

ISSN 0868-854 (Print)

ISSN 2413-5984 (Online). Algologia. 2018, 28(2): 121–135

<https://doi.org/10.15407/alg28.02.121>

УДК 581.526.323 (325)/58.056

**МИНИЧЕВА Г.Г., БОЛЬШАКОВ В.Н., КАЛАШНИК Е.С.,  
ЗОТОВ А.Б., МАРИНЕЦ А.В.**

Институт морской биологии НАН Украины,  
ул. Пушкинская, 37, Одесса 65011, Украина  
[minicheva@ukr.net](mailto:minicheva@ukr.net)

### **ОЦЕНКА РЕАКЦИИ АЛГОСООБЩЕСТВ ЧЕРНОМОРСКИХ ЭКОСИСТЕМ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ**

Обсуждаются методологические проблемы, методы и показатели устойчивости растительных сообществ водных экосистем на воздействие климатических факторов. На примере различных жизненных форм черноморских водорослей рассматривается устойчивость альгосообществ к изменчивости и аномальному воздействию климатических факторов (поток солнечной энергии, температура воды, осадки, речной сток). Для оценки реакции альгосообществ на воздействие климатических факторов предложен ряд методических подходов. Подчеркнуто, что сопоставление изменчивости показателей климатических факторов и растительных сообществ необходимо проводить только на соответствующих уровнях организации природных систем (локальный, региональный, глобальный). Для этого необходимо использовать единые методы и показатели оценки вариабельности климатических факторов и альгосообществ в одинаковых временных промежутках (ежемесячно, посезонно, за год). В качестве показателя меры «устойчивости» водной растительности предлагается соотношение коэффициентов осцилляции ( $V_R$ , %), рассчитанных для альгосообществ и показателей климатических факторов:  $(V_R)_{\text{автотрофы}} / (V_R)_{\text{климат. факторы}}$ . Для экспертной оценки влияния климатических факторов на автотрофный компонент экосистемы следует использовать критерий значимого (более 30%) отклонения структурно-функциональных параметров растительности от многолетнего регионального уровня. На основе анализа многолетних наблюдений (1997–2016 гг.) и модельного периода (2008–2009 гг.) оценена устойчивость макрофитобентоса, фитопланктона и микроэпифитона к изменчивости и аномальному воздействию климатических факторов. Отмечена высокая природная устойчивость альгосообществ черноморских экосистем к изменчивости климатических факторов, а также синхронность аномальных реакций водорослей с аномальными климатическими условиями. На основании данных 2002–2003 гг. и 2010 г. показано существенное отклонение параметров (на 35–60%) в структуре и функциональных показателях альгосообществ от региональной нормы при долговременном или комбинированном действии нескольких аномальных климатических факторов.

**Ключевые слова:** альгосообщества, фитобентос, фитопланктон, микроэпифитон, Черное море, климатические факторы

©Миничева Г.Г., Большаков В.Н., Калашник Е.С., Зотов А.Б., Маринец А.В., 2018

## **Введение**

В настоящее время из актуальных экологических проблем, таких как загрязнение биосферы, разрушение природных ландшафтов, сокращение биологического разнообразия, наибольшее внимание уделяется изменению климата. Реакции биологических сообществ на аномальные климатические воздействия занимают приоритетные позиции. Стабильный рост глобальной температуры вызывает повышенное внимание к этому природному явлению (Levi, 2000; Forth, 2007). Существенное изменение условий среды может стать серьезной угрозой для цивилизации (Терез, 2006).

Это следует учитывать при анализе возможных последствий климатических изменений для экосистемы северо-западной части Черного моря (СЗЧМ), лиманов северного Причерноморья и Приазовья.

Цель данной работы – поиск методов и показателей воздействия региональных климатических факторов и ответной реакции первого звена водных экосистем – автотрофных сообществ, включая бентосные и планктонные, длинно- и короткоциклические жизненные формы водорослей. Нам предстояло решить ряд методических и прикладных задач таких, как:

- поиск методов выделения природно-антропогенных факторов, воздействующих на сообщества водной растительности;
- поиск единых универсальных показателей, характеризующих динамику климатических факторов, и параметров структурно-функциональной организации альгосообществ;
- определение параметров и значений климатических факторов, которые наиболее сильно влияют на перестройку различных жизненных форм водорослей и вызывают у них реакцию, превышающую многолетний уровень в данном регионе.
- анализ природной пластичности и устойчивости различных жизненных форм водорослей (фитобентос, фитопланктон, микроэпифитон) к воздействию региональных климатических факторов;
- анализ величин аномалий климатических факторов и их комбинаций, способных существенно изменить уровень первично-продукционного процесса и структуру альгосообществ.

## **Материалы и методы**

Работу выполняли с использованием методов системного подхода, основным условием которого является рассмотрение целостных систем. Объектом исследования выбрана функциональная, динамическая, иерархически организованная система, состоящая из двух основных компонентов: факторы, определяющие первично-продукционный процесс и сообщества водорослей всех жизненных форм. В качестве элементов первого компонента рассматривали такие климатические

факторы, как температура воды ( $T$ ), поток солнечной энергии ( $Q$ ), осадки ( $P$ ) и объем речного стока ( $W$ ). В качестве элементов второго компонента изучали сообщества бентосных и планктонных одноклеточных и многоклеточных водорослей (фитобентос, фитопланктон, микроэпифитон) морских и лиманных экосистем СЗЧМ.

