

ВЕТРОВОЕ ВОЛНЕНИЕ КАК ФАКТОР ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ СРЕДЫ НА ФИТОЦЕНОЗЫ ПРИБРЕЖЬЯ ЧЁРНОГО МОРЯ

В. П. Евстигнеев¹, И. К. Евстигнеева², И. Н. Танковская²

¹Севастопольский государственный университет, Севастополь, РФ, vald_e@rambler.ru

²Институт морских биологических исследований имени А.О. Ковалевского РАН, Севастополь, РФ

Гидродинамическое воздействие водной среды в виде ветрового волнения на прибрежные экосистемы нестационарно и подвержено климатической изменчивости в масштабах 50–60 лет. Высказано предположение о различных «климатических» режимах функционирования альгоценоза обрастания. Согласно расчетам, воздействие штормовых волн на макрофиты побережья Чёрного моря в период 1954–1983 гг. было в 1.5–2 раза выше, чем в современный климатический период.

Ключевые слова: макроводоросли, биоразнообразие, устойчивость экосистемы, ветровое волнение.

Морские водоросли являются первичными продуцентами органического вещества, источником кислорода, пищевой базой и убежищем для многих видов животных [1]. Наибольший интерес вызывают исследования макрофитов прибрежного экотона Чёрного моря – пограничной зоны, через которую осуществляется энергомассообмен между сушей и морем [2]. Экотон наиболее подвержен внешнему воздействию и может быть отнесен к открытой неустойчивой экосистеме, на функционирование которой влияют изменения гидролого-гидрохимического режима, активная штормовая деятельность, наличие источников пресных вод, поступающих в море [2].

Сообщества обрастания твердых субстратов играют ключевую роль в процессах трансформации вещества и энергии водных экосистем. Известно, что около 74% первичной продукции и 90% деструкции органического вещества в прибрежной зоне Чёрного моря приходится на обрастания [3], поэтому исследование устойчивости сообщества обрастания и его важного компонента – макрофитов – под действием внешних факторов играет важную роль для выработки стратегии поддержания биоразнообразия морских акваторий Крыма в условиях увеличения антропогенной нагрузки и изменения климата. Сообщества обрастания как естественных твердых субстратов, так и искусственных гидротехнических сооружений, подвергаются воздействию ветровых волн. Во время шторма у макрофитов возникает риск смещения с субстрата и повреждения потоками воды, индуцированными штормом или обрушающимися волнами. Динамическое воздействие движущейся воды усугубляется регулярностью таких событий [4]. Детальные исследования данного феномена широко распространены за рубежом на основе представлений о биомеханических свойствах макроводорослей в водной среде. Для альгоценозов Крымского побережья, как и для всего Чёрного моря, такие исследования редки. Практически отсутствуют работы на тему долговременных изменений свойств альгоценозов в связи с эволюцией крупномасштабных процессов в глобальной климатической системе и с их проявлениями на региональном уровне. Считается, что вековые климатические изменения условий среды не нарушают устойчивость экосистем, однако могут стимулировать перестройки видового состава и трофических связей [5]. Временная динамика такого рода изменений может быть согласована с масштабом климатической

изменчивости свойств водной среды. Недавно показано, что штормовая деятельность в Азово-Черноморском регионе подвержена изменчивости в масштабах 50–60 лет и является региональным откликом на крупномасштабные процессы в глобальной климатической системе Земли [6]. В связи с этим, актуален вопрос о «климатической» изменчивости структурно-функциональной характеристики альгоценозов обрастания, на решение которого направлено настоящее теоретическое исследование.

