

УДК 574.5:58.02

Г.Г. МИНИЧЕВА, А.Б. ЗОТОВ, Е.С. КАЛАШНИК

Одесский филиал Ин-та биологии южных морей им. А.О. Ковалевского НАН Украины,  
ул. Пушкинская, 37, 65011 Одесса, Украина  
e-mail: minicheva@ukr.net

## СОПОСТАВЛЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ «ЦВЕТЕНИЯ» И ПОЖАРА НА ПРИМЕРЕ АЛЬГОСИСТЕМЫ ФИТОПЛАНКТОН–МАКРОФИТЫ

Морфофункциональные реакции альгосистемы фитопланктон–макрофиты северо-западной части Черного моря на климатические аномалии 2010 г. рассматриваются как иллюстрация сходства явлений «цветения» водоема и пожара в наземных экосистемах. Экологическая аналогия механизмов данных явлений состоит в быстрой трансформации накопившегося в экосистеме избыточного органического вещества в минеральные формы. В растительном компоненте наземных и водных экосистем сукцессионные изменения при пожаре и «цветении», связанные с переходом от видов с *r*- к видам с *k*-стратегам, имеют прямо противоположную направленность. Сделан вывод о том, что в процессе пожара и «цветения» реализуются сходные механизмы восстановления экологического здоровья наземных и водных экосистем, характеризующихся избытком органического вещества.

Ключевые слова: «цветение», пожар, фитопланктон, макрофиты, *r*-, *k*-стратегии, северо-западная часть Черного моря.

### Введение

Сложившаяся в биологических науках специализация исследований позволяет детально изучить биотический компонент экологических систем разного типа. При этом специализация может стать препятствием в понимании единой сути природных процессов, происходящих, например, в водных и наземных экосистемах. Данную проблему можно решить с помощью широко применяемого в практике научных исследований метода аналогий (Уемов, 1970), позволяющего выявлять сходные структурно-функциональные изменения в разноорганизованных динамических системах.

В климатически аномальном 2010 г. (Adobovskiy et al., 2011) и в последующий трехлетний период в альгосистеме фитопланктон–макрофиты северо-западной части Черного моря (СЗЧМ) и лиманах северного Причерноморья наблюдались реакции, существенно отличающиеся от сложившихся региональных закономерностей. Анализ коротко- и долго-периодных реакций планктонных и бентосных альгосообществ позволил предположить существование экологической аналогии кризисных явлений «цветения» и пожара и сопровождающих их перестроек растительного компонента водных и наземных экосистем.

Цель данного исследования – поиск эколого-ботанических аналогий механизмов «цветения» и пожара, а также иллюстрация предполагаемого сходства с эмпирическими данными морфофункциональных реакций альгоценозов фитопланктона и фитобентоса северо-западной части Черного моря и Тилигульского лимана в период 2010–2013 гг.

© Г.Г. Миничева, А.Б. Зотов, Е.С. Калашник, 2014

## Материалы и методы

Для поиска аналогий между явлениями «цветения» и пожара использовали методологию системного подхода, основные положения о развитии растительных сукцессий и функционировании экосистем (Уемов, 1978; Одум, 1986; Миркин и др., 2002). Используются результаты оценки классических (Романенко, 2004) и морфофункциональных показателей сообществ одноклеточных (фитопланктон) и многоклеточных (макрофитобентос) водорослей (Миничева и др., 2003), развивающихся в СЗЧМ и Тилигульском лимане в 2010–2013 гг.

## Результаты и обсуждение

Среди экологических последствий лесных пожаров выделяют как позитивные, так и негативные составляющие, воздействующие на экосистему, окружающую природную среду и человека (Кузнецов, Балашов, 2012). В настоящее время в природопользовании укрепилось представление о естественном экологическом обновлении экосистемы в результате лесных пожаров ([http://ru.wikipedia.org/wiki/Лесной\\_пожар](http://ru.wikipedia.org/wiki/Лесной_пожар)). Однако экологически близкое явление – «цветение» водоемов оценивают исключительно как негативное явление, обусловленное антропогенной эвтрофикацией. Такая однозначная оценка, нивелирующая естественно-природный механизм «цветения», имеет объективные причины, связанные с тем, что в современных условиях абсолютное большинство «цветений», наблюдаемых в пресноводных и морских экосистемах, вызвано интенсивным поступлением в водоемы аллохтонного вещества антропогенного происхождения. Вместе с тем, при пожаре и «цветении» протекают однотипные по физико-химической сути процессы – окислительные реакции горения и гниения. При сопоставлении различных составляющих механизма пожара и «цветения» можно обнаружить многочисленные аналогии (см. таблицу). При «цветении» и пожаре наблюдаются различия в форме проявления сходного экологического процесса, связанные с особенностями организации биотического компонента наземных и водных экосистем. При пожаре трансформация органических веществ в минеральные формы осуществляется исключительно за счет физико-химических процессов горения ранее сформированной растительной биомассы.