Рассмотрение климатических факторов и автотрофных сообществ в качестве элементов единой динамической системы требовало поиска общих методов оценки изменчивости абиотического и биотического компонентов водной экосистемы. Единообразная количественная оценка динамических свойств разнородных элементов системы позволяет судить о сопряженности процессов и реакции растительных сообществ на вариабельность климатических факторов. Такой подход актуален в условиях, когда изменение климата сопровождается не только абсолютным увеличением температуры, но и увеличением частоты, интенсивности и продолжительности экстремальных погодных явлений (Forth..., 2007). Учитывая то, что динамика климатических факторов и структурно-функциональных параметров альгосообществ имеет волновой характер, был использован один из показателей вариации – коэффициент осцилляции ( $V_R$ , %). Он рассчитывается как отношение интервала вариации к средней величине ряда, выраженное в процентах (Васнев, 2001). Значения  $V_R$  для климатических факторов и альгосообществ рассчитывались для аналогичных временных промежутков, регионов и водных тел. Для климатических факторов данный коэффициент рассматривали в качестве меры «стабильности погоды», для водорослей различных жизненных форм – в качестве характеристики «пластичности» автотрофного элемента водной экосистемы. Соотношение  $(V_R)_{\text{автотрофы}} / (V_R)_{\text{климат. факторы}}$  использовали в качестве меры «устойчивости» водной растительности.

Для сопоставления синхронности отклонений климатических факторов и показателей структурно-функциональной организации альгосообществ от региональной нормы рассчитывали величины месячных и годовых аномалий. Годовые аномалии температуры рассчитывали из средних показателей месячных аномалий. В связи с несопоставимо более низкой наполненностью эмпирических рядов для водных автотрофов аномалии структурных и функциональных показателей альгосообществ рассчитывали как разницу между среднедекадным и годовым значениями:  $\Delta(\bar{x} - x_i)$ . Для этого использовали данные многолетней динамики структурно-функциональных параметров сообществ макрофитобентоса, фитопланктона и микроэпифитона в отдельных водоемах региональной экосистемы СЗЧМ в период 1997–2016 гг. Годовые аномалии для структурно-функциональных показателей фитобентоса рассчитывали в процентном выражении как разницу между средними региональными значениями 30-летнего периода (1981–2011 гг.) и среднегодовым значением конкретного года.

Для оценки изменения температуры в СЗЧМ были использованы ряды среднемесячных значений температуры прибрежных вод за 1997–2016 гг. Потоки солнечной энергии в суточном и годовом циклах рассчитывали по оригинальной модели с учетом таких факторов, как длина пути солнечных лучей в атмосфере, их отражение и преломление на границе двух сред, прозрачность атмосферы, облачность.

Для комплексного анализа динамики температуры и показателей альгосообществ на модельном полигоне «Биостанция» (Одесское побережье) использовали термограф «НОВО Water Temp Pro». Температуру придонного слоя фиксировали в течение 14 месяцев (2008–2009 гг.) с интервалом в полчаса. Исследования сообществ бентосных, планктонных и перифитонных водорослей на полигоне «Биостанция» в указанный период проводили дважды в месяц. В периоды активной вегетации частота съемок для короткоциклических автотрофов увеличивалась.

Аномальную климатическую ситуацию 2010 г. в Одесском регионе анализировали на основе данных о температуре воздуха и осадках (Р) (<http://pogoda.ru.net/monitor.php?id=33837>). Последствия воздействия климатических аномалий 2010 г. на экосистемы лиманов и прибрежных морских акваторий Одесского региона анализировали, учитывая морфофункциональную реакцию всех жизненных форм водорослей.

Для оценки планктонных и бентосных сообществ водорослей использовали стандартные показатели – видовой состав, численность, биомасса, продуктивность (Калугина-Гутник, 1975; Гусяков, 1980; Нестерова, 1988). Также рассчитывали морфофункциональные показатели для одноклеточных и многоклеточных водорослей (Калашник, 2013; Minicheva et al., 2003). Для характеристики экологической активности сообществ использовали показатель удельной поверхности видов, входящих в сообщество ( $S/W$ )<sub>c</sub>, для интенсивности автотрофного процесса – индексы поверхности фитоценозов (ИП<sub>Ф</sub>) фитобентоса, фитопланктона и микроэпифитона.

### **Результаты и обсуждение**

Предыдущие исследования, выполненные с использованием приведенного выше методологического подхода, позволили сделать некоторые заключения, которые мы использовали в качестве исходной информации для дальнейшего анализа и сопоставления результатов данной работы. Ранее удалось установить, что сезонная и годовая вариабельность климатических факторов влияет на структурно-функциональную организацию сообществ планктонных и бентосных водорослей в несоизмеримо большей степени по сравнению с трендом увеличения средних значений температуры воды, достоверно наблюдаемых для СЗЧМ в последнее десятилетие. Высокая природная пластичность автотрофных сообществ умеренных широт гарантирует их устойчивость к современным тенденциям климатических изменений.

Только существенные климатические аномалии могут коренным образом изменить интенсивность регионального экологического процесса (Minicheva et al., 2010).