Ветро-волновой режим на Южном берегу Крыма. Решение поставленной задачи опирается на знание волнового режима, выбранного для исследования района, характеристики которого могут быть получены на основании многолетних регулярных наблюдений за параметрами волнения. В регионе ЮБК эти характеристики могут быть получены по данным двух морских береговых станций – МГ Херсонесский маяк (мыс Херсонес) и МГ Ялта в предположении, что их наблюдения охватывают все разнообразие волнового режима в регионе. Из всех береговых станций по побережью северной и северо-восточной части Чёрного моря на МГ Херсонесский маяк и МГ Ялта, чаще всего наблюдаются опасные высоты волн, достигающие 1.5 м [6]. Максимальная среднегодовая повторяемость таких волн по станциям МГ Херсонесский маяк и МГ Ялта составляет 13.7% и 5.0%, соответственно. В течение года опасная высота волн наблюдается преимущественно в холодное полугодие, в период наиболее активных синоптических процессов, при этом максимум приходится на январь и декабрь. Наибольшую опасность представляют волны, высота которых достигает стихийных значений (более 6.0 м). За период полуинструментальных наблюдений (по прибору ГМ-12) за характеристиками волнения (с 50-х гг. XX в.) на указанных пунктах отмечено 8 случаев стихийной волны: МГ Херсонесский маяк – 6; МГ Ялта – 2. Наиболее часто (шесть из восьми) экстремальные штормы наблюдались в период 1960–1970 гг. Недавно установлен [6] квазипериодический характер изменчивости максимальных высот волн в Черноморском регионе с временным масштабом порядка 50 лет, что, по-видимому, связано с действием Атлантической мультideкадной осцилляции (АМО), являющейся основной модой изменчивости температур поверхности океана в Северной Атлантике. Согласно выводам [6], период 1954–1983 гг. характеризуется положительными ветро-волновыми аномалиями (частые штормы); период после 1983 г. – отнесен к отрицательной фазе аномалий. Краткий обзор режима позволяет сделать вывод о том, что выбранный участок Черноморского побережья подвержен наиболее интенсивному гидродинамическому воздействию, а выбор этого района для исследования действия среды на сообщество фитообрастания является оптимальным.

Силы, действующие на макрофиты в движущейся водной среде. Гидродинамика движения воды в прибойной зоне существенно отличается от таковой в открытой части моря и имеет довольно сложный характер. Из-за действия факторов, связанных с интенсивным движением водных масс и обрушением морских волн на мелководье, сообщество макрофитов перифитона является менее устойчивым, по сравнению с макрофитами бентоса [7]. Динамическое воздействие водной среды приводит к необходимости адаптации биомеханических свойств макрофитов к агрессивным внешним условиям [7]. Морские водоросли способны легко изменять форму, что позволяет им уменьшить равнодействующую всех сил, влияющих на них. К основным силам, действующим на таллом водоросли, относятся: выталкивающая сила, влекущая сила, сила гидродинамического ускорения. При вычислениях выталкивающей силой, как правило, пренебрегают. Сила гидродинамического ускорения существенна при достаточно больших размерах рассматриваемых тел. Макрофиты Крымского

прибрежья Чёрного моря, по всей видимости, не обладают достаточными размерами, чтобы рассматривать эту силу как важный фактор воздействия водной среды. Наибольший вклад при действии воды на таллом оказывает влекущая сила (формула 1):

$$\vec{F}_d = 0.5 \rho_w \vec{u}_r^2 A C_d, \quad (1)$$

где F_d – сила сопротивления (н); ρ_w – плотность воды ($\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$); A – характеристическая площадь таллома (м^2) [8]; C_d – коэффициент сопротивления; u_r – скорость жидкости относительно объекта ($\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$). Для гибких тел, таких как водоросли, коэффициент сопротивления не является постоянным и зависит от скорости потока, поскольку при ее увеличении слоевище стремится изменить свою форму, наиболее оптимально расположившись вдоль течения. Влекущая сила при этом уменьшается. Процесс реконфигурации тела подробно описан в [9], где предложен способ эмпирического учета степени отклонения силы от теоретического закона, путем введения понятия «добротности». Предложена более точная формула для вычисления силы (формула 2):

$$\vec{F}_d = 0.5 \rho_w \vec{u}_r^{2+B} A S_d, \quad (2)$$

где S_d – коэффициент формы, B – добротность.

Результаты и обсуждение. Очевидно, что динамическое воздействие среды на альгоценоз в разные климатические фазы ветро-волновых аномалий в Черноморском регионе отличается. О величине этого различия можно судить по отношению η влекущей силы, действующей на один и тот же виртуальный таллом макрофита, но в разные климатические фазы ветро-волновых аномалий на Чёрном море (формула 3):

$$\eta = \frac{F_d^{(+)}}{F_d^{(-)}} = \frac{0.5 \rho_w u^{(+2+B)} A S_d}{0.5 \rho_w u^{(-2+B)} A S_d} = \left(\frac{u^{(+)}}{u^{(-)}} \right)^{2+B}, \quad (3)$$

где индексы (+) и (–) означают периоды положительных и отрицательных ветро-волновых аномалий, т.е. 1954–1983 и 1984–2010 гг., соответственно. Как видно, отношение сил определяется отношением скоростей воды вблизи таллома водоросли и параметром его конфигурации B , который, как правило, принимает значения, приблизительно равные -0.5 (для отдельных видов макрофитов – значения менее -1) [4]. Для оценки (3) используем линейную теорию мелкой воды, согласно которой максимальная орбитальная скорость движения у дна определяется формулой:

$$u = \left(\frac{\pi H}{T} \right) \left(\frac{\cosh ks}{\sinh kd} \right), \quad (4)$$

где H – высота волны, T – период волны, d – глубина моря в интересующей точке прибрежья, s – высота над субстратом, $k=2\pi/L$ – волновое число, связанное с длиной волны $L=(gT^2/2\pi) (\tanh(4\pi^2 d/T^2 g))^{0.5}$.