При «цветении» кроме окислительных реакций гниения происходит оперативная биотическая трансформация вещества через высокоактивные дисперсионные структуры – фитопланктонные и бактериальные сообщества. Гетеротрофная активность мелкоклеточного фитопланктона позволяющая поглощать до 60 % растворенного в водоеме органического вещества (Скобеева, 1999), выполняет функцию биологической губки водной толщи. Короткий жизненный цикл планктонных водорослей и быстрое отмирание клеток способствуют следующему этапу трансформации живого органического вещества в мертвую растительную биомассу.

Следовательно, при интенсивном «цветении» водоема фитопланктон выполняет двойную экологическую функцию: высоко производительного продуцента и эффективного биотрансформатора экологического потока на этапах «растворенное органическое вещество – живое органическое вещество – мертвое органическое вещество». На последующем этапе, который является

экологической целью санирующего явления «цветения», в результате процессов бактериального разложения и прямого окисления происходит минерализация. Таким образом, механизм «цветения», по сравнению с пожаром, имеет более длинную цепочку этапов трансформации органического вещества в минеральные формы с помощью биотических и физико-химических процессов, что приводит к удалению растворенного или мертвого органического вещества из экосистемы.

## Сопоставление экологических и ботанических аспектов механизма «цветения» и пожара

| Составляющие механизма  | Наземная экосистема  | Водная экосистема   |
|-------------------------|--|---|
| <i>Предпосылки</i>      | – Накопление больших объемов мертвой растительной биомассы<br>– Преобладание в структуре растительности <i>k</i> -стратегов (древовидные, кустарниковые формы)   | – Высокая концентрация растворенных соединений азота и фосфора (эвтрофикация)<br>– Преобладание в структуре растительности <i>r</i> -стратегов (одноклеточные планктонные формы)  |
| <i>Причины</i>          | – Высокие температуры (молния, поджог)   | – Высокие температуры (летний сезон, аномальные климатические условия)  |
| <i>Суть процесса</i>    | – Трансформация органических веществ в минеральные в результате окислительных реакций  | – Трансформация органических веществ в минеральные в результате биотрансформации и окислительных реакций  |
| <i>Форма проявления</i> | – Горение живой и мертвой растительной биомассы<br>– Выделение токсичных продуктов горения<br>– Частичная гибель животных от огня и продуктов горения  | – Гниение мертвой биомассы фитопланктона<br>– Выделение токсичных веществ, связывание кислорода<br>– Частичная гибель гидробионтов от гипоксии  |
| <i>Последствия</i>      | – Гибель большинства <i>k</i> -стратегов (древовидные, кустарниковые формы)<br>– Преимущество для развития <i>r</i> -стратегов (травянистые формы)<br>– Трансформация мертвого органического вещества из сухостоя в минеральные вещества почвы<br>– Повышение освещенности наземного горизонта | – Гибель большинства <i>r</i> -стратегов (одноклеточные планктонные формы)<br>– Преимущество для развития <i>k</i> -стратегов (донные макрофиты)<br>– Трансформация растворенного органического вещества из водной толщи в минеральные вещества донных отложений<br>– Повышение прозрачности и освещенности донного горизонта |
| <i>Результат</i>        | – Избавление от избытка органического вещества, накопившегося в экосистеме<br>– Возврат на исходный этап растительной сукцессии с преимуществом развития <i>r</i> -стратегов (травянистые формы)   | – Избавление от избытка органического вещества, накопившегося в экосистеме<br>– Возврат на исходный этап растительной сукцессии с преимуществом развития <i>k</i> -стратегов (донные макрофиты)   |

В отличие от сходной экологической сути «цветения» и пожара, которые имеют разное количество этапов, но единую направленность процесса, сукцессии наземной и водной растительности, сопровождающие эти явления, имеют прямо противоположный вектор. В наземных экосистемах пожар

уничтожает многолетние древовидные формы растительности (*k*-стратегии) и создает условия для первичной сукцессии с преобладанием короткоциклических, травянистых форм (*r*-стратегов). В водных экосистемах, наоборот, последствием «цветения» является гибель одноклеточных форм водорослей (*r*-стратегов). После минерализации отмершей биомассы фитопланктона создаются условия для развития крупных, длинноциклических форм макрофитов (*k*-стратегов).