Модельные исследования климатических факторов и ответной реакции сообществ макро- и микроводорослей, выполненные на полигоне «Биостанция» в 2008–2009 гг., позволили определить некоторые особенности функционирования системы «климатические факторы – альгосообщества». В 2008 г. в прибрежной зоне Одесского залива климатические факторы ( $T$  и  $Q$ ) сильно изменялись по сравнению с 2009 г. Этот факт отразился на пластичности всех жизненных форм водорослей. При практически сходной величине изменчивости потока солнечной энергии  $V_{R(Q)}$  в 2008 и 2009 гг., соответственно 204,6 и 202,2%, изменчивость температуры морской воды  $V_{R(T)}$  в 2008 г. была на 7% выше по сравнению с 2009 г. Разница в стабильности погодных условий этих лет закономерным образом отразилась на пластичности длинно- и короткоциклических альгосообществ. В 2008 г. показатель  $V_R$  сообществ макрофитобентоса был на 18%, а  $V_R$  сообществ фитопланктона – на 26% выше, чем в 2009 г. (рис. 1). Таким образом, подтверждается предположение о межгодовой зависимости степени пластичности автотрофов от стабильности погодных условий.

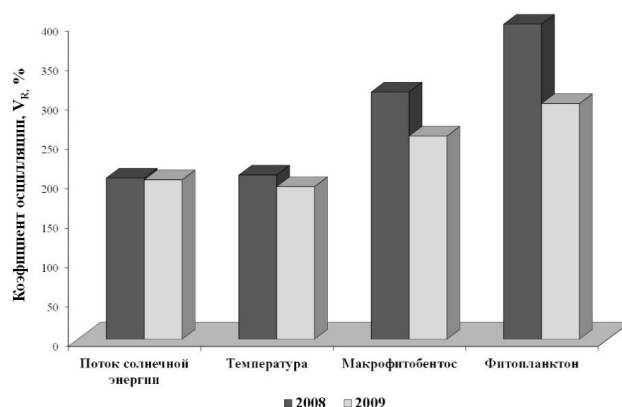


Рис. 1. Изменчивость климатических факторов ( $T$ ,  $Q$ ) и пластичности длинноциклических (макрофитобентос) и короткоциклических (фитопланктон) форм водорослей в 2008 и 2009 гг. на Одесском побережье

С учетом волнового характера динамики климатических факторов и показателей структурно-функциональной организации сообществ водорослей 2008 и 2009 годы были разбиты на четыре периода на основе ежесуточных показателей температуры воды. Границей периодов послужили ее максимальные и минимальные значения. Кривые коэффициентов осцилляции морфофункциональных показателей, характеризующих первично-продукционный процесс различных

жизненных форм водорослей для выделенных периодов, имели параллельный характер (рис. 2). Это может свидетельствовать о сходном характере реакции различных компонентов автотрофного звена на воздействие факторов среды.

Для выделенных температурных периодов 2008–2009 гг. выявлено очевидное несоответствие между значениями коэффициента осцилляции  $Q$ ,  $T$  и экологической активности ( $S/W$ )<sub>c</sub> флористического состава макрофитов и фитопланктона (рис. 3). Возникает вопрос о возможности вычленения климатических факторов из всего комплекса абиотических условий, влияющих на продукционный процесс (концентрация биогенных веществ, прозрачность, интенсивность гидродинамики и т. д.).

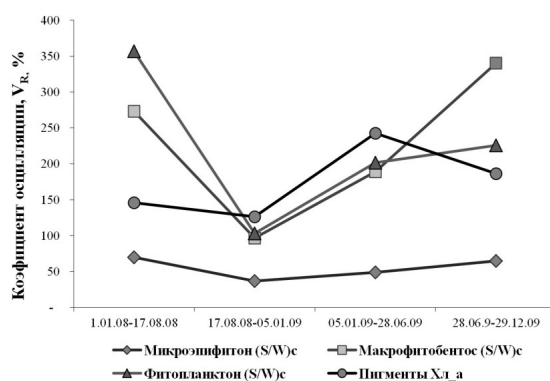


Рис. 2. Пластичность ( $V_R$ , %) функциональных показателей различных жизненных форм водорослей в разные температурные периоды 2008–2009 гг.

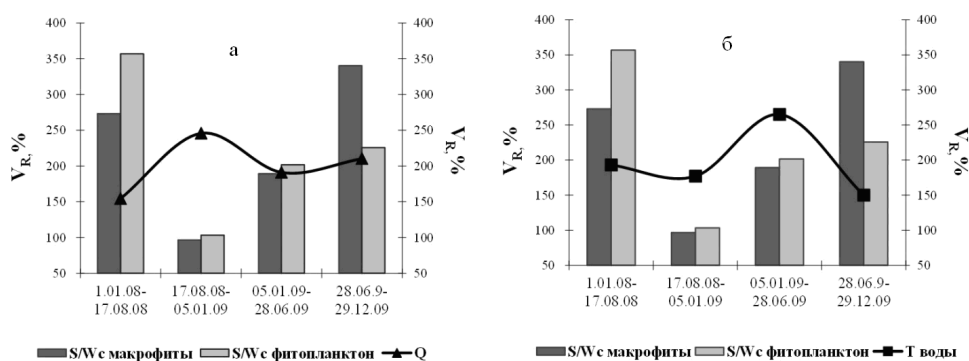


Рис. 3. Зависимость пластичности экологической активности сообществ макрофитов и фитопланктона ( $S/W$ )<sub>c</sub> от климатических факторов: потока солнечной энергии (а) и температуры воды (б)