Для каждого случая волнения, отмеченного на станциях МГ Херсонесский маяк и МГ Ялта, проведен расчет скорости u по формуле (4) для высоты над субстратом $s=10$ см и глубины $d=1$ м. Полученная для каждой станции выборка скоростей разделена на две подвыборки по периодам лет: 1954–1983 и 1984–2010 гг. Для каждой подвыборки рассчитана среднегодовая скорость в штормовых волнах. Под штормовыми понимались случаи волн с высотами 10%-ной обеспеченности. Отношение найденных средних скоростей позволило оценить изменение степени среднего гидродинамического воздействия водной среды η (3), обусловленное климатической изменчивостью. Численные значения η получены для $B=-0.5$ (табл.).

Табл. Отношение η влекущей силы, действующей на таллом макрофита, для разных климатических фаз ветро-волновых аномалий в прибрежье Чёрного моря

Станция	η
МГ Ялта	1.5±0.01
МГ Херсонесский маяк	2.0±0.05

Для прибрежной зоны м. Херсонес климатическая изменчивость гидродинамического фактора среды проявляется в большей степени, по сравнению с акваторией г. Ялты. В период 1954–1983 гг. воздействие со стороны штормовых волн было в среднем в 1.5–2 раза выше, по сравнению с современным периодом.

Выводы. Теоретический расчет свидетельствует о заметных различиях в динамическом воздействии водной среды на альгоценоз прибрежной зоны в разные фазы климатической изменчивости ветро-волновых аномалий Чёрного моря. Предположено наличие климатообусловленных вариаций альгоценоза, проявляющихся в структурно-функциональных изменениях этого сообщества.

1. Калугина-Гутник А. А. *Фитобентос Чёрного моря*. К.: Наукова думка, 1975. С. 5–8.
2. Евстигнеева И. К., Танковская И. Н. Макрофитобентос прибрежного экотона юго-запада Крыма (Чёрное море) // *Морской экологический журнал*. 2010. Т. 9, № 4. С.48–61.
3. Александров Б. А. Экологические проблемы Черного моря: *Сб. научн. ст.* Одесса: ОЦНТЭИ, 1999. С. 192–197.
4. Denny M., Gaylord B. The mechanics of wave-swept algae // *J. Expert. Biol.* 2002. Vol. 205. P. 1355–1362.
5. Матишов Г. Г., Дженюк С. Л., Моисеев Д. В., Жичкин А. П. Климатические изменения морских экосистем Европейской Арктики // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2010. № 3. С. 7–21.
6. Polonsky A., Evstigneev V., Naumova V., Voskresenskaya E. Low-frequency variability of storms in the northern Black sea and associated processes in the ocean-atmosphere system // *Reg. Environ. Change*. 2014. Vol. 14, no. 5. P. 1861–1871.
7. Herrel A., Speck T., Rowe N. P. *Ecology and Biomechanics: A Mechanical Approach to the Ecology of Animals and Plants*. Taylor & Francis Group, 2006. 351 p.
8. Gaylord B., Blanchette C. A., Denny M. W. Mechanical consequences of size in wave-sept algae // *Ecol. Monogr.* 1994. Vol. 64, no. 3. P.287–313.
9. Vogel S. *Life in Moving Fluids*: 2nd edn. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1994. 467 p.

WIND-WAVES AS A FACTOR OF DYNAMICAL ENVIRONMENTAL IMPACT ON BLACK SEA COAST PHYTOCENOSIS

V. P. Evstigneev¹, I. K. Evstigneeva², I. N. Tankovskaya²

¹Sevastopol State University, Sevastopol, RF, vald_e@rambler.ru

²Kovalevsky Institute of Marine Biological Research, RAS, Sevastopol, RF

Wind-waves hydrodynamic influence on sea coast ecosystems is non-stationary and subjected to climate variability with typical timescale of 50-60 yrs. The present study presumes different “climate” regimes of phytoperiphyton functioning. According to computations, storm waves impact on Black sea coast macrophytes in the period of 1954–1983 was 1.5–2.0 times higher than during the current climate period.

Keywords: macroalgae, biodiversity, ecosystem stability, wind waves