуры в слое 45 – 110 м до абсолютного максимума – более $8,0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Отметим, что расчеты декадных профилей температуры для экстремального периода летнего прогрева (VII – IX месяцы), несмотря на значительно меньшее количество данных по району выборки, дают в целом аналогичные результаты.

Соленость морских вод. Многолетние изменения средней зимней солености вод СЗШ показывают наличие достаточно выраженных трендов, указывающих на климатическое её понижение. В определенной мере это обусловлено значительным увеличением количества поздних осенних и, особенно, зимних паводков. В 1990 – 2011 гг. наблюдалось восемь (2 – поздних осенних и 6 – зимних) паводков, в то время как за 1947 – 1989 гг. их было только четыре.

В связи с изменением климатических условий происходит также увеличение размеров вихрей северо-западного склона (Севастопольских вихрей), усиление их влияния на динамику вод шельфа путем вовлечения шельфовых дунайских и даже днепро-бугских и днестровских вод в вихревую систему, что в декадном масштабе осреднения может способствовать уменьшению солености поверхностных вод СЗШ [6].

Особенностью многолетнего хода солености в летние сезоны является климатическое повышение ее в западной части. Детально анализируя исходные данные, следует отметить, что в период 1986 – 1995 гг. минимум солености поверхностных вод в районе о.Змеиный наблюдался на уровне 4 ‰, что объясняется поступлением слабо трансформированных дунайских вод. В период 1996 – 2005 гг. минимальная соленость имела значение 11,50 ‰, но за декаду 1986 – 1995 гг. 25 раз наблюдалась соленость ниже 11,40 ‰. В

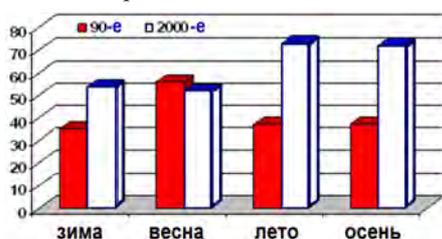
этом аспекте отметим, что анализ климатических изменений направлений ветра на станции Одесса-порт показал не только уменьшение модуля скорости, но для летнего сезона обнаружено увеличение повторяемости северной компоненты при одновременном уменьшении западной [7]. В такой ситуации происходит интенсификация увлечения дунайских вод на юг, препятствуя их распространению в открытую акваторию СЗШ.

Фитопланктон. Климатические изменения и антропогенное воздействие на экосистему СЗШ вызвали изменения в структуре и развитии морских биоценозов, в числе фитопланктонного сообщества. Количество и таксономические структуры фитопланктона зависят от наличия в воде биогенных веществ, климатических условий и скорости потребления их зоопланктоном. Он очень быстро реагирует на любые изменения в окружающей среде и является хорошим индикатором экологического состояния морских вод. Повышение температуры и снижение солености поверхностных вод моря привели к определенному уменьшению вертикальной устойчивости водных масс и в сочетании с теплыми зимами последних лет способствовали активному развитию фитопланктона.

В 50 – 60-х гг. прошлого века при изучении фитопланктона СЗШ были определены 372 вида; в 1970 – 1999 гг. список видов фитопланктона состоял из 627 видов и разновидностей микроводорослей [8]. Исследования фитопланктона, проведенные в 2006 – 2010 гг., показали, что в настоящее время общий список видов в СЗШ включает 787 видов и разновидностей микроводорослей [8]. За последние пять лет список водорослей возрос на 81 вид, из которых 69 являются новыми для СЗЧМ и 12 – новые для Черного моря. Увеличение видового разнообразия было отмечено для всех видов фитопланктона, но основу их составляют диатомовые и динофитовые.

Увеличение числа видов фитопланктона проявляется и в сезонных изменениях таксономической структуры. Среднее число видов, зарегистрированных в летний и осенний периоды, увеличилось почти в два раза: с 37 до 73 и 72, соответственно. Интересным фактом является значительное увеличение видов в зимний период (до 54), а также снижением количества видов весной до 52. Таким образом, в зимние месяцы, которые традиционно рассматривались как период покоя, разнообразие появляется больше, чем весной (рис.6).

Причинами этого могут быть увеличение зимнего пресноводного стока и преобладание теплых зим в последние десятилетия. Такие процессы способствуют удлинению периода развития осенних видов – включив и зимние месяцы, а также весенним видам – раньше начать развитие. С другой стороны, это привело к появлению зимнего максимума количественных показателей,



Р и с . 6 . Распределение среднего числа видов фитопланктона по сезонам.

что особенно заметно в прибрежных районах СЗШ. В последние годы (2008 – 2010 гг.) наблюдается тенденция появления 3 – 4 пиков фитопланктона: весна, лето, осень и зима (ранее мы отмечали, только 2 – 3: весенне-летний, осенний). Основная часть зимнего максимума обусловлена мелкоклеточными формами (*Skeletonema costatum* и ви-



Рис. 7. Вклад в видовой состав фитопланктона 90-х (а) и 2000-х (б) гг.