Полученные неодинаковые показатели осцилляции климатических факторов и альгосообществ, свидетельствует о том, что реакции водной растительности могут определяться не только воздействием таких климатических факторов, как  $Q$  и  $T$ , но и сочетанием ряда других природных или антропогенных факторов, определяющих первично-продукционный процесс. Это еще раз подтверждает то, что в экосистемах с высокой антропогенной нагрузкой, отличающихся высоким колебанием условий существования гидробионтов (изменение качества воды под действием загрязнения, трансформация биотопов), воздействие климатических факторов не является единственной угрозой нарушения региональных закономерностей функционирования биологического компонента.

Результаты анализа данных за 2008–2009 гг. показали, что при наблюдаемом среднегодовом уровне изменчивости  $Q$  и  $T$  устойчивость всех исследованных жизненных форм водорослей СЗЧМ превышала единицу. Это означает, что значение коэффициента осцилляции у всех планктонных и бентосных жизненных форм водорослей было выше, чем у климатических факторов в рассматриваемые периоды. Устойчивость короткоциклических одноклеточных водорослей микроэпифитона, характеризующихся быстрой реакцией на воздействие условий среды и развивающихся преимущественно в поверхностных горизонтах, где действие климатических факторов наиболее ощутимо, в среднем была в три раза выше по сравнению с устойчивостью многоклеточных длинноточных форм бентосных макрофитов, произрастающих в более стабильных условиях глубинных горизонтов. При этом межгодовая (2008–2009 гг.) устойчивость всех трех исследованных жизненных форм отличалась всего на сотые и десятые доли единицы (рис. 4). Учитывая то, что в процессе природной или антропогенной сукцессии микроводоросли могут полностью заменить макроформы донной растительности, можно предположить, что в целом автотрофное звено СЗЧМ обладает запасом прочности, более чем в три раза превышающим современную природную региональную изменчивость климатических факторов в данный период.

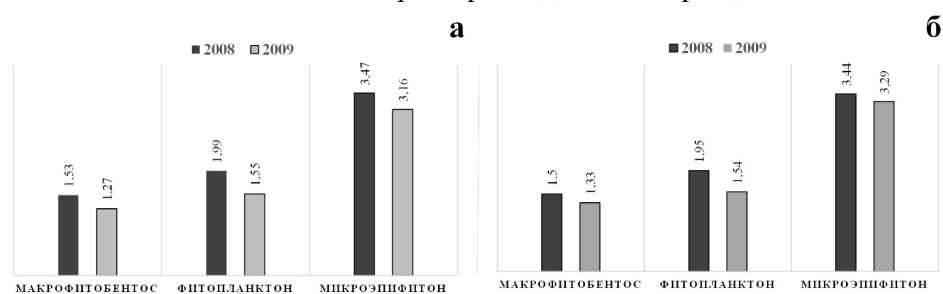


Рис. 4. Устойчивость жизненных форм водорослей СЗЧМ в период 2008–2009 гг. к воздействию климатических факторов: потока солнечной энергии (а), температуры воды (б)

Как в любой динамической системе, механизм «воздействие – реакция» в системе «климатические факторы – альгосообщества» имеет свои ограничения. Предыдущие исследования показали, что причиной нарушения региональных закономерностей функционирования водной растительности СЗЧМ могут быть существенные аномалии температуры воды (Minicheva et al., 2010). В 1997–2009 гг. в Одесском регионе СЗЧМ наблюдали периоды, при которых годовые аномалии температуры воды составляли 0,5–1,0 °С. Только в период аномалий двух последующих лет (положительной 2002 г. (1,0 °С) и отрицательной 2003 г. (1,5 °С) был зафиксирован биологический отклик автотрофного звена, который проявился в нарушении региональных закономерностей структурной организации и функциональных показателей альгосообществ. Так, уровень первичной продукции макрофитов увеличился в 2,5 раза, а сезонная динамика их видового состава сместилась на 6–7 недель.

Предлагаемый подход, в основе которого лежит рассмотрение динамической системы абиотического и биотического элементов экосистемы, а также поиск унифицированных показателей оценки воздействия и реакции заключается в следующем: для автотрофного компонента экосистемы необходимо ввести практику расчета аномалий по аналогии с климатическими факторами. Расчет величин отклонений структурно-функциональных параметров различных жизненных форм водорослей от среднего регионального уровня крайне редко встречается в исследованиях Черного моря. В случае расчета величины  $\sigma$  биомассы фитопланктонных сообществ сопоставление проводится не с аналогичными, а с абсолютными показателями температуры воды или речного стока (Пархоменко, Кривенко, 2010).

Для выявления степени гармонизации исследуемой системы были сопоставлены значения аномалий температуры воды и аномалий интенсивности функционирования прибрежного фитобентоса ИП<sub>ф</sub> в 1997–2009 гг. Для наглядности сопоставления величины аномалии температуры воды смещены на один порядок (рис. 5).