Поводом для поиска аналогий между «цветением» и пожаром стали ярко выраженные и нетипичные для СЗЧМ морфофункциональные реакции планктонных и бентосных альгосообществ, проявившиеся на фоне аномальной климатической ситуации 2010 г. Максимальный за 50 лет объем стока р. Дунай и температура морской воды, которая в июле–августе 2010 г. более четырех недель превышала 29 °С, сопровождалась небывалым в регионе «цветением» синезеленых водорослей по всей акватории СЗЧМ. Концентрация доминанта «цветения» *Nodularia spumigena* Mertens ex Bornet & Flahault достигала 6,2 кг·м<sup>-3</sup> (Александров и др., 2012). В этот же период доминанты бентосных альгоценозов, обычно представленные видами родов *Ceramium*, *Cladophora*, *Ulva*, с удельной поверхностью популяций [(S/W)<sub>п</sub>] 25–80 м<sup>2</sup>·кг<sup>-1</sup>] сменились высоко активными *Cyanophyta* из родов *Lyngbya* и *Spirulina* с (S/W)<sub>п</sub> 300–800 м<sup>2</sup>·кг<sup>-1</sup>). При этом биомасса донных фитоценозов снизилась на несколько порядков. Очевидно, экстраординарное «цветение», связанное с климатическими условиями, выполнило функцию освобождения экосистемы от избытка растворенного органического вещества, определявшего ее высокий трофический статус. В результате интенсивного «цветения» и разложения массы отмершего фитопланктона произошло связывание и выведение из экосистемы большого объема органического вещества, что подготовило условия для восстановительной сукцессии макрофитного компонента.

Последующий период охарактеризовался реверсной реакцией двух разно функциональных составляющих альгосистемы: фитопланктон (*r*-стратегии) – макрофиты (*k*-стратегии). В 2011 г. (S/W)<sub>п</sub> доминирующих видов фитопланктона снизилась почти в два раза (с 1884 до 1040 м<sup>2</sup>·кг<sup>-1</sup>), а структурные (численность, биомасса) и морфофункциональные (индексы поверхности сообщества) показатели – на порядок (рис. 1). После аномального «цветения» фитопланктона наблюдался нехарактерный для региона всплеск развития макрофитов. В результате повышения прозрачности водных масс на твердых субстратах Одесской банки (глубина 7–12 м) сформировалась очень высокая биомасса макроводорослей, представленная тонко разветвленными видами родов *Ulva* и *Cladophora* [(S/W)<sub>п</sub> около 85 м<sup>2</sup>·кг<sup>-1</sup>]. В 2011 г. масштабные выбросы макрофитов фиксировались на всем побережье Днестровско-Днепровского междуречья. На некоторых участках одесских пляжей концентрация растительной массы в выбросах достигала 30–90 кг·м<sup>3</sup> водной толщи прибрежной зоны (Адобовский и др., 2012). Это явление в несколько меньших масштабах наблюдалось и в последующие два года. Аналогичные морфофункциональные реакции альгосистемы фитопланктон–макрофиты зафиксированы в этот же период и в локальной экосистеме Тилигульского лимана.

В августе 2010 г. биомасса цветущей динофитовой водоросли *Prorocentrum micans* Ehrenb. достигла 135 г·м<sup>-3</sup> (при норме менее 1 г·м<sup>-3</sup>). Величина индекса поверхности (ИПс) фитопланктона возросла до 42 м<sup>-1</sup> (при норме менее 1 м<sup>-1</sup>). В этот период прибрежные макрофиты лимана, включая популяцию бурой

водоросли *Cystoseira barbata* (Gooden. et Woodw.) C. Agardh, находились в угнетенном состоянии. Однако в последующие 2011–2013 гг. в сообществах макрофитобентоса Тилигульского лимана наблюдалась выраженная восстановительная сукцессия донной растительности. Развивались преимущественно бурые водоросли, относящиеся к *k*-стратегам и характеризующиеся наиболее низкой среди черноморских макрофитов функциональной активностью, не превышающей  $20\text{--}25 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$ .