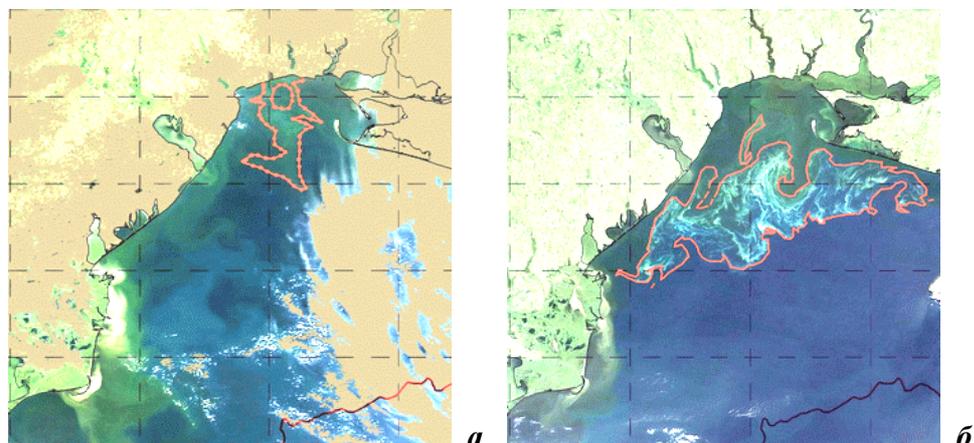
дами родов *Pseudonitzshia* и т.д.). Развитие микроводорослей при благоприятных условиях может привести к зимнему "цветению" – явлению, неоднократно наблюдавшемуся в последние годы. Период "весеннего пика" сейчас начинается на 2 – 3 недели раньше, чем обычно, он передвинулся с апреля на начало марта. Весенний максимум фитопланктона в значительной степени определяется влиянием весенних половодий на реках СЗШ. Наибольшее влияние оказывают Днепр и Южный Буг.

Вклад различных видов в структуру фитопланктонного сообщества в открытых водах СЗШ изменился (рис.7). Доля *Bacillariophyta* увеличилась более чем в два раза. Но наиболее значительный рост числа видов наблюдалось у *Chlorophyta* and *Cyanobacteria* (с 2 до 7 % и от 1 до 4 % соответственно). Увеличение видового разнообразия часто происходит за счет представителей пресноводных и солоноватоводных комплексов, среди которых много зеленых и сине-зеленых водорослей. Снижение солености создало благоприятные условия для развития этих представителей фитопланктона. Вклад *Dinophyta* снизилась, среди них существует много миксотрофных видов, поэтому уменьшение их количества свидетельствует о снижении органического загрязнения морской среды.

В 90-е гг. представители *Dinophyta* наблюдалась практически во все сезоны и годы. В последнее десятилетие ведущая роль перешла к диатомовым водорослям, и их вклад становится равным или даже превысил *Dinophyta*. Во всех сезонах вклад *Chlorophyta* возрос. Максимум их развития приходится на зимний период. Это, как уже говорилось, может быть связано с увеличением стока рек в осенне-зимний период. В весенний период количество цианобактерий увеличивается максимально и их вклад составляет 17 %. Количественные показатели представителей этого семейства также увеличились, что иногда приводило к цветению сине-зеленых водорослей, что не было характерным для 90-х гг.

В целом, в последнее десятилетие мы наблюдаем увеличение видового разнообразия, численности, доминантных и субдоминантных видов фитопланктона. В открытых водах СЗШ выявлена смена доминантных и субдоминантных комплексов в 90-е и 2000-е гг. Кроме того, количество *S. costatum*, которая является показателем эвтрофикации и, имевшая ранее почти круглогодичное цветение, сократилось. Теперь ее развитие происходит обычно только в зимние месяцы. *E. huxleyi*, которая также связана с высоким уровнем эвтрофикации морской среды, также выпала из доминант.

В период мощного экстремального прогрева водной поверхности Черного моря в летний период 2010 г. на СЗШ был отмечен случай развития нового вида токсичного фитопланктона *Nodularia spumigena*, который ранее здесь не наблюдался. Пространственные ареалы распространения фитопланктона в периоды двух этапов его развития показаны на рис.8. На основе регулярного мониторинга прибрежной зоны вод Одесского региона, было установлено, что в период цветения водорослей концентрации *Nodularia*



Р и с . 8 . Ареалы пространственного распространения фитопланктона *Nodularia spumigena* в начале всплеска цветения (29 июня 2010 г.) (а), в период максимального распространения по СЗШ (16 июля 2010 г.) (б) (MODIS Rapid Response System Subset, USA).