Характер межгодовой изменчивости аномалий свидетельствует о высокой степени гармонизации первично-продукционного процесса в прибрежной зоне моря и изменчивости температуры воды. Кроме того, на рисунке показана аномальная реакция донной растительности на две последовательные (2002 и 2003 гг.) аномалии температуры воды.

Причиной аномальных реакции водной растительности, выходящей за границы региональной нормы, могут быть не только продолжительные аномальные действия какого-либо одного климатического фактора, но и одновременное сочетание нескольких факторов, влияющих на автотрофный процесс.



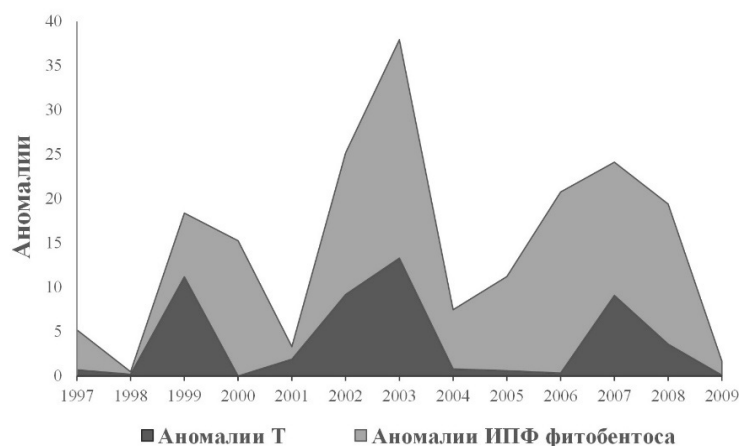


Рис. 5. Годовые аномалии температуры воды и интенсивности функционирования фитобентоса в прибрежной зоне Одесского побережья в 1997–2009 гг.

Сопоставление годовых аномалий температуры воды и объема речного стока Дуная, который привносит большую часть биогенных веществ в район Дунай-Днепровского междуречья, с показателем продукции фитобентоса в 2007–2016 гг. свидетельствует о том, что одновременная аномалия температуры воды (22%) и объема стока Дуная (45%) в 2010 г. привели к повышению продукционной способности сообществ макрофитов более чем на 60% существующей нормы в данном регионе в 1981–2011 гг. (рис. 6).

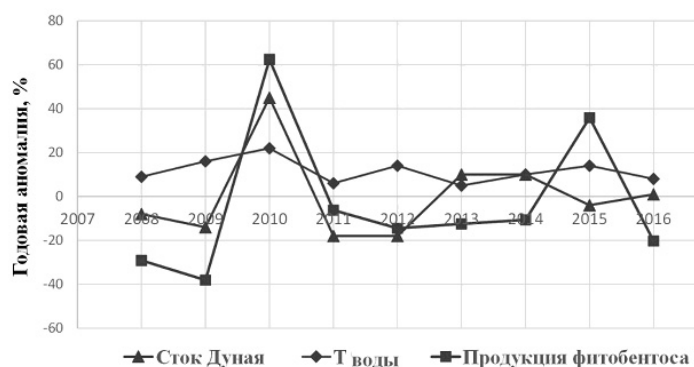


Рис. 6. Сопоставление годовых аномалий стока Дуная и температуры воды с аномалиями продукции фитобентоса в Дунай-Днепровском междуречье в 2008–2016 гг.

Из рисунка видно, что в 2010 г. отмечены наиболее яркие аномальные климатические изменения в СЗЧМ и лиманах северного Причерноморья. Реакция водных экосистем этого аномального периода дает основания для понимания механизмов нарушения региональных

экологических процессов, за которыми следует разбалансировка образования и трансформации органического вещества, что сопровождается существенным ухудшением качества водной среды и потерей биоресурсов. С точки зрения долгосрочной гидрометеорологической статистики 2010 г. не является рекордно экстремальным на фоне потепления, которое началось в 70-х гг. прошлого века. Так, для Одесского региона в 2002 г. зафиксировано 11, в 2007 г. – 12, а в 2010 г. – только 9 экстремально рекордных высоких температур воздуха. В июле 2009 г. и в июле 2010 г. была зафиксирована месячная аномальная температура воздуха 2,8 °С (рис. 7). Тем не менее, именно в 2010 г. произошло не просто региональное нарушение закономерностей функционирования автотрофного звена, но и наблюдалась кризисная экологическая ситуация. Массовые заморы рыбы и гибель гидробионтов отмечались для большинства пресноводных водоемов юга Украины, лиманов северного Причерноморья и Приазовья, морских прибрежных экосистем СЗЧМ (Адобовский и др., 2012).