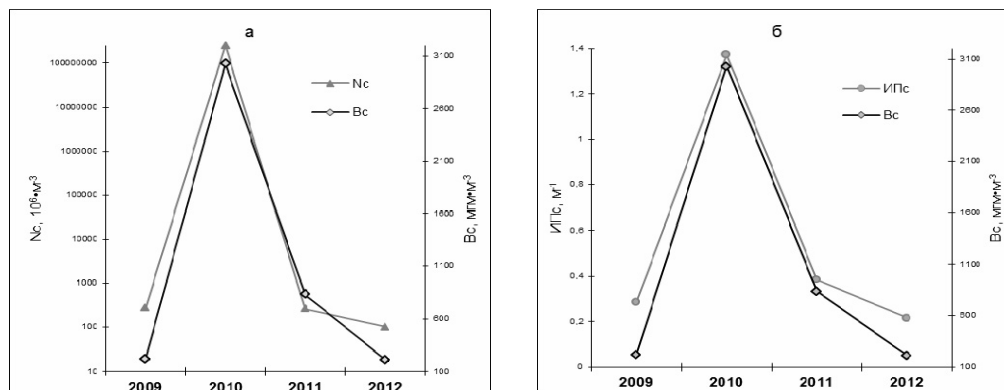


Рис. 1. Динамика численности  $N_c$  (а), биомассы  $B_c$  (а, б) и индекса поверхности ИПс (б) сообществ фитопланктона Одесского залива в 2009–2012 гг.

В зимне-весенний сезон постаномального периода в прибрежной зоне лимана массово развились новые для экосистемы виды, впервые обнаруженные в лимане около 10 лет назад (Ткаченко, Ковтун, 2004). Это *Punctaria tenuissima* (C. Agardh.) Grev. [ $(S/W)_n$   $21 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$ ], *Striaria attenuata* (C. Agardh.) Grev. [ $(S/W)_n$   $18 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$ ] и *Leathesia difformis* (L.) Aresch. [ $(S/W)_n$   $9 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$ ]. Так, в апреле–мае 2013 г. в Тилигульском лимане наблюдали развитие вида, нового не только для этого водоема, но и в целом для СЗЧМ. Это бурая водоросль *Liebmannia leveillei* J. Agardh [ $(S/W)_n$   $15 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$ ] (рис. 2).

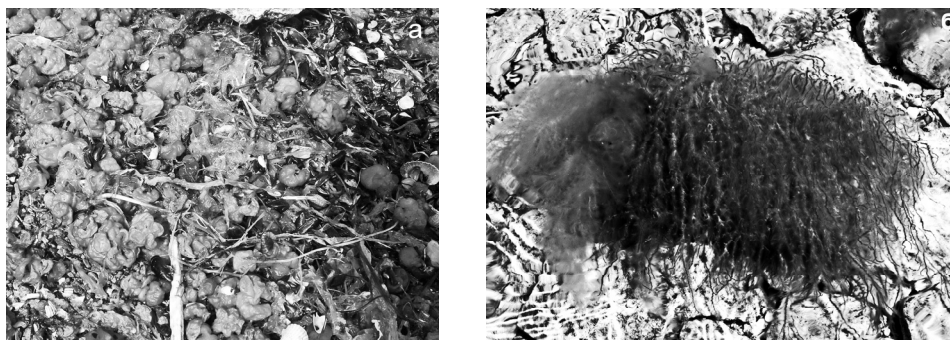


Рис. 2. Массовое развитие редких в Тилигульском лимане видов бурых водорослей в 2011–2013 гг.: а – *Leathesia difformis*; б – *Liebmannia leveillei*

Таким образом, после интенсивного «цветения» в экосистеме Тилигульского лимана стали наблюдаться как позитивные процессы восстановления флористической структуры макрофитов, так и повышение показателей развития низко функциональных видов донной растительности (*k*-стратегов).

### Заключение

Сравнение экологических и ботанических аспектов пожара и «цветения» на примере реакции природной альгосистемы фитопланктон–макрофиты на аномальные климатические условия показало, что в процессе этих явлений реализуются сходные механизмы быстрого освобождения экосистемы от избытка органического вещества. Пожар и «цветение» являются точкой отсчета нового этапа растительной сукцессии. В наземных экосистемах она развивается в классической направленности: от травянистых видов (*r*-стратегов) к древовидным (*k*-стратегам). В водных экосистемах, наоборот, на начальных этапах восстановительной сукцессии после интенсивного «цветения» фитопланктона (*r*-стратеги) преимущественное развитие получают крупные формы макрофитов (*k*-стратеги). Следовательно, пожар и «цветение» можно рассматривать в качестве сходных природных явлений, способствующих восстановлению экологического здоровья наземных и водных экосистем, частота проявления которых в условиях антропогенного и аномального климатического воздействия увеличивается.