доходили до 1 – 2 млн. экз/л при длине нитей до 4 мм (до 1000 кл. в одной нити), биомасса *Nodularia* составляла 200 – 400 мг/л, а в отдельных точках до 1000 мг/л. Первые сведения о наличии необычного цветения были получены по визуальным изображениям спутников *TERRA* и *AQWA* (USA) в конце июня 2010 г. Последние следы цветения наблюдались в Жебриянской бухте и на взморье Килийской дельты Дуная в первых числах августа. Т.о., общий период цветения фитопланктона, определенный по ежесуточным спутниковым наблюдениям визуального диапазона, составил 30 – 33 суток.

Крупномасштабное цветение данного вида фитопланктона и высокий уровень интенсивности процесса является новым состоянием экосистемы СЗШ.

Выводы. 1. Изменчивость значения средней летней температуры воздуха на МГС Одесса имеет колебательный характер с периодичностью около 60 лет.

2. В настоящее время Черное море относится к районам с быстрым нагреванием поверхностного слоя вод (с 1982 по 2005 гг. значение потепления равно 0,96 °С).

3. Начиная с 20-х гг. XX ст., отмечается выраженная тенденция уменьшения суровости зимних условий на СЗШ; зимний и летний тренды вплоть до середины 90-х гг. находились в противофазе, но затем произошло интенсивное и однонаправленное увеличение температуры воздуха. Для летнего периода в климатическом масштабе следует отметить большую повторяемость в последние годы теплых и очень теплых и, наоборот, полное отсутствие очень холодных летних условий

4. В последние годы наблюдается рост температуры ядра вод ХПС до 8 °С и более.

5. Повышение температуры, снижение солености поверхностных вод моря привели к определенному уменьшению вертикальной устойчивости водных масс и в сочетании с увеличением осенне-зимнего пресноводного стока и теплыми зимами последних лет способствовали активному развитию фитопланктона.

6. Увеличение видового разнообразия было отмечено для всех видов фитопланктона, но основу их составляют диатомовые и динофитовые. Зимнее цветение фитопланктона, крупномасштабное цветение *Nodularia spumigena* и высокий уровень интенсивности процессов является новыми элементами годового хода его развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мартазинова В.Ф.* Современное состояние атмосферной циркуляции воздуха в северном и южном полушарии и региональные климатические особенности в атлантико-европейском секторе и районе антарктического полуострова. *Мартазинова В.Ф., Тимофеев В.Е.* // Проблемы Арктики и Антарктики.– 2008.– № 3(80).– С.17-37.
2. *Справочник по климату Черного моря* / Под ред. А.И. Соркиной.– М.: Гидрометеиздат, 1974.– 406 с.
3. *Ефимов В.В.* Изменение климата Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005.– вып.13. – С.322-334.
4. *Belkin I.M.* Rapid warming of Large Marine Ecosystems // *Progr. in Oceanogr.* <http://www.lme.noaa.gov>
5. *Popov Yu.I., Ukrayinsky V., Matygin A.* Changes of thermohalinity characteristics in the North-West Black Sea shelf during the last 50 years // *Regional aspect of climate-terrestrial-hydrologic interactions in non-boreal Eastern Europe.*– Springer, 2009.– P.255-262.
6. *Попов Ю.И.* Распространение шельфовых вод в северо-западной части Черного моря и их обмен с водами открытого моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010.– вып.23.– С.117-126.
7. *Украинский В.В., Попов Ю.И., Матыгин А.С.* Климатическая изменчивость океанографических характеристик вод северо-западной части Черного моря // IV Международная конференция «Современные проблемы экологии Азово-Черноморского региона».– Керчь, 2008.– С.42-47.
8. *Северо-западная часть Черного моря: биология и экология* / Под ред. Ю.П.Зайцева, Б.Г. Александрова, Г.Г. Миничевой.– Киев: Наукова думка, 2006.– 701 с.

Материал поступил в редакцию 25.07.2013 г.

АНОТАЦІЯ На підставі більш ніж столітніх спостережень, проведених Гідрометцентром Чорного та Азовського морів, а також матеріалів експедиційних спостережень Українського наукового центру екології моря, розглянуті багаторічні зміни параметрів атмосфери і вод північно - західної частини Чорного моря. Показано стійке зимовий потепління, збільшення температури холодного проміжного шару. Зміни гідрологічних умов досліджуваної акваторії сприяли якісним і кількісним змінам фітопланктону спільноти.

ABSTRACT Using more 100 years long observations made by Hydrometeorological center of the Black sea and the Sea of Azov, as well as data of in situ observations of the Ukrainian Scientific Center of Ecology of the Sea, long-term changes in the atmospheric parameters and the water of the northwestern Black Sea are considered. Sustainable winter warming, the increase in temperature of the cold intermediate layer are shown. Changes of hydrological conditions of the surveyed area have contributed to the qualitative and quantitative changes in the phytoplankton community.