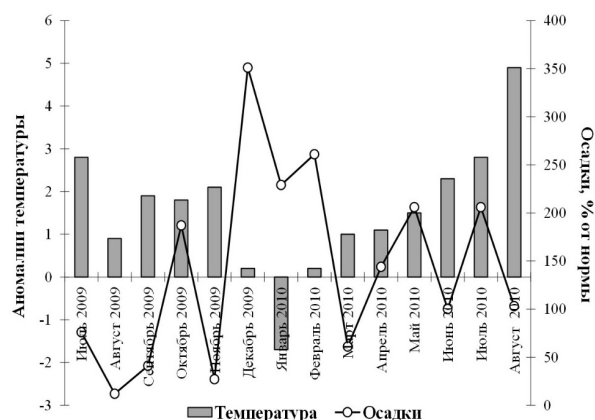


Рис. 7. Месячные аномалии температуры и осадков в 2009–2010 гг. в регионе северного Причерноморья

Разбалансировка сопряженности экологических процессов в водных экосистемах юга Украины из-за погодных условий 2010 г. показала, что при прогнозе реакций водных экосистем на аномальные климатические условия кроме факторов, непосредственно определяющих автотрофный процесс ( $Q$  и  $T$ ), необходимо учитывать также такой климатический фактор, как осадки. Они приносят в водоемы минеральные и органические соединения азота и фосфора, которые стимулируют первично-продукционный процесс. Наблюдаемое в 2010 г. сочетание аномалий температуры и осадков стало критичным для водных экосистем юга Украины. Две последовательные аномалии температуры воздуха в июле (2,8 °С) и августе (4,9 °С) и пять месячных аномалий осадков, превышающих 200% нормы (декабрь 2009 г. – июль 2010 г.)

(см. рис. 7), нарушили региональные закономерности автотрофного процесса и разбалансировали продукционно-деструкционные процессы в водных экосистемах. Сочетание последовательности, продолжительности и величин аномалий  $T$  и  $P$  в 2010 г. вызвало реакцию автотрофного звена, которая привела к аномалиям продукционного процесса и перестройке флористической структуры альгосообществ, что не наблюдалась в регионе исследования последние 50 лет. С первой декады июля повсеместно в прибрежной и открытой части СЗЧМ были отмечены вспышки «цветения» планктонной синезеленой водоросли *Nodularia spumigena* Mert. ex Bornet & Flahault. Раннее массовое ее развитие в районе исследований не фиксировалось. Биомасса *N. spumigena* в прибрежной зоне в июле 2010 г. достигла рекордных для морских экосистем значений –  $8 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$  (Александров и др., 2012). Кардинально изменилось морфофункциональное состояние прибрежного фитобентоса. Экологическая активность массовых видов фитобентоса выросла на порядок (с 30 до  $300 \text{ м}^2\cdot\text{кг}^{-1}$ ). Прежде доминирующие зеленые и красные макрофиты (*Ulva intestinalis* L., *Cladophora vagabunda* (L.) Høek, *Ceramium diaphanum* var. *elegans* (Roth) Roth) сменились нитчатými цианобактериями (*Lyngbya lutea* Gomont ex Gomont, *Phormidium nigroviride* (Thwaites ex Gomont) Anagnostidis et Komárek, *Spirulina tenuissima* Kütz.). Ситуация сопровождалась потерей рекреационных качеств морской среды и массовой гибелью гидробионтов из-за нехватки кислорода в результате окисления органического вещества, выход которого возрос на 1–2 порядка. Особенно данная ситуация отразилась на лиманных экосистемах. Даже наиболее устойчивая среди лиманов северного Причерноморья экосистема Тилигульского лимана не выдержала такого уровня интенсификации автотрофного процесса. В июле–августе в лимане началось массовое «цветение» планктонной динофитовой водоросли *Prorocentrum micans* Ehrenb., биомасса которой увеличилась на 2 порядка (с 1 до  $135 \text{ г}\cdot\text{м}^{-3}$ ). Концентрация хлорофилла  $a$  возросла более чем в 40 раз (с 10 до  $453 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ ). До середины сентября с периодичностью в несколько недель наблюдались заморы рыбы и гидробионтов.

Кризисная реакция водных экосистем юга Украины 2010 г. на климатические изменения предоставила богатый материал не только для понимания механизма отклика автотрофного звена на аномальный климатический период, но и для исследования восстановительной сукцессии водорослей «постаномального» периода (Minicheva et al., 2014), который начался в 2011 г. и изучение которого продолжается до настоящего времени.

## Выводы

В результате наших исследований установлено, что для анализа оценки реакции альгосообществ водных экосистем на климатические факторы следует использовать ряд методологических подходов:

- сопоставление изменчивости показателей климатических факторов и растительных сообществ необходимо проводить только на соответствующих уровнях организации природных систем (локальный, региональный, глобальный);

- необходимо использовать единые методы и показатели оценки вариабельности климатических факторов и альгосообществ в одинаковых временных промежутках;

- использование соотношения коэффициентов осцилляции растительных сообществ и климатических факторов позволяет количественно оценить «устойчивость» различных жизненных форм водорослей;

- для оценки влияния климатических факторов на автотрофный компонент экосистемы следует использовать критерий значимого (более 30%) отклонения структурно-функциональных параметров растительности от многолетнего регионального уровня.

Зафиксирована внутри- и межгодовая синхронность коэффициента осцилляции ( $V_R$ , %) климатических факторов (температура воды, поток солнечной энергии) и морфофункциональных параметров сообществ водорослей (фитобентос, фитопланктон, микроэпифитон) СЗЧМ. Случаи нарушения такой синхронности могут свидетельствовать о влиянии группы третьих факторов, не связанных с климатическими условиями, например, об изменении концентрации биогенных веществ, нарушении биотопов и т.д.