*Авторы выражают благодарность к.б.н. Н.А. Мильчаковой за подтверждение идентификации бурой водоросли *Liebmanna leveillei*.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адобовский В.В., Александров Б.Г., Богатова Ю.И. и др. Экологические последствия гидрометеорологических аномалий в прибрежной зоне Одесского региона (2009–2011 гг.) // Причорномор. екол. бюл. – 2012. – 43(1). – С. 112–127.
- Александров Б.Г., Теренько Л.М., Нестерова Д.А. Первый случай «цветения» *Nodularia spumigena* Mertens ex Born. et Flah. в Чёрном море // Альгология. – 2012. – 22(2). – С. 152–165.
- Кузнецов М.А., Балашов А.В. Экологические последствия лесных пожаров // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: Мат. VIII Всерос. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов и конкурса по программе «Умник». – Екатеринбург, 2012. – С. 54–56.
- Миничева Г.Г., Зотов А.Б., Косенко М.Н. Методические рекомендации по определению комплекса морфофункциональных показателей одноклеточных и многоклеточных форм водной растительности. – Одесса, 2003. – 37 с. – (Препр. / НАН Украины. Одес. фил. ИнБЮМ).
- Миркин Б.М., Наумова Л.Г., Соломещ А.И. Современная наука о растительности. – М.: Логос, 2002. – 264 с.
- Одум Ю. Экология: В 2-х т. – М.: Мир, 1986. – Т. 1. – 328 с.; Т. 2. – 376 с.
- Романенко В.Д. Основы гидроэкологии. – Киев: Генеза, 2004. – 664 с.

- Скобеева Т.Н. Производство органического вещества в водоемах и его деструкция фито- и бактериопланктоном: Дис. ... к.б.н. – Москва, 1999. – 133 с.
- Ткаченко Ф.П., Ковтун О.О. Нові знахідки макрофітів у Тилігульському лимані Чорного моря // Вісн. Харк. нац. аграр. ун-ту. Сер. Біологія. – 2004. – 1(4). – С. 108–115.
- Уемов А.И. Аналогия в практике научного исследования. – М.: Наука, 1970. – 258 с.
- Уемов А.И. Системный подход и общая теория систем. – М.: Мысль, 1978. – 272 с.
- Adobovskiy V.V., Alexandrov B.G., Bogatova Yu.I. et al. Reactions of aquatic ecosystems of northwestern Black Sea region on the climate anomalous // Proc. 3-rd Bi-annual BS Sci. Conf. and UP-GRADE BS-SCENE Project Joint Conf. (Odessa, 1–4 Nov. 2011). – P. 39–40.
- [http://ru.wikipedia.org/wiki/ Лесной пожар](http://ru.wikipedia.org/wiki/Лесной_пожар).

Подписал в печать П.М. Царенко

*G.G. Minicheva, A.B. Zotov, E.S. Kalashnik*

Odessa Branch of A.O. Kovalevsky Institute of South Seas, NAS of Ukraine,  
37, Pushkinskaya St., 65011 Odessa, Ukraine  
e-mail: minicheva@ukr.net

#### COMPARISON OF «BLOOM» AND FIRE ON THE EXAMPLE OF ALGAESYSTEM PHYTOPLANKTON–MACROPHYTES

Morphofunctional responses of phytoplankton–macrophytes algaesystems of the northwestern part of the Black Sea to climate anomalies in 2010 are regarded as an illustration of analogy of the «blooms» mechanisms in water and flames in terrestrial ecosystems. Ecological point of similarities in these phenomena is the rapid transformation of excess organic matter accumulated in the ecosystem to mineral forms. Succession changes under the «bloom» and flames in the vegetation component of terrestrial and aquatic ecosystems connected with the transition from species with *r*- to species with *k*-strategy have the opposite direction. It is concluded that flames and «bloom» are similar mechanisms of restoring of the ecological health of terrestrial and aquatic ecosystems which have excess of organic matter.

**Key words:** «bloom», flames, phytoplankton, macrophytes, *r*- and *k*-strategies, northwestern Black Sea.