Установлено, что все жизненные формы альгосообществ СЗЧМ по отношению к температуре воды и потоку солнечной энергии [ $(V_R)_{\text{автотрофов}} / (V_R)_{\text{климат. факторов}}$ ] характеризуются показателем «устойчивости», равным больше единицы. Наименьшая устойчивость характерна для длинноциклических макроформ донных водорослей (около единицы). Для планктонных форм водорослей такой показатель находится в пределах двух единиц. Для одноклеточных эпифитных форм, развивающихся преимущественно в верхних горизонтах водных экосистем и наиболее зависящих от изменчивости климатических факторов, устойчивость сообществ составляет около трех единиц.

Для периода 1978–2016 гг. зафиксирована синхронность динамики между аномалиями климатических факторов и структурно-функциональными параметрами альгосообществ СЗЧМ. Годовые аномалии климатических факторов, превышающие 20% региональной нормы, вызывают выраженную реакцию перестройки сообществ водорослей. Особо показательные аномальные реакции альгосообществ (35–60% региональной нормы) зафиксированы в 2002–2003 гг. при долговременной аномальной температуре воды и в 2010 г. при сочетании высоких аномалий двух факторов: сток Дуная (45%) и температура воды (22%).

Авторы благодарят Е.М. Руснак, сотрудника ИМБ НАН Украины, за любезно предоставленные данные о концентрации хлорофилла *a* в фитопланктоне полигона «Биостанция» в 2008–2009 гг. и Тилигульского лимана в 2010 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адобовский В.В., Александров Б.Г., Богатова Ю.И., Большаков В.Н., Доценко С.А., Говорин И.И., Зотов А.Б., Миничева Г.Г., Теренько Л.М., Хомова Е.С., Шацилло Е.И. Экологические последствия гидрометеорологических аномалий в прибрежной зоне Одесского региона (2009–2011 гг.). *Причерномор. экол. бюл.* 2012. 1(43): 112–127.
- Александров Б.Г., Теренько Л.М., Нестерова Д.А. Первый случай «цветения» воды в Черном море водорослью *Nodularia spumigena* Mert. ex Bornet et Flahault (*Cyanoprokaryota*). *Альгология.* 2012. 22(2): 152–165.
- Васнев С.А. *Статистика: Учеб. пособие.* М.: МГУП, 2001. 170 с.
- Калашник Е.С. Принципы расчета индексов поверхности эпифитного компонента альгосистемы «базифит-эпифит». В кн.: *Международная научно-практическая конференция «Pontus Euxinus»:* Тез. докл. Севастополь, 2013. С. 67–69.
- Калугина-Гутник А.А. *Фитобентос Черного моря.* Киев: Наук. думка, 1975. 248 с.
- Гусяков Н.Е. Макрофитобентос. В кн.: *Руководство по методам биологического анализа морской воды и донных отложений.* Л.: Гидрометеиздат, 1980. С. 170–176.
- Нестерова Д.А. Методические рекомендации по сбору и обработке морского фитопланктона. Одесса: ОФ ИнБЮМ, 1988. 19 с.
- Пархоменко А.В., Кривенко О.В. Межгодовая изменчивость биомассы фитопланктона в Черном море за период 1948–2001 гг. *Наук. зап. Терноп. нац. ун-ту.* Сер. Біол. 2010. 3(44): 198–201.
- Терез Э.И. Устойчивое развитие и проблемы изменения глобального климата Земли. *Ученые зап. Тавр. нац. ун-та.* 2004. 17(56): 181–205.
- Forth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: *Climate change 2007: The physical science basis.* IPCC Secretariat, Switzerland, 21. IPCC, Geneva, Switzerland, 2007. 104 p.
- Levi B.G. The Decreasing Artic Ice Cover. *Phys. Today.* 2000. 1: 19–20.
- Minicheva G.G., Bolshakov V.N., Zotov A.B. The response of autotrophic communities of the northwestern Black Sea to the variability of climatic factors. *J. Environ. Protect. Ecol.* 2010. 3(11): 1046–1054.
- Minicheva G.G., Zotov A.B., Kalashnik E.S. Comparison of «bloom» and fire on the example of algaesystem phytoplankton-macrophytes. *Int. J. Algae.* 2014. 16(3): 263–270.
- Minicheva G.G., Zotov A.B., Kosenko M.N. *Methodical recommendations on the morpho-functional indexes define for unicellular and multicellular forms of aquatic vegetation.* Odessa: GEF UNDP Black Sea Ecosyst. Recovery Project, 2003. 32 p.
- <http://pogoda.ru.net/monitor.php?id=33837>

Поступила 14 марта 2018 г.

Подписала в печать О.Н. Виноградова

## REFERENCES

- Adobovskiy V.V., Aleksandrov B.G., Bogatova Yu.I., Bolshakov V.N., Dotsenko S.A., Govorin I.I., Zotov A.B., Minicheva G.G., Terenko L.M., Khomova E.S., Shatsillo E.I. *Prichernomor. ekol. byul.* 2012. 1 (43): 112–127.
- Aleksandrov B.G., Terenko L.M., Nesterova D.P. *Algologia.* 2012. 22(2): 152–165.
- Forth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: *Climate change 2007: The physical science basis.* IPCC Secretariat, Switzerland, 21. IPCC, Geneva, Switzerland, 2007. 104 p.
- Guslyakov N.E. V kn.: *Rukovodstvo po metodam biologicheskogo analiza morskoy vody i donnykh otlozheniy.* [In: *Manual methods of biological analysis of sea water and bottom sediments*]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1980. P. 170–176.
- Kalashnik E.S. In: *Materialy VIII Mezhdunarodnoy konferencii [Materials of VIII Int. Conf.]*. Sevastopol, 2013. Pp. 67–69.
- Kalugina-Gutnik A.A. *Fitobentos Chernogo morya [Phytobenthos of the Black Sea]*. Kiev: Nauk. Dumka Press, 1975. 248 p.
- Levi B.G. *Phys. Today.* 2000. 1: 19–20.
- Minicheva G.G., Bolshakov V.N., Zotov A.B. *J. Environ. Protect. Ecol.* 2010. 3(11): 1046–1054.
- Minicheva G.G., Zotov A.B., Kalashnik E.S. *Int. J. Algae.* 2014. 16(3): 263–270.
- Minicheva G.G., Zotov A.B., Kosenko M.N. *Methodical recommendations on the morpho-functional indexes define for unicellular and multicellular forms of aquatic vegetation.* Odessa: GEF UNDP Black Sea Ecosyst. Recovery Project, 2003. 32 p.
- Nesterova D.A. *Methodological recommendations for the collection and processing of marine phytoplankton.* Odessa: OBIBSS, 1988. 19 p.
- Parchomenko A.V., Kryvenko O.B. *Nauk. zap. Ternop. nats. ped. un-tu.* Ser. Biol. 2010. 3(44): 198–201.
- Terez E.I. *Uch. zap. Tavri. nats. ped. un-tu.* 2004. 17(56): 181–205.
- Vasnev S.A. *Statistika: Ucheb. posobiye [Statistics: Tutorial]*. Moscow: MGUP Publ., 2001. 170 p.
- <http://pogoda.ru.net/monitor.php?id=33837>

ISSN 0868-854 (Print)

ISSN 2413-5984 (Online). *Algologia.* 2018, 28(2): 121–135

<https://doi.org/10.15407/alg28.02.121>

*Minicheva G.G., Bolshakov V.N., Kalashnik E.S., Zotov A.B., Marinets A.V.*

Institute of Marine Biology, NAS of Ukraine,  
37 Pushkinskaya St., Odessa 65011, Ukraine

ASSESSMENT OF THE REACTIONS OF ALGAL COMMUNITIES TO INFLUENCE  
OF CLIMATIC FACTORS IN THE N-W BLACK SEA ECOSYSTEM

The paper gives an overview of methodological problems (i.e., methods and indicators) in assessing the reactions of algae communities to climatic factors. We discuss the resistance of algal communities to the fluctuations and anomalous impact of climatic factors (solar energy flow, water temperature, precipitation, and river runoff) with reference to various life forms of Black Sea algae. To assess the reaction of algal communities impacted by climatic factors, a number of methodological approaches are proposed. It is necessary to carry out a comparison of the variability of both climatic factors and plant communities at appropriate levels of organization in natural systems (local, regional, and global). The changeability of climatic factors and algal communities must be measured using unified methods and indicators (variability, anomalies, etc.), and within the same time intervals (monthly, seasonally, and annually). Authors propose to use the ratio of oscillation coefficients ( $V_R$ , %) for the structural-functional parameters of algal communities, and climatic factor indices:  $(V_R)_{\text{algae communities}} / (V_R)_{\text{climatic factors}}$ , as a measure of “stability” in different life forms of algae. For a sound conclusion about the significant impact of climatic factors on plant communities, we proposed to use the criterion of a significant (more than 30%) deviation of structural-functional parameters of algae communities from several years on a regional level. Analysis of the original results of both long-term observations (1997–2016) and the model period (2008–2009) made it possible to assess the stability of macrophytobenthos, phytoplankton, and microepiphyton to fluctuations in climatic factors, as well as their anomalous manifestations. High-natural stability of algal communities of the northwestern part of the Black Sea (NWBS) ecosystems to variability of climatic factors, as well as the synchronism of anomalous reactions of algae with anomalous climatic conditions is noted. It includes intra- and inter-annual synchronicity of the oscillation coefficient ( $V_R$ , %) of climatic factors (water temperature, solar energy flow) and morphofunctional parameters of algae (phytobenthos, phytoplankton, and epiphyton). Cases of violation to such synchronism may indicate the effect of a group of third factors not related to climatic conditions, for example, changes in nutrient concentrations, biotope disturbance, etc. For the period of 1978–2016, synchronicity of the dynamics between climatic anomalies and structural-functional parameters of algal communities of the NWBS was recorded. Annual anomalies of climatic factors, exceeding 20% of the regional norm, cause evident restructuring of algal communities. Particularly strong anomalous reactions of plant communities (35–60% from the regional norm) were recorded in 2002–2003 under the long-term anomaly of water temperature and in 2010 under combination of high anomalies of two factors: the Danube runoff (45%) and water temperature (22%).

**Key words:** algae communities, phytobenthos, phytoplankton, epiphyton, Black Sea, climatic factors